



**Universidade do Estado do Rio de Janeiro**

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Engenharia

Felipe Almeida de Sousa

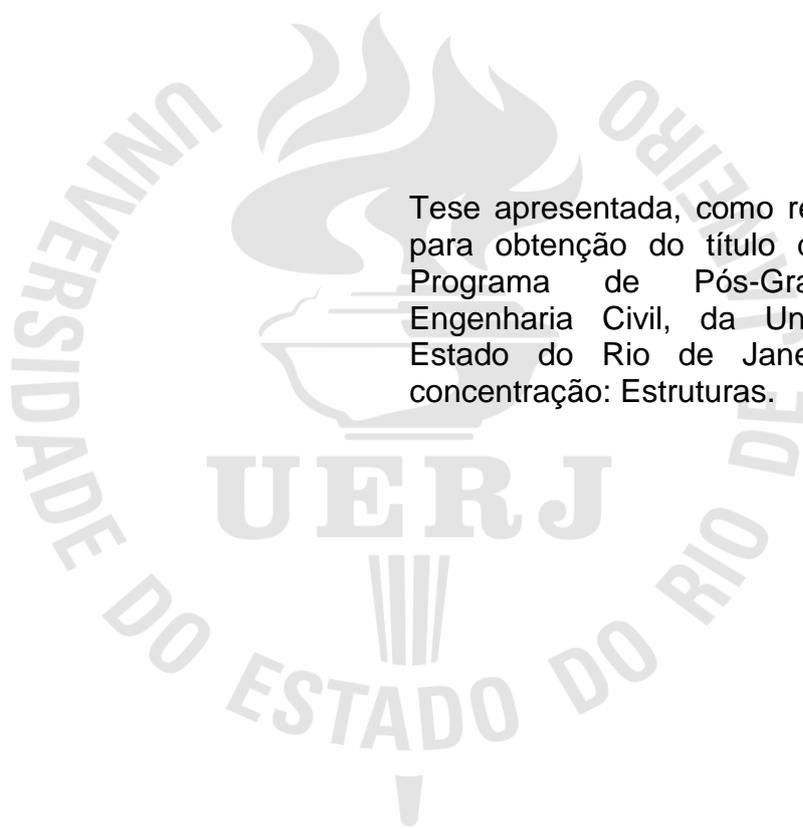
**Análise estrutural dinâmica de pisos de edifícios submetidos a  
atividades humanas rítmicas com base no uso de modelos  
biodinâmicos: modelagem experimental e numérica**

Rio de Janeiro

2023

Felipe Almeida de Sousa

**Análise estrutural dinâmica de pisos de edifícios submetidos a atividades humanas rítmicas com base no uso de modelos biodinâmicos: modelagem experimental e numérica**



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

2023

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

S725 Sousa, Felipe Almeida de.  
Análise estrutural dinâmica de pisos de edifícios submetidos a atividades humanas rítmicas com base no uso de modelos biodinâmicos: modelagem experimental e numérica / Felipe Almeida de Sousa. – 2023. 301 f.

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

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

CDU 624.016:692.52

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

05/11/2023

Data

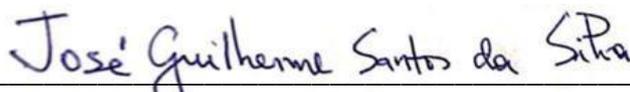
Felipe Almeida de Sousa

**Análise estrutural dinâmica de pisos de edifícios submetidos a atividades humanas rítmicas com base no uso de modelos biodinâmicos: modelagem experimental e numérica**

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: 11 de agosto de 2023.

Banca Examinadora:



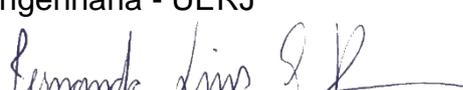
---

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



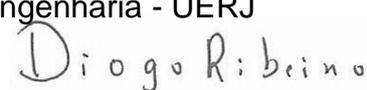
---

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



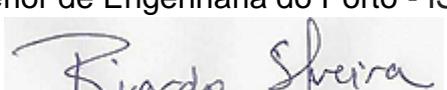
---

Prof. Dra. Fernanda Lins Gonçalves Pereira  
Faculdade de Engenharia - UERJ



---

Prof. Dr. Diogo Rodrigo Ferreira Ribeiro  
Instituto Superior de Engenharia do Porto - ISE



---

Prof. Dr. Ricardo Azoubel da Mota Silveira  
Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP



---

Prof. Dra. Renata Gonçalves Faisca  
Universidade Federal Fluminense - UFF



---

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

2023

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a Deus que é e sempre será a minha fonte de sabedoria e inspiração. "Confia no Senhor de todo coração e não te estribes no teu próprio entendimento; reconhece-o em todos os teus caminhos, e Ele endireitará as tuas veredas." - Provérbios 3:5-6

## AGRADECIMENTOS

É com coração grato que estou aqui para prestar todo o meu agradecimento a Deus. Confesso que não foi fácil encontrar as melhores palavras que fossem capazes de descrever toda a minha gratidão a Ele. E por mais que se utilizem as mais belas palavras de sabedoria, nenhuma delas seria capaz de descrever e expressar o amor de Deus para conosco que me fez compreender que nada poderá nos separar do amor de Deus, que está em Cristo Jesus. Aquele que levou sobre si a nossa fraqueza e nos fortaleceu com o seu poder, assumiu a nossa mortalidade e fez nossa a sua imortalidade. Deus encarnou e desceu à terra para abrir o caminho ao céu, fez-se filho do homem e nos fez filhos de Deus.

Contudo, reconheço que se consegui subir o degrau dessa escada da vida, foi porque o Engenheiro do Universo construiu essa escada. Ele sempre esteve conosco desde quando estávamos no ventre materno, pois Ele é o início e o fim, o Alfa e o Ômega, aquele que nos ama além da eternidade e para todo o sempre.

Ao Rei dos Reis, ofereço esta homenagem, proferindo as palavras de São Paulo aos Romanos: "Porque dele e por ele e para ele são todas as coisas; glória, pois, a ele eternamente. Amém." Romanos 11:36.

Eu também não poderia deixar de agradecer à minha família, que sempre foi fonte de inspiração em tudo o que faço. Em especial, dedico todo o meu amor à minha esposa Raquel Diniz e à minha filha Esther, assim como aos filhos que virão. Aos meus pais, todo o agradecimento pela instrução e apoio.

Ao meu orientador, José Guilherme, pela paciência, convívio e ensinamentos passados ao longo de todo o curso, que contribuíram muito para o meu crescimento acadêmico.

Além disso, quero agradecer ao professor Gilvan Debona pela disposição, parceria e ajuda no desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus amigos do PGECIV e a todos os envolvidos, direta ou indiretamente, nos testes experimentais realizados nesta tese de doutorado, meu sincero agradecimento.

Por fim, gostaria de agradecer ao suporte financeiro recebido pelas agências de fomento à pesquisa do país: CAPES, CNPq e FAPERJ.

## RESUMO

SOUSA, Felipe Almeida de. *Análise estrutural dinâmica de pisos de edifícios submetidos a atividades humanas rítmicas com base no uso de modelos biodinâmicos: modelagem experimental e numérica*. 2023. 301 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.

O trabalho de pesquisa tem como objetivo principal a avaliação da resposta estrutural dinâmica de pisos de edifícios, considerando-se a aplicação de carregamentos humanos rítmicos (atividades aeróbicas). Neste sentido, é proposto um modelo biodinâmico composto por massa, amortecimento e rigidez, constituído por um grau de liberdade (SDOF), para simular as ações humanas rítmicas sobre os pisos de edificações, objetivando a avaliação do efeito da interação dinâmica pessoa-estrutura. Deste modo, no âmbito da análise dinâmica, o estudo investiga um piso de concreto armado real existente, localizado no 8º andar da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), com dimensões de 16 m x 36 m e área de 576 m<sup>2</sup>. De acordo com este contexto, são realizadas inicialmente análises modais experimentais, utilizando estratégias distintas, objetivando a avaliação do comportamento global dinâmico do piso do edifício investigado, com o propósito de calibrar o modelo de elementos finitos desenvolvido para a representação da estrutura. Em seguida, são realizados testes de monitoração experimental dinâmica com base em análises de vibração forçada desenvolvidas sobre as lajes de concreto do piso, visando assim uma análise comparativa entre a resposta estrutural dinâmica experimental e os resultados obtidos por meio da modelagem numérica. Para tal, são utilizadas inúmeras funções matemáticas tradicionais representativas das ações dinâmicas humanas rítmicas, correspondentes aos modelos de “força-dura”, além do emprego dos sistemas biodinâmicos. Com base nas respostas dinâmicas obtidas, constata-se que os modelos biodinâmicos produzem resultados mais próximos daqueles observados nos testes experimentais realizados sobre o piso, uma vez que estes modelos incorporam o efeito da interação dinâmica pessoa-estrutura, além das características de cada indivíduo (massa, amortecimento e rigidez), resultando em atenuações sobre os valores dos deslocamentos e acelerações. Além disso, foi realizado um estudo paramétrico, com o intuito de analisar o comportamento estrutural dinâmico em relação aos critérios de conforto humano, considerando-se para tal os limites estabelecidos via utilização de normas e critérios de projeto. Desta forma, os resultados alcançados indicam que os modelos tradicionais de carregamento dinâmico (“força-dura”) tendem a apresentar respostas dinâmicas mais conservadoras, enquanto que a modelagem com base no emprego de sistemas biodinâmicos fornece valores de resposta (deslocamentos e acelerações) mais próximos da resposta determinada via monitoração experimental dinâmica do piso investigado. Finalmente, destaca-se que a metodologia de análise proposta neste trabalho de pesquisa pode ser considerada como sendo uma alternativa viável para a caracterização das ações dinâmicas humanas rítmicas sobre pisos de edifícios.

Palavras-chave: Pisos de edifícios; Sistemas biodinâmicos; Modelagem em elementos finitos; Monitoração experimental dinâmica; Análise dinâmica; Conforto humano.

## ABSTRACT

SOUSA, Felipe Almeida de. *Dynamic structural analysis of building floors subjected to rhythmic human activities using biodynamic models: experimental and numerical modelling*. 2023. 301 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.

This research paper aims to evaluate the dynamic structural response of building floors under rhythmic human loading (aerobic activities). To achieve this objective, a biodynamic model consisting of mass, damping, and stiffness, represented as a Single Degree of Freedom (SDOF) system, is proposed to simulate rhythmic human actions on building floors and assess the dynamic human-structure interaction effect. The study focuses on the dynamic analysis of an existing reinforced concrete floor located on the 8<sup>th</sup> floor of the University of the State of Rio de Janeiro (UERJ), with dimensions of 16 m x 36 m and an area of 576 m<sup>2</sup>. Initially, experimental modal analyses are performed using different strategies to evaluate the overall dynamic behavior of the investigated floor, aiming to calibrate the finite element model developed to represent the structure. Subsequently, dynamic experimental monitoring tests are conducted based on forced vibration analyses applied to the concrete slabs of the floor, allowing a comparative analysis between the experimental dynamic structural response and the results obtained through numerical modelling. Traditional mathematical functions representing rhythmic human dynamic actions, corresponding to "force-only" models, as well as biodynamic systems, are employed in the study. Based on the dynamic responses obtained, it is observed that the biodynamic models produce results closer to those observed in the experimental tests on the floor. These models consider the dynamic human-structure interaction effect, as well as individual characteristics such as mass, damping, and stiffness, resulting in attenuations of displacement and acceleration values. Additionally, a parametric study is conducted to analyze the dynamic structural behavior in relation to human comfort criteria, considering the limits established by relevant standards and design criteria. The results indicate that traditional dynamic loading models (only force) tend to yield more conservative dynamic responses, while modelling based on biodynamic systems provides response values (displacements and accelerations) closer to those determined through dynamic experimental monitoring of the investigated floor. Finally, it is emphasized that the proposed analytical methodology in this research work can be considered a viable alternative for characterizing rhythmic human dynamic actions on building floors, taking into account the dynamic human-structure interaction.

Keywords: Building floors; Biodynamic systems; Numerical modelling; Finite element modelling; Dynamic analysis; Human comfort.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Vista externa da academia de ginástica na Sérvia 2005 [4].....	27
Figura 2 - Vista interna da academia de ginástica na Sérvia 2005 [4].....	27
Figura 3 - Vista externa da academia de ginástica no Irã 2013 [5].....	28
Figura 4 - Vista interna da academia de ginástica no Irã 2013 [5].....	28
Figura 5 - Vista externa da academia de ginástica no Brasil 2020 [6].....	29
Figura 6 - Etapas de um salto humano [7] .....	37
Figura 7 - Análise da ressonância global nos pavimentos [14].....	40
Figura 8 - Ginásio esportivo Hebie China [15].....	41
Figura 9 - Monitoração dos saltos sobre a plataforma [28] .....	43
Figura 10 - Resposta estrutural dinâmica da atividade de saltar [29].....	44
Figura 11 - Testes experimentais: saltos sobre a plataforma ( $f = 2$ Hz) [30] .....	45
Figura 12 - Aceleração no domínio do tempo [32].....	46
Figura 13 - Testes experimentais de medição de força [33].....	46
Figura 14 - Monitoração experimental piso de concreto [34].....	47
Figura 15 - Testes experimentais em grupo [12].....	48
Figura 16 - Coeficientes de impacto x frequência de excitação [40] .....	49
Figura 17 - Modelagem experimental e numérica [41] .....	49
Figura 18 - Comparação entre o teórico e experimental [43] .....	50
Figura 19 - Experimento de saltos sobre uma plataforma [44] .....	51
Figura 20 - Testes experimentais sobre a plataforma MDF [46-50] .....	53
Figura 21 - Resposta dinâmica do indivíduo saltando sobre a plataforma [46-50]....	53
Figura 22 - Arena Swiss Krono [51].....	54
Figura 23 - Ensaio de vibração livre [52] .....	55
Figura 24 - Teste de vibração livre: aceleração no domínio do tempo [52] .....	55
Figura 25 - CD ações humanas rítmicas em função do número de pessoas [28] .....	59
Figura 26 - Análise de carregamento dinâmico (saltos) via distribuição normal.....	63
Figura 27 - Sistema de coordenadas: vibrações em seres humanos [75, 76].....	64
Figura 28 - Comparação entre aceleração: original, ponderada e RMS [77] .....	65
Figura 29 - Limites toleráveis de aceleração em diferentes ambientes [3].....	69
Figura 30 - Composições de modelos biodinâmicos [45] .....	71

Figura 31 - Fluxograma Algoritmo genético [120].....	74
Figura 32 - Projeto de monitoração dinâmica experimental .....	77
Figura 33 - Construção da plataforma de MDF .....	78
Figura 34 - Croqui de posicionamento das células de carga [95].....	78
Figura 35 - Células de carga modelo (CSR1000).....	79
Figura 36 - Acelerômetro PCB Piezotronics (393B04) .....	80
Figura 37 - Acelerômetro Dytran (7521A1).....	81
Figura 38 - Sistema de aquisição de dados (ADS 2500).....	82
Figura 39 - Exemplo print da tela do <i>software</i> AqDAnalysis.....	83
Figura 40 - Display Sound Corse (metrônomo).....	83
Figura 41 - Metodologia desenvolvida nos testes experimentais (Laboratório).....	84
Figura 42 - Sala de monitoração dinâmica experimental [Dimensões em cm].....	85
Figura 43 - Monitoração dinâmica experimental (modelagem biodinâmica) .....	86
Figura 44 - Resposta dinâmica do indivíduo (deslocamento) [m = 48,90 kg].....	87
Figura 45 - Resposta dinâmica do indivíduo (velocidade) [m = 48,90 kg] .....	87
Figura 46 - Resposta dinâmica do indivíduo (aceleração) [m = 48,90 kg].....	88
Figura 47 - Resposta dinâmica do indivíduo (Força) [m = 48,90 kg] .....	88
Figura 48 - Resposta dinâmica do indivíduo (deslocamento) [m = 69,25 kg].....	88
Figura 49 - Resposta dinâmica do indivíduo (velocidade) [m = 69,25 kg] .....	88
Figura 50 - Resposta dinâmica do indivíduo (aceleração) [m = 69,25 kg].....	89
Figura 51 - Resposta dinâmica do indivíduo (Força) [m = 69,25 kg] .....	89
Figura 52 - Resposta dinâmica do indivíduo (deslocamento) [m = 88,25 kg].....	89
Figura 53 - Resposta dinâmica do indivíduo (velocidade) [m = 88,25 kg] .....	89
Figura 54 - Resposta dinâmica do indivíduo (aceleração) [m = 88,25 kg].....	90
Figura 55 - Resposta dinâmica do indivíduo (Força) [m = 88,25 kg] .....	90
Figura 56 - Resposta dinâmica do indivíduo (deslocamento) [m = 107,15 kg].....	90
Figura 57 - Resposta dinâmica do indivíduo (velocidade) [m = 107,15 kg] .....	90
Figura 58 - Resposta dinâmica do indivíduo (aceleração) [m = 107,15 kg].....	91
Figura 59 - Resposta dinâmica do indivíduo (Força) [m = 107,15 kg].....	91
Figura 60 - Correlação entre $F_{exp}$ e $F_{otm}$ [massa = 81,80kg; f = 2,0 Hz].....	95
Figura 61 - Correlação entre $F_{exp}$ e $F_{otm}$ [massa = 82,65kg; f = 2,2 Hz] [95].....	95
Figura 62 - Correlação linear entre a rigidez e massa.....	97
Figura 63 - Correlação linear entre a amortecimento e rigidez .....	97

Figura 64 - Correlação linear entre amortecimento e massa .....	98
Figura 65 - Vista externa UERJ.....	101
Figura 66 - Vista interna academia de ginástica.....	101
Figura 67 - Vista interna academia de ginástica.....	102
Figura 68 - Vista interna academia de ginástica.....	102
Figura 69 - Planta baixa e corte do piso de concreto armado (unidades em cm)....	103
Figura 70 - Elemento BEAM44 [130].....	105
Figura 71 - Elemento SHELL63 [130].....	106
Figura 72 - Modelo em elementos finitos do piso de concreto armado .....	107
Figura 73 - Detalhes do modelo em elementos finitos .....	108
Figura 74 - Elemento COMBIN40 [130].....	110
Figura 75 - Representação dos indivíduos via modelos biodinâmicos (SDOF).....	111
Figura 76 - Detalhes dos parâmetros da modelagem biodinâmica .....	112
Figura 77 - Modelo em elementos finitos (plataforma MDF) .....	113
Figura 78 - Primeiro modo de vibração da plataforma ( $f_{01} = 17,65$ Hz) .....	114
Figura 79 - Resposta dinâmica da plataforma [massa = 58,7 kg; $f = 2,0$ Hz] .....	115
Figura 80 - Resposta dinâmica da plataforma [massa = 62,1 kg; $f = 2,0$ Hz] .....	115
Figura 81 - Resposta dinâmica da plataforma [massa = 62,1 kg; $f = 2,0$ Hz] .....	116
Figura 82 - Resposta dinâmica da plataforma [massa = 69,3 kg; $f = 2,0$ Hz] .....	116
Figura 83 - 1° modo de vibração ( $f_{01} = 7,89$ Hz) .....	121
Figura 84 - 2° modo de vibração ( $f_{02} = 7,90$ Hz) .....	122
Figura 85 - 3° modo de vibração ( $f_{03} = 8,02$ Hz) .....	123
Figura 86 - 4° modo de vibração ( $f_{04} = 8,12$ Hz) .....	124
Figura 87 - 5° modo de vibração ( $f_{05} = 8,14$ Hz) .....	125
Figura 88 - 6° modo de vibração ( $f_{06} = 8,25$ Hz) .....	126
Figura 89 - 7° modo de vibração ( $f_{07} = 8,32$ Hz) .....	127
Figura 90 - 8° modo de vibração ( $f_{08} = 8,41$ Hz) .....	128
Figura 91 - 9° modo de vibração ( $f_{09} = 8,44$ Hz) .....	129
Figura 92 - 10° modo de vibração ( $f_{10} = 8,66$ Hz) .....	130
Figura 93 - 54 pessoas distribuídas ao longo da academia de ginástica .....	132
Figura 94 - Vista frontal teste experimental I.....	138
Figura 95 - Vista lateral teste experimental I.....	139
Figura 96 - Aceleração do piso no domínio do tempo ( $m/s^2$ ).....	140

Figura 97 - Equipamentos utilizados no Teste II (Catálogo de equipamentos) .....	141
Figura 98 - PDV 100 (Catálogo de equipamentos).....	142
Figura 99 - Martelo de impacto (Catálogo de equipamentos) .....	143
Figura 100 - Teste experimental II (martelo de impacto).....	144
Figura 101 - Força aplicada sobre o piso, por meio do martelo de impacto.....	145
Figura 102 - FRF no domínio da frequência.....	145
Figura 103 - Equipamentos utilizados no Teste III (Catálogo de equipamentos) ....	146
Figura 104 - Tela do <i>software</i> NCH Tone Generator.....	148
Figura 105 - Experimento I: shaker sobre a laje L1.....	149
Figura 106 - Experimento II: shaker sobre a laje L2.....	149
Figura 107 - Experimento III: shaker sobre a laje L3.....	150
Figura 108 - Experimento IV: shaker sobre a laje L4 .....	150
Figura 109 - Resposta estrutural dinâmica da laje L1 (shaker sobre a laje L3).....	151
Figura 110 - Resposta estrutural dinâmica da laje L2 (shaker sobre a laje L3).....	151
Figura 111 - Resposta estrutural dinâmica da laje L3 (shaker sobre a laje L3).....	151
Figura 112 - Resposta estrutural dinâmica da laje L4 (shaker sobre a laje L3).....	152
Figura 113 - Modelo de carregamento I (1 Pessoa sobre a Laje L3) .....	157
Figura 114 - Resposta dinâmica do piso: MC-I (1 pessoa; $f = 2,0$ Hz; Laje L3) .....	157
Figura 115 - Resposta dinâmica do piso: MC-II (1 pessoa; $f = 2,0$ Hz; Laje L4) .....	158
Figura 116 - Modelo de carregamento III (2 Pessoas sobre a Laje L3/L4).....	159
Figura 117 - Resposta dinâmica do piso: MC-III (2 pessoas; $f = 2,0$ Hz; Laje L3)...	159
Figura 118 - Modelo de carregamento IV (3 Pessoas sobre a Laje L3) .....	160
Figura 119 - Resposta dinâmica do piso: MC-IV (3 pessoas; $f = 2,0$ Hz; Laje L3) ..	161
Figura 120 - Modelo de carregamento V (3 Pessoas sobre a Laje L4) .....	161
Figura 121 - Resposta dinâmica do piso: MC-V (3 pessoas; $f = 2,0$ Hz; Laje L4) ...	162
Figura 122 - Modelo de carregamento VI (6 Pessoas sobre a Laje L3/L4) .....	163
Figura 123 - Resposta dinâmica do piso: MC-VI (6 pessoas; $f = 2,0$ Hz; Laje L3) ..	163
Figura 124 - Modelo de carregamento VII (9 Pessoas sobre a Laje L3) .....	164
Figura 125 - Resposta dinâmica do piso: MC-VII (9 pessoas; $f = 2,0$ Hz; Laje L3) .	165
Figura 126 - Modelo de carregamento VIII (9 Pessoas sobre a Laje L4) .....	166
Figura 127 - Resposta dinâmica do piso: MC-VIII (9 pessoas; $f = 2,0$ Hz; Laje L4)	166
Figura 128 - Modelo de carregamento IX (18 Pessoas sobre a Laje L3/L4) .....	167
Figura 129 - Modelo de carregamento IX (18 Pessoas sobre a Laje L3/L4) .....	168

Figura 130 - Resposta dinâmica do piso: MC-IX (18 pessoas; $f = 2.0$ Hz; Laje L3)	168
Figura 131 - Vista isométrica (academia de ginástica)	173
Figura 132 - Modelo de carregamento I (MC I)	173
Figura 133 - Comparação da resposta estrutural dinâmica (Laje L3): MC-I	174
Figura 134 - MC-II (1 pessoa; Laje L4) [dimensões em cm]	175
Figura 135 - MC-II (1 pessoa; Laje L4) [dimensões em cm]	175
Figura 136 - Comparação da resposta estrutural dinâmica (Laje L4): MC-II	176
Figura 137 - Vista MC-III (1 pessoa; Laje L3) e (1 pessoa; Laje L4)	177
Figura 138 - MC-III (1 pessoa; Laje L3) e (1 pessoa; Laje L4) [dimensões em cm]	177
Figura 139 - Comparação da resposta estrutural dinâmica (Laje L3): MC-III	178
Figura 140 - Vista MC-IV (3 pessoas; Laje L3)	179
Figura 141 - MC-IV (3 pessoas; Laje L3) [dimensões em cm]	179
Figura 142 - Comparação da resposta estrutural dinâmica (Laje L3): MC-IV	180
Figura 143 - MC-V (3 pessoas; Laje L4)	181
Figura 144 - MC-V (3 pessoas; Laje L4) [dimensões em cm]	181
Figura 145 - Comparação da resposta estrutural dinâmica (Laje L4): MC-V	182
Figura 146 - MC-VI (3 pessoas; Laje L4)	183
Figura 147 - MC-VI (3 pessoas; Laje L3)(3 pessoas; Laje L4) [dimensões em cm]	183
Figura 148 - Comparação da resposta estrutural dinâmica (Laje L3): MC-VI	184
Figura 149 - Comparação da resposta estrutural dinâmica (Laje L3): MC-VII	185
Figura 150 - MC-VII (9 pessoas; Laje L3) [dimensões em cm]	185
Figura 151 - Comparação da resposta estrutural dinâmica (Laje L3): MC-VII	186
Figura 152 - MC-VIII (9 pessoas; Laje L4)	187
Figura 153 - MC-VIII (9 pessoas; Laje L4)	187
Figura 154 - Comparação da resposta estrutural dinâmica (Laje L3): MC-VIII	188
Figura 155 - MC-IX (9 pessoas; Laje L3) e (9 pessoas; Laje L4)	192
Figura 156 - MC-IX (9 pessoas; Laje L3) e (9 pessoas; Laje L4)	192
Figura 157 - Modelo Biodinâmico x Experimental: aceleração do piso (Laje L3)	193
Figura 158 - Modelo Biodinâmico x Experimental: aceleração do piso (Laje L3)	193
Figura 159 - Modelo Faisca x Experimental: aceleração do piso (Laje L3)	194
Figura 160 - Modelo Faisca x Experimental: aceleração do piso (Laje L3)	194
Figura 161 - Modelo SCI x Experimental: aceleração do piso (Laje L3)	195
Figura 162 - Modelo SCI x Experimental: aceleração do piso (Laje L3)	195

Figura 163 - Modelo AISC x Experimental: aceleração do piso (Laje L3) .....	196
Figura 164 - Modelo AISC x Experimental: aceleração do piso (Laje L3) .....	196
Figura 165 - Vista isométrica do piso investigado .....	201
Figura 166 - Vista isométrica MC-X (18 Pessoas).....	203
Figura 167 - Vista em planta MC-X (18 pessoas).....	203
Figura 168 - Aceleração na seção central da Laje L2 (MC-X; Biodinâmico) .....	204
Figura 169 - Deslocamento na seção central da Laje L2 (MC-X; Biodinâmico) .....	204
Figura 170 - Aceleração na seção central da Laje L2 (MC-X; Faisca) .....	204
Figura 171 - Deslocamento na seção central da Laje L2 (MC-X; Faisca) .....	204
Figura 172 - Aceleração na seção central da Laje L2 (MC-X; SCI).....	205
Figura 173 - Deslocamento na seção central da Laje L2 (MC-X; SCI).....	205
Figura 174 - Aceleração na seção central da Laje L2 (MC-X; AISC) .....	205
Figura 175 - Deslocamento na seção central da Laje L2 (MC-X; AISC) .....	205
Figura 176 - Vista isométrica MC-XI (18 Pessoas).....	207
Figura 177 - Vista em planta MC-XI (18 pessoas).....	207
Figura 178 - Aceleração na seção central da Laje L5 (MC-XI; Biodinâmico) .....	208
Figura 179 - Deslocamento na seção central da Laje L5 (MC-XI; Biodinâmico) .....	208
Figura 180 - Aceleração na seção central da Laje L5 (MC-XI; Faisca) .....	208
Figura 181 - Deslocamento na seção central da Laje L5 (MC-XI; Faisca) .....	208
Figura 182 - Aceleração na seção central da Laje L5 (MC-XI; SCI).....	209
Figura 183 - Deslocamento na seção central da Laje L5 (MC-XI; SCI).....	209
Figura 184 - Aceleração na seção central da Laje L5 (MC-XI; AISC) .....	209
Figura 185 - Deslocamento na seção central da Laje L5 (MC-XI; SCI).....	209
Figura 186 - Vista isométrica MC-XII (18 Pessoas).....	211
Figura 187 - Vista em planta MC-XII (18 pessoas)].....	211
Figura 188 - Vista isométrica MC-XIII (27 Pessoas).....	213
Figura 189 - Vista em planta MC-XIII (27 pessoas).....	213
Figura 190 - Vista isométrica MC-XIV (27 Pessoas) .....	215
Figura 191 - Vista em planta MC-XIV (27 pessoas) .....	215
Figura 192 - Aceleração na seção central da Laje L5 (MC-XIV; Biodinâmico) .....	216
Figura 193 - Deslocamento na seção central da Laje L5 (MC-XIV; Biodinâmico) ...	216
Figura 194 - Aceleração na seção central da Laje L4 (MC-XIV; Faisca).....	216
Figura 195 - Deslocamento na seção central da Laje L4 (MC-XIV; Faisca).....	216

Figura 196 - Aceleração na seção central da Laje L4 (MC-XIV; SCI) .....	217
Figura 197 - Deslocamento na seção central da Laje L4 (MC-XIV; SCI) .....	217
Figura 198 - Aceleração na seção central da Laje L4 (MC-XIV; AISC) .....	217
Figura 199 - Deslocamento na seção central da Laje L4 (MC-XIV; AISC) .....	217
Figura 200 - Vista isométrica MC-XV (36 Pessoas) .....	219
Figura 201 - Vista em planta MC-XV (36 pessoas) .....	219
Figura 202 - Vista isométrica MC-XVI (36 Pessoas) .....	221
Figura 203 - Vista em planta MC-XVI (36 pessoas) .....	221
Figura 204 - Aceleração na seção central da Laje L4 (MC-XVI; Biodinâmico) .....	222
Figura 205 - Deslocamento na seção central da Laje L4 (MC-XVI; Biodinâmico) ...	222
Figura 206 - Aceleração na seção central da Laje L2 (MC-XVI; Faisca) .....	222
Figura 207 - Deslocamento na seção central da Laje L2 (MC-XVI; Faisca) .....	222
Figura 208 - Aceleração na seção central da Laje L2 (MC-XVI; SCI) .....	223
Figura 209 - Deslocamento na seção central da Laje L2 (MC-XVI; SCI) .....	223
Figura 210 - Aceleração na seção central da Laje L2 (MC-XVI; AISC) .....	223
Figura 211 - Deslocamento na seção central da Laje L2 (MC-XVI; AISC) .....	223
Figura 212 - Vista isométrica MC-XVII (45 Pessoas) .....	225
Figura 213 - Vista em planta MC-XVII (45 pessoas) .....	225
Figura 214 - Vista isométrica MC-XVIII (45 Pessoas) .....	227
Figura 215 - Vista em planta MC-XVIII (45 pessoas) .....	227
Figura 216 - Vista isométrica MC-XIX (54 Pessoas) .....	228
Figura 217 - Vista em planta MC-XIX (54 pessoas) .....	229

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Faixas de frequências de atividades humanas rítmicas [3].....	38
Tabela 2 - Análise comparativa das forças geradas sobre os pisos [2, 45].....	52
Tabela 3 - Respostas dinâmicas da plataforma para 4 indivíduos [46-50].....	53
Tabela 4 - Carga estática equivalente de carregamentos dinâmicos.....	57
Tabela 5 - Parâmetros analíticos desenvolvidos por Faisca [28].....	60
Tabela 6 - Coeficientes de Fourier e ângulos de fase [57, 60].....	61
Tabela 7 - Modelagem do ser humano com base nos sistemas biodinâmicos.....	71
Tabela 8 - Especificações técnicas da célula de carga.....	79
Tabela 9 - Características do acelerômetro PCB Piezotronics.....	80
Tabela 10 - Características do acelerômetro Dytran.....	81
Tabela 11 - Valores máximos das respostas dinâmicas dos indivíduos.....	91
Tabela 12 - Propriedades dinâmicas (m; c; k) Pessoas 1 a 25.....	93
Tabela 13 - Parâmetros estatísticos referente ao modelo biodinâmico.....	94
Tabela 14 - Correlação de Pearson (CCP) das pessoas 1 a 25.....	96
Tabela 15 - Dados obtidos mediante à aplicação da regressão linear.....	98
Tabela 16 - Correlação de Pearson: $F_{exp}$ , $F_{otm}$ e Experimental.....	117
Tabela 17 - Características modais do piso investigado (Estrutura vazia).....	120
Tabela 18 - Propriedades modais do piso ocupado: 1º modo de vibração.....	132
Tabela 19 - Propriedades modais do piso ocupado: 2º modo de vibração.....	133
Tabela 20 - Propriedades modais do piso ocupado: 3º modo de vibração.....	133
Tabela 21 - Estrutura ocupada x vazia: frequência natural e amortecimento.....	134
Tabela 22 - Estrutura ocupada x vazia: massa modal e rigidez modal.....	134
Tabela 23 - Características modais do modelo estrutural ocupada: 3º modo de vibração.....	140
Tabela 24 - Especificações técnica do PDV 100.....	142
Tabela 25 - Especificações técnicas do Shaker modelo S 51140-M.....	147
Tabela 26 - Especificações técnicas do Amplificador de potência BAA 1000.....	147
Tabela 27 - Comparação entre frequência experimental e frequência numérica....	153
Tabela 28 - Modelos de carregamento investigados.....	156
Tabela 29 - Correlação estatística entre a resposta dinâmica numérica e experimental: MC-I (1 pessoa; $f = 2$ Hz; Laje L3).....	174

Tabela 30 - Correlação estatística entre a resposta dinâmica numérica e experimental: MC-II (1 pessoa; $f = 2$ Hz; Laje L4).....	176
Tabela 31- Correlação estatística entre a resposta dinâmica numérica e experimental: MC-III (2 pessoas; $f = 2.0$ Hz; Laje L3).....	178
Tabela 32 - Correlação estatística entre a resposta dinâmica numérica e experimental: MC-IV (3 pessoas; $f = 2.0$ Hz; Laje L3) .....	180
Tabela 33 - Correlação estatística entre a resposta dinâmica numérica e experimental: MC-V (3 pessoas; $f = 2.0$ Hz; Laje L4) .....	182
Tabela 34 - Correlação estatística entre a resposta dinâmica numérica e experimental: MC-VI (6 pessoas; $f = 2.0$ Hz; Laje L3) .....	184
Tabela 35 - Correlação estatística entre a resposta dinâmica numérica e experimental: MC-VII (9 pessoas; $f = 2.0$ Hz; Laje L3) .....	186
Tabela 36 - Correlação estatística entre a resposta dinâmica numérica e experimental: MC-VIII (9 pessoas; $f = 2.0$ Hz; Laje L4) .....	188
Tabela 37 - Parâmetros utilizados nos modelos de “força-dura” .....	191
Tabela 38 - Comparação entre os resultados de aceleração máxima do piso .....	197
Tabela 39 - Parâmetros do modelo proposto por Faisca [28] .....	200
Tabela 40 - Parâmetros do modelo desenvolvido por SCI [57] .....	200
Tabela 41 - Parâmetros da função matemática presente no AISC [3] .....	200
Tabela 42 - Modelos de carregamento investigados: conforto humano .....	202
Tabela 43 - Critérios de conforto humano para as atividades humanas rítmicas ....	202
Tabela 44 - Resposta estrutural dinâmica do piso investigado: MC-X .....	206
Tabela 45 - Resposta estrutural dinâmica do piso investigado: MC-XI .....	210
Tabela 46 - Resposta estrutural dinâmica do piso investigado: MC-XII .....	212
Tabela 47 - Resposta estrutural dinâmica do piso investigado: MC-XIII .....	214
Tabela 48 - Resposta estrutural dinâmica do piso investigado: MC-XIV .....	218
Tabela 49 - Resposta estrutural dinâmica do piso investigado: MC-XV .....	220
Tabela 50 - Resposta estrutural dinâmica do piso investigado: MC-XVI.....	224
Tabela 51 - Resposta estrutural dinâmica do piso investigado: MC-XVII.....	225
Tabela 52 - Resposta estrutural dinâmica do piso investigado: MC-XVII.....	226
Tabela 53 - Resposta estrutural dinâmica do piso investigado: MC-XVIII.....	227
Tabela 54 - Resposta estrutural dinâmica do piso investigado: MC-XIX.....	229

## 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
AMSM	Amortecedores de Massa Sintonizados Múltiplos
ANSYS	Swanson Analysis Systems
BS	British Standards Institution
CEB	Comité Euro-international du Béton
FFT	Transformada Rápida de Fourier
ISO	International Organization for Standardization
MEF	Método dos Elementos Finitos
NBR	Norma Brasileira
RMS	Root Mean Square
SCI	The Steel Construction Institute
S1GL	Sistema com um Grau de Liberdade
VDV	Valores em Dose de Vibração
TMD	Amortecedor de Massa Sintonizado

## 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>
deslfp1	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
$F_{Otm}$	força otimizada
$F_{Exp}$	força experimental

$F_i(t)$	força produzida pelo indivíduo $i$
$f_{obj}$	função a ser minimizada através do AG
$f_n$	frequência natural da estrutura
$f_e$	frequência natural da estrutura experimental
$F_p$	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
$p$	número de pessoas
$P_{gnd}$	força de reação do piso (rígido)

$P'_{\text{gnd}}$	força de reação do piso (em vibração)
RMS	valor quadrático médio ( <i>root mean square</i> )
$r$	coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ )
$r_{n,v}$	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
$\dot{u}_{ha}$	velocidade do ser humano ativo
$\ddot{u}_{ha}$	aceleração 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>
$v_{\text{elfpa1}}$	velocidade experimental do indivíduo
$W_d$	coeficiente de ponderação nos eixos $x$ e $y$
$W_d$	coeficiente de ponderação no eixo $z$
$x_i$	elemento da primeira variável
$x_i(t)$	deslocamento do indivíduo $i$ ao longo do tempo
$x(1)$	amortecimento do indivíduo a ser determinada através da otimização
$x(2)$	rigidez do indivíduo a ser determinada através da otimização
$\bar{x}$	media dos valores de $x_i$
$y_i$	elemento da segunda variável
$\bar{y}$	média dos valores de $y_i$
$\alpha$	razão de contato ( $T_c/T$ )
$\Delta t$	intervalo de integração
$\gamma_c$	densidade

$\xi$	fator ou taxa de amortecimento
$\xi_i$	fator ou taxa de amortecimento do modo i
$\delta$	decremento logarítmico
$\omega$	frequência angular da força externa
$\omega_i$	frequência natural circular do modo i
$\omega_j$	frequência angular associada ao j-ésimo harmônico
$\omega_p$	frequência angular associada ao j-ésimo harmônico
$w_r$	o peso total do sistema

## SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>26</b>
<b>1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>35</b>
1.1 Considerações iniciais .....	35
1.2 Caracterização do carregamento dinâmico: ações humanas rítmicas.....	36
1.3 Casos de vibrações excessivas decorrentes das ações humanas .....	38
1.4 Análise dos efeitos da interação dinâmica pessoa-estrutura .....	43
1.5 Modelos de carregamento dinâmico desenvolvidos .....	55
1.5.1 Modelos de carregamento equivalente .....	56
1.5.2 Modelos de carregamento periódico.....	57
1.5.2.1 Modelo de carregamento proposto por Faisca [28] .....	58
1.5.2.2 Modelo de carregamento proposto por SCI [57].....	60
1.5.2.3 Modelo de carregamento proposto por AISC [3] .....	62
1.5.2.4 Modelo de carregamento proposto: Caetano et al. [73] e Agu [74] .....	62
1.6 Critérios de projeto para avaliação do conforto humano.....	64
1.6.1 Critérios estabelecidos pela norma técnica: ISO 10137 [55] .....	65
1.6.2 Critérios estabelecidos pela norma técnica: BS 6472-1 [78] .....	66
1.6.3 Critérios estabelecidos pela norma técnica: NBR 8800 [82].....	66
1.6.4 Critérios estabelecidos pelo guia de projeto: SCI [57].....	67
1.6.5 Critérios estabelecidos pela norma técnica: NBR 6118 [83].....	67
1.6.6 Critérios estabelecidos pelo guia de projeto: AISC [3] .....	68
<b>2 MODELAGEM DE SISTEMAS BIODINÂMICOS</b> .....	<b>70</b>
2.1 Considerações iniciais.....	70
2.2 Aplicações dos modelos biodinâmicos.....	70
2.3 Formulação matemática .....	72
2.4 Modelagem experimental .....	75
2.4.1 Projeto de monitoração dinâmica experimental.....	76
2.4.2 Descrição dos equipamentos .....	77
2.4.3 Metodologia desenvolvida nos testes experimentais .....	84
2.4.4 Processo de otimização (Algoritmo Genético).....	92
2.5 Considerações finais .....	99

<b>3</b>	<b>MODELO ESTRUTURAL INVESTIGADO</b>	<b>100</b>
3.1	Considerações iniciais	100
3.2	Modelo estrutural: piso de concreto armado	100
3.3	Considerações do capítulo	103
<b>4</b>	<b>MODELO EM ELEMENTOS FINITOS</b>	<b>104</b>
4.1	Considerações iniciais	104
4.2	Elementos finitos empregados na modelagem do piso	104
4.3	Hipóteses simplificadoras	106
4.4	Modelo em elementos finitos	107
4.5	Modelagem do amortecimento estrutural	108
4.6	Modelagem numérica: sistemas biodinâmicos	110
4.6.1	Validação do modelo biodinâmico proposto	112
4.7	Considerações finais	117
<b>5</b>	<b>ANÁLISE MODAL NUMÉRICA</b>	<b>118</b>
5.1	Considerações iniciais	118
5.2	Análise modal: piso vazio	119
5.2	Análise modal: piso ocupado	131
5.3	Considerações finais	135
<b>6</b>	<b>ANÁLISE MODAL EXPERIMENTAL</b>	<b>136</b>
6.1	Considerações iniciais	136
6.2	Teste experimental I: determinação do amortecimento experimental	137
6.2.1	Descrição dos equipamentos	137
6.2.2	Procedimentos experimentais	138
6.2.3	Resultados experimentais	139
6.3	Teste experimental II: martelo de impacto sobre o piso	141
6.3.1	Descrição dos equipamentos	142
6.3.2	Procedimentos experimentais	143
6.3.3	Resultados experimentais	144
6.4	Teste experimental III: excitação por um shaker	145
6.4.1	Descrição dos equipamentos	146
6.4.2	Procedimentos experimentais	148
6.4.3	Resultados experimentais	151
6.5	Comparação de resultados: numérico-experimental	152

6.6 Considerações finais .....	153
<b>7 ANÁLISE DE VIBRAÇÃO FORÇADA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>155</b>
7.1 Considerações iniciais.....	155
7.2 Modelos de carregamento analisados.....	155
7.2.1 Modelo de carregamento I (MC-I) .....	156
7.2.2 Modelo de carregamento II (MC-II) .....	158
7.2.3 Modelo de carregamento III (MC-III) .....	158
7.2.4 Modelo de carregamento IV (MC-IV).....	160
7.2.5 Modelo de carregamento V (MC-V).....	161
7.2.6 Modelo de carregamento VI (MC-VI).....	162
7.2.7 Modelo de carregamento VII (MC-VII).....	164
7.2.8 Modelo de carregamento VIII (MC-VIII).....	165
7.2.9 Modelo de carregamento IX (MC-IX).....	167
7.3 Considerações finais .....	169
<b>8 VIBRAÇÃO FORÇADA: NUMÉRICO-EXPERIMENTAL .....</b>	<b>170</b>
8.1 Considerações iniciais.....	170
8.2 Análise transiente.....	170
8.3 Validação do modelo biodinâmico proposto .....	171
8.3.1 Modelo de carregamento I (MC-I) .....	172
8.3.2 Modelo de carregamento II (MC-II) .....	175
8.3.3 Modelo de carregamento III (MC-III) .....	177
8.3.4 Modelo de carregamento IV (MC-IV).....	178
8.3.5 Modelo de carregamento V (MC-V).....	180
8.3.6 Modelo de carregamento VI (MC-VI).....	183
8.3.7 Modelo de carregamento VII (MC-VII).....	185
8.3.8 Modelo de carregamento VIII (MC-VIII).....	186
8.4 Considerações finais .....	189
<b>9 VIBRAÇÃO FORÇADA: EXPERIMENTAL x BIODINÂMICO x "FORÇA-DURA" .....</b>	<b>190</b>
9.1 Considerações iniciais.....	190
9.2 Critérios adotados na modelagem numérica .....	190
9.3 Comparação da resposta dinâmica: numérico-experimental.....	191
9.4 Considerações finais .....	198

<b>10</b>	<b>AVALIAÇÃO DO CONFORTO HUMANO DO PISO</b>	<b>199</b>
10.1	Considerações iniciais	199
10.2	Parâmetros empregados na modelagem	199
10.3	Avaliação do conforto humano	201
10.3.1	Modelo de carregamento X (MC-X)	203
10.3.2	Modelo de carregamento XI (MC-XI)	207
10.3.3	Modelo de carregamento XII (MC-XII)	211
10.3.4	Modelo de carregamento XIII (MC-XIII)	213
10.3.5	Modelo de carregamento XIV (MC-XIV)	215
10.3.6	Modelo de carregamento XV (MC-XV)	219
10.3.7	Modelo de carregamento XVI (MC-XVI)	221
10.3.8	Modelo de carregamento XVII (MC-XVII)	224
10.3.9	Modelo de carregamento XVIII (MC-XVIII)	226
10.3.10	Modelo de carregamento XIX (MC-XIX)	228
10.4	Considerações finais	230
<b>11</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>231</b>
11.1	Introdução	231
11.2	Conclusões avançadas	233
11.2.1	Modelo biodinâmico proposto	233
11.2.2	Análise modal do piso investigado	235
11.2.3	Calibração do modelo em elementos finitos do piso	236
11.2.4	Vibração forçada: validação dos modelos biodinâmicos	237
11.2.5	Análise comparativa: Experimental x Sistemas Biodinâmicos x Força-dura	239
11.3	Sugestão para trabalhos futuros	242
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>244</b>
	<b>APÊNDICE A - Parâmetros da modelagem de sistemas biodinâmicos de cada pessoa</b>	<b>260</b>
	<b>APÊNDICE B - Coeficiente de Pearson (CCP) entre a força experimental (<math>F_{exp}</math>) e a força otimizada (<math>F_{otm}</math>) das pessoas 1 até 100</b>	<b>264</b>
	<b>APÊNDICE C - Propriedades geométricas do piso de concreto armado</b>	<b>268</b>
	<b>APÊNDICE D - Modos de vibração do piso do 11º até 18º</b>	<b>269</b>
	<b>APÊNDICE E - Análise modal experimental: shaker</b>	<b>277</b>
	<b>APÊNDICE F - Resposta dinâmica experimental x biodinâmico [95]</b>	<b>281</b>

<b>APÊNDICE G - Parâmetros utilizados na modelagem de sistemas biodinâmicos referente aos casos carregamento investigados MC-X até MC-XIX .....</b>	<b>285</b>
<b>APÊNDICE H - Respostas estruturais dinâmica: seções críticas .....</b>	<b>286</b>

## INTRODUÇÃO

Ao longo dos anos, observa-se uma expansão de projetos de edificações com arquiteturas arrojadas e modernas, além de novos materiais e técnicas construtivas têm sido empregadas com o objetivo de otimizar o tempo de execução e flexibilidade em termos de uso final. Neste contexto, os engenheiros estruturais por meio da sua experiência e emprego de novos materiais de construção conseguem projetar estruturas com vãos longos, esbeltas e leves, sendo assim uma vantagem em termos estéticos e de custos de projeto. Por outro lado, ressalta-se que tais métodos construtivos podem influenciar diretamente sobre a resposta dinâmica dos pisos de edifícios, devido às modificações dos parâmetros modais. Uma consequência direta dessa tendência de projeto é o aumento considerável dos problemas de vibração excessiva relatados nos últimos anos.

Estudos recentes desenvolvidos por Ferreira et al. [1], Wang e Chen [2] e Murray et al. [3] relacionados à análise do comportamento estrutural dinâmico dos pisos de edifícios, observaram que os casos mais críticos ocorrem em sistemas estruturais com baixas frequências naturais combinadas com atividades humanas rítmicas e sincronizadas, o que pode amplificar o efeito da ação dinâmica sobre a estrutura, ampliando assim a probabilidade de ressonância.

Dada a importância desse tema de pesquisa investigado no âmbito desta tese de doutorado, serão apresentados na sequência vários projetos de edifícios modernos, arrojados e inovadores, especificamente destinados à prática de atividades físicas (academia de ginásticas).

A academia de ginástica localizada na Sérvia, inaugurada em 2005, refere-se a um edifício que abriga um complexo esportivo com um sistema estrutural caracterizado por sustentar todas as lajes por meio de dois apoios centrais. Esse sistema utiliza *cantilevers* com doze metros de comprimento. Além disso, vale ressaltar que a laje de concreto e a cobertura do teto não estão conectadas no perímetro do edifício, permitindo assim a continuidade da fachada de vidro ao longo de sua extensão. Por outro lado, é preciso considerar que esse método construtivo pode influenciar sobre a rigidez do sistema estrutural. A seguir, as Figuras 1 e 2 apresentam as vistas do edifício.



**Figura 1 - Vista externa da academia de ginástica na Sérvia 2005 [4]**



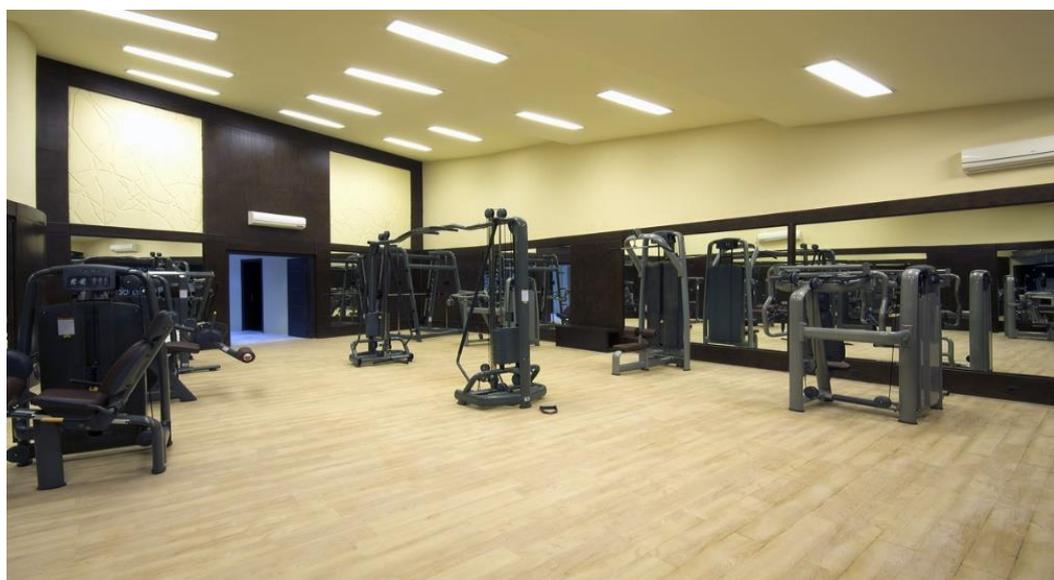
**Figura 2 - Vista interna da academia de ginástica na Sérvia 2005 [4]**

Um exemplo adicional é a academia de ginástica localizada no Irã, que foi inaugurada em 2013, essa edificação é composta por espaços destinados à musculação e sala de ginástica. No que se refere ao sistema estrutural, este é constituído por estruturas mista (aço-concreto), onde os pilares e vigas foram construídos com perfis metálicos, enquanto as lajes foram executadas com o uso de

*steel deck*. Cabe ressaltar que o sistema apresenta uma laje em balanço, com um vão de nove metros. Com relação aos revestimentos de fachada foram aplicados materiais mais leves em comparação aos tradicionais, e um sistema estrutural de contraventamento utilizando os perfis metálicos foram empregados nas fachadas. Nas Figuras 3 e 4, são apresentadas ilustrações da academia de ginástica mencionada.



**Figura 3 - Vista externa da academia de ginástica no Irã 2013 [5]**



**Figura 4 - Vista interna da academia de ginástica no Irã 2013 [5]**

No ano de 2020, foi inaugurada a academia de ginásticas destinada à prática de atividades de alto impacto como o *crossfit*, o projeto estrutural foi idealizado pelo

arquiteto Marcio Davi, na cidade de Salvador, estado da Bahia, conforme ilustrado na Figura 5. Neste contexto, a academia se destaca por sua simplicidade e com um baixo custo de construção, uma vez que as paredes e coberturas são constituídas por cinco estruturas de containers interligadas com perfis de aço. Deste modo, é importante ter em mente que esses novos materiais, bem como as técnicas construtivas empregadas, podem ter influência sobre os parâmetros modais de todo o sistema estrutural.



**Figura 5 - Vista externa da academia de ginástica no Brasil 2020 [6]**

No que diz respeito aos sistemas construtivos adotados nas grandes redes de academias de ginástica no Brasil, observa-se uma tendência de utilizar sistemas estruturais mistos (aço-concreto), nos quais vigas e pilares são feitos de perfis metálicos e as lajes de concreto. A vantagem desse método construtivo refere-se à rapidez de execução em comparação com as estruturas convencionais de concreto armado tradicionais. No entanto, os sistemas estruturais mais esbeltos e flexíveis podem resultar em frequências naturais muito baixas, tornando-os mais suscetíveis a problemas de vibrações excessivas causadas decorrente da interação dinâmica pessoa-estrutura, podendo assim resultar em desconforto aos usuários da edificação.

Diante das técnicas construtivas recentes, é essencial realizar uma caracterização adequada do carregamento humano sobre o sistema estrutural, especialmente em relação ao carregamento dinâmico aplicado ao piso. No entanto, considerar essa ação de forma idealizada se torna muito complexo, e muitos estudos e normas técnicas simplificam ao considerar o carregamento humano como uma ação puramente estática. Contudo, essa abordagem nem sempre corresponde à realidade observada, uma vez que as cargas humanas são de natureza aleatória, com intensidade e direção variando ao longo do tempo. Conseqüentemente, a resposta de uma estrutura à vibração induzida através do ser humano também apresenta uma natureza aleatória. Com base neste entendimento, a presente tese de doutorado tem como objetivo desenvolver um modelo de carregamento dinâmico, utilizando sistemas biodinâmicos.

Neste sentido, é proposto o desenvolvimento de um modelo biodinâmico com um grau de liberdade (SGL1), compostos por massa, amortecedor e rigidez, a fim de representar a ação rítmica do ser humano sobre o sistema estrutural investigado. Assim sendo, para alcançar esse objetivo, as variáveis do modelo foram obtidas por meio de testes experimentais e aplicação de técnicas de otimização, como o algoritmo genético (AG).

Considerando os aspectos abordados anteriormente, o objetivo desta pesquisa concentrou-se em estudar a resposta estrutural dinâmica de um piso real e existente (academia de ginástica). Assim sendo, os principais focos desta investigação foram os seguintes: desenvolver um sistema biodinâmico por meio de testes experimentais; calibrar o modelo biodinâmico proposto através da comparação dos resultados numérico-experimentais; validar o modelo de elementos finitos utilizando os resultados da análise modal experimental; desenvolver um estudo paramétrico com diferentes composições de carregamento dinâmico sobre o piso de concreto armado, considerando as propriedades modais (massa, amortecimento e rigidez), a taxa de amortecimento estrutural e a resposta estrutural dinâmica (aceleração); calibrar o modelo biodinâmico proposto com base nos resultados de aceleração do piso obtidos nos testes de vibração forçada da monitoração dinâmica experimental; realizar uma análise comparativa entre as respostas dinâmicas fornecidas por meio das funções matemáticas de carregamento dinâmico (“força-dura”) e a estratégia de modelos

biodinâmicos; e, por fim, analisar o critério de conforto humano com base em normas técnicas e critérios de projeto.

## **Motivação**

No contexto brasileiro, o projeto de edifícios geralmente considera os critérios dos Estados Limites Últimos (ELU), mas frequentemente negligencia ou analisa parcialmente os parâmetros relacionados aos Estados Limites de Serviço (ELS). Em função disso, ressalta-se que casos de vibrações excessivas sobre os pisos de edifícios têm sido relatados ao longo dos últimos anos. Portanto, é importante desenvolver um projeto estrutural que atenda simultaneamente aos critérios de segurança e conforto humano das edificações.

Neste sentido, vale ressaltar que as normas técnicas de projeto vigentes no Brasil normalmente abordam os carregamentos dinâmicos de maneira simplificada, considerando-os de forma puramente estática. Diante disso, o trabalho de pesquisa busca caracterizar o carregamento dinâmico associado às ações humanas rítmicas (ginástica aeróbicas), com base no desenvolvimento de modelos biodinâmicos que incorporam o efeito da interação dinâmica pessoa-estrutura e podem ser empregados para representar as características dinâmicas dos indivíduos (massa, amortecimento e rigidez) sobre os pisos de edifícios.

Neste contexto, o presente trabalho de pesquisa objetiva avaliar de forma mais detalhada os efeitos da interação dinâmica pessoa-estrutura, com a finalidade de aprimorar a obtenção da resposta dinâmica de pisos de edifícios, proporcionando assim aos engenheiros e projetistas ferramentas necessárias para o desenvolvimento de projetos estruturais que atendam simultaneamente aos requisitos de vibração excessiva e conforto humano. Dessa forma, com base nos resultados obtidos neste estudo, espera-se contribuir para uma melhor avaliação dos efeitos da interação dinâmica pessoa-estrutura, além de possibilitar uma análise mais detalhada acerca da resposta estrutural dinâmica de pisos de edifícios, tendo em mente os critérios de conforto humano.

## Objetivos

Este trabalho de pesquisa tem como objetivo central analisar a resposta estrutural dinâmica de pisos de edifícios quando submetidos a ações dinâmicas humanas rítmicas. Assim sendo, busca-se avançar no estudo sobre os efeitos da interação dinâmica pessoa-estrutura e, bem como, no desenvolvimento de técnicas de monitoração experimental dinâmica e modelagem numérica em elementos finitos, tendo em mente uma avaliação mais realista do conforto humano destes pisos.

Deste modo, esta pesquisa propõe o desenvolvimento de modelos biodinâmicos, por meio da realização de uma extensa bateria de testes experimentais em laboratório, com o intuito de determinar as características dinâmicas das pessoas (massa, amortecimento e rigidez). Para tal, a formulação dos modelos biodinâmicos é realizada inicialmente por meio da resolução da equação clássica de equilíbrio dinâmico e, posteriormente, através da resolução de um problema de otimização.

Com o objetivo de calibrar o modelo biodinâmico proposto, são realizadas análises experimentais e numéricas sobre as respostas dinâmicas das lajes de concreto armado do piso em estudo, quando submetidas a diferentes situações de carregamentos dinâmicos humanos rítmicos (ginástica aeróbica), visando à investigação do comportamento estrutural dinâmico global da estrutura. Essas análises apresentam como foco principal a validação do modelo biodinâmico desenvolvido no âmbito deste estudo, objetivando proporcionar uma caracterização mais realista acerca das ações dinâmicas humanas rítmicas sobre os pisos de edifícios.

Além disso, são realizadas análises qualitativas e quantitativas, com base na comparação das respostas do piso fornecidas através da aplicação dos modelos tradicionais de carregamento dinâmico (“força-dura”) e a estratégia de modelagem biodinâmica proposta neste estudo. Por fim, são avaliados os parâmetros relacionados ao conforto humano do sistema estrutural investigado, com base em critérios, normas e guias de projeto. Pretende-se, portanto, contribuir para o avanço do conhecimento científico na área de análise estrutural dinâmica de pisos de edifícios, mediante estudo do efeito da interação dinâmica pessoa-estrutura a partir do emprego de sistemas biodinâmicos.

## Estrutura da Tese

Com o intuito de atender às metodologias desenvolvidas no âmbito deste estudo, o presente trabalho de pesquisa é estruturado em onze capítulos, conforme descrição apresentada na sequência.

O primeiro capítulo, dedica-se em apresentar revisões bibliográficas, tendo como referência pesquisas científicas desenvolvidas relacionadas à análise dos efeitos da interação dinâmica pessoa-estrutura.

No segundo capítulo, são apresentados os conceitos teóricos e a modelagem experimental relacionada ao desenvolvimento de sistemas biodinâmicos, os quais visam representar a ação humana sobre os sistemas estruturais. Para tal, são detalhados os processos referentes à modelagem de sistemas biodinâmicos através da realização de uma bateria de testes experimentais e da aplicação da resolução matemática de um problema clássico de otimização, utilizando Algoritmos Genéticos (AG). Neste contexto, o capítulo se concentra em apresentar de forma detalhada a metodologia utilizada para a formulação do modelo biodinâmico proposto.

O terceiro capítulo, concentra-se em descrever as características do modelo estrutural investigado neste trabalho de pesquisa, o qual representa um piso de concreto armado real localizado no 8º andar da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ).

No quarto capítulo, procede-se ao desenvolvimento do modelo numérico do piso de concreto armado investigado no âmbito desta pesquisa com base na utilização método dos elementos finitos (MEF), empregando técnicas usuais de discretização. Além disso, são descritos os detalhes acerca do processo de modelagem numérica empregado no âmbito do desenvolvimento de sistemas biodinâmicos.

No quinto capítulo, apresentam-se os parâmetros modais do piso em estudo e os respectivos modos de vibração por meio da aplicação da análise modal numérica. Neste contexto, analisam-se as propriedades modais do piso considerando duas situações: 'piso vazio' e 'piso ocupado'. Dessa forma, investiga-se a influência dos indivíduos sobre os parâmetros modais do piso de concreto.

No sexto capítulo, descrevem-se os testes referentes à análise modal experimental realizados sobre o piso investigado, com o objetivo de obter os parâmetros modais das lajes de concreto em estudo. Cabe ressaltar que são

empregadas diferentes metodologias e estratégias de monitoração dinâmica experimental. Em seguida, são realizadas calibrações do modelo numérico proposto neste trabalho com base nos resultados obtidos.

No sétimo capítulo, são fornecidos detalhes a respeito dos testes experimentais de vibração forçada realizados sobre piso investigado. Assim sendo, são avaliados diferentes cenários de carregamento dinâmico gerados por grupos distintos de indivíduos praticando atividades aeróbicas sobre o piso.

O oitavo capítulo tem como objetivo analisar a resposta estrutural dinâmica do piso em estudo, por meio da comparação entre os resultados obtidos pelos modelos biodinâmicos via modelagem numérica e através da monitoração dinâmica experimental. Os resultados são avaliados tanto de forma qualitativa (graficamente) quanto quantitativa, com referência aos resultados obtidos na análise.

No nono capítulo, são realizadas análises comparativas entre os resultados obtidos na monitoração dinâmica da resposta experimental do piso, em comparação com os resultados fornecidos pelos modelos tradicionais de carregamento dinâmico “força-dura” e através da estratégia proposta neste estudo (modelo biodinâmico). Dessa forma, o objetivo dessa investigação consiste em verificar o método que melhor se ajusta à resposta observada na estrutura real.

O décimo capítulo dedica-se à análise das respostas estruturais dinâmicas do piso induzidas por diferentes composições de carregamento dinâmico, utilizando as funções de carregamento dinâmico: modelo biodinâmico e modelos tradicionais de “força-dura”. Neste contexto, realiza-se a verificação do atendimento aos critérios de conforto humano, com base nos limites estabelecidos pelas normas técnicas e critérios de projeto.

No décimo primeiro capítulo, são apresentadas as conclusões obtidas neste trabalho de pesquisa. Com base nos resultados obtidos, o estudo busca desenvolver metodologias que possam auxiliar engenheiros e projetistas na compreensão aprofundada da interação dinâmica pessoa-estrutura por meio de modelos biodinâmicos, visando o desenvolvimento de projetos que atendam às exigências de segurança e conforto. Além disso, com base nas conclusões desta tese, são sugeridas novas perspectivas de pesquisa para trabalhos futuros.

## 1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 1.1 Considerações iniciais

O presente capítulo apresenta uma extensa revisão bibliográfica das pesquisas científicas desenvolvidas ao longo dos anos acerca da análise dos efeitos da interação dinâmica pessoa-estrutura. Desta forma, são apresentados os principais estudos e avanços referentes a essa linha de pesquisa, levando em consideração a análise do comportamento estrutural dinâmico de pisos de edifícios e os requisitos normativos e de projeto relacionados ao conforto humano.

Neste contexto de análise, cabe ressaltar que os trabalhos de pesquisa são desenvolvidos mediante a aplicação das técnicas derivadas da modelagem numérica, monitoração experimental dinâmica e formulações analíticas. A modelagem numérica, por exemplo, utiliza os métodos dos elementos finitos com o objetivo de desenvolver diferentes tipos de simulações numéricas, tais como análises do tipo modal e transientes. Por outro lado, a modelagem experimental consiste na realização de testes experimentais em laboratório ou sobre a estrutura real com a intenção de mensurar os diferentes parâmetros em função do tempo, tais como força, aceleração, velocidade ou deslocamento. Além disso, a modelagem analítica também desempenha um papel relevante, utilizando princípios teóricos e equações matemáticas. Dessa forma, essas diferentes abordagens possibilitam uma compreensão mais abrangente dos efeitos da interação dinâmica pessoa-estrutura.

No que diz respeito à caracterização do carregamento dinâmico resultante das ações humanas (atividades rítmicas), é importante ressaltar que uma análise aprofundada sobre o tema será apresentada ao longo deste capítulo, pois compreender os efeitos dessas ações dinâmicas permitirá uma análise mais detalhada acerca da resposta estrutural dinâmica de pisos de edifícios, tendo em mente os critérios de conforto humano.

Portanto, compreender profundamente o comportamento estrutural dinâmico dos pisos induzidos por atividades humanas rítmicas é fundamental para o desenvolvimento de projetos de edificações que atendam aos critérios de conforto humano. Neste sentido, a seguir são apresentadas uma ampla variedade de

pesquisas científicas desenvolvidas com foco na análise dinâmica de estruturas. Tais estudos abordam diferentes aspectos, como a caracterização do carregamento dinâmico, a modelagem numérica e experimental, bem como a aplicação de métodos analíticos.

## 1.2 Caracterização do carregamento dinâmico: ações humanas rítmicas

Ao longo dos anos, pesquisas científicas dedicam-se em caracterizar o carregamento dinâmico induzido por ações humanas de maneira mais adequada, com base em estudos referentes aos carregamentos dinâmicos aplicados sobre a estrutura, tais como: saltos, danças, ginástica rítmica, caminhada e outras ações que geram excitação sobre a estrutura. Assim sendo, é importante uma compreensão mais detalhada acerca do carregamento dinâmico humano rítmico resultante das ações humanas sobre as edificações.

No que se refere as atividades aeróbicas desenvolvidas por indivíduos, como saltos rítmicos sobre os sistemas estruturais, observa-se que essa prática envolve a perda temporária de contato com a estrutura por meio de movimentos na direção vertical ou oblíqua. Deste modo, nota-se que em referência ao salto vertical, o corpo do indivíduo é impulsionado verticalmente, enquanto no salto oblíquo ocorrem movimentos simultâneos nas direções vertical e horizontal. Assim sendo, a Figura 6 ilustra as etapas de um salto humano, desde a preparação até a conclusão do salto.

Diante do exposto, destaca-se que o carregamento dinâmico resultante das atividades humanas rítmicas depende de uma série de parâmetros associados às características de cada indivíduo, tais como sexo, peso, idade, aptidão física, frequência de excitação, biótipo e forma de execução da atividade. Tais parâmetros exercem influência direta sobre a magnitude e a natureza das forças dinâmicas aplicadas sobre a estrutura durante as atividades rítmicas.

Conforme mencionado anteriormente, compreender e quantificar o carregamento dinâmico gerado através das atividades humanas rítmicas é essencial para o adequado desenvolvimento do projeto estrutural. Portanto, o conhecimento dos parâmetros envolvidos possibilita a correta avaliação das cargas dinâmicas,

contribuindo para um bom dimensionamento estrutural e a definição de critérios de segurança apropriados.



**Figura 6 - Etapas de um salto humano [7]**

De acordo com a norma CEB nº 209 [8], os problemas mais comuns relacionados à dinâmica das estruturas são frequentemente observados em ambientes de academias de ginástica, devido às atividades humanas rítmicas realizadas, como saltos e corridas. Deste modo, é importante ressaltar que essas atividades se tornam ainda mais significativas quando realizadas em grupo, uma vez que os movimentos sincronizados podem intensificar as respostas dinâmicas das estruturas dos pisos.

De acordo com estudos conduzidos por Bachmann et al. [9], citados por Segundinho [10], o primeiro harmônico associado aos saltos rítmicos situa-se na faixa de frequência de 1,5 Hz a 3,4 Hz e é comumente observado em ambientes de academias de ginástica ou salas de treinamento. Neste sentido, é importante ressaltar que compreender essas faixas de frequência de excitação relacionadas às atividades humanas nos pisos de edifícios é fundamental para uma análise e desenvolvimento adequados do projeto estrutural sujeito a essas ações humanas, uma vez que auxiliam na identificação das frequências críticas que apresentam as maiores amplitudes de resposta estrutural.

Neste contexto, a Tabela 1 apresenta as faixas de frequência de excitação utilizadas em diferentes atividades humanas rítmicas, conforme descrito no guia de projeto AISC [3]. Portanto, ao projetar e avaliar a adequação de estruturas em ambientes de academias de ginástica, é essencial considerar as faixas de frequência de excitação mencionadas, a fim de garantir a segurança e a durabilidade das estruturas diante das respostas dinâmicas geradas através das atividades humanas rítmicas realizadas sobre o piso.

**Tabela 1 - Faixas de frequências de atividades humanas rítmicas [3]**

Frequência de excitação ( $f_{step}$ ) e coeficientes dinâmicos* ( $\alpha_i$ )						
Harmônico, $i$	Grupo de dança		Atividade aeróbica		Show de rock	
	$f_{step}$ (Hz)	$\alpha_i$	$f_{step}$ (Hz)	$\alpha_i$	$f_{step}$ (Hz)	$\alpha_i$
1	1,5 a 2,7	0,5	2,0 a 2,75	1,5	1,5 a 2,7	1,25
2	3,0 a 5,4	0,05	4,0 a 5,5	0,6	3,0 a 5,4	0,026
3	-	-	6,0 a 8,25	0,1	-	-

\* Coeficiente dinâmico: razão entre o pico da força senoidal com o peso da pessoa.

### 1.3 Casos de vibrações excessivas decorrentes das ações humanas

Esta seção tem como objetivo descrever, por meio de um levantamento histórico, os principais casos documentados nos últimos anos que se relacionam à ocorrência de vibração excessiva sobre os sistemas estruturais devido às atividades humanas desenvolvidas. Neste sentido, são apresentados exemplos desses casos, bem como as medidas de segurança adotadas com o objetivo de garantir o conforto humano aos usuários das edificações.

Em um estudo realizado por Thornton et al. [11] citado por Carmona [12], foi investigada a resposta estrutural dinâmica de um edifício comercial de seis pavimentos. Os principais problemas de vibração excessiva foram atribuídos às atividades rítmicas realizadas na academia de ginástica localizada no pavimento superior da edificação. Com o objetivo de compreender melhor o comportamento estrutural, foram realizados testes de monitoração experimental dinâmica.

Os resultados obtidos revelaram que a taxa de amortecimento estrutural do piso do segundo pavimento era inferior a 1%. Além disso, foram registrados níveis de aceleração no primeiro pavimento da ordem de 2,5%g, enquanto no segundo pavimento esses níveis foram de 0,6%g. Tais valores indicam a presença de respostas estruturais dinâmicas significativas, decorrentes das atividades rítmicas praticadas na academia de ginástica.

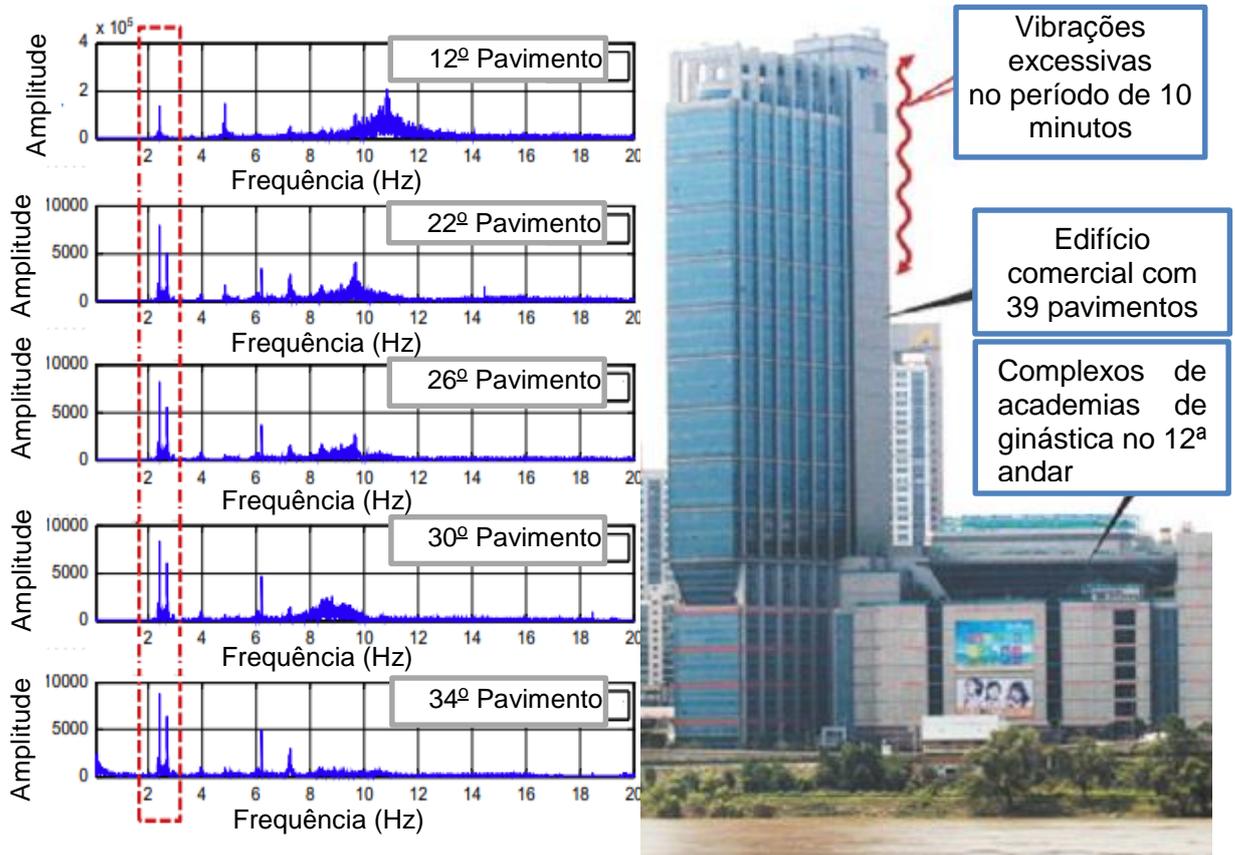
Essas constatações destacam a importância de considerar adequadamente os efeitos das atividades humanas rítmicas sobre as estruturas em projetos de

edificações, pois a baixa taxa de amortecimento e os altos níveis de aceleração podem resultar em desconforto aos usuários da edificação. Portanto, com o intuito de solucionar as vibrações excessivas foram instalados um sistema com oito AMSM (Amortecedores de Massa Sintonizados Múltiplos) sob o piso da academia de ginástica com o intuito de mitigar os impactos das ações induzidas através das atividades humanas, a fim de garantir a segurança, o conforto e o desempenho adequado das estruturas.

Webster e Vaicaitis [13] realizaram uma avaliação do comportamento estrutural dinâmico de um piso misto de um edifício comercial Terrace on The Park Building, em Nova York. A pesquisa foi motivada em função de uma série de relatos relacionados à problemas de dinâmica das estruturas decorrentes das atividades humanas sincronizadas. Os estudos indicaram que a frequência fundamental do piso correspondia a 2,3 Hz, o que indica uma compatibilidade com o intervalo dos harmônicos associados às atividades humanas rítmicas realizadas sobre o piso, aumentando assim a possibilidade de ocorrência do fenômeno de ressonância. Nessas condições críticas, observou-se um deslocamento translacional vertical máximo de 3,3 mm. Assim sendo, como medida corretiva para as vibrações excessivas, foram instalados sistemas de amortecimento de AMSM, resultando em uma redução de aproximadamente 60% nas vibrações. Concluiu-se, portanto, que o sistema de amortecimento proporcionou resultados satisfatórios do ponto de vista técnico e econômico, sendo assim uma alternativa viável para ampliar o amortecimento estrutural.

Lee et al. [14] conduziram uma investigação em um edifício comercial de 39 pavimentos localizado na Coreia do Sul, devido aos níveis de vibração intoleráveis observados nos pisos dos pavimentos superiores, especialmente no andar que abriga um complexo de academias de ginástica. O objetivo dessa pesquisa foi avaliar o comportamento estrutural dinâmico do edifício por meio de modelagem numérica e monitoramento experimental. Os resultados indicaram que o edifício apresenta um modo de vibração global equivalente a 2,7 Hz e um amortecimento estrutural da ordem de 0,3%. Desta forma, cabe ressaltar que esse modo de vibração pode ser facilmente estimulado através das atividades humanas rítmicas realizadas no complexo de academias de ginástica no 12º andar do edifício. A partir da análise de vibração forçada, foram identificados picos de aceleração entre 0,6 e 0,7 m/s<sup>2</sup>, superando os

limites toleráveis estabelecidos pelo guia de projeto AISC [3]. Assim sendo, a Figura 7 apresenta os resultados do monitoramento dos pavimentos, destacando a região do gráfico onde a frequência global coincide com as atividades realizadas na academia, resultando em ressonância global dos pavimentos.



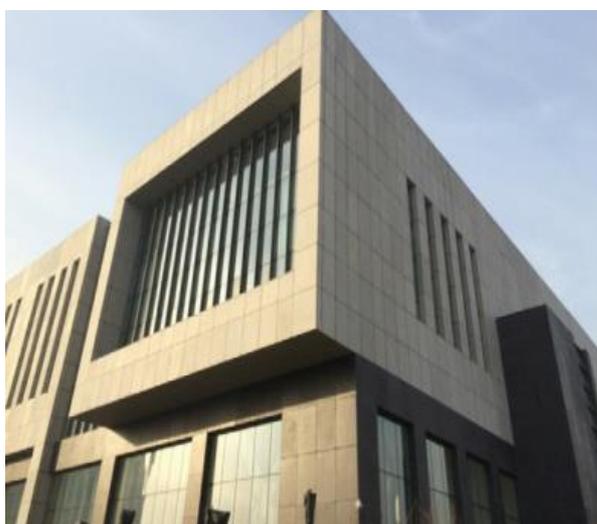
a) Espectro de resposta

b) Vista externa edifício comercial

**Figura 7 - Análise da ressonância global nos pavimentos [14]**

An et al. [15] investigaram o comportamento estrutural dinâmico de um ginásio esportivo em Hebie, na China, sob os efeitos das ações dinâmicas humanas rítmicas, como saltos, passos sincronizados, caminhada e corrida. Com a finalidade de mitigar os impactos dessas atividades que geravam vibrações excessivas, foram implementadas medidas de controle sobre o sistema estrutural. Primeiramente, instalou-se um sistema de cabos na cobertura, permitindo a construção de uma estrutura com um vão considerável, conforme ilustrado na Figura 8. Além disso, foram instalados sistemas com Amortecedores de Massa Sintonizados (AMS).

Com base no emprego dessas medidas observou-se um aumento na taxa de amortecimento que era da ordem de 1,54% para um valor correspondente a 3,2%. Em seguida, realizou-se um teste de monitoração experimental dinâmica, onde a arena foi excitada por um grupo de 64 pessoas, os resultados de aceleração de pico indicaram que os limites de aceleração previstos no guia de projeto AISC [3] foram atendidos para a maioria das atividades investigadas, exceto para as atividades decorrentes de saltos sincronizados. No entanto, o sistema de controle de vibrações instalado contribuiu significativamente para a redução do desconforto humano decorrente dessas atividades humanas rítmicas.



a) Vista externa



b) Vista interna

**Figura 8 - Ginásio esportivo Hebie China [15]**

Zhang et al. [16] realizaram uma avaliação das vibrações excessivas induzidas por ações humanas relatadas na plataforma de um mirante olímpico em Pequim. Deste modo, ao avaliar as propriedades modais através da modelagem numérica, constatou-se que os resultados referentes aos modos de vibração vertical associados à flexão do piso apresentam frequências naturais da ordem de  $f_{02} = 3,0$  Hz e  $f_{03} = 3,5$  Hz associadas ao segundo e terceiro modo, respectivamente.

Assim sendo, cabe ressaltar que esses modos de vibração podem ser excitados por carregamento de multidão, aumentando assim a possibilidade de ocorrência do fenômeno de ressonância. Como medida corretiva, foram implementados dois pares de Amortecedores de Massa Sintonizados (AMS) e foi construída uma camada de revestimento sobre o piso. Essas ações contribuíram para

aumentar a rigidez vertical e a frequência modal da ordem de 4%, solucionando assim os problemas de vibrações excessivas na plataforma.

Erlina et al. [17] realizaram uma investigação em um auditório referente à um piso em concreto protendido que era frequentemente utilizado para a realização de concertos musicais. Durante as apresentações, foram observados desconfortos causados através das vibrações geradas através das atividades humanas. Com base no estudo de monitoração experimental dinâmica, constatou-se que a frequência fundamental do piso era da ordem de 4,39 Hz, e que situava dentro da faixa relacionada às atividades humanas realizadas sobre o piso. Para solucionar esse problema, foi implementado um sistema de atenuação passiva de vibrações, resultando em um aumento do amortecimento do piso em mais de 300%. Essa medida foi eficaz no atendimento dos critérios de conforto humano, proporcionando uma redução significativa das vibrações e eliminando os desconfortos causados devido aos concertos musicais de auditório.

Recentemente, foram registrados no Brasil casos de vibrações excessivas em edificações. Um desses casos, relatado no jornal virtual G1 [18], que relata o acontecimento referente à evacuação de indivíduos dos pavimentos inferiores de um edifício comercial com treze pavimentos devido às vibrações intensas causadas por saltos simultâneos executados por um grupo de cinquenta pessoas no último pavimento durante uma palestra motivacional. Outro caso relacionado à vibração excessiva presente no jornal virtual Folha de São Paulo [19] diz respeito aos fortes impactos percebidos por vizinhos de uma academia de ginástica durante a execução das atividades físicas.

Neste contexto, é importante destacar que a ocorrência de vibrações excessivas pode resultar em desconforto humano, sensação de insegurança e até mesmo pânico aos ocupantes dos edifícios. Portanto, é essencial realizar uma análise adequada do comportamento estrutural, considerando as atividades humanas e implementando medidas de controle de vibrações com o intuito de garantir o conforto e a segurança dos usuários. Deste modo, esses casos relatados evidenciam a necessidade de uma abordagem técnica e a adoção de soluções adequadas para mitigar os problemas de vibração em edifícios. Neste sentido, Hanagan [20] reforça sobre medidas que podem ser implementadas, ainda na fase de projeto, com o objetivo de controlar os níveis de resposta estrutural dinâmica dos pisos, visando

proporcionar conforto aos usuários. No entanto, é importante ressaltar que a adoção dessas medidas pode aumentar o custo da obra, tornando-se uma desvantagem do ponto de vista econômico.

#### 1.4 Análise dos efeitos da interação dinâmica pessoa-estrutura

Esta seção apresenta uma síntese dos principais estudos realizados sobre o comportamento estrutural dinâmico de sistemas estruturais, por meio de abordagens de modelagem numérica, experimental e analítica, baseados em testes realizados tanto em laboratório quanto em estruturas reais existentes. No entanto, é importante destacar que as investigações da interação dinâmica pessoa-estrutura em ambientes laboratoriais, utilizando simulações de pisos, podem não reproduzir com precisão as respostas estruturais encontradas em estruturas reais. Isso ocorre devido à simplificação dos modelos construídos em laboratório, especialmente em relação aos graus de liberdade (Liu et al. [21], Patuelli et al. [22], Aras et al. [23], Banas [24], He et al. [25], Francavilla et al. [26], Racic et al. [27]). Dessa forma, a calibração da resposta estrutural dinâmica do piso em uma estrutura real é fundamental para uma análise mais detalhada do comportamento dinâmico do piso, permitindo assim comparações com os resultados obtidos através dos testes experimentais realizados em laboratório.

Faisca [28] desenvolveu uma função matemática de carregamento dinâmico, com base em testes experimentais envolvendo diferentes atividades realizadas com diferentes grupos de pessoas praticando saltos livres, saltos com frequências ritmadas (1,5 a 3,0 Hz), ginástica aeróbica e movimentos de torcidas de futebol sobre um piso de concreto, conforme ilustrado na Figura 9.



a) Teste com dupla



b) Teste com grupo

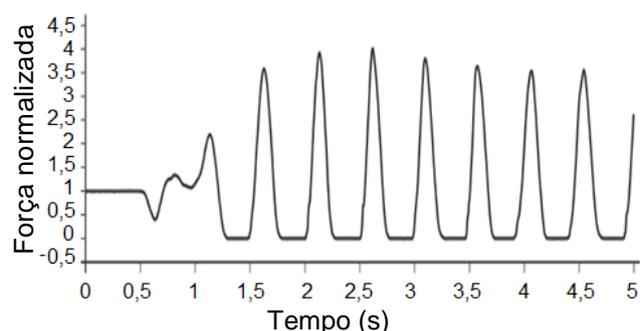
**Figura 9 - Monitoração dos saltos sobre a plataforma [28]**

No contexto do estudo proposto por Faisca [28], foi realizada a modelagem do carregamento dinâmico, com o objetivo de aprimorar o entendimento da interação dinâmica pessoa-estrutura. Deste modo, na próxima seção, serão fornecidos mais detalhes sobre o processo empregado para o desenvolvimento e caracterização do carregamento dinâmico.

Parkhouse et al. [29] conduziram um estudo com o objetivo de analisar a força exercida por uma pessoa ao realizar saltos sobre uma placa de força. Os testes experimentais foram desenvolvidos com base na frequência de excitação de 2 Hz, sendo monitorados por um metrônomo para garantir a consistência nos saltos. Os resultados obtidos encontram-se representados graficamente na Figura 10, que mostra o sinal de força normalizado em função do tempo. Essa abordagem experimental possibilitou uma análise detalhada da força aplicada ao longo do tempo, fornecendo uma relação entre as variáveis de força. Com base no estudo, foi possível observar a caracterização do carregamento dinâmico associado aos saltos rítmicos.



a) Teste experimental



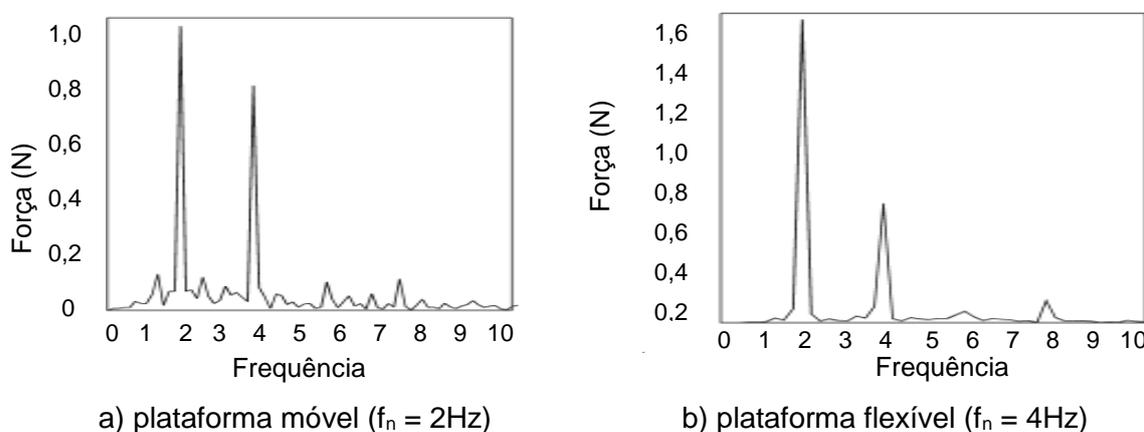
b) Força no domínio do tempo

**Figura 10 - Resposta estrutural dinâmica da atividade de saltar [29]**

Yao et al. [30] investigaram a resposta estrutural dinâmica de duas diferentes plataformas, com frequências fundamentais da ordem de 2 Hz e 4 Hz, respectivamente. Para tal, o objetivo do trabalho diz respeito à avaliação do comportamento dinâmico das estruturas quando expostas à ressonância, foram realizados testes experimentais nos quais a mesma pessoa realizou saltos em uma frequência de 2 Hz em cada uma das plataformas estudadas. Durante os testes, foram observados picos elevados de aceleração devido à ocorrência da ressonância. Tais picos de aceleração excederam os limites estabelecidos pelos critérios de projeto em ambas as plataformas, resultando em desconforto para o usuário. Os resultados

destacam a importância de considerar os efeitos da ressonância nas estruturas flexíveis e móveis, visando garantir o conforto e a segurança dos usuários.

A Figura 11 apresenta os resultados de força no domínio da frequência para as plataformas submetidas aos saltos humanos rítmicos com base nos resultados presentes na figura, é possível observar o efeito de transferência de energia entre as frequências e também identificar as respectivas frequências fundamentais de cada plataforma. Portanto, os resultados contribuíram para uma compreensão mais aprofundada da interação entre a ação humana e as estruturas em situações de ressonância.

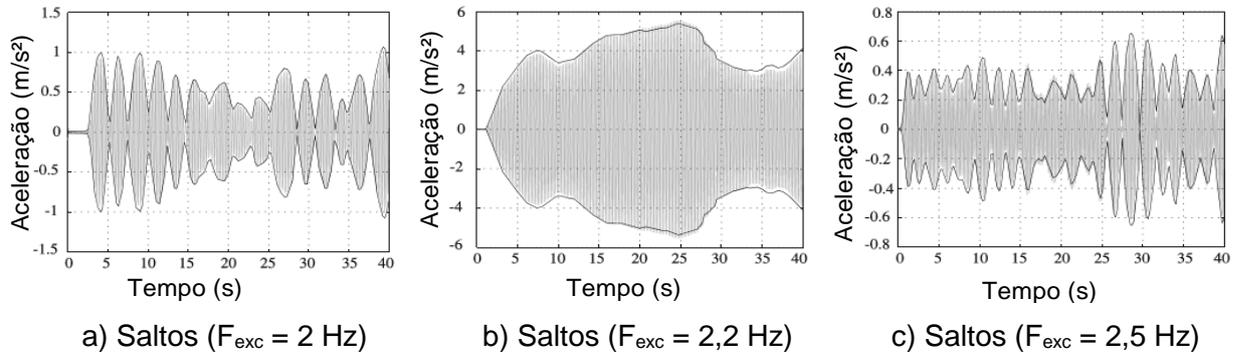


**Figura 11 - Testes experimentais: saltos sobre a plataforma ( $f = 2\text{ Hz}$ ) [30]**

Nhleko et al. [31] realizaram uma avaliação da interação dinâmica pessoa-estrutura por meio da monitoração experimental dinâmica, com base na avaliação da resposta dinâmica de uma plataforma submetida a saltos humanos rítmicos. Através dos resultados, os autores concluíram que o modelo de carregamento correspondente a força semi-senoidal de pulso não representou de forma adequada a carga de impulso e que as frequências associadas à atividade de saltar não se adequaram ao modelo proposto.

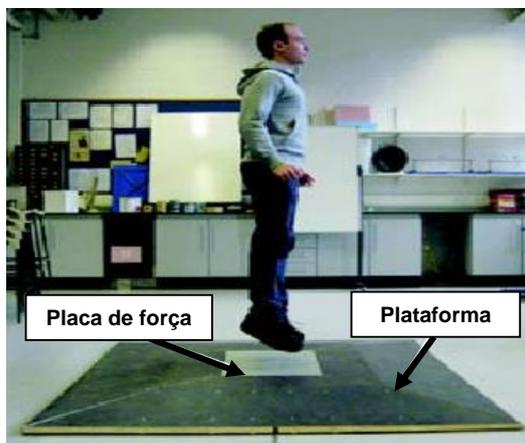
Racic et al. [32] analisaram a resposta estrutural dinâmica da plataforma por meio de equipamentos de rastreamento de movimento corporal monitorados por sistemas de câmeras de vídeo especializadas. Assim sendo, a Figura 12 apresenta os resultados de aceleração da plataforma em função do tempo, quando o indivíduo realizou saltos nas frequências de 2,0 Hz, 2,2 Hz e 2,5 Hz. Ressalta-se que os valores de aceleração mais elevados foram observados na frequência de excitação de 2,2 Hz,

devido à coincidência harmônica com a frequência fundamental da plataforma, que era de 4,4 Hz, conforme esperado a compatibilidade entre as frequências da plataforma e excitação ( $f = 2,2$  Hz) resultou em picos de aceleração mais significativos nessa condição específica.

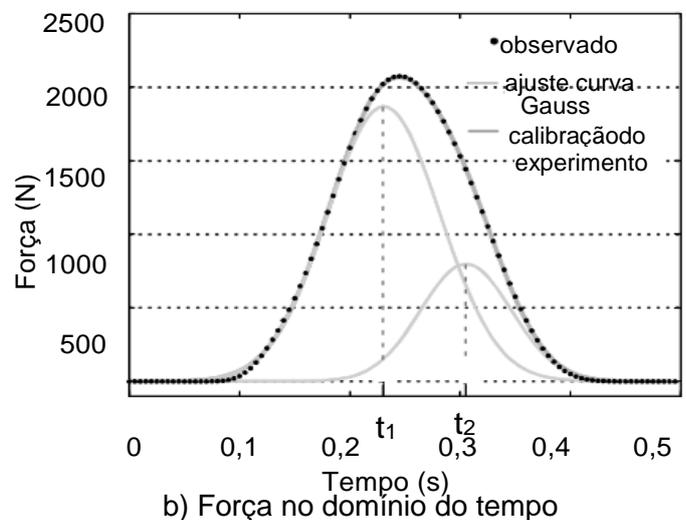


**Figura 12 - Aceleração no domínio do tempo [32]**

Racic et al. [33] realizaram neste estudo uma investigação analítica e experimental da resposta estrutural dinâmica de uma plataforma submetida à saltos humanos rítmicos com base na frequência de excitação de 2 Hz. Os testes foram conduzidos em ambiente laboratorial e a componente de força foi monitorada utilizando uma placa de força. Deste modo, a Figura 13 apresenta detalhes do experimento juntamente com os resultados da componente de força em função do tempo. Cabe ressaltar que para garantir a representatividade da amostragem, os resultados foram calibrados utilizando a distribuição normal através do ajuste da curva de Gauss, permitindo uma análise precisa e confiável da componente de força ao longo do tempo.



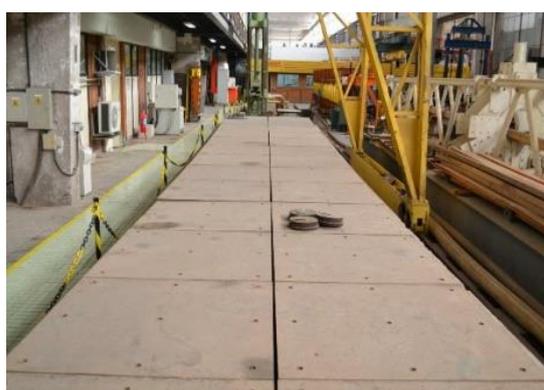
a) Saltos sobre à plataforma



**Figura 13 - Testes experimentais de medição de força [33]**

Vega et al. [34] realizaram um estudo investigando a interação dinâmica pessoa-estrutura de piso de concreto, com base no emprego de modelagem numérica e testes experimentais com indivíduos de massa corporal variando entre 55 e 85 kg. Assim sendo, o objetivo do estudo concentrou-se em avaliar as modificações dos parâmetros modais da plataforma submetida às ações humanas rítmicas, levando em consideração diferentes estratégias com diferentes grupos de participantes. Assim sendo, a Figura 14 ilustra um dos experimentos realizados com um grupo de seis pessoas, para esse exemplo em questão um participante realizava saltos enquanto os demais permaneciam parados.

Com base nos resultados obtidos na pesquisa, nota-se que o aumento do número de participantes sobre o piso investigado influencia na redução dos parâmetros modais do piso, como a frequências naturais da estrutura, tanto no modelo numérico quanto no experimental. Além disso, foi observado que a taxa de amortecimento aumenta à medida que o número de pessoas é ampliado. Cabe ressaltar que no contexto deste estudo, essa mesma conclusão encontra-se em concordância com pesquisas desenvolvidas anteriormente (Brownjohn [35]; Falati [36]; Zivanovic et al. [37]; Salyards and Noss [38]; Salyards and Hua [39]), evidenciando assim que a presença de mais indivíduos pode impactar diretamente sobre os parâmetros modais do piso, resultando assim em modificações das frequências naturais e da taxa de amortecimento modal.



a) Vista superior plataforma



b) Teste experimental

**Figura 14 - Monitoração experimental piso de concreto [34]**

Carmona [12] investigou, neste trabalho de pesquisa, os parâmetros modais de um piso que apresenta um sistema de amortecimento AMS (Amortecimento de Massa

Sintonizada) com base na excitação do piso por um grupo de pessoas. A Figura 15 ilustra um dos casos de carregamento investigados no âmbito deste estudo.

Com base na análise dos parâmetros modais do piso para esse caso em questão, nota-se que a frequência fundamental da estrutura, que originalmente era de 3,52 Hz (estrutura vazia), reduziu para 3,32 Hz (carregada com 5 pessoas e com AMS). Contudo, é importante ressaltar que uma redução excessiva na frequência fundamental pode resultar em uma faixa de frequência que coincide com as atividades humanas, o que pode ser indesejável, ou seja, o sistema de amortecimento (AMS) deverá ser implementado, após um estudo específico.



a) Sistema AMS sob a laje

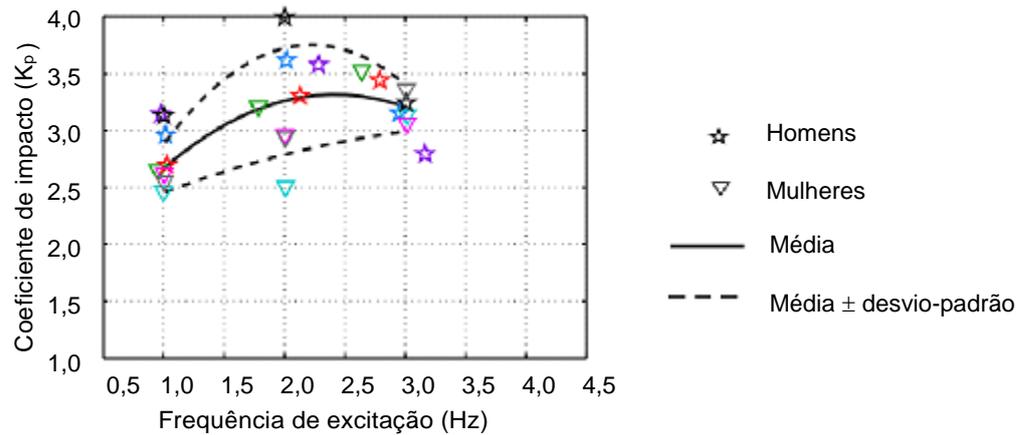


b) Saltos sobre o piso de concreto armado

**Figura 15 - Testes experimentais em grupo [12]**

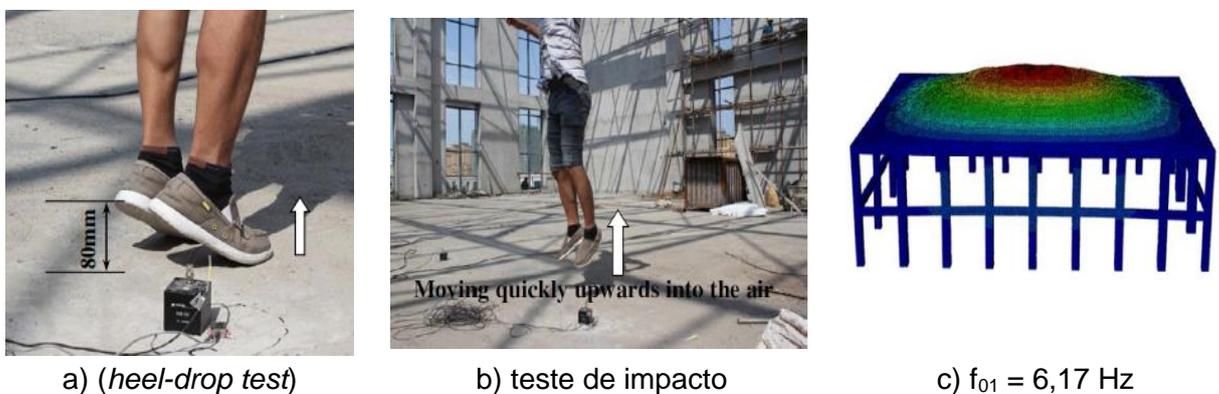
No estudo desenvolvido por McDonald e Živanović [40], foram realizados testes experimentais de laboratório nos quais os participantes realizaram saltos em um piso em diferentes frequências de excitação (1 Hz, 2 Hz e 3 Hz). Neste seguimento, o objetivo da pesquisa concentrava na investigação da relação entre o coeficiente de impacto ( $K_p$ ) e a frequência de excitação, levando em consideração o sexo dos participantes.

Com base nos resultados apresentados na Figura 16, foi observado que o coeficiente de impacto variou de acordo com o sexo e a frequência de excitação. Os coeficientes de impacto mais elevados foram registrados nas frequências em torno de 2 Hz, que eram mais facilmente alcançadas por indivíduos durante os saltos.



**Figura 16 - Coeficientes de impacto x frequência de excitação [40]**

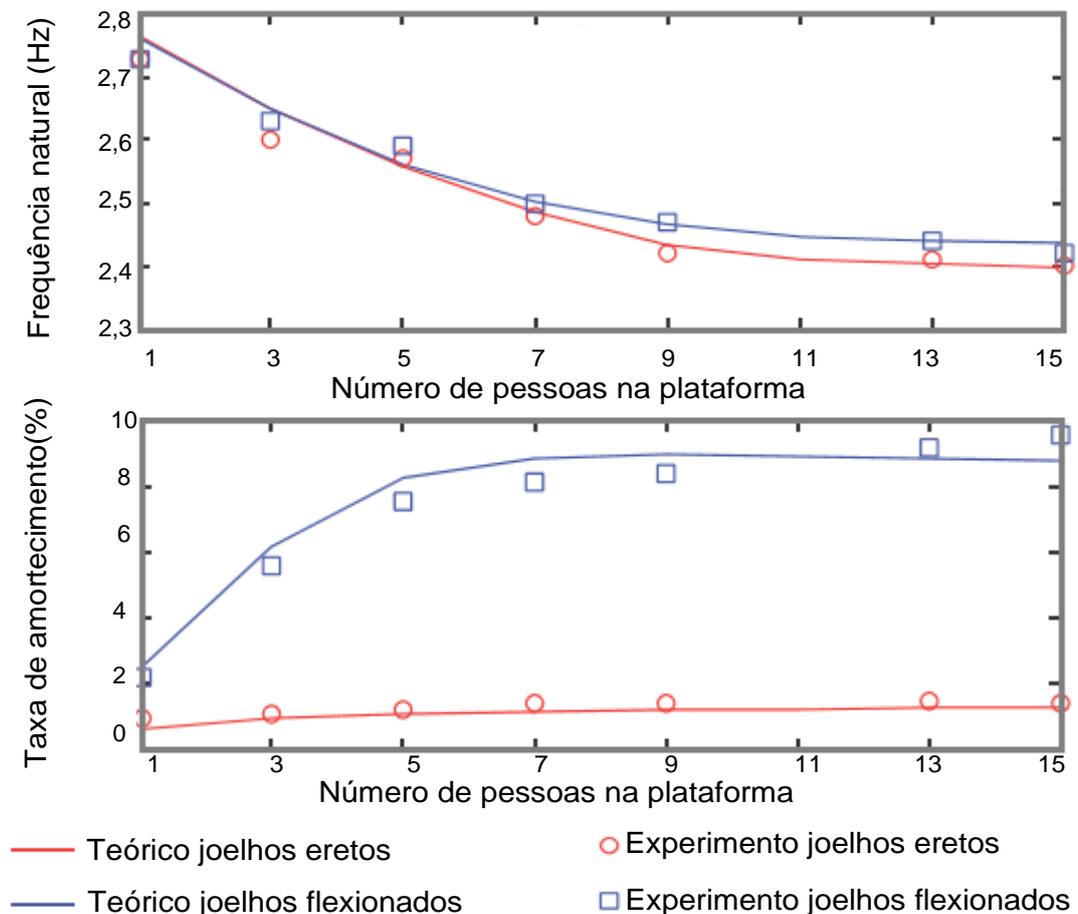
Zhou et al. [41] desenvolveram uma investigação de um piso de concreto protendido utilizando modelagem numérica e experimental, como ilustrado na Figura 17. Os testes experimentais de impacto com o calcanhar (*heel-drop test*) foram utilizados para obter as frequências naturais e os modos de vibração da estrutura. Com base nos resultados experimentais identificou-se a frequência fundamental do piso que equivale a 6,17 Hz, o que está abaixo do limite recomendado para atividades humanas rítmicas. Na sequência, foram realizados testes de monitoração experimental dinâmica sobre o piso (vibração forçada), os resultados da pesquisa indicaram que as respostas dinâmicas na seção do piso com maior amplitude não causariam desconforto ao usuário. Desta forma, os autores concluíram que a norma aplicada apresenta índices conservadores, uma vez que a frequência natural da estrutura é menor do que a exigida para a respectiva atividade humana rítmica.



**Figura 17 - Modelagem experimental e numérica [41]**

Zhou e Li [42] realizaram testes experimentais de impacto de calcanhar (*heel-drop test*) com o propósito de investigar o amortecimento estrutural de um piso de concreto armado. Os resultados da pesquisa indicaram um valor referente ao amortecimento experimental médio obtido corresponde a 1,14%. Contudo, cabe ressaltar que esse valor se encontra abaixo da faixa de amortecimento adequada para estruturas de concreto armado.

He et al. [43] conduziram uma análise teórica e experimental da influência humana sobre os parâmetros modais de uma plataforma (frequência natural e taxa de amortecimento). Assim sendo, foram realizados experimentos com grupos de 1 a 15 pessoas em duas situações: com os joelhos eretos e flexionados, observa-se que, à medida que o número de ocupantes aumenta, a taxa de amortecimento da plataforma tende a estabilizar, enquanto a frequência natural da estrutura diminui, independentemente da posição dos joelhos dos participantes, conforme expressos nos resultados presentes na Figura 18.



**Figura 18 - Comparação entre o teórico e experimental [43]**

Neste contexto, o estudo proposto por He et al. [43] reforça a hipótese que a variação do número de participantes pode impactar sobre os parâmetros modais da plataforma. Com o aumento do número de ocupantes, houve um aumento na interação entre os indivíduos e a estrutura, resultando assim em uma maior dissipação de energia e, conseqüentemente, em uma expansão da taxa de amortecimento da plataforma. Por outro lado, a frequência natural da estrutura foi observada decrescer à medida que se aumentava o número de pessoas na plataforma, evidenciando a influência da massa adicional dos participantes na rigidez global do sistema.

Campista e Silva [44] realizaram uma avaliação do conforto humano em um piso misto de aço e concreto, utilizando abordagens numéricas e experimentais. O objetivo do estudo foi investigar o comportamento estrutural dinâmico da plataforma quando um indivíduo realiza saltos com uma frequência de excitação de 2,2 Hz. Neste sentido, realizaram testes com 32 indivíduos de diferentes biótipos, e a Figura 19 ilustra detalhes a respeito da monitoração dinâmica experimental.

Com base nos resultados da pesquisa ressalta-se que o caso mais crítico em referência ao maior valor de aceleração da plataforma foi observado no participante com massa corporal de 79,8 kg, que apresentou um alto grau de sincronismo em comparação com os demais participantes. Com base nas situações analisadas os resultados experimentais indicaram que as acelerações máximas observadas na plataforma foram inferiores aos limites críticos definidos no critério de projeto AISC ( $<0,5 \text{ m/s}^2$ ), indicando assim que os critérios das normas técnicas podem ser conservadores.



**Figura 19 - Experimento de saltos sobre uma plataforma [44]**

Gaspar [45] realizou uma investigação do comportamento estrutural de plataformas rígidas e flexíveis quando excitadas por ações humanas rítmicas em diferentes frequências de excitação: 1,89 Hz, 2,00 Hz e 2,27 Hz. Foram analisados os

picos de força medidos ( $F_p$ ), e observou-se uma alteração na variável de redução [(rígido - flexível) / rígido] de aproximadamente 28% e 18% nos testes realizados nas frequências de 1,89 Hz e 2,27 Hz, respectivamente, como indicado na Tabela 2.

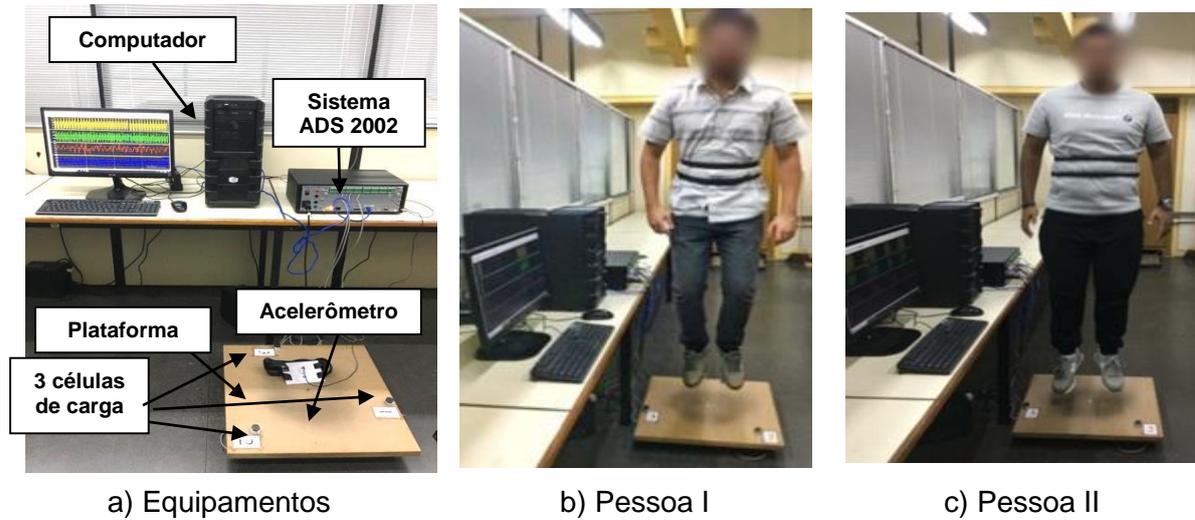
**Tabela 2 - Análise comparativa das forças geradas sobre os pisos [2, 45]**

Atividade rítmica	Piso rígido	Piso flexível	Redução (%) [(rígido - flexível)/rígido]
	Força (N)	Força (N)	
1,89 Hz	$F_p=3258$	$F_p=2348$	28%
	$F_{RMS}=1174$	$F_{RMS}=1011$	14%
2,00 Hz	$F_p=3487$	$F_p=2613$	25%
	$F_{RMS}=1207$	$F_{RMS}=1023$	15%
2,27 Hz	$F_p=3425$	$F_p=2798$	18%
	$F_{RMS}=1231$	$F_{RMS}=1082$	12%

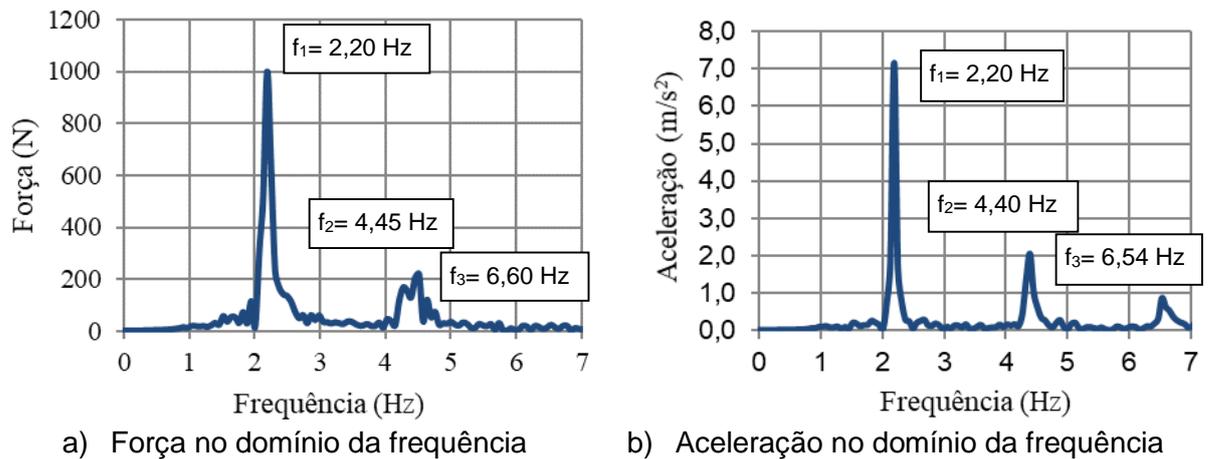
Os resultados mostram que as plataformas flexíveis têm uma maior capacidade de absorver as forças geradas através dos saltos em comparação com as plataformas rígidas. Essa diferença é expressa nos dados apresentados na Tabela 2. Essas conclusões destacam a importância de considerar a flexibilidade do sistema estrutural ao projetar estruturas sujeitas a carregamentos dinâmicos induzidos por atividades humanas. Deste modo, sistemas mais flexíveis podem proporcionar uma melhor dissipação das forças e reduzir o impacto sobre a estrutura.

Campista [46-50] conduziu um estudo com o intuito de investigar a interação dinâmica pessoa-estrutura, com base no uso de uma plataforma. Cabe ressaltar que o foco da pesquisa era investigar o modelo de carga dinâmica capaz de descrever as ações humanas rítmicas sobre os sistemas estruturais. A Figura 20 ilustra um dos experimentos nos quais um indivíduo realiza saltos em uma frequência controlada de 2,2 Hz, monitorada por um metrônomo.

Durante os ensaios, foram feitas medições experimentais das variáveis dinâmicas, como aceleração e força, para cada indivíduo. Os resultados das respostas no domínio da frequência são apresentados na Figura 21, na qual podem ser observados picos de transferência de energia associados à excitação da plataforma na frequência de 2,2 Hz. No âmbito da pesquisa [46-50], foram realizadas medições experimentais das respostas estruturais dinâmicas enquanto quatro indivíduos saltavam sobre a plataforma. Os resultados experimentais obtidos estão apresentados na Tabela 3.



**Figura 20 - Testes experimentais sobre a plataforma MDF [46-50]**



**Figura 21 - Resposta dinâmica do indivíduo saltando sobre a plataforma [46-50]**

**Tabela 3 - Respostas dinâmicas da plataforma para 4 indivíduos [46-50]**

Massa da pessoa (kg)	Força (N)	Aceleração (m/s <sup>2</sup> )	Velocidade (m/s)	Deslocamento (mm)
50,2	850	9,0	0,55	0,030
67,8	1000	9,3	0,56	0,035
82,65	1650	10,0	0,60	0,040
99,35	2000	15,0	0,80	0,050

Ao analisar os resultados presentes na Tabela 3, nota-se existe uma correlação entre a massa do indivíduo e as respostas dinâmicas da plataforma (força, aceleração, velocidade e deslocamento), assim sendo, observa-se um aumento significativo nas seguintes variáveis: a aceleração e o deslocamento aumentaram em 166%, a velocidade aumentou em 145% e a força exercida aumentou em 235% ao comparar os indivíduos de 50,2 kg e 99,35 kg.

Grebowski et al. [51] realizou um estudo sobre as vibrações excessivas na cobertura da arena Swiss Krono, localizada na Polônia. O estudo utilizou uma abordagem combinada de modelagem numérica e experimentos para investigar as vibrações induzidas por atividades humanas rítmicas, especificamente saltos realizados sobre a estrutura da arena esportiva. Assim sendo, foram conduzidos monitoramentos experimentais dinâmicos in loco com grupos de 400 a 450 indivíduos, como ilustrado na Figura 22, com o objetivo de avaliar o comportamento vibratório da estrutura. Os resultados do estudo indicaram que a frequência natural da estrutura medida experimentalmente equivale a 4,68 Hz. Deste modo, ressalta-se que se encontra próximo da frequência de excitação decorrente da carga de multidão, correspondente a 4,4 Hz o que pode ocasionar a incidência do fenômeno de ressonância.



a) Testes experimentais na arquibancada



b) Modelo numérico

**Figura 22 - Arena Swiss Krono [51]**

Ferreira [52] desenvolveu um estudo a respeito do comportamento estrutural dinâmico de um piso em fase de construção, com o objetivo de verificar os parâmetros modais do piso realizou-se testes de saltos sobre a laje de concreto, conforme expresso na Figura 23. Os resultados da pesquisa expressos na Figura 24, refere-se à resposta estrutural do piso decorrente da excitação oriunda do salto.

É importante ressaltar que, foram desenvolvidas neste trabalho uma extensa campanha de testes experimentais de maneira a obter maior confiabilidade dos resultados. Com base nos resultados associados ao amortecimento estrutural experimental nota-se que o mesmo se encontra abaixo do esperado para esse tipo de estrutura. Contudo, como a edificação encontra-se na fase de construção as

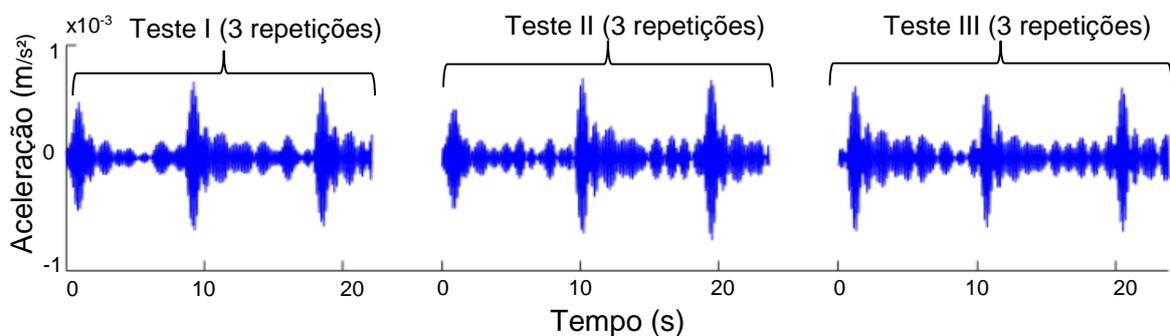
propriedades modais do piso poderão ser alteradas através da implementação de elementos não estruturais.



a) preparação

b) salto

c) aterrissagem

**Figura 23 - Ensaio de vibração livre [52]****Figura 24 - Teste de vibração livre: aceleração no domínio do tempo [52]**

### 1.5 Modelos de carregamento dinâmico desenvolvidos

As normas técnicas e critérios de projeto frequentemente adotam uma abordagem simplificada no desenvolvimento de projetos de engenharia, utilizando modelo de carga equivalente. Neste modelo, o carregamento dinâmico é representado por uma carga estática uniformemente distribuída, que tem o mesmo efeito que a ação humana. Essa simplificação proporciona uma representação mais simples e direta do carregamento dinâmico.

Por outro lado, a abordagem baseada em carga periódica envolve o modelo de carregamento dinâmico que simula as atividades humanas de forma mais realista ao aplicar cargas periodicamente em função do tempo, considerando assim a periodicidade e a variação temporal das ações humanas, permitindo uma análise mais detalhada das respostas estruturais dos pisos.

Neste contexto, ao longo dos anos, foram conduzidos estudos científicos com o objetivo de caracterizar de forma mais precisa as ações humanas sobre os pisos de edifícios. Pesquisadores desenvolveram diferentes modelos de carregamento dinâmico, baseados em formulações matemáticas que consideram parâmetros normalmente obtidos por meio de testes experimentais. Essas pesquisas visam aperfeiçoar a compreensão e a representação das interações dinâmicas entre as pessoas e as estruturas dos pisos de edifícios.

No campo de estudos relacionados à caracterização do carregamento dinâmico em estruturas, destacam-se os principais trabalhos de pesquisa desenvolvidos ao longo dos anos, como os de AISC [3], Faisca [28], Bachmann e Ammann [53], Ellis e Ji [54], ISO 10137 [55], Sim et al. [56], SCI [57] e Martínez et al. [58]. Tais estudos concentram-se na modelagem das ações humanas sobre sistemas estruturais, contribuindo significativamente assim para o avanço das pesquisas relacionadas à análise dinâmica das estruturas.

Diante do exposto, é importante ressaltar que ao longo dos anos outras abordagens de modelos de carregamento dinâmico estão sendo estudadas, que podem ser alternativas aos modelos de carregamento discutidos nesta seção, como a modelagem de sistemas biodinâmicos, que será abordada com mais detalhes no próximo capítulo.

### 1.5.1 Modelos de carregamento equivalente

Os modelos de carregamento equivalente são amplamente utilizados em projetos de engenharia como uma abordagem conveniente e simples para a simulação do carregamento dinâmico por meio do emprego de uma carga estática equivalente. No entanto, é fundamental ressaltar que essa abordagem apresenta simplificações, uma vez que não representa completamente o comportamento dinâmico real da estrutura sob ação humana.

Neste contexto, a norma brasileira NBR 6120 [59] estabelece diretrizes para o dimensionamento de estruturas e recomenda a aplicação de uma carga estática equivalente mínima de 5 kN/m<sup>2</sup> para descrever as ações provenientes de atividades humanas rítmicas, esse carregamento é empregado como uma aproximação

simplificada do carregamento dinâmico, considerando fatores como a frequência e a distribuição de carga esperadas.

Neste sentido, Ellis e Ji [60] propõem uma carga estática de 5 kN/m<sup>2</sup> para representar multidões, o que equivale a aproximadamente 6 pessoas por metro quadrado. É importante ressaltar que essa carga estática equivalente é apenas uma simplificação, pois não considera o comportamento dinâmico real das multidões. Neste contexto, a Tabela 4 apresenta resultados referentes ao carregamento equivalente desenvolvido por diversos pesquisadores, como Moreland [61], Tilden [62], Tuan e Saul [63], Ebrahimpour et al. [64] e Jones et al. [65].

**Tabela 4 - Carga estática equivalente de carregamentos dinâmicos**

Modelo	Moreland [61]	Tilden [62]	Tuan e Saul [63]	Ebrahimpour et al. [64]	Jones et al. [65]
Carregamento observado	1,13	2,04	-	2,85	0,75
Carregamento estático equivalente	3,23	5,83	4,50	8,14	2,15
Frequência (Hz)	-	-	2,20	4,00	-
Tipo de atividade	salto	" <i>bouncing</i> "	salto rítmico	salto periódico	estática

É importante ressaltar que a utilização da carga estática equivalente ainda é comum devido à sua simplicidade e praticidade, especialmente em situações onde não é viável ou necessário realizar uma análise mais detalhada do carregamento dinâmico. Cabe ao engenheiro responsável considerar as limitações e escolher a abordagem mais adequada de acordo com as características do projeto e os requisitos de desempenho da estrutura.

#### 1.5.2 Modelos de carregamento periódico

O modelo de carregamento dinâmico humano do tipo periódico consiste em um modelo empregado para representar as cargas dinâmicas geradas através dos movimentos periódicos do ser humano sobre os sistemas estruturais, como caminhar, correr, saltar ou outros tipos de atividades rítmicas. Neste sentido, o modelo considera

na modelagem que essas atividades podem ser representadas por uma série de impulsos ou forças periódicas aplicadas sobre a estrutura.

Cabe destacar que funções matemáticas propostas através dos modelos são desenvolvidas com base em estudos e medições experimentais que buscam compreender e quantificar as características dinâmicas das ações humanas. Geralmente, o modelo considera em sua formulação as seguintes variáveis, a frequência de excitação, a amplitude e a duração dos impulsos gerados pelos movimentos humanos, bem como os efeitos dinâmicos resultantes na estrutura.

Ao aplicar um modelo de carregamento dinâmico humano do tipo periódico, é possível analisar os efeitos dinâmicos nas estruturas, como vibrações, ressonâncias e redistribuição de esforços. Desta forma, tal entendimento é importante para análise e dimensionamento de estruturas de maneira mais adequada, garantindo a segurança, a durabilidade e o conforto das edificações ou outras estruturas sujeitas a ações humanas periódicas.

#### 1.5.2.1 Modelo de carregamento proposto por Faisca [28]

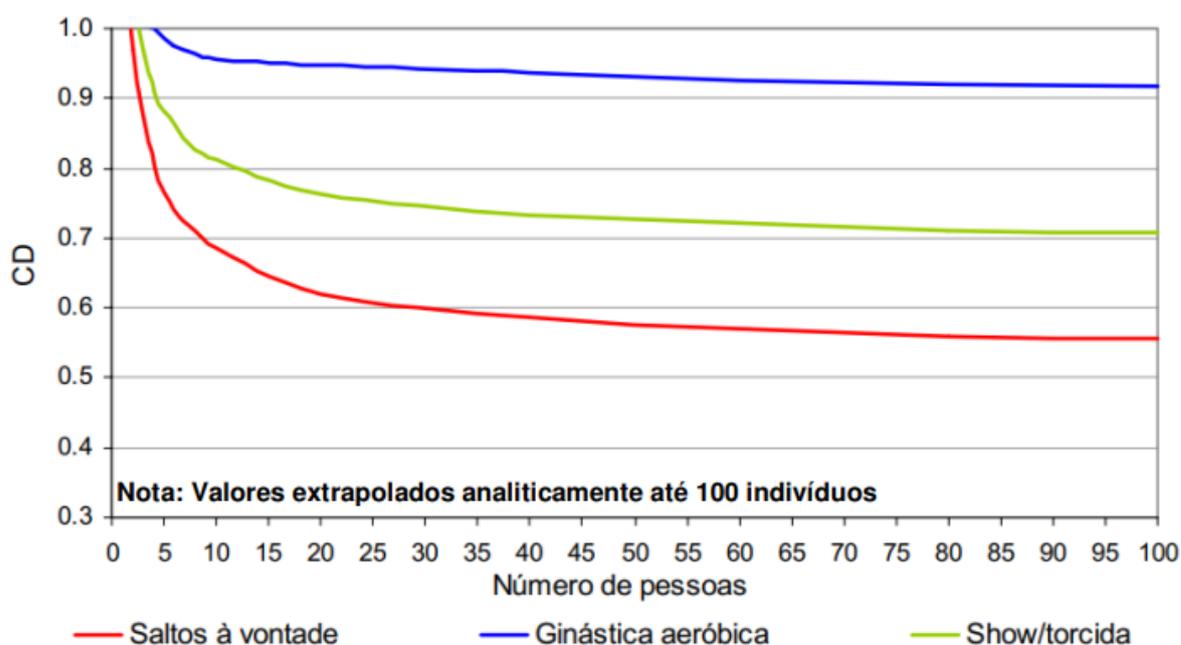
O modelo de carregamento proposto por Faisca [28] corresponde a uma abordagem que se baseia na caracterização do carregamento dinâmico por meio de uma função matemática formulada com base em testes de monitoração experimental dinâmica realizados sobre um piso. Com o objetivo de representar o carregamento dinâmico humano em diferentes situações, o modelo utiliza como base a função matemática de Hanning, que é expressa pela Equação 1.

$$F(t) = CD \left\{ K_p P \left[ 0.5 - 0.5 \cos \left( \frac{2\pi}{T_c} t \right) \right] \right\} \therefore t \leq T_c \therefore F(t) = 0 \therefore T_c \leq t \leq T \quad (1)$$

Onde: F(t): força representativa da atividade humana ao longo do 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).

Cabe ressaltar que os parâmetros do modelo foram obtidos mediante testes experimentais envolvendo diferentes grupos de indivíduos, com um, dois, seis, dez, dezesseis e vinte participantes, que realizaram atividades de salto em diferentes frequências de excitação, incluindo 1,5 Hz, 2,0 Hz, 2,5 Hz e 3,0 Hz. Durante os testes, foram investigadas ações humanas como ginástica aeróbica, saltos livres e vibrações

causadas por torcidas de futebol. No entanto, é importante mencionar que os testes realizados com a frequência de 1,5 Hz foram descartados devido à dificuldade de execução pelos participantes. No que diz respeito ao coeficiente de defasagem (CD), vale ressaltar que esse parâmetro pode ser modificado em função das propriedades modais do sistema estrutura, especialmente quando as frequências de excitação se aproximam da frequência natural da estrutura [28]. Deste modo, em situações de ressonância ou quase-ressonância, a proximidade entre as frequências torna mais desafiador para os indivíduos estarem sincronizados tanto em relação ao movimento da estrutura quanto entre si, resultando em uma redução desse coeficiente. Além disso, o CD é influenciado com base no número de pessoas envolvidas e tipo de atividade, conforme ilustrado na Figura 25.



**Figura 25 - CD ações humanas rítmicas em função do número de pessoas [28]**

Neste contexto, a Tabela 5 apresenta os parâmetros empregados nas situações investigadas no trabalho de pesquisa [28], abrangendo assim os valores referentes aos parâmetros analíticos associados ao período da atividade, período de contato e coeficiente de impacto ajustados através da função matemática Hanning, considerando uma variedade de tipos de atividades rítmicas. Cabe ressaltar que os parâmetros obtidos experimentalmente são empregados na caracterização do carregamento dinâmico e fornecem informações sobre as características para diferentes atividades, permitindo assim uma análise adequada do comportamento

estrutural frente a essas ações humanas rítmicas executadas sobre o sistema estrutural.

**Tabela 5 - Parâmetros analíticos desenvolvidos por Faisca [28]**

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

#### 1.5.2.2 Modelo de carregamento proposto por SCI [57]

O modelo de carregamento dinâmico proposto por Ellis e Ji [60], conforme citação presente no guia de projeto SCI [57], corresponde a um modelo tradicional amplamente utilizado na simulação do carregamento dinâmico em referência a análise do carregamento de multidões em sistemas estruturais. A determinação dos parâmetros desse modelo de carregamento dinâmico foi realizada por meio de testes experimentais envolvendo grupos de até sessenta e quatro pessoas.

Através da análise dos dados experimentais coletados, os parâmetros da função matemática apresentada na Equação 2 foram obtidos para representar o carregamento dinâmico induzido através das ações humanas sobre o piso. Essa formulação matemática foi desenvolvida com base em uma análise detalhada dos dados experimentais e contribui para uma melhor compreensão do impacto das atividades humanas na resposta dinâmica da estrutura em estudo.

$$F(t) = G + \sum_{n=1}^{\infty} Gr_{n,p} \sin(2n\pi f_p t + \varphi_n) \quad (2)$$

Onde: F(t): força representativa da atividade humana ao longo do tempo (N); G: peso de uma pessoa (N); r<sub>n,p</sub>: coeficientes da série de Fourier induzida por p pessoas; n: número de termos de Fourier; φ<sub>n</sub>: diferença de fase T: período da atividade em (s); f<sub>p</sub>: frequência do carregamento; t: tempo em (s);

Vale ressaltar que o modelo emprega no contexto da análise variáveis relacionadas aos primeiros três termos da série de Fourier, os quais foram

desenvolvidos com base em estudos de pesquisa anteriores (Ellis e Ji, [60]; Smith, A.L. et al. [57]). Deste modo, as Equações 3 a 5 representam os respectivos parâmetros.

$$r_{1,p} = 1,61p^{-0,082} \quad (3)$$

$$r_{2,p} = 0,94p^{-0,24} \quad (4)$$

$$r_{3,p} = 0,44p^{-0,31} \quad (5)$$

Onde: p: corresponde ao número de indivíduos sobre o piso;  $r_{n,p}$ : coeficientes da série de Fourier induzida por p pessoas. Além disso, as diferenças de fase entre as atividades foram determinadas por meio de testes experimentais que estabeleceram uma relação entre o período de contato da atividade e o tempo de execução. Os valores dos coeficientes de Fourier e os ângulos de fase correspondentes a diferentes atividades humanas rítmicas estão apresentados na Tabela 6.

**Tabela 6 - Coeficientes de Fourier e ângulos de fase [57, 60]**

Termos da série de Fourier normalizada	Aeróbica de baixo impacto ( $\alpha=2/3$ )		Aeróbica de alto impacto ( $\alpha=1/2$ )		Salto normal ( $\alpha=1/3$ )	
	$r_p$	$\varphi_i$	$r_p$	$\varphi_i$	$r_p$	$\varphi_i$
1	9/7	$-\pi/6$	$\pi/2$	0	9/5	$\pi/6$
2	9/55	$-5\pi/6$	2/3	$-\pi/2$	9/7	$-\pi/6$
3	2/15	$-\pi/2$	0	0	2/3	$-\pi/2$
4	9/247	$-\pi/6$	2/15	$-\pi/2$	9/55	$-5\pi/6$
5	9/391	$-5\pi/6$	0	0	9/91	$-\pi/6$
6	2/63	$-\pi/2$	2/35	$-\pi/2$	2/15	$-\pi/2$

A norma ISO 10137 [55] adota a mesma função de carregamento dinâmico descrita no SCI [57] (Equação 2). No entanto, uma diferença importante é a consideração de ângulos de fase iguais a zero. A norma estabelece diretrizes específicas para a determinação dos coeficientes de Fourier relacionados aos três primeiros harmônicos, levando em consideração a frequência da atividade em análise. Os coeficientes são calculados de acordo com as Equações 6, 7 e 8, respectivamente. A norma ISO 10137 [55] fornece orientações detalhadas sobre como obter esses coeficientes, considerando a frequência da atividade específica.

$$r_{1,v} = 2,1 - 0,15(f_p) \quad (6)$$

$$r_{2,v} = 1,9 - 0,17(2f_p) \quad (7)$$

$$r_{3,v} = 1,25 - 0,13(3f_p) \quad (8)$$

Conforme evidenciado por estudos de pesquisa recentes (Gaspar e Silva [66]; Sousa [67] e Richter [68], Silva et al. [69], Branco et al. [70] e Almeida et al. [71] ), foi observado que as respostas estruturais dinâmicas dos pisos submetidos ao mesmo estado de carregamento dinâmico geradas no emprego do modelo SCI [57] foram superiores as obtidas através do modelo proposto por FAISCA [28]. Essa constatação sugere que os resultados obtidos mediante emprego do modelo SCI [57] tendem a ser mais conservadores.

#### 1.5.2.3 Modelo de carregamento proposto por AISC [3]

O modelo de carregamento dinâmico proposto presente no guia de projeto AISC [3] considera o efeito dos harmônicos nas ações dinâmicas humanas exercidas sobre o piso. Na equação matemática, são considerados coeficientes dinâmicos para cada harmônico, juntamente com suas respectivas frequências de excitação, como mostrado na Equação 9.

$$F(t) = Q + \sum_{i=1}^N \alpha_i Q \cos(2\pi i f_p t + \phi_n) \quad (9)$$

Onde,  $F(t)$ : força representativa da atividade humana ao longo do tempo (N);  $Q$ : peso da pessoa em (N);  $f_p$ : frequência de excitação em (Hz);  $t$ : tempo em (s);  $i$ : número harmônico;  $\alpha_i$ : Coeficiente dinâmico;  $\phi_n$ : diferença de fase;  $N$ : número de harmônicos considerados.

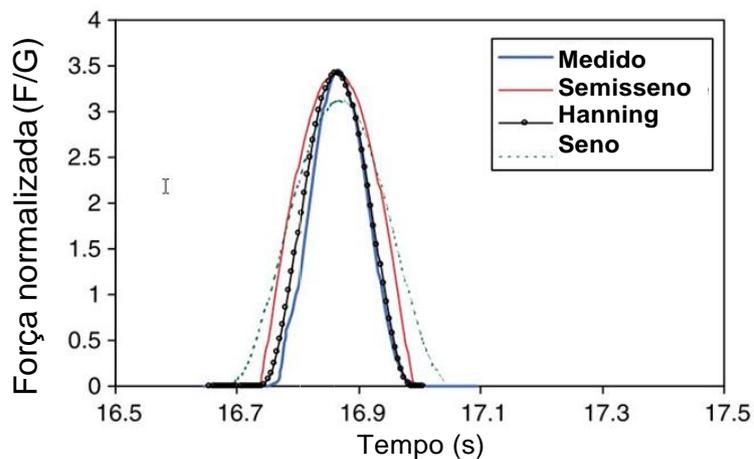
#### 1.5.2.4 Modelo de carregamento proposto: Caetano et al. [73] e Agu [74]

Em continuidade, o modelo de carregamento dinâmico proposto por Arrillaga e Watson [72] utiliza a função cosseno ao quadrado ( $\cos^2$ ), também conhecida como função Hanning, com a finalidade de analisar as ações geradas por saltos rítmicos. Essa função matemática, expressa na Equação 10, demonstra um bom ajuste à forma do sinal experimental produzido por tais saltos, conforme evidenciado em estudos realizados por Caetano et al. [73], Faisca [28] e Sim et al. [56].

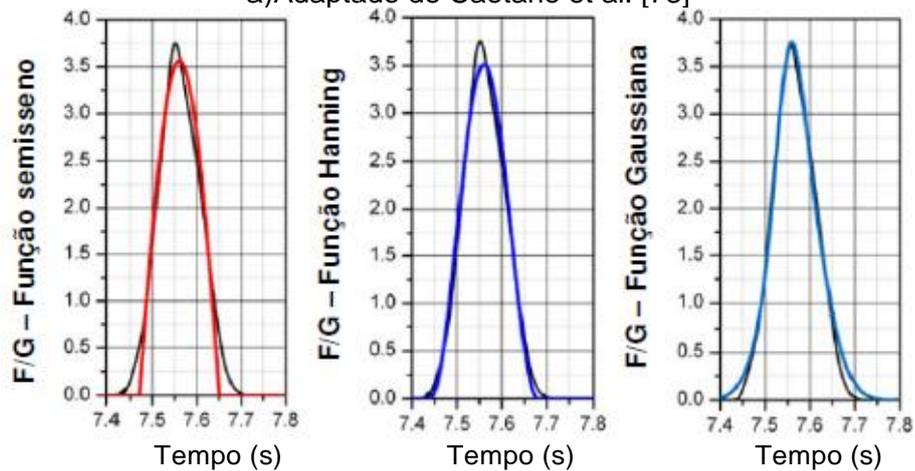
$$F(t) = K_p G \cos^2\left(\frac{\pi}{t_c}\right) \quad \forall \quad -T_c/2 \leq T_c/2 \quad (10)$$

$$K_p = \frac{2}{T_c} = \frac{2}{T}$$

De acordo com Caetano et al. [73], adaptado por Agu [74], o uso de duas funções gaussianas proporciona uma representação mais precisa do valor máximo referente ao coeficiente de impacto quando comparado às funções semisseno e Hanning. A distribuição normal, devido às suas propriedades matemáticas, é amplamente empregada na estatística para a análise de carga dinâmica exercida por seres humanos sobre estruturas. No entanto, é importante destacar que a distribuição normal tende a superestimar o período de contato. Por outro lado, a função semisseno pode subestimar esse valor, como evidenciado na Figura 26. Portanto, é necessário considerar cuidadosamente a escolha da função que melhor se ajusta aos dados experimentais e às características específicas do carregamento dinâmico.



a) Adaptado de Caetano et al. [73]

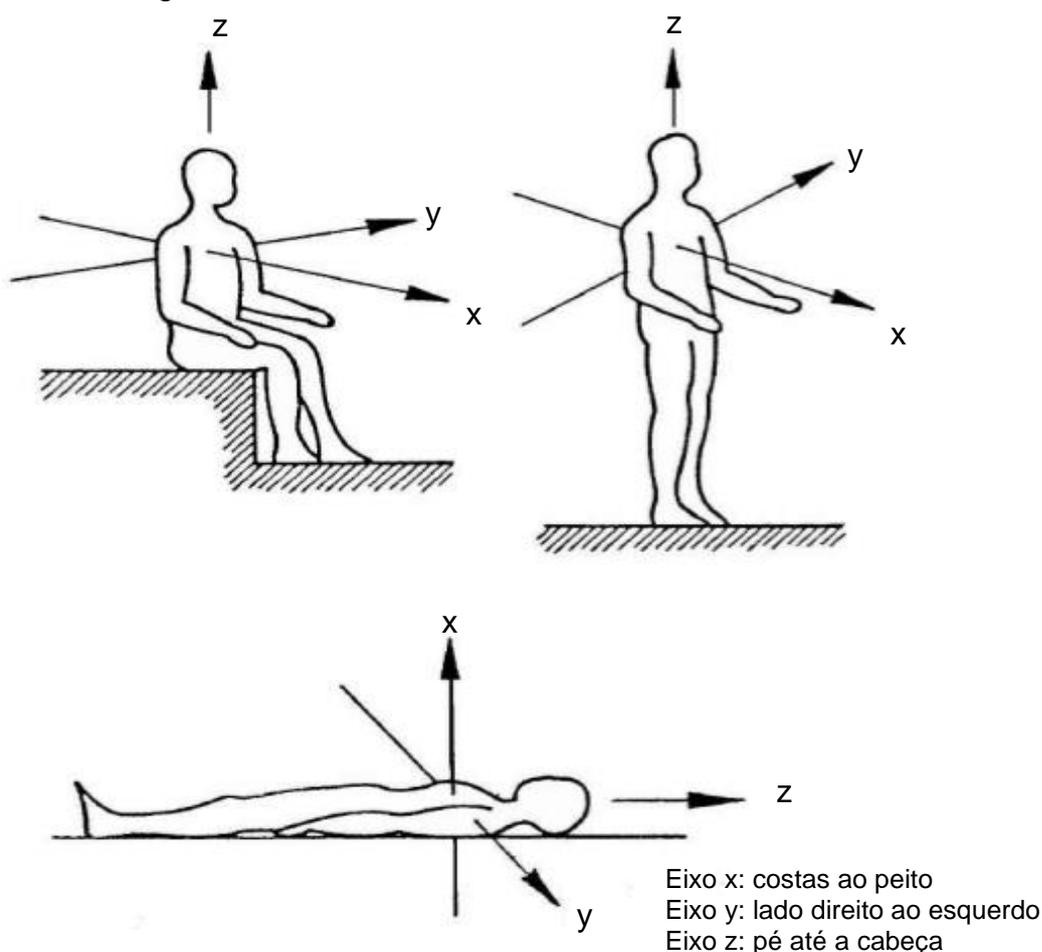


b) Adaptado de Agu [74]

**Figura 26 - Análise de carregamento dinâmico (saltos) via distribuição normal**

## 1.6 Critérios de projeto para avaliação do conforto humano

No contexto da análise dinâmica de estruturas, normas, guias de projeto e pesquisas desempenham um papel essencial ao fornecer os parâmetros necessários para garantir o conforto humano dos usuários das edificações. Essas referências estabelecem premissas e critérios de projeto a serem seguidos na análise das respostas dinâmicas das estruturas quando submetidas a diferentes ações humanas. Cabe ressaltar que os critérios de projeto se concentram na avaliação dos parâmetros empregados nas análises de vibração livre e forçada, como a frequência natural mínima exigida e os deslocamentos máximos permitidos. De acordo com a definição da ISO 2631 [75, 76], os eixos de percepção das vibrações estão associados aos três eixos do corpo humano. Os eixos x e y estão relacionados à mobilidade do tronco e dos membros superiores, enquanto o eixo z está alinhado com a coluna vertebral, conforme ilustrado na Figura 27.



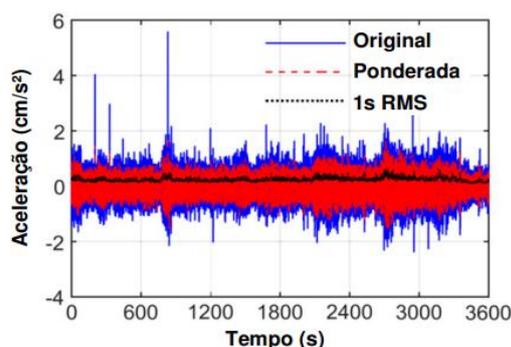
**Figura 27 - Sistema de coordenadas: vibrações em seres humanos [75, 76]**

Ao analisar a Figura 27, é importante destacar que o corpo humano apresenta faixas de frequência mais sensíveis em termos de conforto humano. No eixo z, essa faixa está entre 4 e 8 Hz, enquanto nos eixos x e y é inferior a 2 Hz. Neste sentido, as regiões transversais do corpo humano são mais sensíveis às vibrações do que as regiões longitudinais, exceto quando as frequências são superiores a 2,8 Hz. Deste modo, destaca-se que o aumento no tempo de contato tende a aumentar a tolerância do indivíduo às vibrações.

### 1.6.1 Critérios estabelecidos pela norma técnica: ISO 10137 [55]

A norma ISO 10137 [55] é aplicada com o objetivo de analisar vibrações em edifícios e passarelas com base nas respostas dinâmicas. Neste contexto de avaliação, são empregadas variáveis relacionadas ao biótipo do indivíduo, o tempo de execução da atividade, o tipo de ação humana e os níveis de vibração aceitáveis para o conforto humano. Deste modo, é importante ressaltar que a norma classifica as vibrações em contínuas, intermitentes e ocasionais, cada uma com características específicas. Essa norma fornece diretrizes para a avaliação e controle das vibrações, visando garantir a segurança e o conforto das pessoas nas estruturas analisadas.

A Figura 28 apresenta um exemplo de aplicação que compara os sinais de aceleração do piso no domínio do tempo [45]. Nessa análise, foram utilizadas comparações entre os valores de aceleração RMS e os picos de aceleração, os resultados indicam que quando a relação entre a aceleração de pico e a aceleração RMS é superior a seis, ocorre uma violação dos limites de conforto humano estabelecidos pela norma ISO 10137 [55].



**Figura 28 - Comparação entre aceleração: original, ponderada e RMS [77]**

### 1.6.2 Critérios estabelecidos pela norma técnica: BS 6472-1 [78]

A norma BS 6472-1 [78] foi desenvolvida com o objetivo de avaliar o conforto humano em estruturas sujeitas a vibrações causadas por ações humanas. Para essa avaliação, são utilizados parâmetros os valores de dose de vibração (VDV) como critérios de análise, a fim de obter uma avaliação do conforto humano. Vale ressaltar que tais parâmetros levam em consideração o tipo de vibração (contínua, intermitente, ocasional e impulsiva) e os respectivos períodos de atuação em relação à aceleração e ao tempo.

No que diz respeito às ações dinâmicas sobre os sistemas estruturais, estas são cargas intermitentes, ou seja, não ocorrem de forma contínua. Neste contexto de análise, o parâmetro VDV se torna mais adequado. Tais valores representam uma medida cumulativa das respostas dinâmicas ao longo do tempo, possibilitando uma análise mais precisa das vibrações presentes na estrutura. Essa abordagem é respaldada por estudos realizados por Margarido [79], Griffin [80] e Junior [81], os quais demonstraram a aplicabilidade do VDV na avaliação do conforto humano em situações de vibrações intermitentes.

### 1.6.3 Critérios estabelecidos pela norma técnica: NBR 8800 [82]

As principais causas de vibrações excessivas induzidas por ações humanas em estruturas de edifícios podem estar relacionadas aos parâmetros modais da estrutura. Neste contexto, a norma técnica NBR 8800 [82] define critérios de projeto com base na mínima frequência natural da estrutura e os limites máximos de deslocamento.

Assim sendo, estabelece que em ambientes residenciais e de escritórios, onde ocorre caminhada humana, a frequência natural da estrutura não deve ser inferior a 4 Hz, e o deslocamento vertical máximo permitido sobre o piso deve ser inferior a 20 mm, conforme especificado na seção L3.2 da norma.

Porém, em locais destinados a práticas de atividades humanas rítmicas, como saltos ou danças em ginásios, academias e estádios esportivos, a seção L3.3 recomenda que a primeira frequência fundamental da estrutura não seja inferior a 6 Hz. No caso de atividades com muitas repetições, como ginástica rítmica, a frequência

mínima da estrutura não pode ser inferior a 8 Hz. Além disso, os limites toleráveis de deslocamento vertical para os sistemas estruturais, devem ser até 9 mm para atividades sem repetições e 5 mm para atividades com repetições. É importante ressaltar que tais critérios são simplificados e que, para uma análise dinâmica mais precisa, o projetista deve considerar outras premissas relevantes.

Entre essas premissas, estão a definição dos tipos de ações dinâmicas humanas presentes na estrutura, o uso e ocupação específicos da edificação, a frequência natural da estrutura, a taxa de amortecimento estrutural, o peso efetivo do piso e os critérios de avaliação do conforto humano. Esses fatores adicionais podem influenciar as respostas dinâmicas da estrutura e devem ser considerados em conjunto com os critérios estabelecidos pela norma, a fim de garantir uma análise mais precisa e adequada.

#### 1.6.4 Critérios estabelecidos pelo guia de projeto: SCI [57]

O guia de projeto SCI [57] oferece recomendações para o projeto de pisos de edifícios, especificando uma frequência mínima de 8,4 Hz na direção vertical e pelo menos 4 Hz na direção horizontal. Além disso, a avaliação do comportamento dinâmico é realizada utilizando a aceleração RMS, que mede os valores médios de aceleração em função do tempo. No entanto, nos casos de vibrações intermitentes, o guia recomenda a análise utilizando os valores de dose de vibração.

No que diz respeito ao conforto humano resultante de atividades humanas rítmicas em pisos, o guia não estabelece um consenso sobre os valores limite de aceleração de pico. Em vez disso, sugere-se seguir as diretrizes do guia de projeto AISC [3] para determinar os critérios apropriados em cada caso. Esta abordagem leva em consideração os fatores específicos relacionados às atividades humanas rítmicas e fornece orientações mais detalhadas para garantir o conforto e a segurança dos usuários dos pisos.

#### 1.6.5 Critérios estabelecidos pela norma técnica: NBR 6118 [83]

A ABNT NBR 6118 [83] estabelece critérios para a análise de estados limites últimos e de serviço em estruturas de concreto simples, armado e protendido. No

contexto da análise de estados limites de serviço, as estruturas são dimensionadas considerando o regime linear elástico, visando controlar as vibrações excessivas sobre os sistemas estruturais. No entanto, é importante ressaltar que a norma simplifica a análise dinâmica ao estabelecer valores mínimos de frequências naturais que a estrutura deve apresentar, levando em consideração as atividades desenvolvidas sobre o piso. Tais valores são expressos em relação à frequência crítica ( $f_c$ ) da atividade realizada sobre o piso, como estabelecido na Equação 11.

$$f_n \geq 1,2 f_c \quad (11)$$

#### 1.6.6 Critérios estabelecidos pelo guia de projeto: AISC [3]

No estudo realizado por Murray et al. [3], são estabelecidos critérios de projeto para a avaliação do comportamento dinâmico de estruturas de pisos e passarelas, visando garantir o conforto dos usuários. Neste contexto, é recomendado um valor mínimo para a frequência natural da estrutura, determinado com base no emprego da Equação 12.

$$f_n \geq f \cdot \sqrt{1 + \frac{k}{(a_o / g)} \cdot \frac{\alpha_i w_p}{w_t}} \quad (12)$$

Onde:  $f_n$ : frequência natural mínima da estrutura (flexão);  $f$ : representa a frequência da atividade ( $f = f_p \cdot i$ );  $f_p$ : frequência de passo;  $i$ : número do harmônico 1, 2 ou 3;  $k$ : constante referente à atividade desenvolvida (1,3 para dança; 1,7 para musical ou evento esportivo e 2,0 para atividades aeróbicas);  $a_o/g$ : razão que estabelece o limite da aceleração da atividade e a gravidade;  $\alpha_i$ : coeficientes dinâmicos definidos em função da atividade;  $w_p$ : peso ou par do indivíduo multiplicado com a respectiva área de contribuição;  $w_t$  peso total do sistema estrutural;

O guia de projeto AISC [3] apresenta equações e critérios para determinar os picos de aceleração em estruturas sujeitas a atividades humanas rítmicas, visando avaliar o conforto humano. Com base em análises analíticas, é possível estimar os picos de aceleração experimentados pelos usuários da estrutura. O pico de aceleração é calculado utilizando a Equação 13. Além disso, quando ocorrem múltiplos harmônicos, é possível combinar os efeitos desses harmônicos utilizando a série de power-rule (Allen [84]), conforme expresso na Equação 14.

$$\frac{a_{p,i}}{g} = \frac{1,3\alpha_i w_p/w_t}{\sqrt{\left(\left(\frac{f_n}{if_p}\right)^2 - 1\right)^2 + \left(\frac{2\xi f_n}{if_p}\right)^2}} \quad (13)$$

$$\frac{a_p}{g} = \frac{[\sum 1,3a_{p,i}^{1,5}]^{1/1,5}}{g} \leq a_0/g \quad (14)$$

Onde:  $f_n$ : frequência natural;  $i$ : número do harmônico 1, 2 ou 3;  $f_p$ : frequência de passo;  $\xi$ : amortecimento;  $a_0/g$ : razão que estabelece o limite da aceleração;  $\alpha_i$ : coeficientes dinâmicos;  $w_p$ : peso ou par do indivíduo multiplicado com a respectiva área de contribuição;  $w_t$  peso total do sistema estrutural;

Diante do exposto, a Figura 29 apresenta os limites de respostas dinâmicas toleráveis em diferentes ambientes, estabelecidos com o objetivo de garantir o conforto dos usuários das estruturas. Observa-se que para atividades humanas rítmicas em ambientes residenciais ou de escritório, recomenda-se limites de aceleração de [0,5g%]. Para ambientes com áreas destinadas a refeições, os limites variam de [1,5 a 2,5g%], enquanto em academias de ginástica com atividades rítmicas, os limites recomendados estão entre [4,0 a 7,0g%].

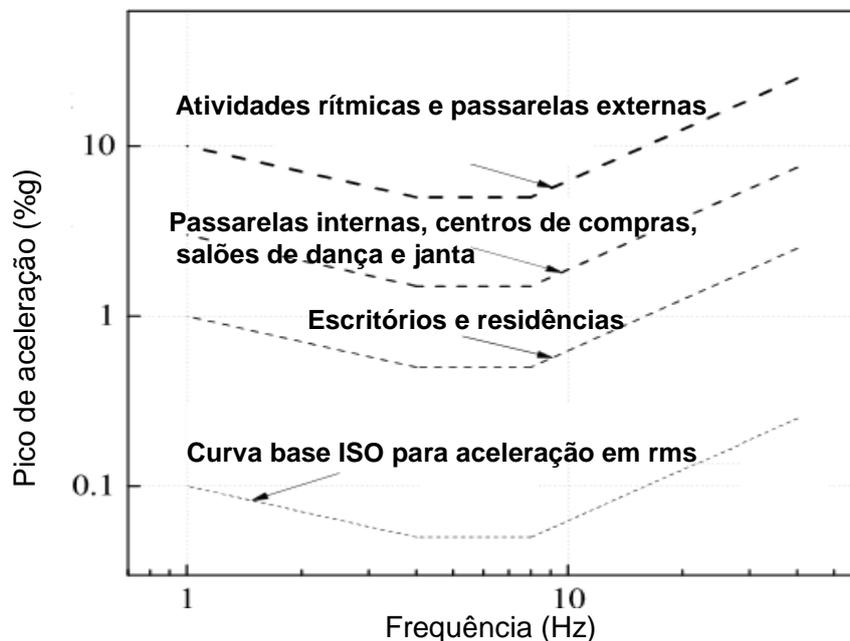


Figura 29 - Limites toleráveis de aceleração em diferentes ambientes [3]

## 2 MODELAGEM DE SISTEMAS BIODINÂMICOS

### 2.1 Considerações iniciais

O objetivo deste capítulo consiste em avaliar os efeitos da interação dinâmica pessoa-estrutura, utilizando sistemas biodinâmicos como uma metodologia de análise alternativa aos modelos tradicionais de carregamento dinâmico ("força-dura"), empregados para representar as ações humanas sobre os pisos de edifícios. Para tal, propõe-se o desenvolvimento de modelos biodinâmicos com base na realização de uma bateria de testes experimentais em laboratório, visando determinar as características dinâmicas das pessoas como massa, amortecimento e rigidez. Neste contexto, são aplicadas formulações matemáticas fundamentadas na equação clássica de equilíbrio dinâmico, e posteriormente, é resolvido um problema de otimização para obter os respectivos parâmetros do método.

Deste modo, com base no emprego de sistemas biodinâmicos, busca-se representar as ações humanas rítmicas de maneira mais realista sobre os pisos de edifícios, pois esse modelo matemático implementa na formulação variáveis relacionadas às propriedades dinâmicas dos indivíduos, o que pode permitir a representação das ações humanas sobre as edificações de forma mais fidedigna.

### 2.2 Aplicações dos modelos biodinâmicos

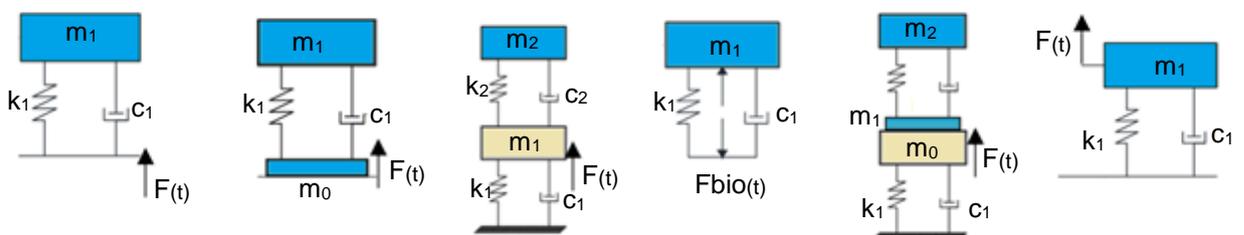
Os sistemas biodinâmicos apresentam uma série de aplicações na engenharia civil, incluindo a representação das ações humanas sobre os sistemas estruturais com a finalidade de investigar os efeitos da interação dinâmica pessoa-estrutura. Neste sentido, o emprego do método com o intuito de modelar e representar o ser humano abrange diversas situações tais como: estática vertical, corrida, caminhada e salto, considerando as características específicas de cada atividade, conforme demonstrado nos estudos científicos realizados ao longo dos anos (Farley e González [85], Yu [86], Silva e Pimentel [87], Gaspar et al. [88], Arampatzis [89], Pfeil et. al [90], Aguiar et al.

[91], Debona e Silva [92], Liang e Chiang [93], Campista [95]). Tais estudos indicam que a modelagem biodinâmica oferece uma descrição mais realista do indivíduo, contribuindo assim para uma melhor compreensão dos efeitos das ações humanas sobre a resposta estrutural. Portanto, esse método pode ser uma alternativa aos modelos tradicionais de carregamento dinâmico (“força-dura”) presentes na literatura. Assim sendo, a Tabela 7 apresenta exemplos de pesquisas científicas desenvolvidas ao longo dos anos relacionados ao emprego de sistemas biodinâmicos com o intuito de representar as ações humanas em diferentes situações.

**Tabela 7 - Modelagem do ser humano com base nos sistemas biodinâmicos**

Em pé ou sentada	Coermann [96]; ISO 5982 [97]; Foschi et al. [98]; Al-foqaha'a [99]; Brownjohn [35]; Falati [36]; Zhang et al. [100]; Brownjohn e Zhang [101]; Matsumoto e Griffin [102]; Saches et al. [103]; Setareh e Gan [104]
Correndo	Farley e Gonzales [85]; Ferris et al. [105], Nigg e Liu [106], Arampatzis [89]
Caminhando	Miyamori et al. [107]; Archbold [108]; Martin e Kim [109]; Aguiar et al. [91]; Silva e Pimentel [87]; Caprani et al. [110]; Qin et al. [111]; Jiménez-Alonso e Sáez [112]; Zhang et al. [77]; Van Nimmen et al. [113]; Lou et al. [114]; Shahabpoor [115]; Gao et al. [116]; Pfeil et al [90]
Saltando	Gaspar [45]; Campista [95]

No âmbito da modelagem de sistemas biodinâmicos, vale destacar que o modelo pode ser representado com “n” graus de liberdade, conforme ilustrado na Figura 30. Basicamente, em sistema simplificado constituído por (massa, amortecimento e rigidez), os parâmetros da modelagem desempenham as seguintes funções: o amortecimento corresponde à energia de dissipação do ser humano, enquanto a rigidez descreve a impedância mecânica do corpo.



**Figura 30 - Composições de modelos biodinâmicos [45]**

Onde “ $m_n$ ”, “ $c_n$ ” e “ $k_n$ ” refere-se aos parâmetros de massa, amortecimento e rigidez, respectivamente; “n” representa a parcela de contribuição do indivíduo;  $F(t)$  e  $F_{bio}(t)$  correspondem a força dura e força biodinâmica, respectivamente.

Cabe ressaltar que a busca por modelos com mais graus de liberdade na representação do ser humano é um desafio complexo nas pesquisas científicas relacionadas à biomecânica e à dinâmica do corpo humano. Nos últimos anos, os estudos têm se dedicado a aprimorar a compreensão desses modelos matemáticos, com o objetivo de criar representações mais precisas e abrangentes das respostas biomecânicas do corpo humano em diversas situações, como caminhada, corrida, movimentos articulares e interações com o ambiente. Neste contexto, essas formulações matemáticas podem fornecer mais detalhes na modelagem do indivíduo, devido à consideração dos efeitos das variáveis do corpo humano, como a distribuição do amortecimento e a variação na rigidez em várias partes do sistema musculoesquelético. No entanto, as pesquisas científicas precisam ser ampliadas com o intuito de avaliar os efeitos de tais parâmetros sobre as interações biomecânicas.

Por outro lado, é importante destacar que pesquisas conduzidas por Ferris et al. [105], Pfeil et al. [90], Campista [95], Toso [117], Vieira [118], Peña [119] e Yu [86], optaram por adotar modelos biodinâmicos mais simplificados em seus trabalhos. Esses modelos consistem em um único grau de liberdade (SGL1) constituído por massa, amortecimento e rigidez, que considera a interação entre massa, amortecimento e rigidez de um sistema.

### 2.3 Formulação matemática

No que se refere à formulação matemática aplicada no desenvolvimento dos sistemas biodinâmicos, destaca-se que as metodologias de análise adotadas no âmbito deste trabalho de pesquisa estão em consonância com os modelos biodinâmicos proposto por Campista [95] e Shahabpoor et al. [115]. Neste sentido, as variáveis do modelo matemático proposto para os sistemas biodinâmicos são determinadas por meio da aplicação da equação de equilíbrio dinâmico, através da resolução de um problema clássico de otimização via método dos Algoritmos Genéticos (AG) (RAO [120]). A seguir, são apresentadas as Equações 15 a 20, que foram empregadas durante o processo de desenvolvimento do modelo biodinâmico. Essas equações representam as variáveis utilizadas no processo de otimização, incluindo a função objetivo a ser minimizada ( $F_{obj}$ ) (Equação 18), a correlação entre

as forças experimentais e as otimizadas matematicamente (Equação 19), a relação entre as forças otimizadas e os parâmetros experimentais (Equação 20).

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

$$k_{ha} = 4\pi^2 f_i^2 m_{ha} \quad (16)$$

$$c_{ha} = 4\pi m_{ha} \xi f_i \quad (17)$$

$$f_{obj} = 1 - (corr\_1)^2 \quad (18)$$

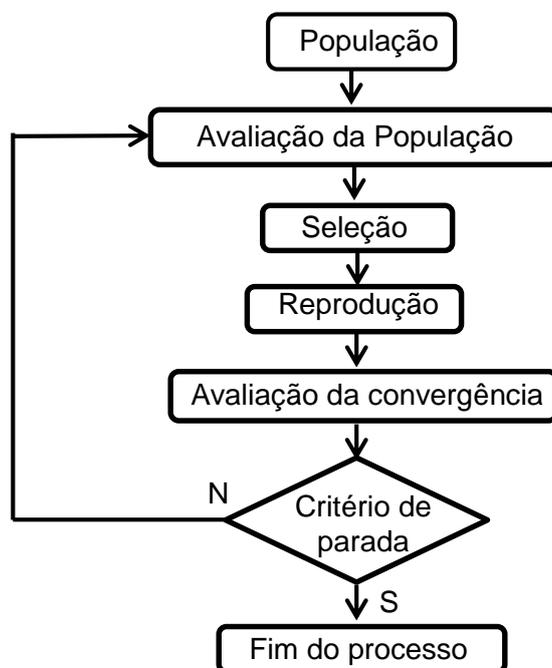
$$corr\_1 = corr(F_{Om} - m_{acelfpa} 1, F_{exp} - m_{acelfpa} 1) \quad (19)$$

$$F_{Om} = x(1) velfpa 1 + x(2) deslfp a 1 \quad (20)$$

Onde  $F_i(t)$ : força produzida pelo indivíduo  $i$  (N);  $k_{ha}$ : rigidez do indivíduo (N/m);  $m_{ha}$ : massa do indivíduo (kg);  $c_{ha}$ : amortecimento do indivíduo (Ns/m);  $u_{ha}(t)$ : deslocamento do indivíduo ao longo do tempo (m);  $\dot{u}_{ha}(t)$ : velocidade do indivíduo ao longo do tempo (m/s);  $\ddot{u}_{ha}(t)$ : aceleração do indivíduo ao longo do tempo (m/s<sup>2</sup>);  $f_i$ : frequência indivíduo (Hz);  $f_{obj}$ : função a ser minimizada por meio do AG;  $corr\_1$ : correlação entre força experimental e otimizada;  $F_{Om}$ : força otimizada do indivíduo (N);  $F_{Exp}$ : força experimental do indivíduo;  $m$ : massa do indivíduo (kg);  $acelfpa1$ : aceleração experimental do indivíduo (m/s<sup>2</sup>);  $velfpa1$ : velocidade experimental do indivíduo (m/s);  $deslfp a 1$ : deslocamento experimental do indivíduo (m);  $x(1)$ : amortecimento do indivíduo (Ns/m);  $x(2)$ : rigidez do indivíduo (N/m). Ressalta-se que as variáveis  $x(1)$  e  $x(2)$  são obtidas através do processo de otimização.

Neste contexto, é importante destacar que o método dos Algoritmos Genéticos (AG) se baseia em formulações matemáticas probabilísticas, nas quais a população é inicializada aleatoriamente, e a busca por indivíduos é realizada por meio de um processo paralelo e adaptativo, fundamentado em princípios de reprodução e sobrevivência dos mais aptos. Para tal, ressaltar-se que a aplicação dessa mesma metodologia, com o intuito de determinar os parâmetros dos modelos biodinâmicos, foi empregada em outros trabalhos de pesquisa, tais como: Marzbanrad e Afkar [121], Abbas [122], Yu [123], e Campista [95]. Na sequência, a Figura 31 apresenta um fluxograma que descreve o processo utilizado para a resolução do problema de otimização mediante o emprego do método de Algoritmos Genéticos. Desta forma,

são ilustradas as etapas envolvidas durante o processo de busca dos parâmetros do modelo desenvolvido, levando em consideração a função matemática e os critérios de parada estabelecidos durante o processo de modelagem.



**Figura 31 - Fluxograma Algoritmo genético [120]**

Com base no fluxograma relativo aos processos de otimização, é possível obter uma visão geral do método utilizado, auxiliando na compreensão e visualização das etapas e metodologias empregadas neste trabalho de pesquisa. Neste contexto, o fluxograma pode ser descrito através das seguintes etapas [120]:

- 1) Inicialização: Criação de uma população inicial de soluções candidatas (indivíduos) de forma aleatória ou baseada em conhecimento prévio.
- 2) Avaliação: Cálculo da aptidão (ou função objetivo) de cada indivíduo na população com base em critérios estabelecidos. Essa avaliação pode envolver a execução de simulações ou cálculos específicos.
- 3) Seleção: Seleção dos indivíduos mais aptos para reprodução, levando em consideração suas aptidões. Indivíduos com maior aptidão têm maior probabilidade de serem selecionados.

- 4) Reprodução: Criação de uma nova geração de indivíduos por meio de operadores genéticos, como crossover (combinação de informações genéticas de dois pais) e mutação (introdução de variações aleatórias nos indivíduos).
- 5) Avaliação da convergência: Verificação se alguma condição de parada foi atendida. Isso pode ser baseado no número máximo de gerações, na melhoria mínima da aptidão ou em outros critérios definidos. Caso seja necessário são realizadas atualizações com o intuito de substituir a população anterior por uma nova geração criada após a reprodução.
- 6) Critério de parada: Repetição dos passos 2 a 6 até que a condição de parada seja atingida.
- 7) Fim do processo: Nesta etapa são encontradas as soluções obtidas com base na metodologia desenvolvida.

De acordo com o fluxograma apresentado na Figura 31, é possível identificar as técnicas empregadas ao longo do processo de otimização, que incluem a definição das variáveis de projeto, a formulação da função objetivo a ser minimizada, a aplicação dos operadores genéticos (cruzamento e mutação) e os critérios de seleção dos melhores indivíduos. Ressalta-se que essas etapas são essenciais para garantir a evolução da população ao longo das interações, buscando soluções cada vez mais otimizadas para o problema em questão [130]. Assim sendo, o fluxograma fornece uma representação geral das etapas empregadas ao longo do processo de modelagem dos sistemas biodinâmicos.

## 2.4 Modelagem experimental

Nesta seção, são apresentados os testes experimentais de monitoração dinâmica experimental desenvolvidos no Laboratório de Monitoração Dinâmica Experimental (LMDE/FEN/UERJ), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, com a intenção de obter os parâmetros necessários para a formulação matemática do modelo proposto neste trabalho de pesquisa (sistemas biodinâmicos). Deste modo, são detalhados os procedimentos adotados durante o processo de modelagem, incluindo os equipamentos utilizados e as técnicas de medição aplicadas com a

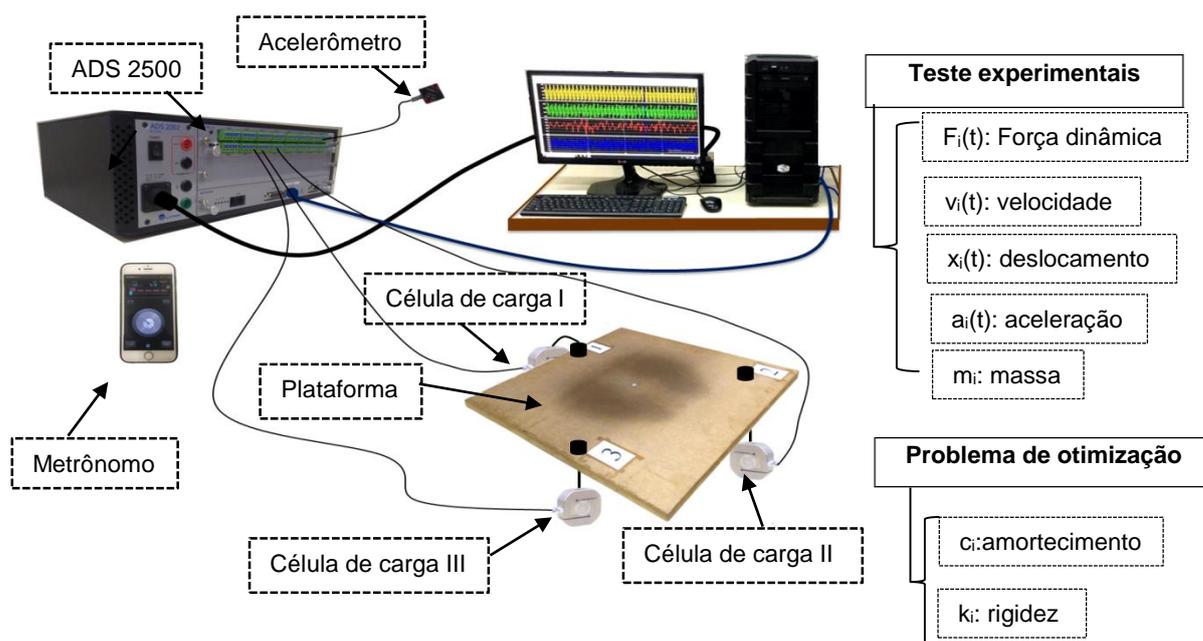
finalidade de obter as variáveis necessárias para o desenvolvimento do modelo proposto.

#### 2.4.1 Projeto de monitoração dinâmica experimental

Os testes experimentais são desenvolvidos com o propósito de determinar os parâmetros do modelo biodinâmico (massa, amortecimento e rigidez) proposto neste estudo. Para garantir uma amostragem mais representativa, são realizados testes com 100 indivíduos distintos, o que permite abranger uma ampla variedade da população investigada. Neste contexto, os testes experimentais são conduzidos individualmente, nos quais são analisadas as forças dinâmicas e acelerações de cada indivíduo durante saltos rítmicos executados sobre uma plataforma rígida de MDF apoiada em um conjunto de células de carga. Durante a realização dos experimentos, são levados em consideração os seguintes critérios:

- Tipo de excitação investigada: saltos humanos individuais
- Amostragem: 100 diferentes indivíduos
- Frequência de excitação: 2,0 Hz
- Direção do movimento: vertical
- Estímulo sonoro: Metrônomo
- Pontos medidos: pessoa e plataforma
- Duração do ensaio: 20 segundos
- Tipo de estrutura utilizada: Plataforma rígida de MDF

A Figura 32 representa o projeto de montagem e seleção dos equipamentos utilizados no âmbito dos testes de monitoração dinâmica experimental. Neste seguimento, são selecionados os seguintes equipamentos: células de carga, plataforma MDF, computador, sistema de aquisição de dados, acelerômetros e metrônomo. A seguir, na seção subsequente, são fornecidas descrições detalhadas das especificações técnicas de cada equipamento, juntamente com os procedimentos de calibração adotados de acordo com as recomendações de cada fabricante.



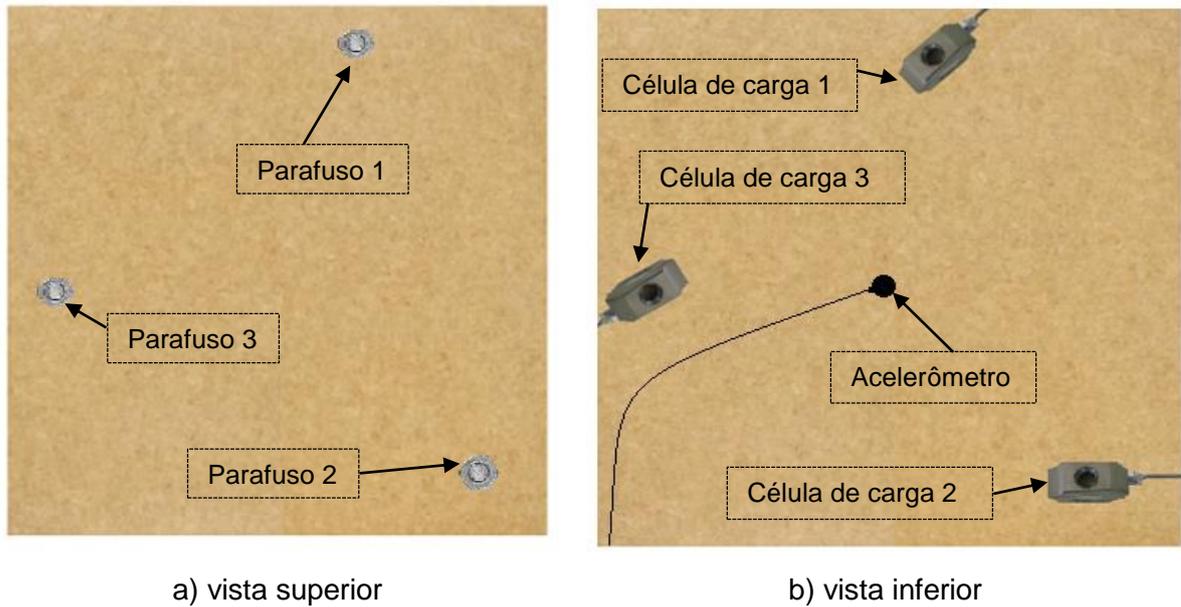
**Figura 32 - Projeto de monitoração dinâmica experimental**

#### 2.4.2 Descrição dos equipamentos

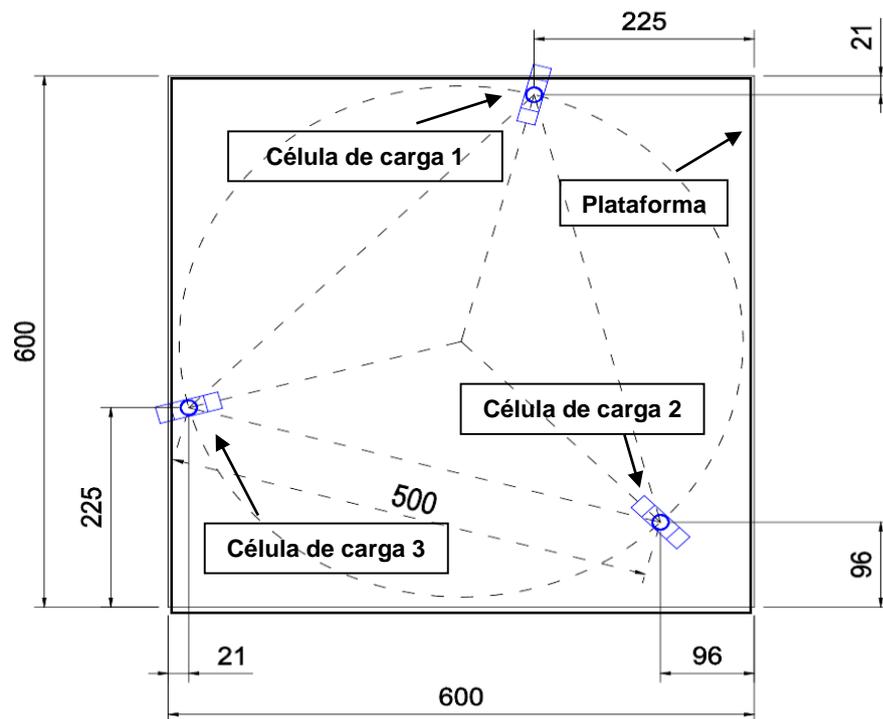
Com o objetivo de monitorar a força dinâmica durante os saltos humanos rítmicos, é montada uma plataforma em MDF sobre um conjunto de 3 células de carga, onde são fixadas através de ligações aparafusadas, conforme ilustrado na Figura 33. Com relação as especificações da plataforma, a referida apresenta as seguintes características: dimensões 600 mm x 600 mm x 25 mm, área de 0,36 m<sup>2</sup> e massa total de 6,4 kg. Além disso, o material utilizado consiste em chapas de madeira aglutinada fabricadas industrialmente proporcionando uma estrutura rígida e leve. Cabe ressaltar que os apoios (células de carga) são posicionados de modo a coincidir com o centro de gravidade da plataforma, conforme ilustrado na Figura 34 referente à disposição das células de carga.

No que se refere à célula de carga empregada nos testes experimentais, essa corresponde ao modelo CSR-1000 fabricado pela empresa MK Controle. O equipamento pode operar tanto em tração quanto em compressão, e apresenta as seguintes especificações técnicas: capacidade máxima de carga de 1000 kg,

sensibilidade de  $2,0 \pm 1\%$  mV/V e tensão de excitação máxima de 15 VDC. Mais detalhes a respeito do equipamento são encontrados na Figura 35 e Tabela 8.



**Figura 33 - Construção da plataforma de MDF**

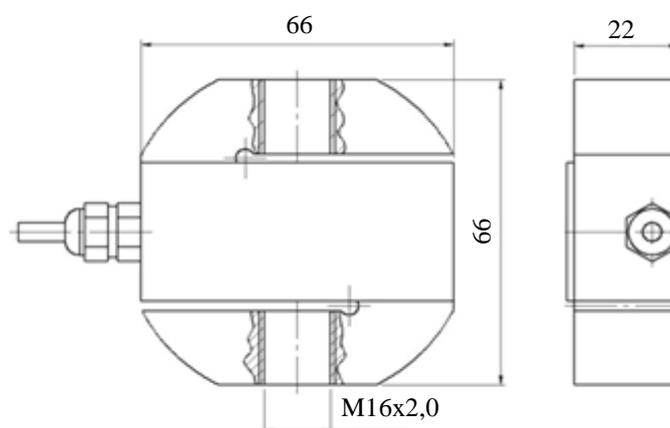


**Figura 34 - Croqui de posicionamento das células de carga [95]**



a) Vista frontal

b) Vista superior



c) Detalhamento da célula de carga (dimensões em mm)

**Figura 35 - Células de carga modelo (CSR1000).****Tabela 8 - Especificações técnicas da célula de carga**

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

No que diz respeito aos acelerômetros utilizados no teste experimental, são empregados dois acelerômetros com finalidades distintas. O primeiro acelerômetro, modelo PCB (393B04), é instalado na seção central da plataforma para monitorar a resposta estrutural dinâmica da plataforma, com a finalidade de monitorar a resposta dinâmica durante os saltos, objetivando a calibração do modelo experimental desenvolvido através de uma correlação da resposta por meio da modelagem numérico-experimental. O segundo acelerômetro, modelo dytran (7521A) é fixado no centro de gravidade do indivíduo com o objetivo de monitorar a aceleração durante a realização da atividade, ou seja, irá mensurar o resultados de aceleração do indivíduo no domínio do tempo.

O acelerômetro PCB Piezotronics (393B04), empregado nos testes experimentais, corresponde a um sensor piezoelétrico projetado com o objetivo de atender às demandas da engenharia estrutural. Assim sendo, a sensibilidade de saída equivale a 1000 mV/g, o que permite a conversão precisa da aceleração mecânica em um sinal elétrico proporcional. Cabe ressaltar que o acelerômetro oferece alta precisão na medição da aceleração em uma ampla faixa de frequência, de 0,06 Hz a 450 Hz. Deste modo, destaca-se que o equipamento é capaz de mensurar baixas frequências, o que é especialmente relevante em análises estruturais. Ademais, o modelo é hermeticamente selado, tornando-o resistente a ambientes úmidos ou empoeirados, e seus conectores são à prova d'água, garantindo uma conexão confiável mesmo em condições adversas. Portanto, o sinal de saída de baixa impedância preserva a integridade do sinal, mesmo em situações com cabos longos ou em ambientes sujeitos a interferências elétricas.

Neste sentido, o acelerômetro PCB oferece uma sensibilidade alta, com uma resolução inferior a 1 $\mu$ g RMS. Isso significa que o equipamento é capaz de detectar variações muito pequenas na aceleração, sendo essencial para análises estruturais que requerem alta precisão. Assim sendo, a Figura 36 ilustra o modelo do acelerômetro utilizado, bem como a Tabela 9 com as suas especificações técnicas.



**Figura 36 - Acelerômetro PCB Piezotronics (393B04)**

**Tabela 9 - Características do acelerômetro PCB Piezotronics**

Modelo	Número de serial	Eixo de medição	Faixa de medição (g)	Faixa de frequência (Hz)	Sensibilidade (mV/g)
393B04	64077	uniaxial	$\pm 5$ g	0,06-450	964

O acelerômetro Dytran (7521A1), utilizado nos testes experimentais, corresponde a um modelo capacitivo empregado nos testes experimentais de monitoração dinâmica com objetivo de mensurar a resposta dinâmica do indivíduo

enquanto realiza saltos sobre a plataforma. Neste seguimento, o equipamento detecta variações na capacitância do circuito quando sujeito a oscilações provenientes das forças aplicadas sobre o dispositivo. Deste modo, são realizadas as medições da variação do sinal elétrico (voltagem), que é proporcional à aceleração do objeto em monitoramento. Cabe ressaltar que o acelerômetro Dytran apresenta uma ampla faixa de medição em comparação ao modelo da PCB, sendo a faixa de medição da ordem de  $\pm 10$  g, tornando-o mais adequado para a avaliação de saltos humanos, os quais geralmente envolvem acelerações relativamente altas, uma vez que o equipamento foi acoplado ao indivíduo para obtenção dos dados de aceleração durante a execução dos saltos rítmicos sobre a plataforma.

No que diz respeito às especificações técnicas do acelerômetro Dytran, ressalta-se que este modelo realiza medições de aceleração em apenas uma direção (uniaxial). A Figura 37 ilustra o acelerômetro Dytran utilizado no âmbito desta pesquisa, e os detalhes relacionados às especificações técnicas podem ser encontrados na Tabela 10, na qual são expostas informações como sensibilidade, faixa de frequência e medição.



**Figura 37 - Acelerômetro Dytran (7521A1)**

**Tabela 10 - Características do acelerômetro Dytran**

Modelo	Número de serial	Eixo de medição	Faixa de medição (g)	Faixa de frequência (Hz)	Sensibilidade (mV/g)
7521A1	3051	uniaxial	$\pm 10$ g	0-1500	549,27

Cabe ressaltar que as respostas dinâmicas (força e aceleração) obtidas durante os testes experimentais foram monitoradas por meio do sistema de aquisição de dados, onde são recebidos os sinais das células de carga e dos acelerômetros. No

contexto deste trabalho, utilizou-se o sistema de aquisição de dados modelo ADS 2500, fabricado pela LYNX Tecnologia Eletrônica LTDA, como ilustrado na Figura 38.

O sistema de aquisição de dados ADS2500 corresponde a um equipamento de alto desempenho e o modelo em questão apresenta 16 entradas analógicas universais. Essas entradas podem ser configuradas por meio de *software* para converter o sinal elétrico recebido em valores correspondentes a grandezas de engenharia, como deformação específica, força, aceleração, entre outras. Neste seguimento, o sistema é compatível com as famílias ADS2000 e ADS1000 da Lynx, permitindo a integração com diferentes tipos de equipamentos.

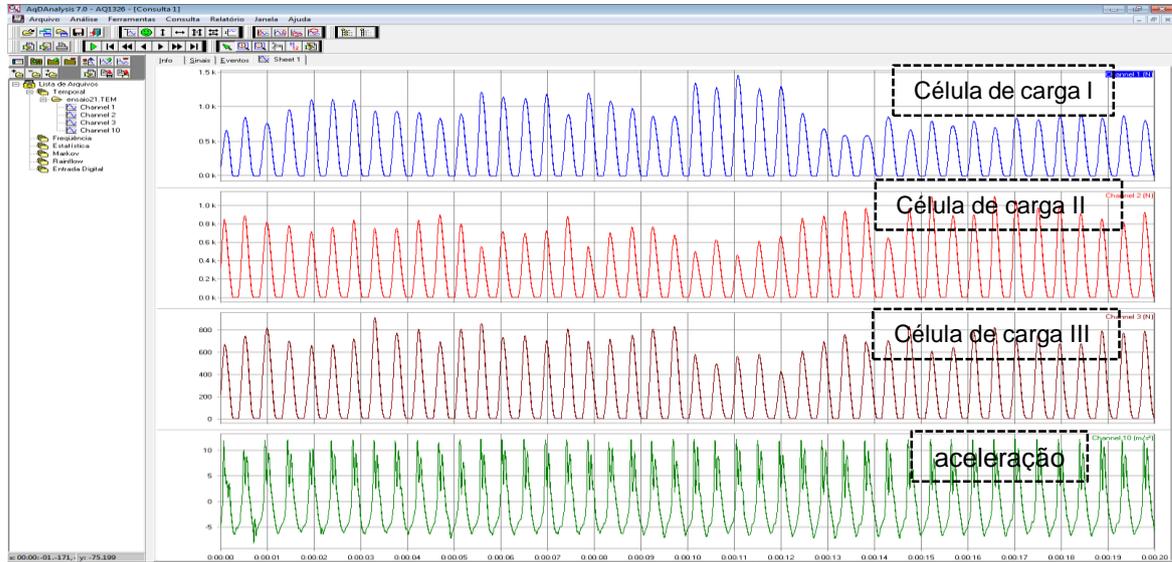
Em termos de características tecnológicas, as entradas analógicas do ADS2500 podem ser configuradas individualmente com a finalidade de acomodar diferentes tipos de sensores, incluindo células de carga, acelerômetros, termopares, Pt100 e strain gages em configurações de  $\frac{1}{2}$ ,  $\frac{1}{4}$  e ponte completa, entre outros. Além disso, o sistema é capaz de fornecer 24 volts em todos os canais para alimentação de sensores por loop de corrente e possui uma frequência máxima de amostragem de 24000 amostras por segundo por canal.



**Figura 38 - Sistema de aquisição de dados (ADS 2500)**

É importante destacar que a coleta de dados é realizada com base no emprego do *software* Aqdados, que permite a aquisição e o armazenamento dos sinais. Após a coleta, os dados são processados e avaliados por meio do programa AqAnalysis. Durante o pós-processamento, as séries temporais obtidas na aquisição são tratadas,

proporcionando a visualização dos resultados dos experimentos em forma gráfica ou em tabelas. A Figura 39 mostra uma tela do *software* AqAnalysis, demonstrando sua interface para visualização e análise dos dados coletados.



**Figura 39 - Exemplo print da tela do *software* AqDAnalysis**

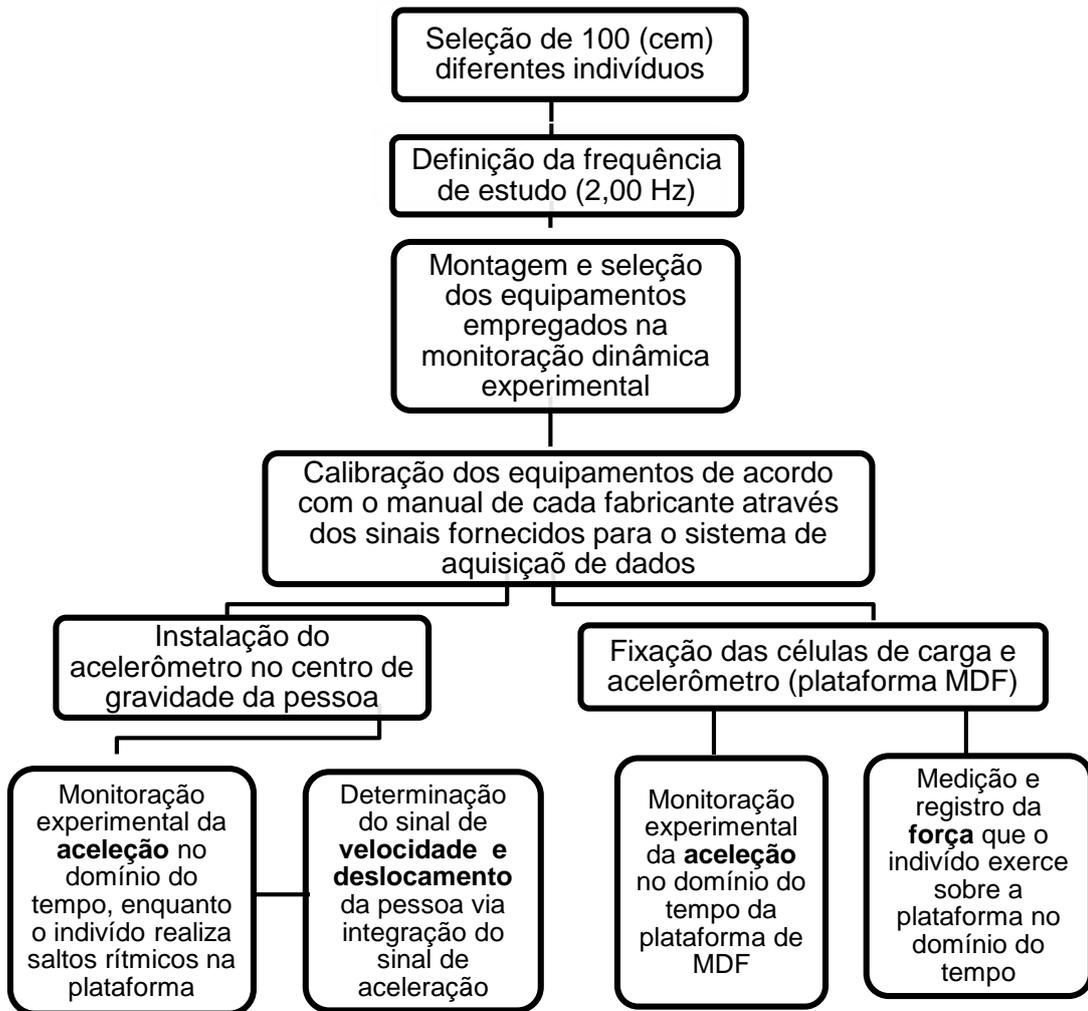
Com o objetivo de controlar a frequência de estímulo dos participantes durante os testes experimentais (saltos rítmicos sobre a plataforma), é utilizado um metrônomo, onde os participantes recebem os estímulos sonoros externos mediante emprego do aplicativo "Sound Corse", instalado em dispositivos Android. As frequências são expressas em batidas por minuto (bpm). Deste modo, a Figura 40 apresenta a interface do aplicativo para uma frequência de 120 bpm ( $f = 2$  Hz).



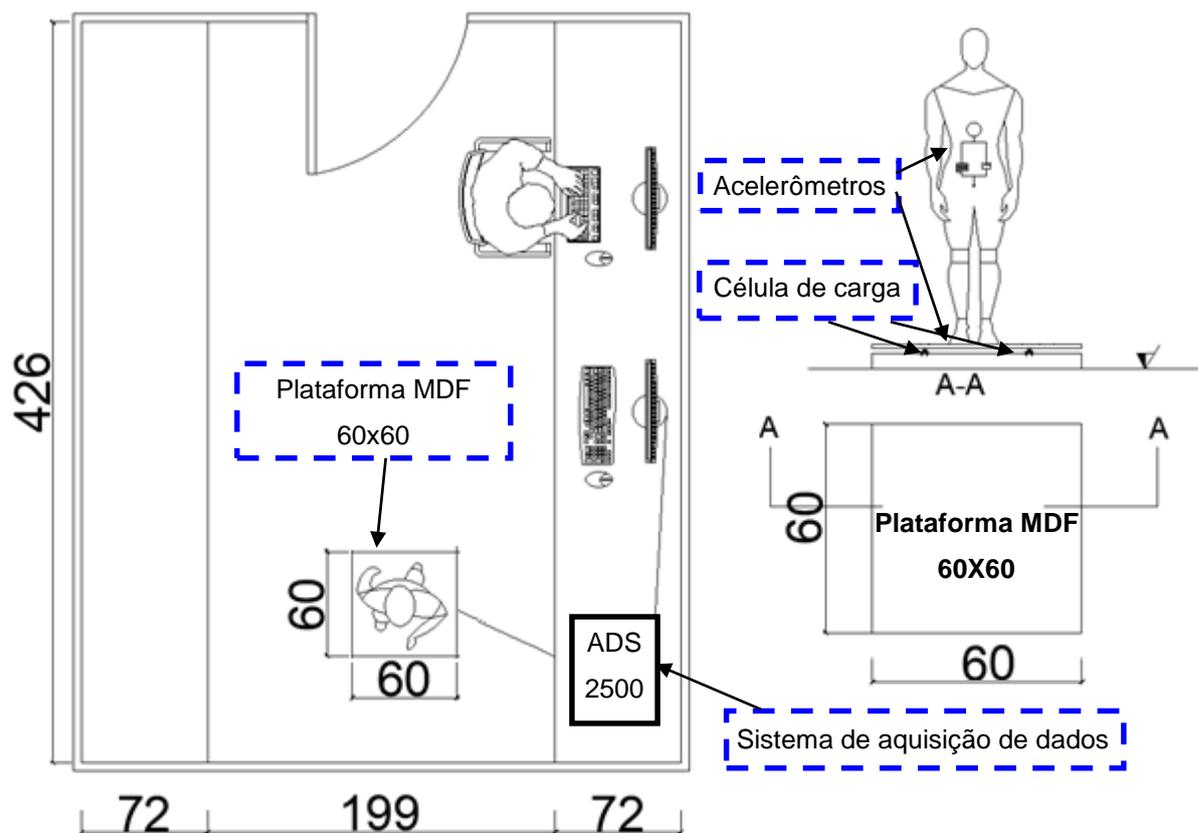
**Figura 40 - Display Sound Corse (metrônomo)**

### 2.4.3 Metodologia desenvolvida nos testes experimentais

Com o objetivo de obter os parâmetros necessários para a modelagem de sistemas biodinâmicos, são conduzidos testes de monitoração dinâmica experimental. Durante esses testes, são monitoradas as características de cada indivíduo, como força dinâmica e aceleração, enquanto eles realizam saltos sobre a plataforma. Os testes são realizados individualmente com a participação de 100 participantes diferentes, utilizando uma frequência de excitação de 2 Hz ( $f = 2 \text{ Hz}$ ), com a finalidade de representar uma aula de ginástica aeróbica. Assim, apresenta-se o fluxograma das metodologias empregadas nos testes experimentais na Figura 41, e a ilustração do teste experimental desenvolvido no laboratório na Figura 42.



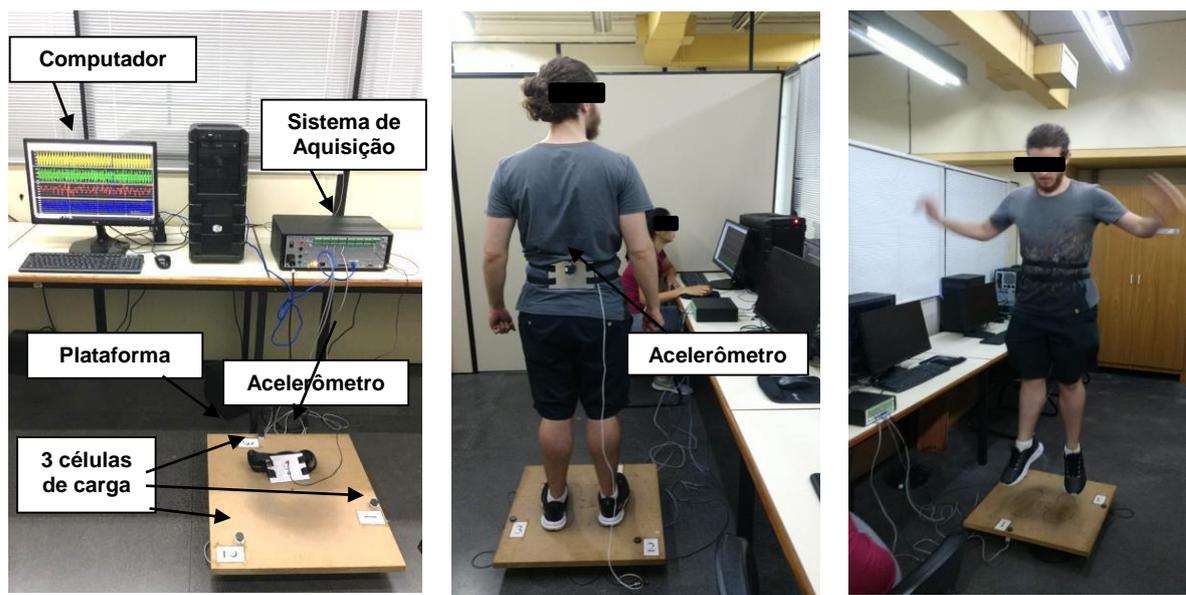
**Figura 41 - Metodologia desenvolvida nos testes experimentais (Laboratório)**



**Figura 42 - Sala de monitoração dinâmica experimental [Dimensões em cm]**

No âmbito dos testes experimentais, ressalta-se que são registradas as forças dinâmicas exercidas sobre a plataforma no domínio do tempo, utilizando as células de carga como apoios da plataforma. Além disso, são registradas as acelerações do indivíduo durante o ensaio. A partir dos resultados obtidos experimentalmente são determinados os demais parâmetros empregados no desenvolvimento do modelo biodinâmico proposto nesta tese. Adicionalmente, monitorou-se a resposta dinâmica por meio de um acelerômetro instalado no centro da plataforma, na parte inferior, com o propósito de monitorar a resposta estrutural dinâmica durante a execução dos saltos sobre a estrutura. Tais dados são posteriormente utilizados na calibração do modelo proposto, comparando os resultados obtidos na modelagem numérica com a monitoração experimental dinâmica.

Diante do exposto, a Figura 43 ilustra um exemplo de um dos testes experimentais realizados neste estudo, observa-se a fixação de um acelerômetro próximo ao centro de gravidade do indivíduo por meio de um cinto, bem como os equipamentos utilizados nos ensaios realizados sobre a plataforma rígida MDF.



a) Equipamentos

b) Preparação

c) Execução dos saltos

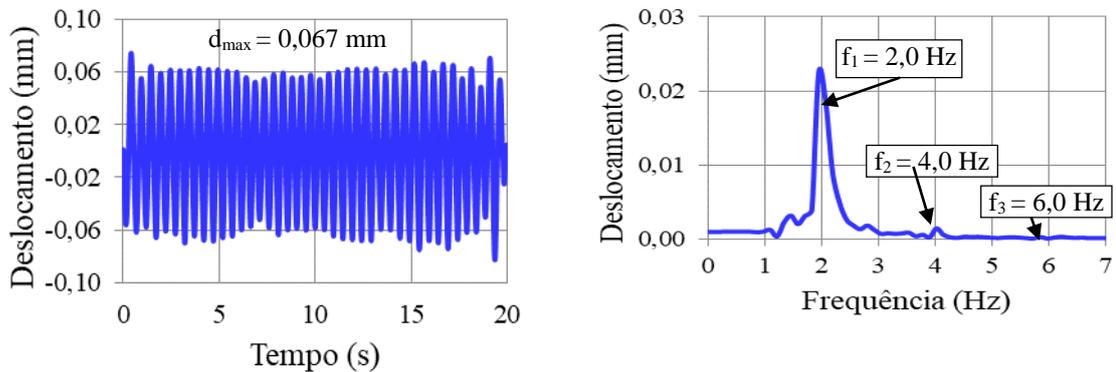
**Figura 43 - Monitoração dinâmica experimental (modelagem biodinâmica)**

Vale ressaltar que foram conduzidos mais de 150 (cento e cinquenta) testes com pessoas distintas. No entanto, foram selecionados os 100 (cem) melhores resultados com base na resposta estrutural dinâmica da plataforma no domínio da frequência, que deveriam estar em consonância com a frequência de excitação utilizada nos testes experimentais ( $f = 2$  Hz), bem como nos valores associados à transferência de energia para o sistema.

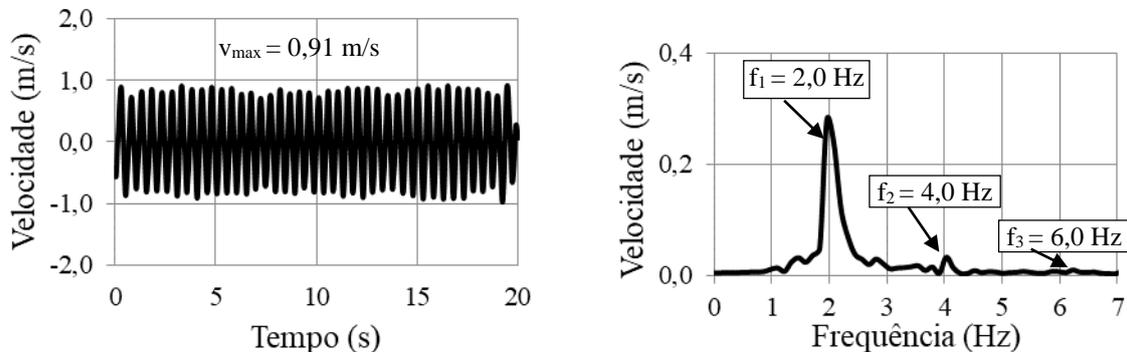
Assim sendo, com base nos resultados obtidos experimentalmente (força experimental dinâmica e aceleração), são aplicados os filtros "passa-alta" e "passa-baixa" com uma faixa de frequência de 0,5 Hz a 8 Hz, com base no emprego do *software* Matlab [125]. De acordo com Brandt [124], esta técnica aplicada tem como objetivo evitar distorções na integração numérica dos sinais. Deste modo, as demais variáveis necessárias para a formulação do método matemática proposto (sistemas biodinâmicos) são obtidas a partir da integração do sinal de aceleração medido experimentalmente, com base nas funções de tempo de velocidade e deslocamento. Cabe ressaltar que os demais parâmetros do modelo desenvolvido são determinados com base na equação de equilíbrio dinâmico do sistema, via resolução de um problema de otimização mediante o emprego do método Algoritmos Genéticos (AG) através do uso do *software* MATLAB [125]. Neste sentido, são obtidos os valores da força otimizada ( $F_{Otm}$ ) que corresponde aos resultados de força obtidos através da modelagem numérica via processo de otimização.

Em virtude das limitações de espaço, as Figuras 44 até 59 apresentam os resultados dos testes experimentais realizados neste estudo, abrangendo 4 (quatro) testes selecionados dos 100 (cem) ensaios desenvolvidos. Tais resultados correspondem a forças dinâmicas, acelerações, velocidades e deslocamentos, expressos no domínio do tempo e da frequência. Assim sendo, tais exemplos correspondem aos testes realizados com indivíduos com massas corporais equivalentes a 48,9 kg, 69,25 kg, 88,3 kg e 107,2 kg.

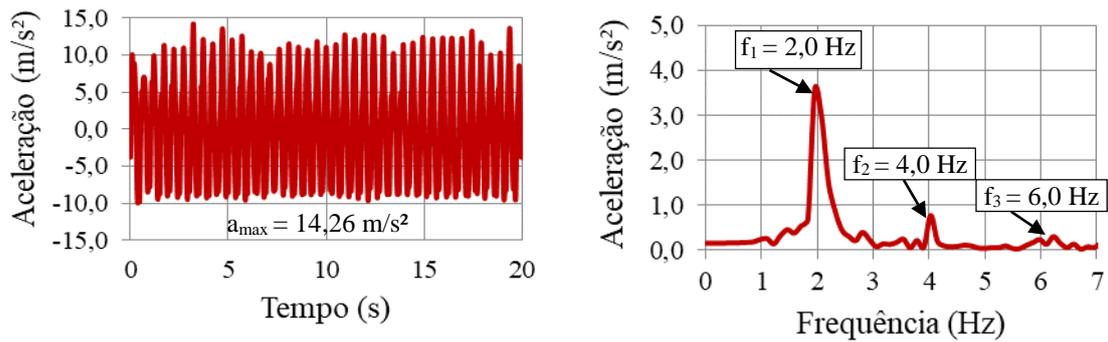
Neste sentido, as figuras são organizadas da seguinte forma: as Figuras 44 a 47 exibem os resultados para o indivíduo com massa de 48,9 kg, as Figuras 48 a 51 apresentam os dados do indivíduo com massa de 69,25 kg, as Figuras 52 a 55 mostram os resultados para o indivíduo com massa de 88,3 kg, e, por fim, as Figuras 56 a 59 exibem os resultados obtidos para o indivíduo com massa de 107,2 kg. Além disso, cabe ressaltar que os resultados dessas respostas dinâmicas expressos no domínio da frequência são obtidos com base na aplicação da Transformada Rápida de Fourier (FFT), utilizando o programa MATLAB [125].



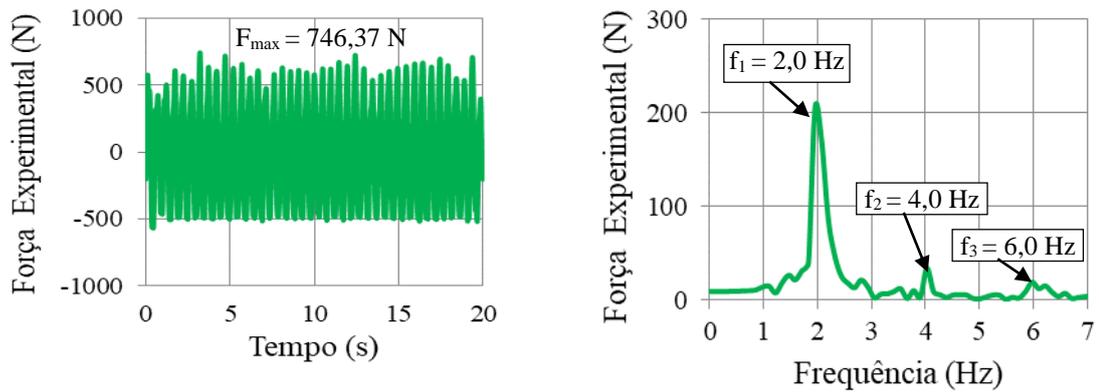
**Figura 44 - Resposta dinâmica do indivíduo (deslocamento) [m = 48,90 kg]**



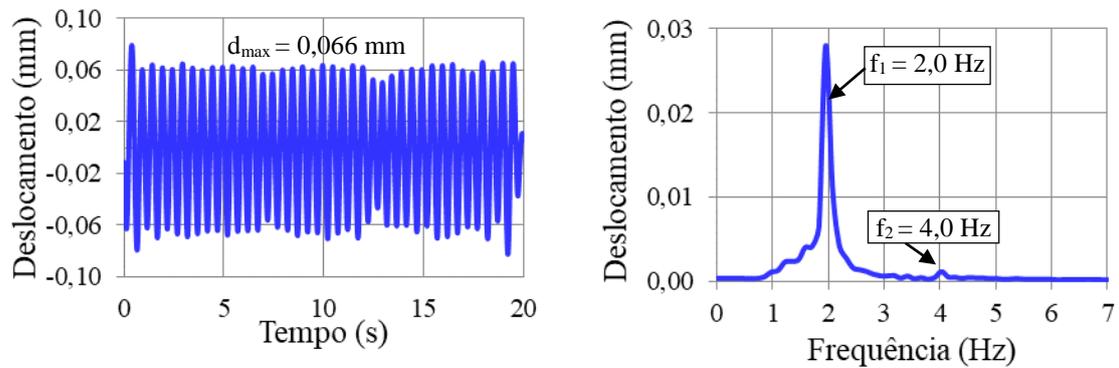
**Figura 45 - Resposta dinâmica do indivíduo (velocidade) [m = 48,90 kg]**



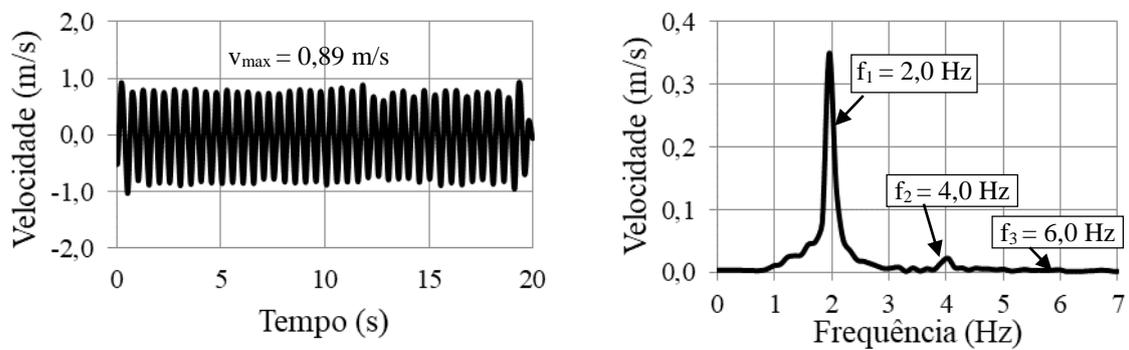
**Figura 46 - Resposta dinâmica do indivíduo (aceleração) [ $m = 48,90 \text{ kg}$ ]**



**Figura 47 - Resposta dinâmica do indivíduo (Força) [ $m = 48,90 \text{ kg}$ ]**



**Figura 48 - Resposta dinâmica do indivíduo (deslocamento) [ $m = 69,25 \text{ kg}$ ]**



**Figura 49 - Resposta dinâmica do indivíduo (velocidade) [ $m = 69,25 \text{ kg}$ ]**

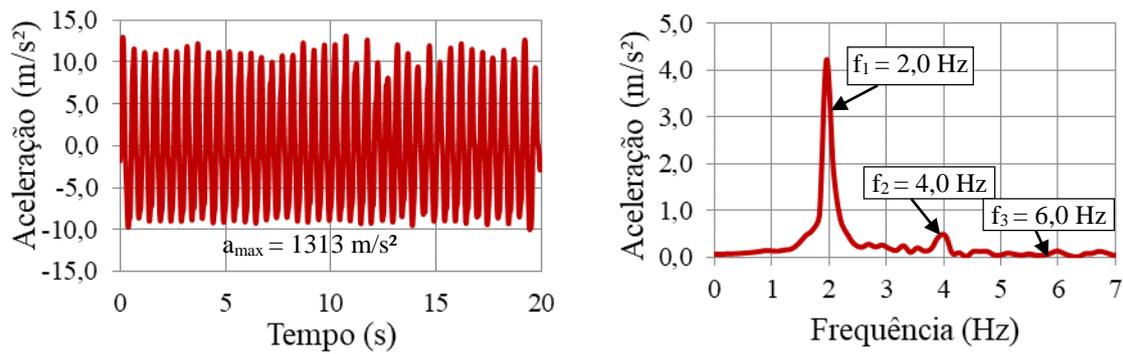


Figura 50 - Resposta dinâmica do indivíduo (aceleração) [ $m = 69,25 kg$ ]

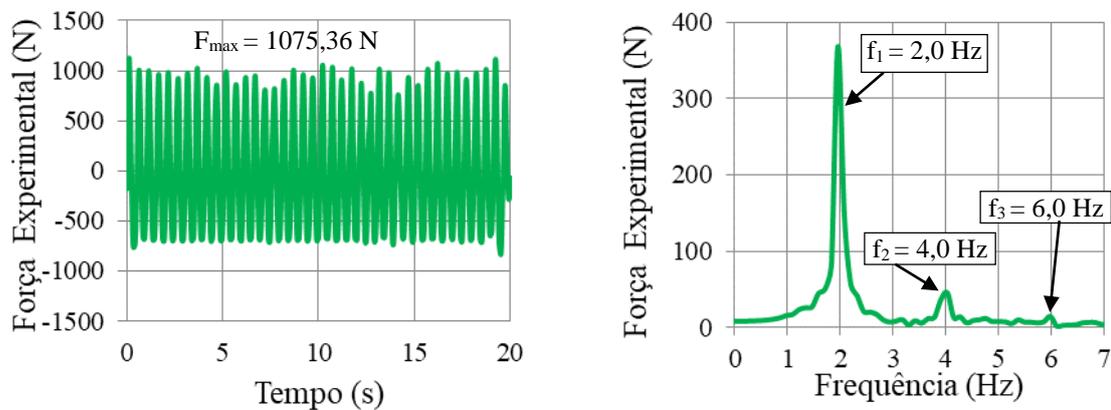


Figura 51 - Resposta dinâmica do indivíduo (Força) [ $m = 69,25 kg$ ]

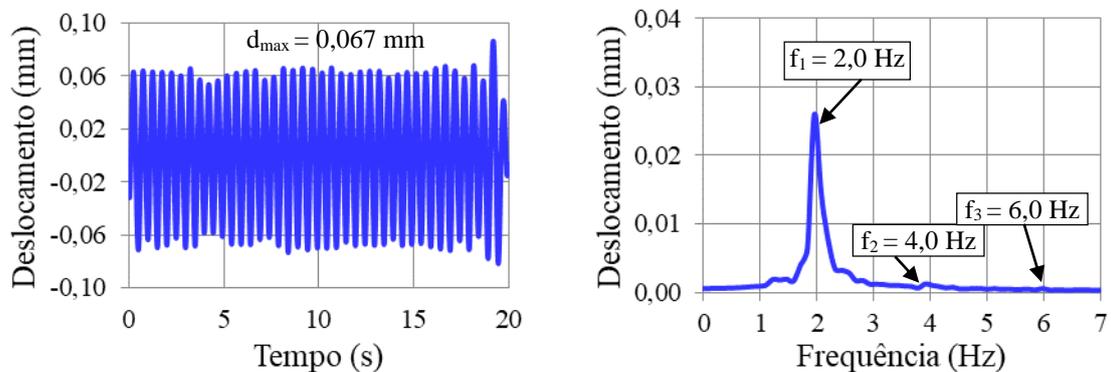


Figura 52 - Resposta dinâmica do indivíduo (deslocamento) [ $m = 88,25 kg$ ]

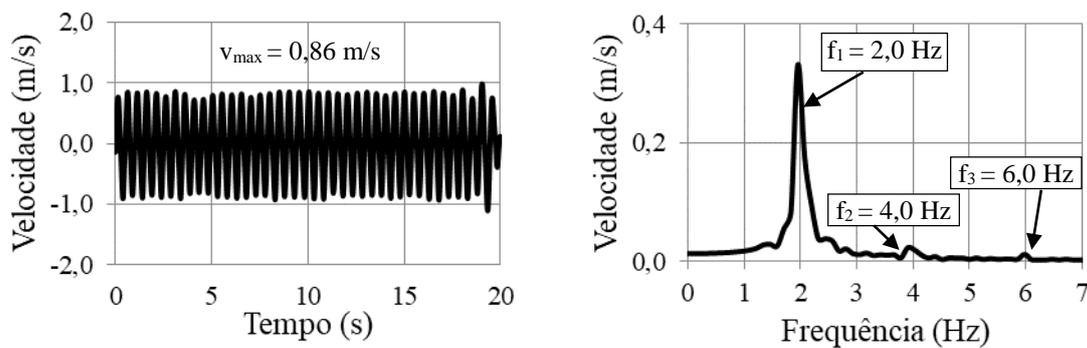
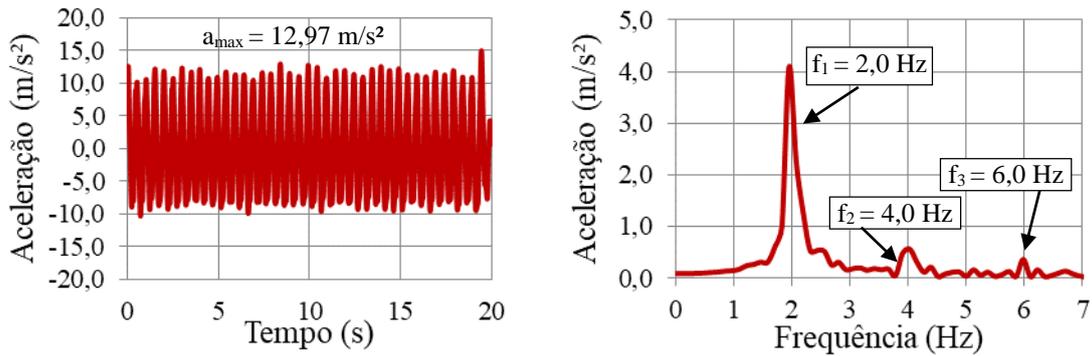
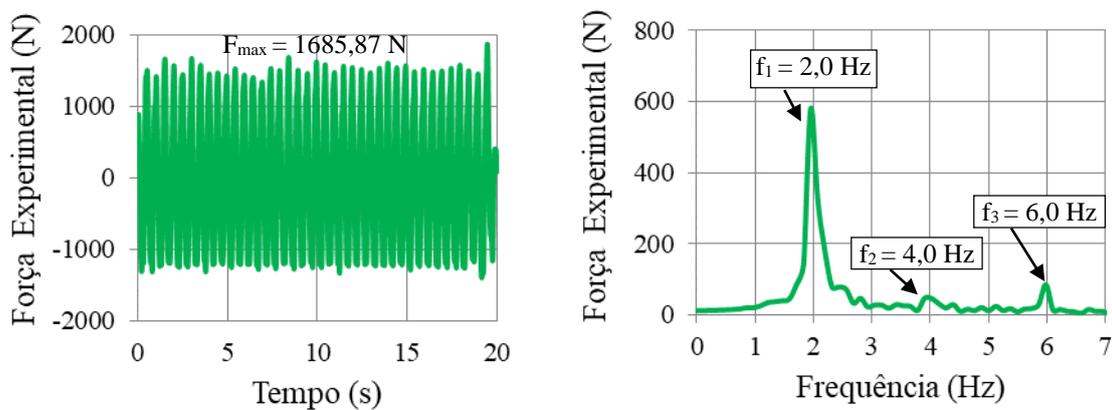


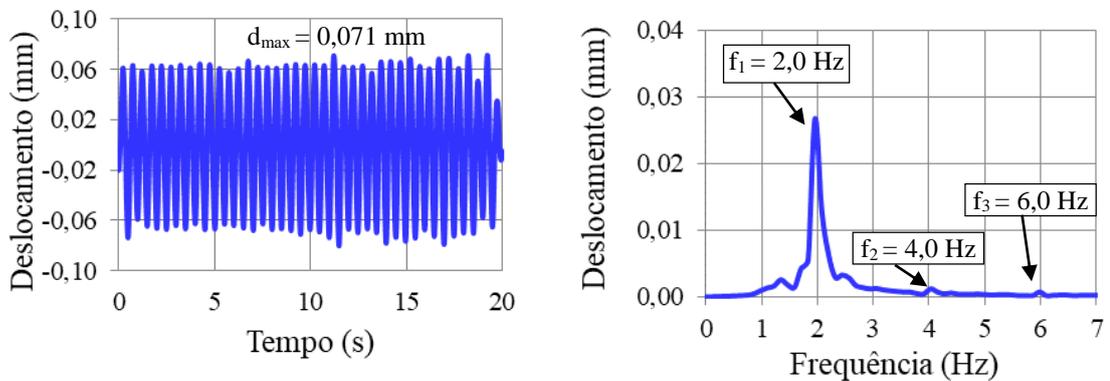
Figura 53 - Resposta dinâmica do indivíduo (velocidade) [ $m = 88,25 kg$ ]



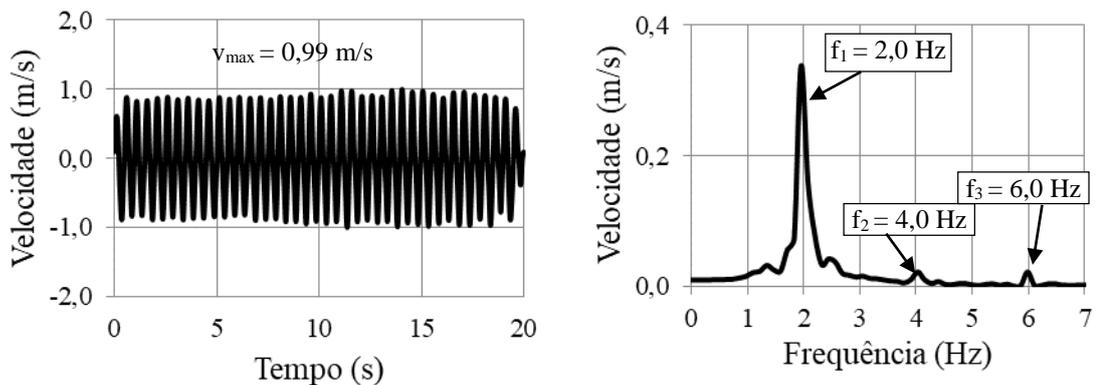
**Figura 54 - Resposta dinâmica do indivíduo (aceleração) [m = 88,25 kg]**



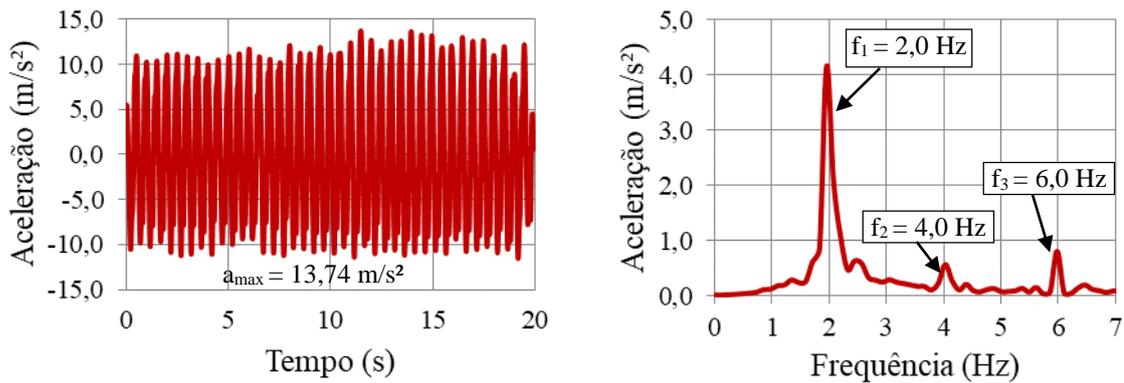
**Figura 55 - Resposta dinâmica do indivíduo (Força) [m = 88,25 kg]**



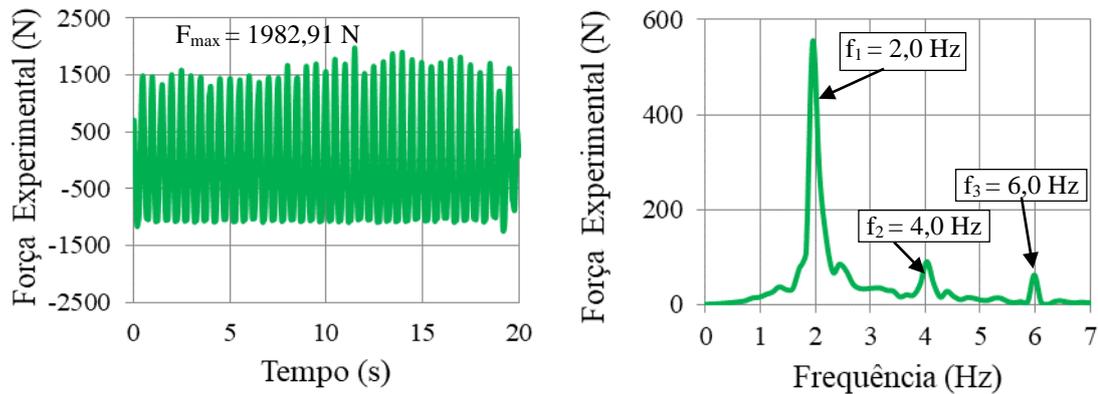
**Figura 56 - Resposta dinâmica do indivíduo (deslocamento) [m = 107,15 kg]**



**Figura 57 - Resposta dinâmica do indivíduo (velocidade) [m = 107,15 kg]**



**Figura 58 - Resposta dinâmica do indivíduo (aceleração) [m = 107,15 kg]**



**Figura 59 - Resposta dinâmica do indivíduo (Força) [m = 107,15 kg]**

Ao analisar as Figuras 44 até 59, que representam os espectros das respostas dinâmicas dos indivíduos, é possível observar, no domínio da frequência, um pico correspondente à frequência de excitação de 2 Hz ( $f = 2Hz$ ). Além disso, são identificados picos relacionados à transferência de energia do sistema em frequências específicas como  $f = 4 Hz$  e  $f = 6 Hz$ . Tais 'picos' indicam que os participantes estão devidamente sincronizados com os estímulos sonoros recebidos mediante emprego do metrônomo, demonstrando que os saltos realizados sobre a plataforma estão executados de maneira adequada. Na sequência, a Tabela 11 resume os valores máximos obtidos durante os testes experimentais, tais como força, aceleração, velocidade e deslocamento nos casos analisados, fornecendo uma visão geral dos resultados obtidos neste contexto de análise.

**Tabela 11 - Valores máximos das respostas dinâmicas dos indivíduos**

Massa da pessoa (kg)	Força (N)	Aceleração ( $m/s^2$ )	Velocidade (m/s)	Deslocamento (mm)
48,90	746,37	14,26	0,91	0,067
69,25	1075,36	13,13	0,89	0,066
88,25	1685,87	12,97	0,86	0,067
107,15	1982,91	13,74	0,99	0,071

Ao analisar os dados relacionados à força dinâmica experimental máxima, presentes na Tabela 11, observa-se que os indivíduos com maior massa corporal apresentaram valores mais elevados para a força dinâmica máxima. Isso indica uma relação direta entre a força exercida e a massa corporal dos indivíduos, conforme o esperado. Por outro lado, ao analisar os resultados das respostas dinâmicas (acelerações, velocidades e deslocamentos), pode-se observar que não há uma relação direta entre a massa dos indivíduos e esses parâmetros.

Neste sentido, ao comparar os casos extremos de massa corporal presentes na Tabela 11, de 48,9 kg e 107,15 kg, é possível observar um aumento significativo na força dinâmica à medida que a massa corporal dos indivíduos aumenta. Nos casos mencionados, a força dinâmica é ampliada em cerca de 2,7 vezes. Isso evidencia a influência direta da massa corporal na resposta dinâmica do sistema avaliado, demonstrando que a massa corporal é um fator determinante na magnitude da força exercida sobre a estrutura. Ao analisar os resultados, nota-se que o valor máximo de aceleração mais elevado é observado no indivíduo com massa corporal de 48,9 kg, resultando em um valor de  $14,26 \text{ m/s}^2$ . Por outro lado, o indivíduo com massa corporal de 88,25 kg apresentou um valor menor, da ordem de  $12,97 \text{ m/s}^2$ . Isso reforça a hipótese de que as grandezas de aceleração, velocidade e deslocamento não seguem uma correlação linear com a massa dos indivíduos. Outros fatores, como sincronismo, condicionamento físico e características individuais, influenciam significativamente nos resultados.

#### 2.4.4 Processo de otimização (Algoritmo Genético)

Com o objetivo de determinar os demais parâmetros do modelo biodinâmico, são empregadas técnicas de otimização utilizando o algoritmo genético (AG), com base nos resultados experimentais obtidos. Deste modo, a intenção da análise consiste em minimizar a equação de equilíbrio dinâmico, utilizando o *software* MATLAB [125]. Por meio desse processo, são determinadas as características dos indivíduos, como a força otimizada, rigidez e amortecimento. Neste sentido, vale ressaltar que para o processo de formulação matemática do método foram aplicados os seguintes critérios: uma população inicial composta por 100 indivíduos e um critério de parada estabelecido após 200 gerações.

Assim sendo, na sequência são apresentados os resultados obtidos referente aos valores das características dinâmicas das pessoas (massa, amortecimento e rigidez). Devido às limitações de espaço, são apresentados na Tabela 12 os primeiros 25 casos dos testes realizados nesta pesquisa. No entanto, todos os casos investigados podem ser encontrados no Apêndice A.

**Tabela 12 - Propriedades dinâmicas (m; c; k) Pessoas 1 a 25**

Pessoa	m (kg)	c (Ns/m)	k (N/m)
1	81,80	708,65	41449,95
2	66,05	558,95	34290,52
3	63,85	531,20	33313,89
4	88,25	848,17	44353,27
5	80,70	743,75	40793,94
6	78,40	676,82	40744,35
7	63,90	561,72	36609,48
8	93,55	818,63	43888,43
9	66,00	586,42	37277,32
10	73,85	635,22	37375,20
11	84,65	793,58	42547,43
12	73,30	672,30	39598,87
13	61,90	553,58	37621,74
14	107,15	945,92	46710,84
15	73,00	626,28	39623,69
16	78,50	733,47	41252,57
17	69,95	597,73	38990,72
18	75,20	674,37	38352,38
19	94,60	922,87	46372,69
20	72,10	617,86	39436,91
21	76,05	685,09	38729,72
22	63,90	561,72	36609,48
23	65,00	535,58	33458,90
24	53,75	446,10	35628,74
25	61,95	538,78	35989,34

Em seguida, a Tabela 13 apresenta uma avaliação estatística das características do modelo biodinâmico tendo como referência os 100 testes experimentais desenvolvidos. Desta forma, são utilizadas as seguintes variáveis estatísticas: média ( $\mu$ ), média quadrática ( $\mu_q$ ), desvio padrão ( $\sigma$ ), variância ( $\sigma^2$ ) e coeficiente de variação (CV). Tais parâmetros proporcionam uma visão abrangente das características do modelo e auxiliam na compreensão da amostragem utilizada nos testes experimentais [126].

**Tabela 13 - Parâmetros estatísticos referente ao modelo biodinâmico**

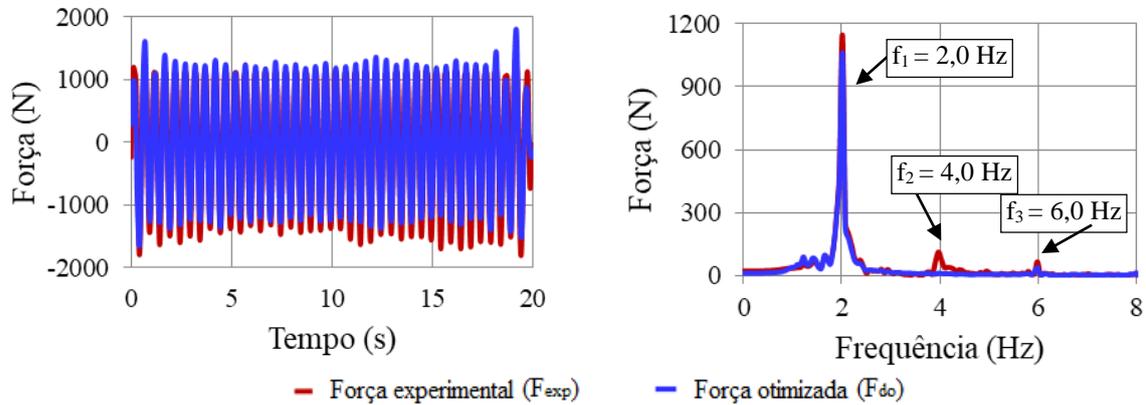
Propriedades do modelo biodinâmico	Média ( $\mu$ )	Média quadrática ( $\mu_q$ )	Variância ( $\sigma^2$ )	Desvio padrão ( $\sigma$ )	Coeficiente de variação (CV) %
Massa (kg)	74,90	77,00	$3,19 \times 10^2$	17,85	23,70
Amortecimento	793,10	930,10	$2,38 \times 10^5$	488,10	61,50
Rigidez (N/m)	44932,20	45748,02	$7,48 \times 10^7$	8646,10	19,21

Com base nos resultados apresentados na Tabela 13, que incluem as variáveis estatísticas de média e média quadrática, é possível analisar a amplitude dos resultados obtidos para as propriedades dos modelos biodinâmicos, como massa, amortecimento e rigidez. Além disso, a dispersão dos resultados pode ser avaliada por meio do desvio padrão e da variância. Ao levar em consideração a diversidade dos indivíduos envolvidos nos testes, observa-se que o alto valor do desvio padrão reflete a ampla variedade de indivíduos que participaram dos testes experimentais. Neste sentido, nota-se que os resultados estão em consonância com estudo proposto por Campista [95] que também evidenciaram essa mesma tendência.

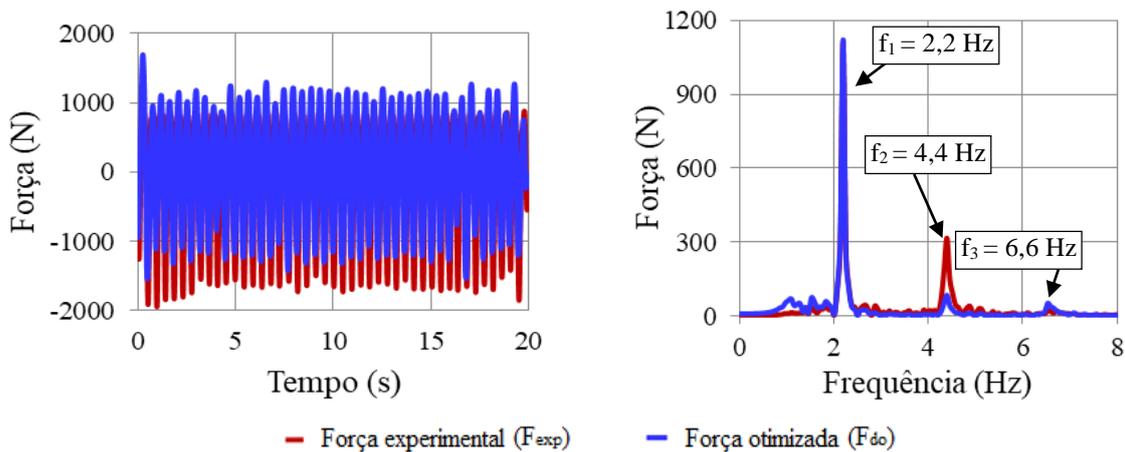
Ao analisar o coeficiente de variação, é possível observar que o parâmetro de massa apresenta uma variação menor em relação aos demais parâmetros. Por outro lado, os parâmetros de rigidez e amortecimento apresentam valores mais elevados. Tais resultados podem ser justificados através da seleção aleatória dos participantes, que leva a uma maior uniformidade nos valores de massa. No entanto, a rigidez e o amortecimento são influenciados por outros fatores, como a forma que cada indivíduo executa atividades humanas rítmicas, a resistência física dos participantes, o tipo de calçado utilizado e as diferenças de peso entre os indivíduos. Desta maneira, esses fatores contribuem para a maior variabilidade nos valores de rigidez e amortecimento observados.

No que se refere à análise comparativa entre os parâmetros relacionados à força otimizada ( $F_{Otm}$ ), obtida por meio da modelagem numérica através do processo de otimização, e os parâmetros de força experimental ( $F_{Exp}$ ), obtidos a partir dos testes experimentais utilizando células de carga, são apresentadas as Figuras 60 e 61 dois exemplos referentes à dois casos investigados. Assim sendo, a Figura 60 apresenta os resultados de força no domínio do tempo e da frequência de um indivíduo com massa corporal de 81,80 kg, saltando a uma frequência de excitação de 2 Hz, enquanto a Figura 61 corresponde aos dados de um indivíduo com massa corporal de

82,65 kg, saltando a uma frequência de excitação de 2,2 Hz. Essas figuras têm como objetivo realizar uma análise comparativa entre as diferentes estratégias de modelagem dos sistemas biodinâmicos.



**Figura 60 - Correlação entre  $F_{exp}$  e  $F_{otm}$  [massa = 81,80kg;  $f = 2,0$  Hz]**



**Figura 61 - Correlação entre  $F_{exp}$  e  $F_{otm}$  [massa = 82,65kg;  $f = 2,2$  Hz] [95]**

Ao avaliar os resultados apresentados nas Figuras 60 e 61 de forma qualitativa, observa-se uma notável convergência entre as variáveis analisadas. Para uma análise quantitativa, utilizou-se o coeficiente de correlação de Pearson (CCP) [126], representado na Equação 21. É importante ressaltar que a correlação entre essas variáveis apresentou valores de CCP superiores a 0,7, indicando uma correlação forte (Mukaka [127], Hafeez et al. [128] e Field [129]). A Tabela 14 apresenta 25 resultados da correlação entre as variáveis no domínio do tempo e da frequência, e os demais resultados obtidos no âmbito deste estudo podem ser encontrados no Apêndice B.

$$CCP = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{(\sum (x_i - \bar{x})^2)(\sum (y_i - \bar{y})^2)}} \quad (21)$$

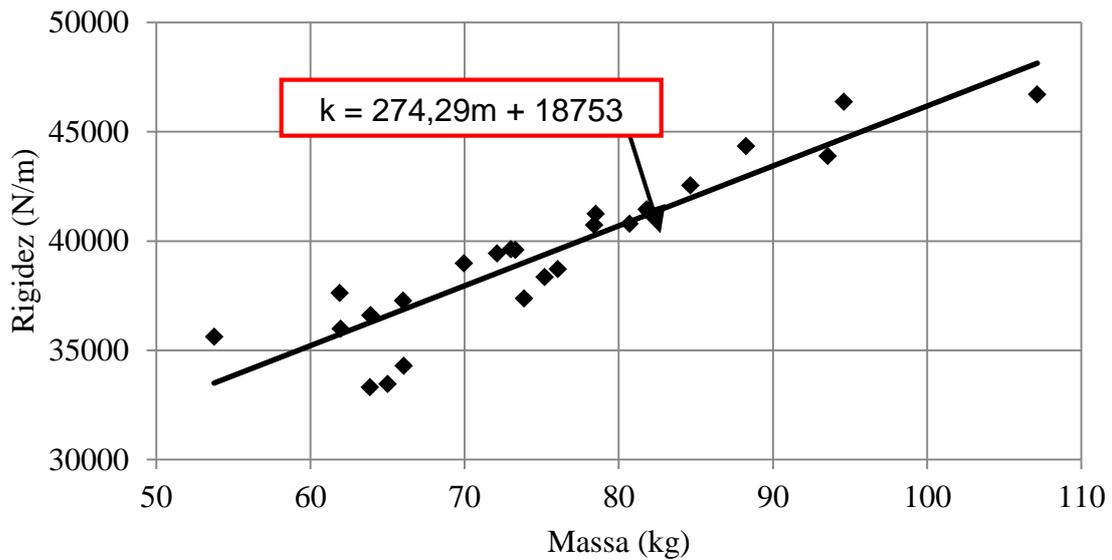
Onde CCP: coeficiente de correlação de Pearson;  $x_i$ : elemento da primeira variável;  $y_i$ : elemento da segunda variável;  $\bar{x}$ : média dos valores de  $x_i$ ;  $\bar{y}$ : média dos valores de  $y_i$ .

**Tabela 14 - Correlação de Pearson (CCP) das pessoas 1 a 25**

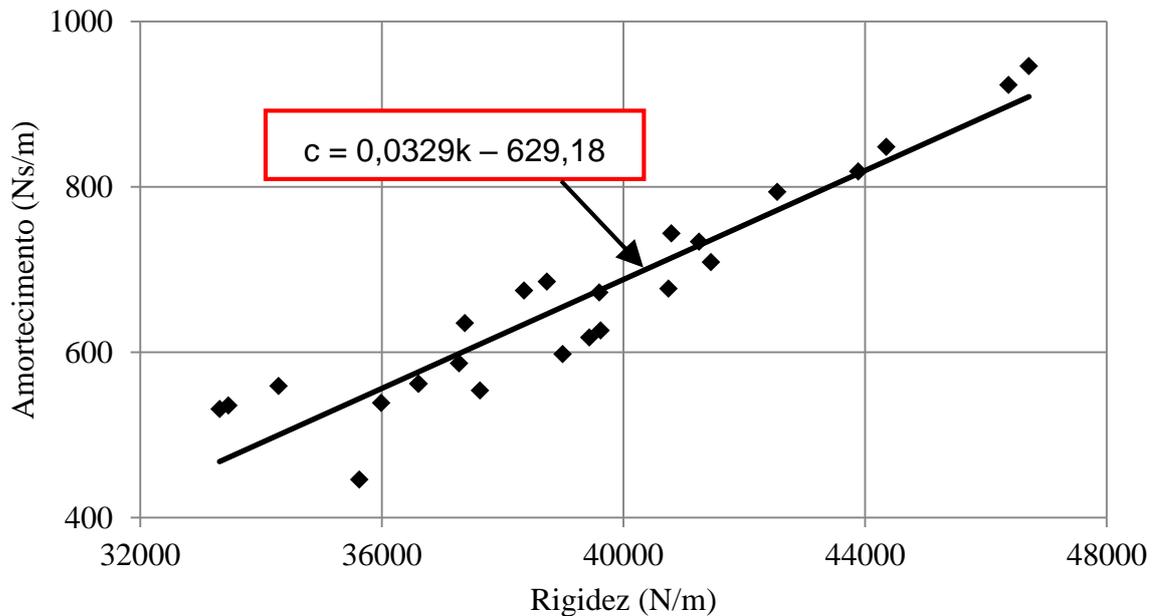
Pessoa	Coeficiente de Pearson (CCP) entre $F_{Exp}$ X $F_{Otm}$	
	Domínio da frequência	Domínio do tempo
1	0,99	0,95
2	0,98	0,97
3	0,97	0,96
4	0,99	0,98
5	0,95	0,94
6	0,98	0,92
7	0,93	0,80
8	0,96	0,86
9	0,92	0,91
10	0,94	0,89
11	0,99	0,97
12	0,99	0,97
13	0,98	0,87
14	0,98	0,95
15	0,96	0,94
16	0,98	0,97
17	0,99	0,92
18	0,95	0,70
19	0,99	0,90
20	0,98	0,92
21	0,97	0,94
22	0,98	0,96
23	0,93	0,86
24	0,98	0,96
25	0,97	0,94

Ao analisar os resultados expressos na Tabela 14, fica evidente uma boa forte correlação entre as variáveis do modelo biodinâmico: Força otimizada ( $F_{Otm}$ ) e força experimental ( $F_{Exp}$ ). Na sequência, com o objetivo de estabelecer uma relação matemática entre as características dinâmicas dos sistemas biodinâmicos (massa, amortecimento e rigidez), utilizou-se uma amostra de 25 indivíduos que apresentaram uma elevada correlação de Pearson. Neste contexto, a Tabela 15 e as Figuras 62 até 64 apresentam as relações entre rigidez-massa, amortecimento-rigidez e amortecimento-massa. As equações de regressão linear são obtidas com base na correlação entre essas variáveis, juntamente com os respectivos valores de  $R^2$ . Assim

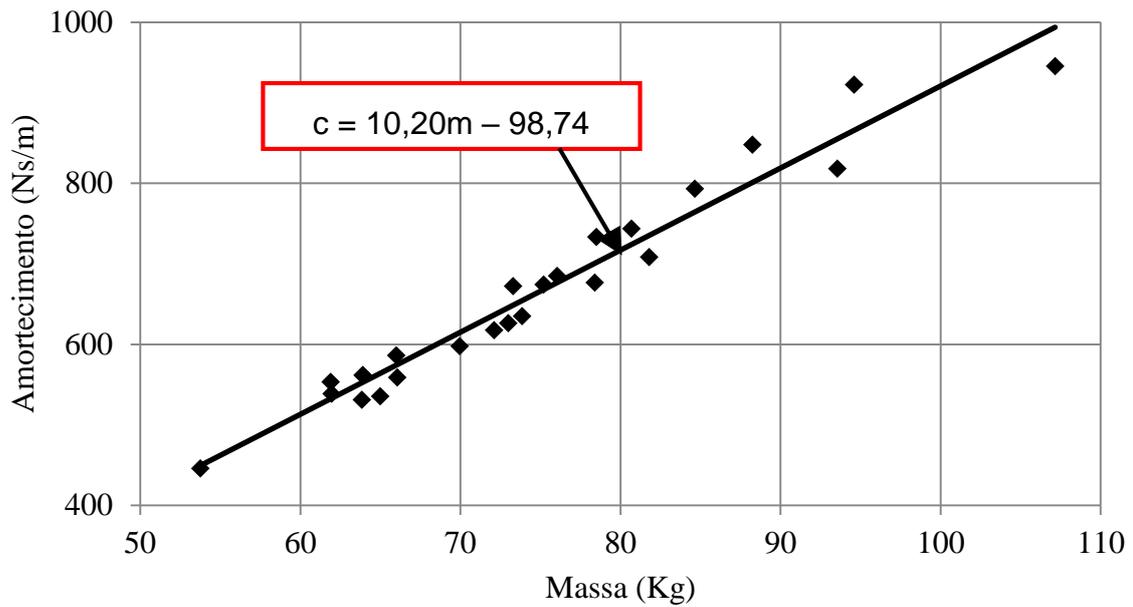
sendo, essas equações matemáticas expressam a relação entre os parâmetros mencionados. Cabe ressaltar que essa abordagem permite determinar as características do modelo biodinâmico dos indivíduos sem a necessidade de realizar novos testes experimentais, ou seja, através dessas relações, é possível estimar as características dinâmicas dos sistemas biodinâmicos dos indivíduos com base no emprego dessas equações matemáticas.



**Figura 62 - Correlação linear entre a rigidez e massa**



**Figura 63 - Correlação linear entre a amortecimento e rigidez**



**Figura 64 - Correlação linear entre amortecimento e massa**

**Tabela 15 - Dados obtidos mediante à aplicação da regressão linear**

Relação	R <sup>2</sup>	CCP	Expressão matemática
k x m	0,84	0,92	$k = 274,29m + 18753$
c x k	0,89	0,94	$c = 0,0329k - 629,18$
c x m	0,96	0,98	$c = 10,20m - 98,74$

Com base nos resultados obtidos para os vinte indivíduos selecionados, expressos na Tabela 15 e Figuras 62 a 64, pode ser observado uma correlação satisfatória entre as características dinâmicas dos sistemas biodinâmicos. Os coeficientes de correlação de Pearson (CCP) e o R<sup>2</sup> indicam que existe uma forte correlação, especialmente na relação entre as variáveis de amortecimento e massa (CCP = 0,98). Por outro lado, ao analisar a correlação entre a rigidez e a massa, nota-se uma relação um pouco menor associação entre as situações investigadas (CCP = 0,92). No entanto, é importante ressaltar que em todas as situações analisados o coeficiente de Pearson (CCP) foi superior a 0,7, indicando assim que entre as variáveis existe uma forte correlação.

## 2.5 Considerações finais

O capítulo abordou a modelagem analítica e experimental adotada no desenvolvimento da modelagem de sistemas biodinâmicos. A formulação matemática do método foi apresentada, juntamente com uma descrição dos testes experimentais realizados no laboratório. Com base nos resultados obtidos, nota-se que a metodologia de análise proposta neste trabalho de pesquisa pode ser considerada uma alternativa mais realista para a caracterização das ações dinâmicas humanas rítmicas sobre pisos de edifícios, uma vez que o modelo biodinâmico considera as características dinâmicas dos indivíduos (massa, amortecimento e rigidez). Além disso, percebe-se uma forte correlação de Pearson ( $CCP > 0,7$ ) entre as variáveis do modelo biodinâmico (força experimental e força otimizada).

### 3 MODELO ESTRUTURAL INVESTIGADO

#### 3.1 Considerações iniciais

O presente capítulo tem como objetivo fornecer uma apresentação detalhada acerca das características do modelo estrutural investigado neste trabalho de pesquisa, o qual representa um piso de concreto armado real localizado no 8º andar da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ). Neste contexto, a escolha desse piso se deve ao fato de ser amplamente utilizado para práticas de atividades humanas rítmicas, o que permite uma análise do comportamento estrutural dinâmico em condições reais de carregamento. Deste modo, ao longo do capítulo são apresentadas as propriedades físicas e geométricas do modelo estrutural investigado neste trabalho de pesquisa.

#### 3.2 Modelo estrutural: piso de concreto armado

O piso de concreto armado investigado neste estudo corresponde a uma estrutural real localizado no 8º pavimento do Instituto de Educação Física Bloco F do Pavilhão Reitor João Lyra Filho da UERJ, Rio de Janeiro/RJ, Brasil. Esse piso investigado corresponde a uma sala interdisciplinar utilizada para aulas práticas do curso de Educação Física, onde são desenvolvidas atividades tais como: dança, caminhada, treinamento funcional, saltos e atividades aeróbicas. Neste sentido, as Figuras 65 a 68 ilustram fotos reais referentes ao sistema estrutural investigado neste trabalho. A Figura 69 apresenta detalhes referentes à vista superior do Departamento de Educação Física da UERJ, composto por um total de 24 lajes de concreto. No entanto, esta investigação concentrou-se em examinar o comportamento estrutural dinâmico da academia de ginástica que apresenta dimensões iguais a 16m x 35m e uma área total de 560 m<sup>2</sup>, dividida em 12 painéis de lajes de concreto com espessura de 12 cm. Mais detalhes relacionados as dimensões das vigas e pilares do piso de concreto armado podem ser encontrados no Apêndice C.

No que se refere às propriedades físicas do concreto, de acordo com as especificações do projeto executivo, o concreto utilizado apresenta uma resistência

característica à compressão de 13,7 MPa, módulo de elasticidade longitudinal secante de 17,6 GPa, coeficiente de Poisson de 0,2 e peso específico de 25 kN/m<sup>3</sup>. Além disso, é importante salientar que o piso foi construído no final da década de 70 e que as propriedades dos materiais utilizados são reais e amplamente empregadas na prática de projetos na cidade do Rio de Janeiro, Brasil, àquela época.

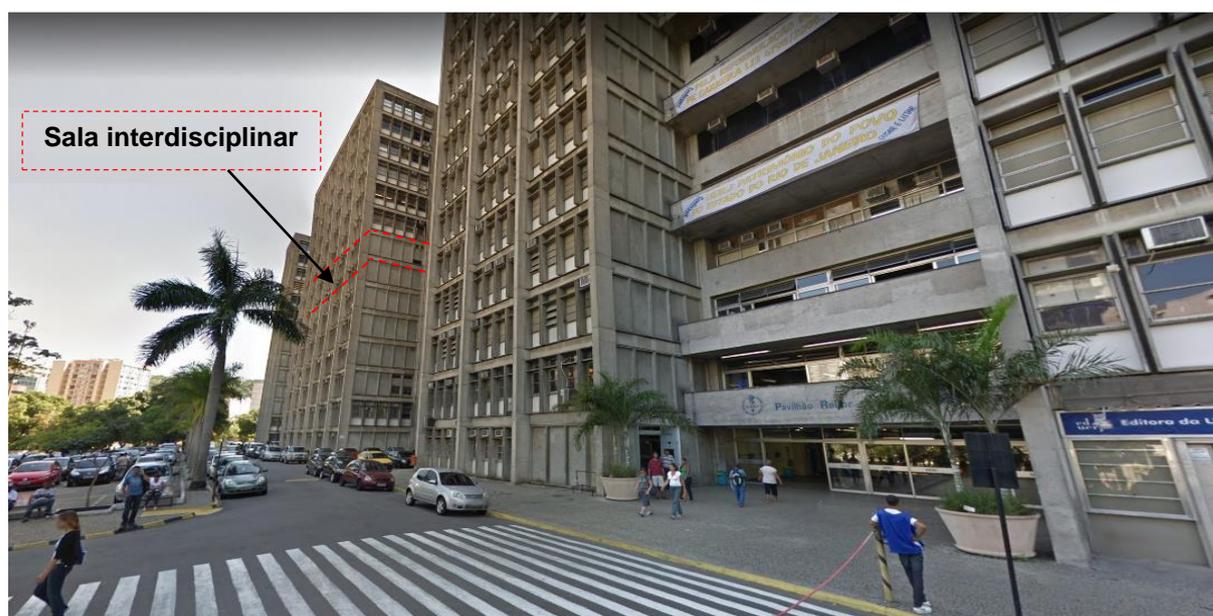


Figura 65 - Vista externa UERJ

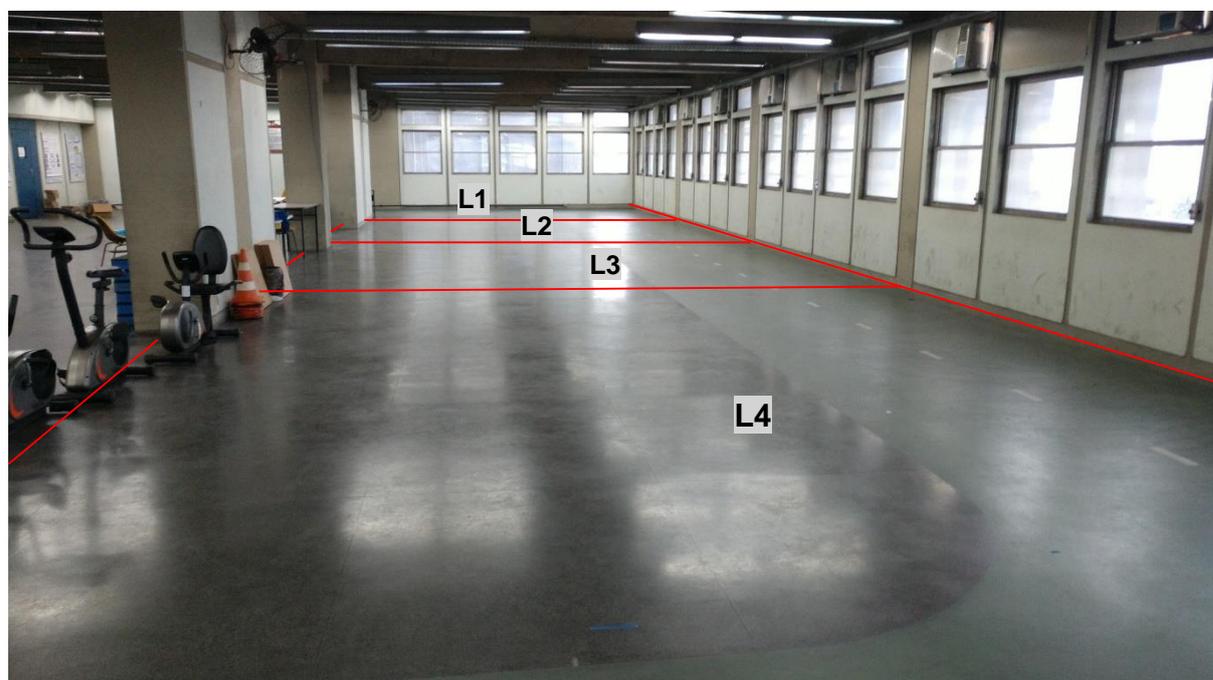


Figura 66 - Vista interna academia de ginástica

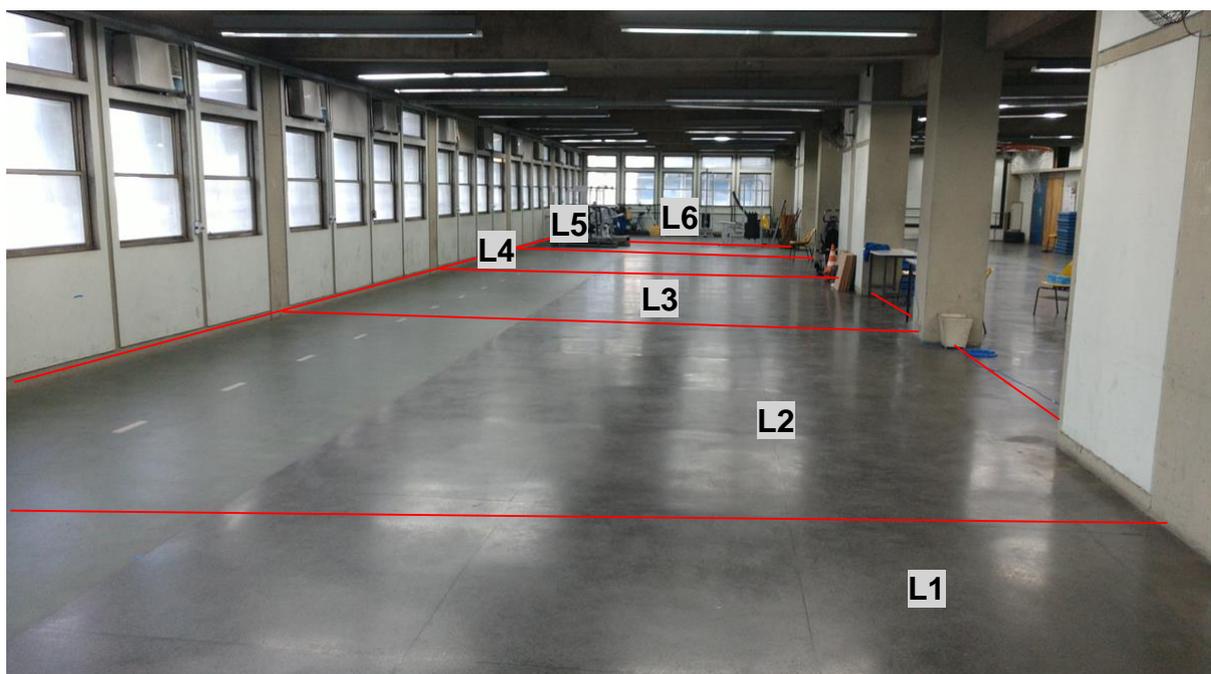


Figura 67 - Vista interna academia de ginástica

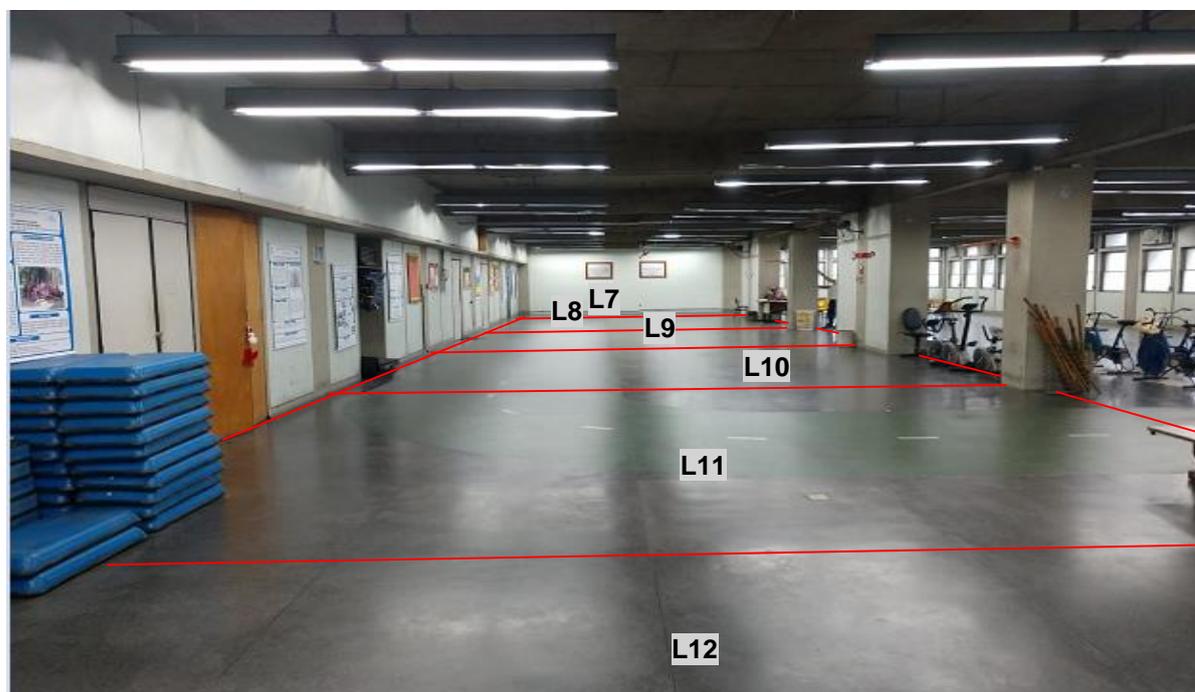


Figura 68 - Vista interna academia de ginástica

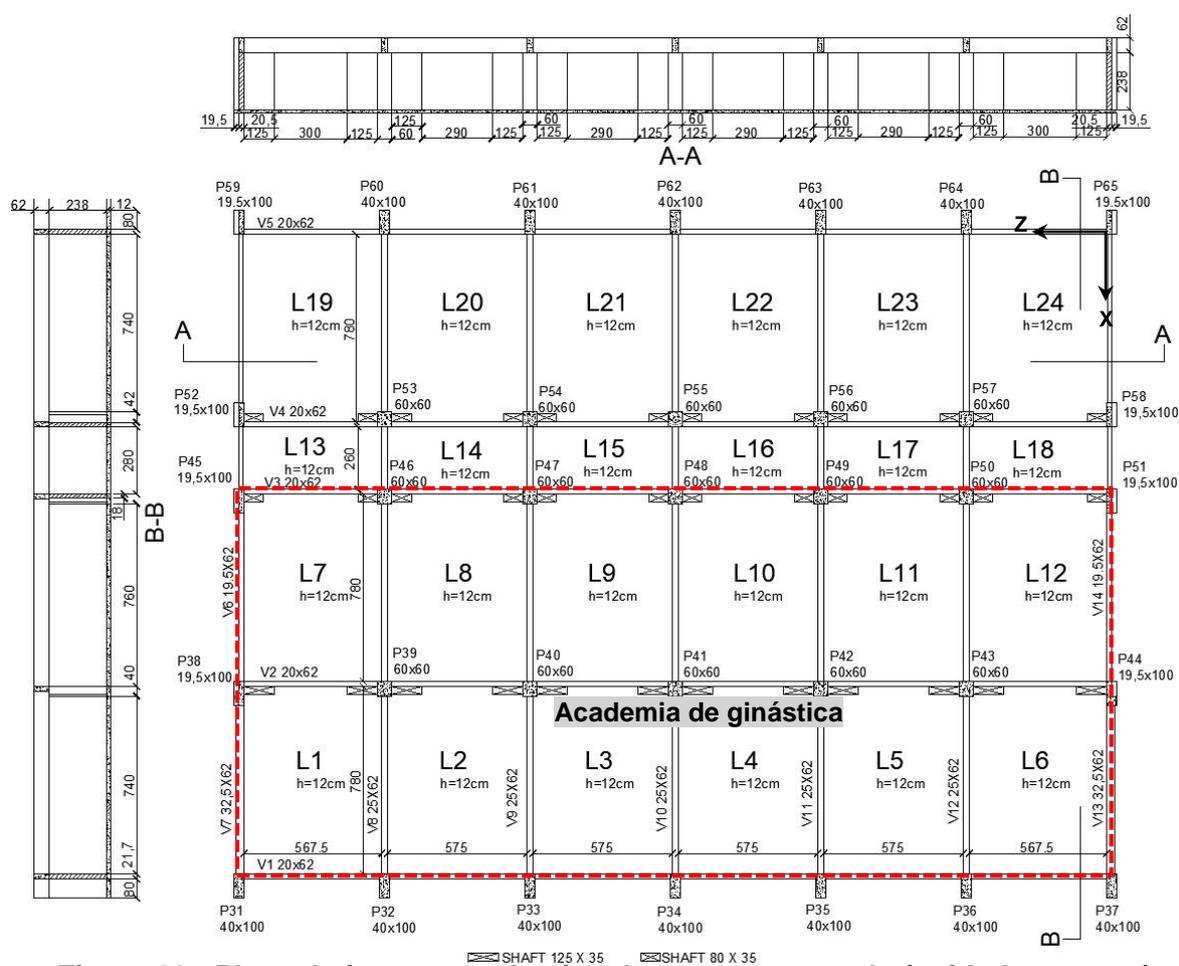


Figura 69 - Planta baixa e corte do piso de concreto armado (unidades em cm)

### 3.3 Considerações do capítulo

O presente capítulo forneceu uma descrição detalhada acerca do modelo estrutural investigado no âmbito desta pesquisa, que corresponde a um piso de concreto armado real localizado na UERJ. A escolha desse piso se deve ao fato de ser amplamente utilizado para práticas de atividades humanas rítmicas, o que permite uma análise do comportamento estrutural dinâmico em condições reais de carregamento.

## 4 MODELO EM ELEMENTOS FINITOS

### 4.1 Considerações iniciais

Este capítulo tem como objetivo principal o desenvolvimento do modelo em elementos finitos com base nas informações previamente apresentadas acerca das propriedades físicas e geométricas do piso em estudo. Pretende-se, portanto, realizar análises do comportamento estrutural dinâmico do piso por meio de modelagem numérica, seguida de calibração e comparação com resultados experimentais.

No decorrer deste capítulo, são apresentados os critérios e as hipóteses simplificadores empregadas durante o processo de modelagem do sistema estrutural investigado. Além disso, são descritos os detalhes acerca do processo de modelagem numérica empregado no âmbito do desenvolvimento de sistemas biodinâmicos.

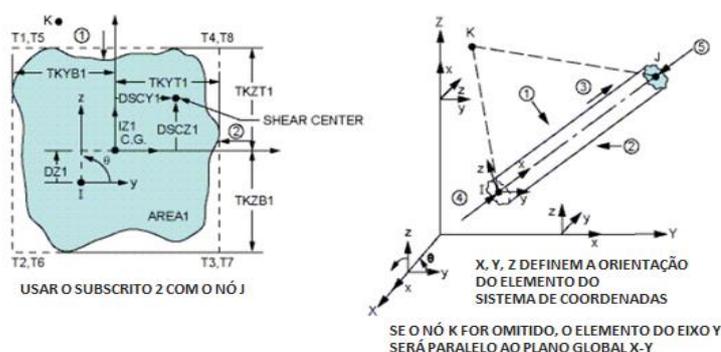
### 4.2 Elementos finitos empregados na modelagem do piso

O Método dos Elementos Finitos (MEF) diz respeito a uma abordagem numérica amplamente utilizada nas resoluções de problemas relacionados à mecânica do contínuo. Desta forma, o método permite obter soluções aproximadas para uma ampla variedade de problemas estruturais. Ressalta-se que esse *software* de análise é amplamente utilizado no campo da Engenharia Civil, permitindo assim uma ampla variedade de análises estruturais, tais como estática, harmônica, modal, dinâmica, espectral e de flambagem. No entanto, neste trabalho, como os estudos são direcionadas na avaliação do comportamento estrutural dinâmico do piso em estudo, são empregadas principalmente as análises modais e transientes. Assim sendo, com a finalidade de modelar o piso de concreto armado investigado no âmbito deste estudo, utiliza-se o programa ANSYS [130] com base no emprego do Método dos Elementos Finitos (MEF).

Neste contexto, com o objetivo de gerar uma malha adequada para a representação do modelo proposto e a seleção dos elementos finitos mais apropriados para descrever o comportamento estrutural dinâmico do piso de forma idealizada, são empregados critérios de modelagem ao longo do desenvolvimento do modelo em elementos finitos. Neste sentido, com a finalidade de garantir a confiabilidade dos

resultados, são aplicadas as técnicas adequadas de discretização na construção do modelo, onde a malha é discretizada em uma distância de 50 cm em todos os elementos, abrangendo vigas, pilares e lajes.

No âmbito deste estudo utilizou-se o elemento finito BEAM44 [130] com a finalidade de representar as vigas e pilares. Cabe ressaltar que esse elemento é unidimensional e composto por dois nós, sendo que cada nó possui seis graus de liberdade: deslocamentos nas direções X, Y e Z e rotações em torno dos eixos X, Y e Z. Além disso, é possível modelar casos em que as extremidades opostas do elemento apresenta geometrias diferentes. Quanto à orientação dos eixos, o eixo X do elemento está alinhado da extremidade do nó i para a extremidade do nó j, enquanto os eixos Y e Z estão situados no plano transversal, conforme ilustrado na Figura 70.

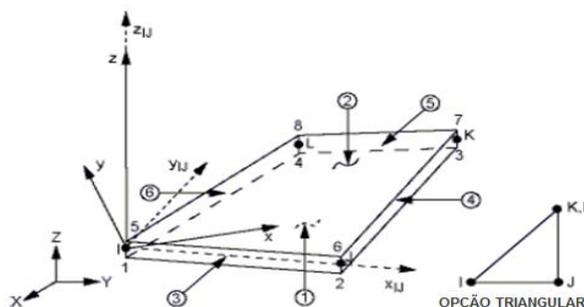


**Figura 70 - Elemento BEAM44 [130]**

Neste contexto de análise, utilizou-se o elemento de casca SHELL63 [130], com o intuito de descrever as lajes de concreto armado do piso investigado. Assim sendo, é importante mencionar que o elemento finito é especialmente projetado para modelar a resposta estrutural de elementos de superfície com espessura, como as lajes de concreto (ver Figura 71). Neste sentido, o elemento SHELL63 [130] considera a deformação e o comportamento de cisalhamento da casca, oferecendo uma representação mais precisa das lajes de concreto. Destaca-se que o elemento é composto por quatro nós, e cada nó possui seis graus de liberdade: deslocamentos nas direções X, Y e Z e rotações em torno dos eixos X, Y e Z. Esses graus de liberdade permitem capturar os efeitos de flexão e membrana nas lajes.

Diante do exposto, com base no emprego do elemento SHELL63 [130], é possível modelar com maior precisão as características estruturais das lajes de concreto, levando em consideração sua espessura, rigidez e comportamento de

cisalhamento. Na próxima seção, serão apresentadas as etapas de modelagem e as considerações adotadas para o desenvolvimento do modelo computacional do piso.



**Figura 71 - Elemento SHELL63 [130]**

#### 4.3 Hipóteses simplificadoras

A modelagem numérica do piso de concreto armado requer uma cuidadosa seleção dos elementos finitos e a correta definição de suas propriedades, a fim de obter resultados confiáveis na análise estrutural dinâmica. Além disso, com intuito de simplificar o modelo estrutural são adotadas algumas hipóteses simplificadoras:

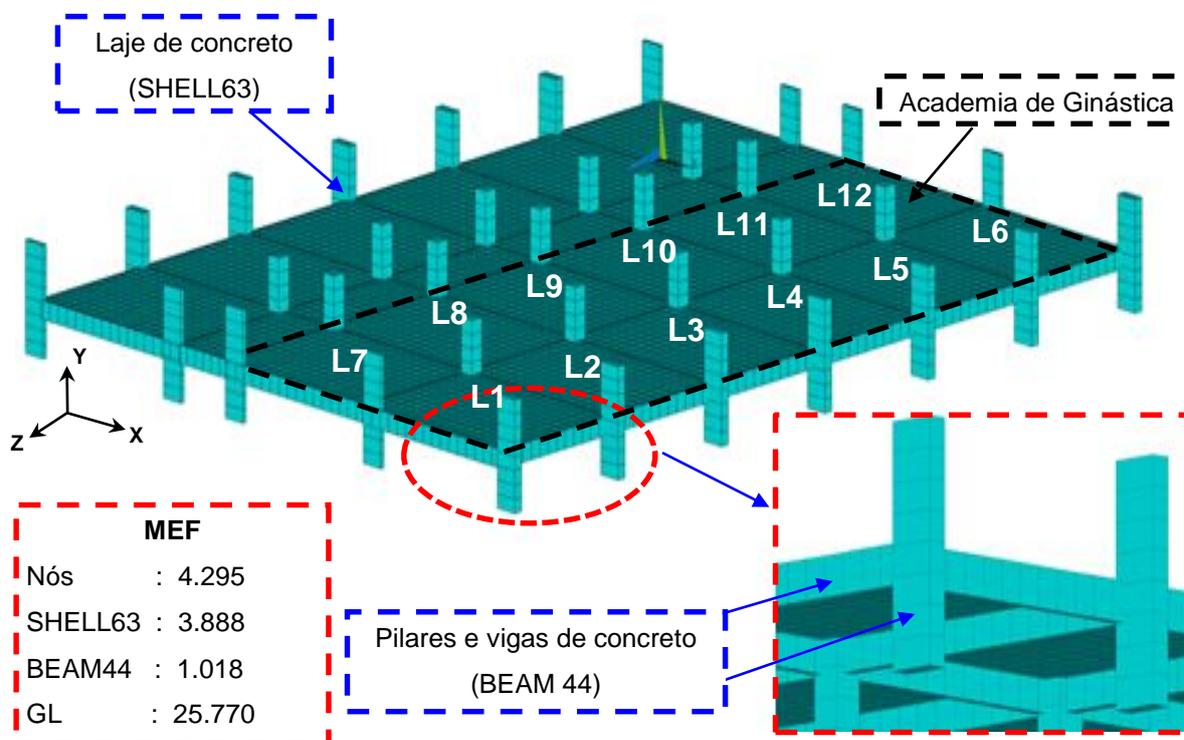
- Comportamento isotrópico e homogêneo: O modelo considera que o material do piso possui as mesmas propriedades em todas as direções, ou seja, não há variação na resposta estrutural em diferentes direções.
- Comportamento linear elástico: A estrutura é assumida como linearmente elástica, o que significa que a relação entre as deformações e as tensões é linear e obedecem à Lei de Hooke, indicando que a estrutura responde de forma proporcional às cargas aplicadas.
- Linearidade geométrica: Não são considerados os efeitos de deformação na estrutura. Essa hipótese simplifica a análise ao assumir que as deformações são pequenas o suficiente para que as mudanças na geometria da estrutura sejam insignificantes.
- Hipótese de Euler-Bernoulli: Assume-se que as seções planas do piso permanecem planas após a deformação, ou seja, não há rotação das seções transversais em relação aos eixos longitudinais.
- Conexões estruturais rígidas: As conexões entre vigas e entre vigas e colunas são consideradas rígidas, o que significa que não há rotação ou deslocamento

relativo entre os elementos conectados. Essa hipótese simplifica a modelagem das conexões estruturais.

Diante do exposto, cada ressaltar que no modelo computacional são utilizadas ligações rígidas do tipo "off-set" entre os elementos BEAM44 e SHELL63. Essas ligações levam em conta a excentricidade do plano central da laje em relação ao eixo central da viga, seguindo as configurações do elemento BEAM44. Além disso, uma simplificação é implementada no modelo do piso do 8º andar, onde o pilar é representado considerando apenas metade do pé-direito inferior (7º andar) e metade do pé-direito superior (8º andar). Essa simplificação é adotada levando em conta as propriedades estruturais do pilar, garantindo uma representação adequada no modelo computacional e reduzindo os custos na análise.

#### 4.4 Modelo em elementos finitos

O modelo em elementos finitos desenvolvido no âmbito deste estudo apresenta as seguintes propriedades: 3.888 elementos do tipo SHELL63, 1.018 elementos do tipo BEAM44, 25.770 graus de liberdade e um total de 4.906 e 4.295 nós. Neste contexto, as Figuras 72 e 73 fornecem detalhes do modelo numérico desenvolvido.



**Figura 72 - Modelo em elementos finitos do piso de concreto armado**

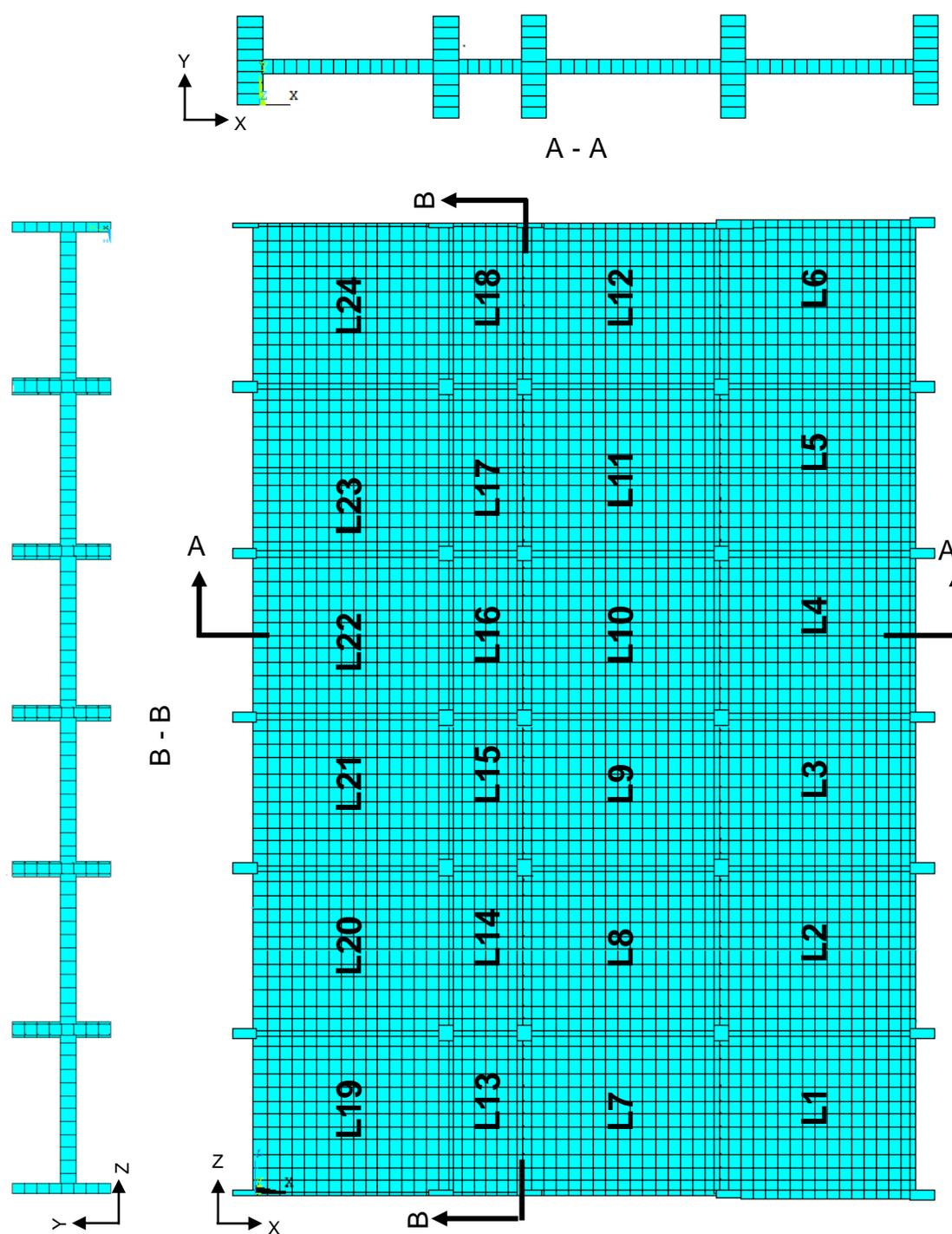


Figura 73 - Detalhes do modelo em elementos finitos

#### 4.5 Modelagem do amortecimento estrutural

O amortecimento estrutural refere-se a uma propriedade modal que pode impactar diretamente sob a energia dissipada durante os movimentos vibratórios. Destaca-se que diversos fatores podem influenciar o amortecimento estrutural,

incluindo as propriedades do projeto e as condições de contorno entre os elementos estruturais, conforme mencionado por Saidi et al. [131].

A norma ISO 10137 [55] destaca que uma série de variáveis podem influenciar as taxas de amortecimento estrutural, como revestimentos, paredes, móveis, equipamentos, propriedades físicas dos materiais, vida útil da estrutura, qualidade da construção, frequência de vibração e amplitude. Além disso, problemas estruturais, como fissuras, também podem desempenhar um papel importante na análise. Por outro lado, as variáveis relacionadas à massa modal e rigidez modal tendem a permanecer constantes ao longo da vida útil da estrutura.

Portanto, em uma análise dinâmica de estruturas, é crucial investigar o amortecimento estrutural com o intuito de avaliar as respostas dinâmicas do sistema estrutural. Deste modo, com o objetivo de modelar o amortecimento estrutural, Craig [132], Clough e Penzien [133], e Chopra [134] propuseram a utilização da matriz de amortecimento de Rayleigh, que combina as contribuições da rigidez ( $\delta$ ) e da massa ( $\alpha$ ), conforme expresso na Equação 22. Nessa equação,  $M$  representa a matriz de massa e  $K$  é a matriz de rigidez do sistema estrutural.

$$C = \alpha M + \delta K \quad (22)$$

A taxa de amortecimento modal pode ser definida em termos da frequência natural circular (rad/s), conforme expresso na Equação 23. Assim sendo, para obter uma representação mais detalhada, as variáveis  $\alpha$  e  $\delta$  podem ser expandidas em função das frequências naturais da estrutura, como demonstrado nas Equações 24 e 25. Essas equações fornecem os termos individuais de  $\alpha$  e  $\delta$  para duas frequências naturais importantes.

$$\xi_i = \frac{\alpha}{2\omega_{0i}} + \frac{\delta\omega_{0i}}{2} \quad (23)$$

$$\alpha = 2\xi_1\omega_{01} - \delta\omega_{01}\omega_{01} \quad (24)$$

$$\delta = \frac{2(\xi_2\omega_{02} - \xi_1\omega_{01})}{\omega_{02}\omega_{02} - \omega_{01}\omega_{01}} \quad (25)$$

Onde,  $\xi_i$  representa a taxa de amortecimento do modo  $i$ ;  $\omega_{0i}$  representa a frequência natural circular do modo  $i$ ;  $\omega_{01}$  refere-se a menor frequência fundamental;  $\omega_{02}$  corresponde a segunda frequência.

Ao considerar as frequências naturais conhecidas e os modos de vibração mais significativos para a resposta dinâmica da estrutura analisada sob a ação do carregamento aplicado, é possível obter os valores dos parâmetros  $\alpha$  e  $\delta$ . Esses parâmetros dependem dos resultados das matrizes de massa e rigidez correspondentes ao modo de vibração de interesse.

#### 4.6 Modelagem numérica: sistemas biodinâmicos

Considerando-se o desenvolvimento de um modelo biodinâmico simples e eficiente, composto somente por elementos de massa, amortecimento e rigidez, e apenas um grau de liberdade (SGL1), foi utilizado o elemento finito COMBIN 40 [130], objetivando a avaliação do efeito da interação dinâmica pessoa-estrutura mediante representação das ações humanas rítmicas sobre pisos de edifícios. Este elemento finito foi selecionado para a modelagem numérica em função das variáveis do modelo biodinâmico relacionadas às características dinâmicas dos indivíduos (massa, amortecimento e rigidez), além do fato de que o mesmo consiste em um sistema com um grau de liberdade (SGL1) por nó. No caso desta investigação, o elemento COMBIN 40 [130] representa somente o movimento vertical das pessoas sobre a estrutura, mediante a utilização do grau de liberdade translacional vertical, conforme ilustrado na Figura 74. Desta maneira, as características dinâmicas dos indivíduos (massa, amortecimento e rigidez), obtidas experimentalmente em etapa anterior [ver Capítulo 2], são utilizadas para a modelagem em elementos finitos do sistema biodinâmico desenvolvido neste trabalho de pesquisa, objetivando a representação numérica dos indivíduos atuando sobre o piso de concreto armado investigado, conforme ilustrado na Figura 74.

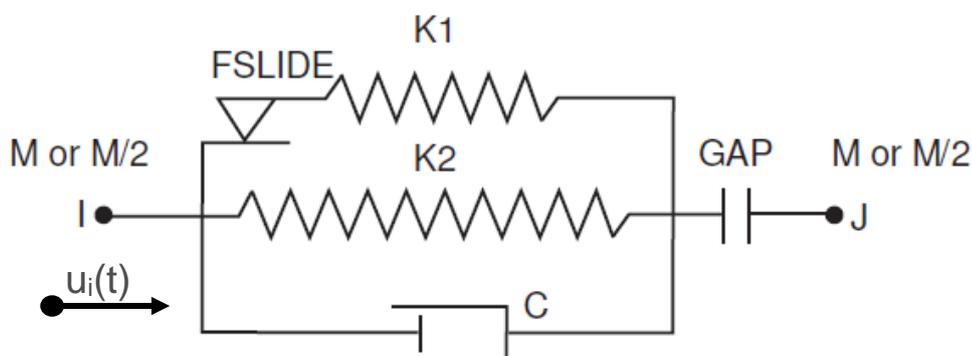
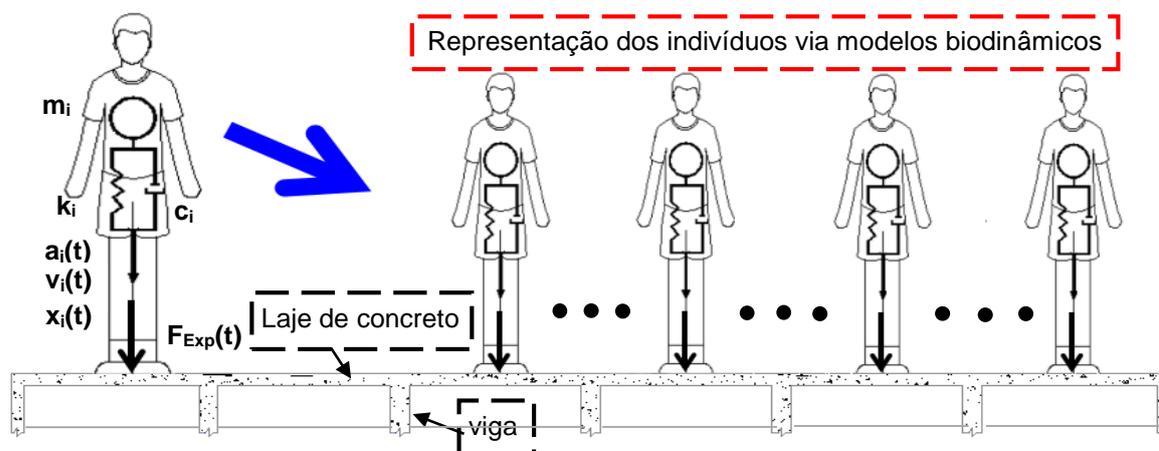


Figura 74 - Elemento COMBIN40 [130]

Deve-se ressaltar, também, que a ação dinâmica  $[F_i(t)]$  atua diretamente sobre as lajes de concreto do piso, em conjunto com os sistemas biodinâmicos. Por sua vez, os sistemas biodinâmicos (COMBIN 40 [130]) são acoplados diretamente aos nós do modelo em elementos finitos global da estrutura representativos das referidas lajes de concreto (SHELL 63 [130]). O grau de liberdade  $[u_i(t)]$  ilustra o movimento translacional vertical do modelo biodinâmico desenvolvido (S1GL), e o símbolo “i”, representa de maneira genérica cada indivíduo sobre as lajes, de acordo com a Figura 74. Na sequência do estudo, apresenta-se a metodologia desenvolvida para a calibração do modelo biodinâmico proposto neste trabalho de pesquisa, tendo em mente as variáveis obtidas experimentalmente e, ainda, via processo numérico de otimização.

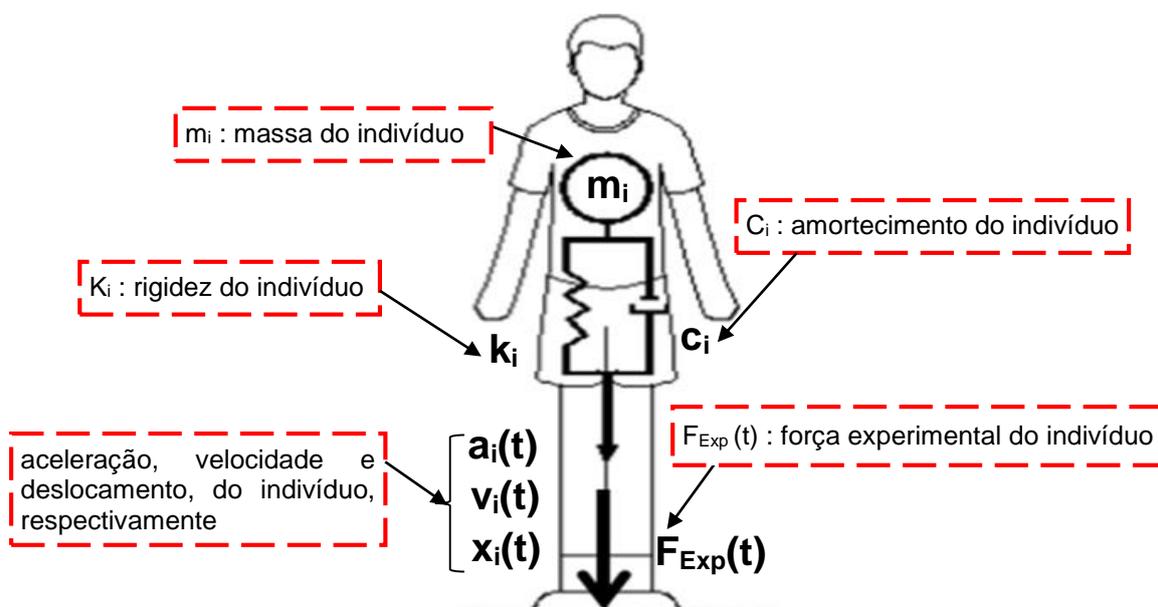
Assim sendo, com o objetivo de representar numericamente os indivíduos no sistema estrutural através de sistemas biodinâmicos, utiliza-se o elemento finito COMBIN40 [130], conforme ilustrado na Figura 75. Em seguida, são descritos os parâmetros utilizados na modelagem biodinâmica, com base no modelo de elementos finitos desenvolvido (ver Figura 76).



**Figura 75 - Representação dos indivíduos via modelos biodinâmicos (SDOF)**

Cabe ressaltar que os parâmetros do modelo biodinâmico foram inseridos no modelo numérico através das variáveis obtidas via testes experimentais e processo de otimização. Deste modo, a massa concentrada do indivíduo foi numericamente atribuída a um nó do elemento COMBIN40 [130], com base nos resultados obtidos via pesagem de cada indivíduo por meio da balança digital, enquanto os demais parâmetros como rigidez e amortecimento do indivíduo foram obtidos mediante o processo de otimização (ver seção 2.4.4), onde os mesmos foram acoplados ao elemento finito. Além disso, monitorou-se experimentalmente a aceleração do

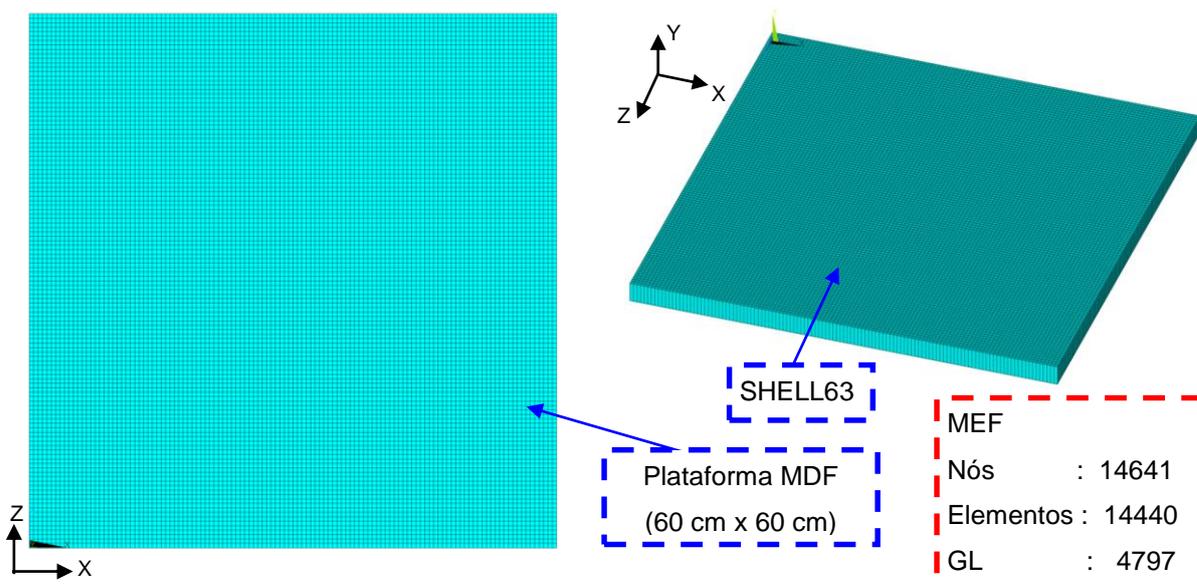
indivíduo através da medição da aceleração do indivíduo ao longo de saltos, bem como os dados de velocidade e deslocamento que foram obtidos via processo de integração numérica, conforme descrito na seção 2.4.3. Neste sentido, cabe ressaltar que tais parâmetros dinâmicos foram empregados no âmbito das diferentes análises realizadas ao longo desta tese de doutorado.



**Figura 76 - Detalhes dos parâmetros da modelagem biodinâmica**

#### 4.6.1 Validação do modelo biodinâmico proposto

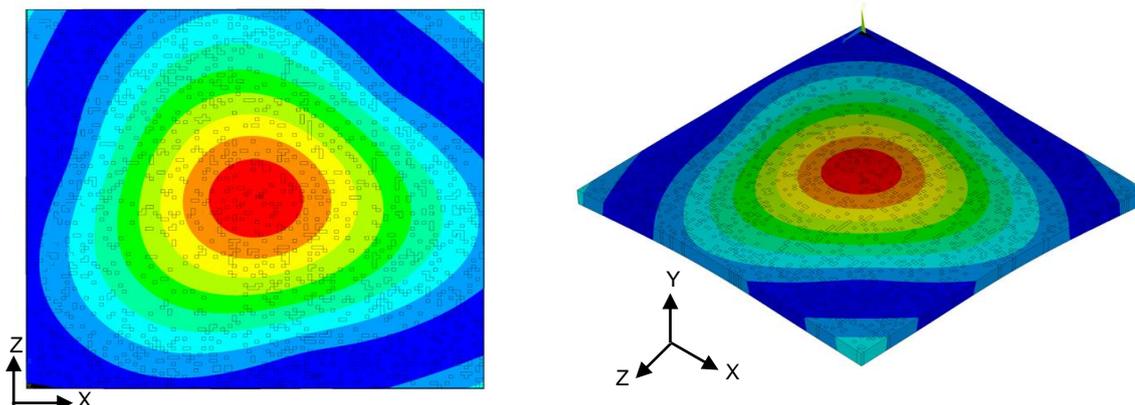
Inicialmente, foi desenvolvido o modelo em elementos finitos da plataforma, no qual foram realizados testes experimentais no laboratório. Para tal, o elemento de casca SHELL63 foi utilizado com o objetivo de representar o MDF, seguindo as propriedades físicas e geométricas da plataforma descritas na seção 2.4.2. A Figura 77, assim, ilustra os detalhes do modelo computacional desenvolvido, destacando a representação detalhada obtida por meio da aplicação de técnicas de refinamento. As condições de contorno adotadas na plataforma estão em consonância com os apoios das células de carga, onde restrições são aplicadas nos graus de liberdade correspondentes aos deslocamentos observados nos testes experimentais.



**Figura 77 - Modelo em elementos finitos (plataforma MDF)**

Na sequência, procede-se a uma avaliação detalhada do comportamento estrutural dinâmico da plataforma, por meio de análise modal (modelagem numérica), com o objetivo de investigar as possíveis influências das propriedades modais (frequências naturais) sobre os testes experimentais realizados (frequência de excitação). Neste sentido, os resultados obtidos via emprego do modelo em elementos finitos indicam que o primeiro modo de vibração da plataforma corresponde a 17,65 Hz ( $f_{01} = 17,65$  Hz).

Deste modo, é possível descartar as possibilidades de ressonância para as faixas de frequência estudadas no âmbito deste trabalho, dado que a frequência de excitação aplicada sobre a plataforma corresponde a 2 Hz ( $f = 2$  Hz). Portanto, a plataforma não estará suscetível a ressonâncias indesejadas nessa faixa de frequência, as quais poderiam gerar interferências sobre a resposta estrutural dinâmica da plataforma durante a realização dos testes experimentais desenvolvidos sobre a plataforma. Assim sendo, a Figura 78 apresenta de maneira ilustrativa o primeiro modo de vibração da plataforma.

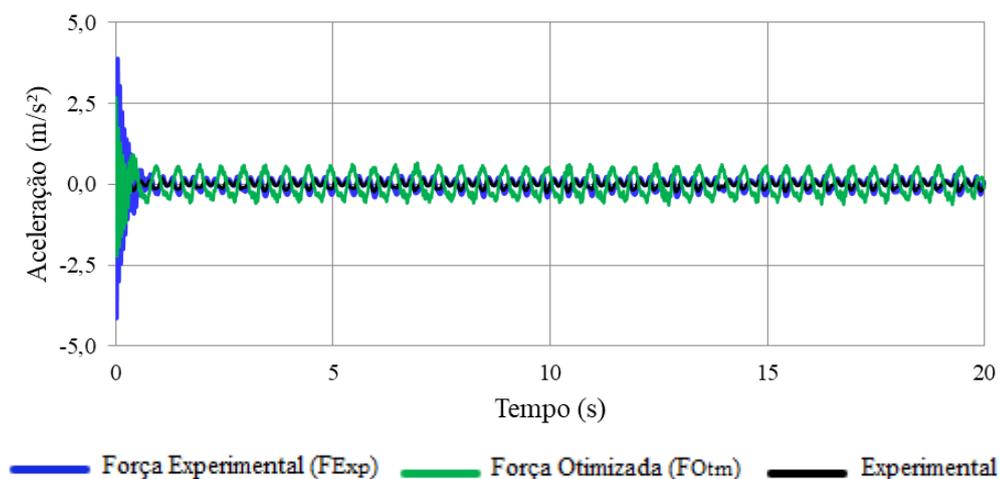


**Figura 78 - Primeiro modo de vibração da plataforma ( $f_{01} = 17,65$  Hz)**

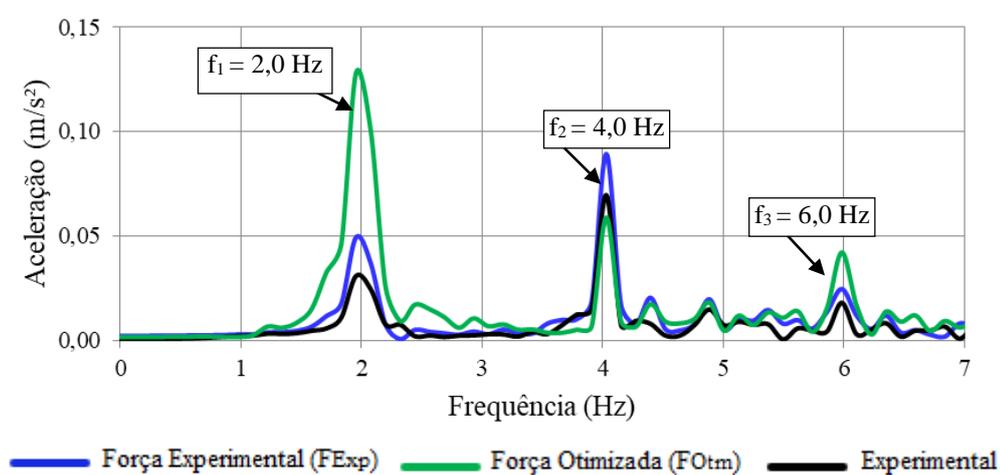
Em seguida, com o objetivo de validar o modelo biodinâmico desenvolvido, são realizadas comparações entre a resposta dinâmica obtida experimentalmente sobre a plataforma de MDF, denominada comumente de “Experimental”, e os resultados determinados via modelagem numérica através do emprego de sistemas biodinâmicos mediante o emprego de estratégias de análise distintas, relacionados à força experimental ( $F_{Exp}$ ) e à força otimizada ( $F_{Optm}$ ), onde a força experimental refere-se à força medida durante os testes experimentais através do uso de células de carga, enquanto a força otimizada é obtida através da modelagem numérica via processo de otimização.

Com base no exposto, a seção central da plataforma é monitorada tanto experimentalmente através dos dados fornecidos pelo acelerômetro quanto por meio da análise dos resultados obtidos via modelagem numérica (sistemas biodinâmicos) relacionada a essa referida seção estrutural investigada. Para tal, três casos de carregamento são analisados, correspondendo aos testes experimentais realizados por indivíduos com massas corporais de 58,75 kg, 62,10 kg e 69,25 kg.

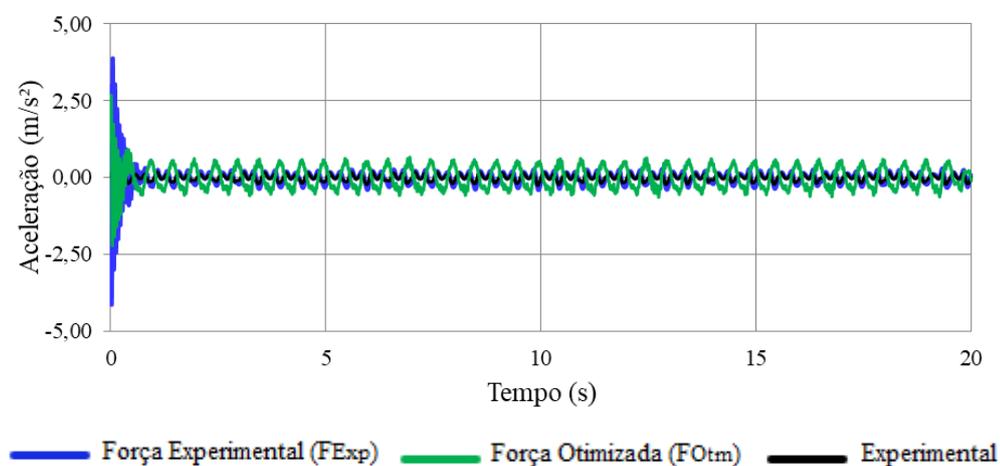
A seguir, nas Figuras 79 até 82, são apresentados os resultados das acelerações no domínio do tempo e da frequência correspondentes a cada um desses casos de carregamento analisados. Além disso, a Tabela 16 apresenta as correlações entre essas variáveis, utilizando o coeficiente de correlação de Pearson (CCP). Tais análises têm como objetivo avaliar o ajuste entre os dados experimentais e o modelo proposto.



(a) aceleração no domínio do tempo

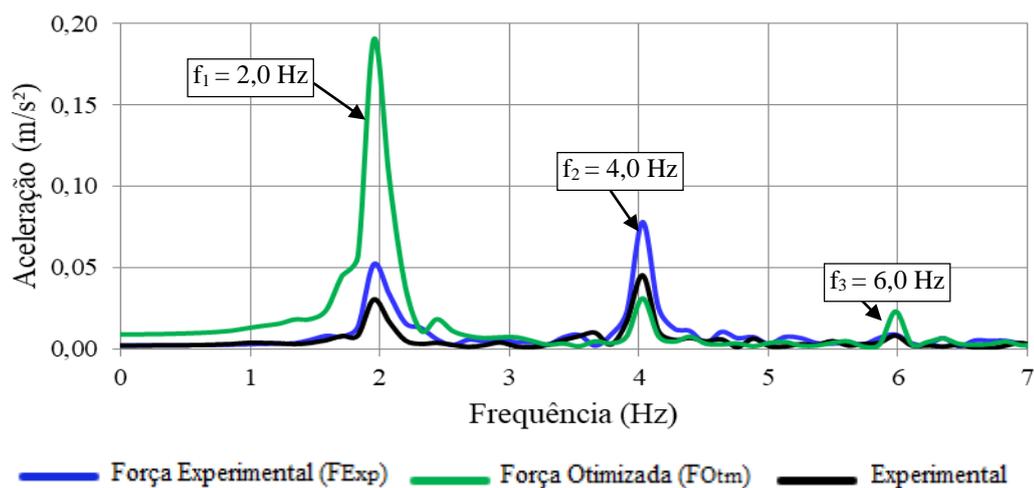


(b) aceleração no domínio da frequência

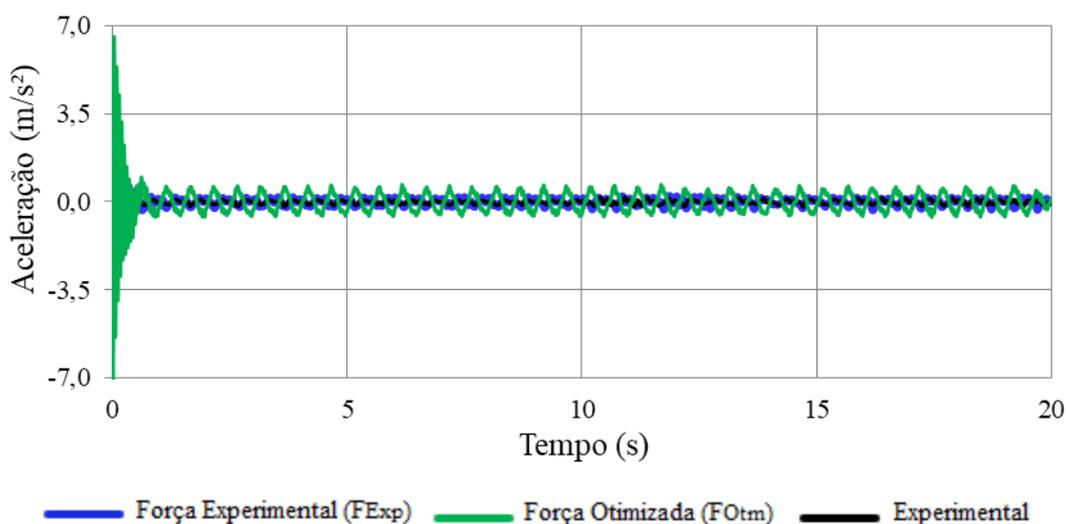
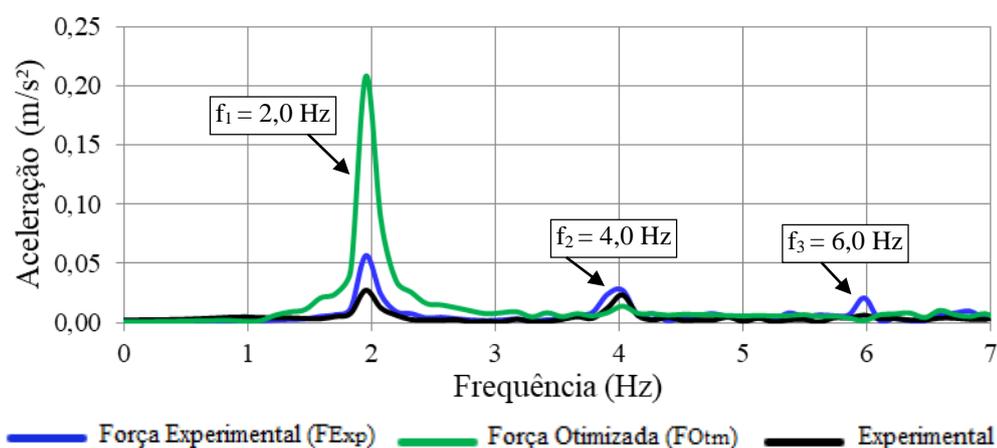
**Figura 79 - Resposta dinâmica da plataforma [massa = 58,7 kg;  $f = 2,0$  Hz]**

(a) aceleração no domínio do tempo

**Figura 80 - Resposta dinâmica da plataforma [massa = 62,1 kg;  $f = 2,0$  Hz]**



(a) aceleração no domínio da frequência

**Figura 81 - Resposta dinâmica da plataforma [massa = 62,1 kg;  $f = 2,0$  Hz]**(a) aceleração no domínio do tempo [massa = 69,25 kg;  $f = 2,0$  Hz](b) aceleração no domínio da frequência [massa = 69,3 kg;  $f = 2,0$  Hz]**Figura 82 - Resposta dinâmica da plataforma [massa = 69,3 kg;  $f = 2,0$  Hz]**

**Tabela 16 - Correlação de Pearson:  $F_{exp}$ ,  $F_{otm}$  e Experimental**

Correlação Person (CCP)	$F_{exp} \times F_{otm}$	$F_{exp} \times \text{Experimental}$	$F_{otm} \times \text{Experimental}$
Pessoa (m = 58,75kg)	0,74	0,97	0,70
Pessoa (m = 62,10kg)	0,79	0,95	0,79
Pessoa (m = 69,25kg)	0,82	0,88	0,72

Os resultados apresentados na Tabela 16 indicam uma forte correlação entre as variáveis  $F_{Exp} \times F_{Otm}$ ,  $F_{Exp} \times \text{Experimental}$  e  $F_{Otm} \times \text{Experimental}$ . Em todas as situações investigadas, os valores do coeficiente de correlação de Pearson (CCP) são superiores a 0,7 [127-129]. Tais resultados demonstram que o modelo biodinâmico utilizado descreve de forma realista as respostas estruturais dinâmicas da plataforma em estudo, pois são incluídas variáveis relacionadas às características dinâmicas das pessoas (massa, amortecimento e rigidez) na formulação do modelo matemático. Ademais, a forte correlação valida a aplicabilidade do modelo e confirma sua capacidade de representar adequadamente o comportamento da estrutura.

#### 4.7 Considerações finais

Neste capítulo, foi apresentada uma descrição detalhada do modelo numérico proposto para o piso de concreto armado investigado, utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF) por meio do *software* ANSYS [130]. Além disso, apresentou-se uma descrição detalhada a respeito da representação dos sistema biodinâmico via modelagem numérica. Neste sentido, foram discutidas as técnicas de modelagem empregadas, assim como as hipóteses simplificadoras adotadas para representar o sistema estrutural de forma realista e com baixa complexidade. Essas considerações e simplificações foram essenciais para o desenvolvimento do modelo computacional do piso de concreto armado em estudo, permitindo assim análise dinâmica confiável. No próximo capítulo, serão apresentados os parâmetros modais obtidos com base no modelo numérico desenvolvido.

## 5 ANÁLISE MODAL NUMÉRICA

### 5.1 Considerações iniciais

O presente capítulo tem como objetivo investigar o comportamento estrutural dinâmico do piso de concreto armado por meio da aplicação de análises de vibração livre via modelagem numérica utilizando o *software* ANSYS [130]. Desta forma, são avaliadas as frequências naturais (autovalores) e os modos de vibração correspondentes (autovetores). Em seguida, são estudadas as propriedades modais do sistema estrutural com base em duas situações: a primeira referente ao piso vazio, ou seja, sem a presença de carga humana, e a segunda relacionada à ocupação da estrutura por diferentes grupos de indivíduos, dispostos sobre o piso ao longo do piso de maneira estática.

A análise modal é de fato uma técnica amplamente utilizada para analisar e caracterizar o comportamento vibratório de estruturas, esse método pode ser aplicado em vários campos da engenharia, especialmente na engenharia civil, são avaliadas as propriedades dinâmicas das estruturas. Neste sentido, a análise modal proporciona uma compreensão a respeito do comportamento dinâmico da estrutura, permitindo assim identificar potenciais problemas, como ressonâncias indesejadas ou pontos de falha estrutural.

Neste contexto, a massa modal refere-se à distribuição de massa ao longo dos modos de vibração da estrutura, tal parâmetro pode ser modificado em função da inércia do sistema estrutural. A massa modal é expressa em termos de massas concentradas associadas a cada modo de vibração. Com relação à rigidez modal ressalta-se que essa propriedade se relaciona com a capacidade da estrutura em resistir às deformações elásticas induzidas através da vibração. No que diz respeito à frequência natural vale destacar que essa propriedade modal representa a taxa de oscilação característica de cada modo de vibração e está relacionada à rigidez e à massa modais da estrutura. Assim sendo, a determinação das frequências naturais

do piso é importante para a compreensão das características vibratórias da estrutura e sua resposta a excitações dinâmicas.

Além dos parâmetros modais mencionados anteriormente, ressalta-se a importância do amortecimento modal no contexto da dissipação de energia durante do sistema estrutural avaliado que pode provocar atenuação das oscilações. Assim sendo, as taxas de amortecimento são associadas a cada modo de vibração e representam a quantidade de energia dissipada em cada modo específico.

Diante do exposto, cabe ressaltar que o estudo dos parâmetros modais do piso torna-se importante no contexto da implementação das medidas preventivas necessárias ainda na fase de projeto, visando preservar o conforto humano dos usuários da edificação.

## 5.2 Análise modal: piso vazio

Nesta seção, são avaliados os parâmetros modais do piso (massa modal, rigidez modal, amortecimento modal e frequências), considerando a estrutura vazia, ou seja, sem a presença de pessoas sobre o piso. Neste contexto, utiliza-se o *software* ANSYS [130] com o objetivo de analisar as propriedades modais do piso em estudo. A Tabela 17 apresenta os resultados dos dezoito primeiros modos de vibração do piso, que são relevantes para a engenharia civil, ou seja, os modos que podem ser excitados através das atividades humanas rítmicas realizadas sobre o piso ( $f_n < 10$  Hz).

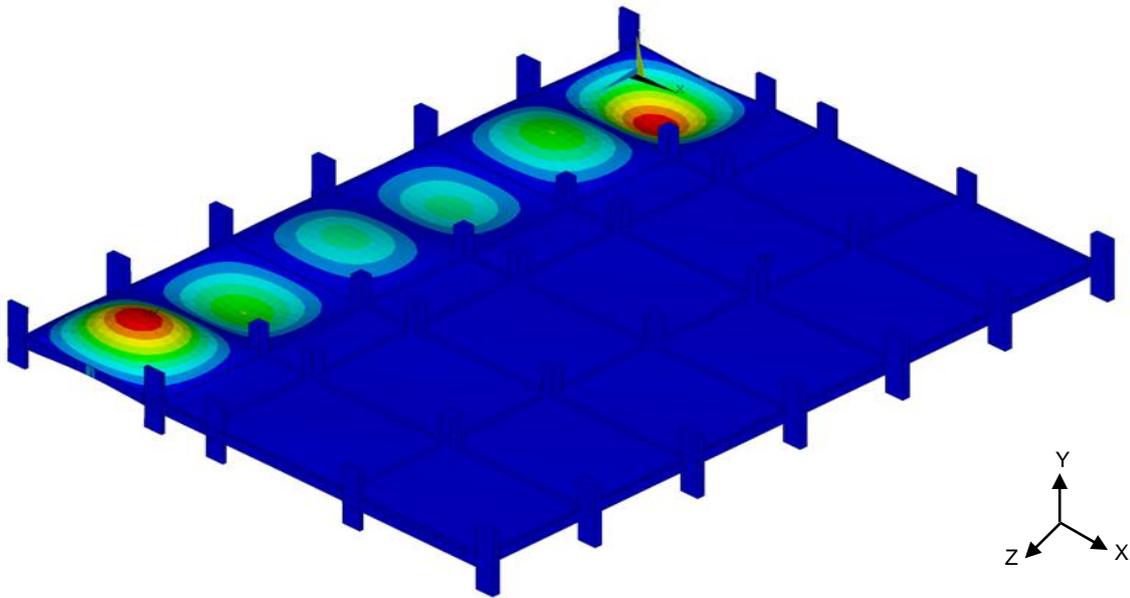
Com base nos resultados, observa-se que a frequência fundamental do piso ( $f_{01} = 7,89$  Hz) encontra-se em uma faixa de frequência de excitação correspondente ao terceiro harmônico das atividades humanas rítmicas, conforme relatado por Faisca [28] e Ellis e Ji [60], que variam de 5,66 a 8,57 Hz e de 4,5 a 8,4 Hz, respectivamente. Isso indica que a estrutura apresenta uma suscetibilidade ao fenômeno da ressonância, pois há uma compatibilidade entre as frequências naturais do sistema e as frequências de excitação geradas por atividades humanas rítmicas. Essa condição pode resultar em vibrações excessivas e desconforto humano, o que evidencia a necessidade de investigar e mitigar esse efeito indesejado. Além disso, é importante ressaltar que a frequência fundamental do piso ( $f_{01} = 7,89$  Hz) está abaixo do valor mínimo recomendado pelas normas técnicas NBR 8800 (8 Hz) [82] e NBR 6118 (9,6

Hz) [83], que estabelecem critérios de projeto para pisos em relação a atividades rítmicas. Neste sentido, essas normas visam garantir a segurança, o conforto e o desempenho adequado das estruturas em relação às vibrações.

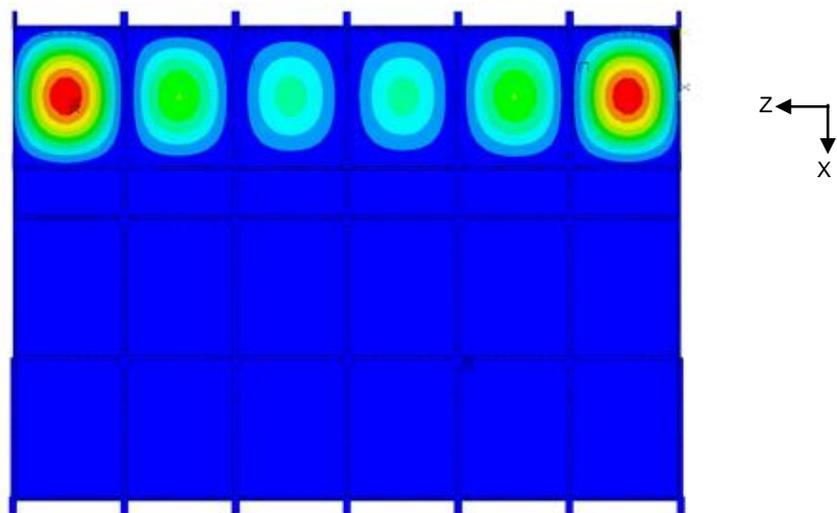
**Tabela 17 - Características modais do piso investigado (Estrutura vazia)**

Modo de vibração	Frequência (Hz)	Massa modal (kg)	Rigidez modal (N/m)	Amortecimento modal (Ns/m)
f <sub>01</sub>	7,887	4,724x10 <sup>3</sup>	1,160x10 <sup>7</sup>	1,953x10 <sup>4</sup>
f <sub>02</sub>	7,898	4,349x10 <sup>3</sup>	1,071x10 <sup>7</sup>	1,798x10 <sup>4</sup>
f <sub>03</sub>	8,020	1,148x10 <sup>4</sup>	2,916x10 <sup>7</sup>	1,708x10 <sup>4</sup>
f <sub>04</sub>	8,117	1,570x10 <sup>4</sup>	4,083x10 <sup>7</sup>	6,612x10 <sup>4</sup>
f <sub>05</sub>	8,136	1,544x10 <sup>4</sup>	4,034x10 <sup>7</sup>	6,513x10 <sup>4</sup>
f <sub>06</sub>	8,249	6,016x10 <sup>3</sup>	1,616x10 <sup>7</sup>	2,562x10 <sup>4</sup>
f <sub>07</sub>	8,316	4,747x10 <sup>3</sup>	1,296x10 <sup>7</sup>	2,033x10 <sup>4</sup>
f <sub>08</sub>	8,406	8,392x10 <sup>3</sup>	2,341x10 <sup>7</sup>	3,623x10 <sup>4</sup>
f <sub>09</sub>	8,440	6,685x10 <sup>3</sup>	1,880x10 <sup>7</sup>	2,894x10 <sup>4</sup>
f <sub>10</sub>	8,657	9,552x10 <sup>3</sup>	2,826x10 <sup>7</sup>	4,212x10 <sup>4</sup>
f <sub>11</sub>	8,702	7,811x10 <sup>3</sup>	2,335x10 <sup>7</sup>	3,457x10 <sup>4</sup>
f <sub>12</sub>	8,703	1,013x10 <sup>4</sup>	3,028x10 <sup>7</sup>	4,484x10 <sup>4</sup>
f <sub>13</sub>	8,876	7,035x10 <sup>3</sup>	2,188x10 <sup>7</sup>	3,162x10 <sup>4</sup>
f <sub>14</sub>	8,953	9,259x10 <sup>3</sup>	2,930x10 <sup>7</sup>	4,190x10 <sup>4</sup>
f <sub>15</sub>	9,038	4,965x10 <sup>3</sup>	1,601x10 <sup>7</sup>	2,263x10 <sup>4</sup>
f <sub>16</sub>	9,145	9,935x10 <sup>3</sup>	3,280x10 <sup>7</sup>	3,160x10 <sup>4</sup>
f <sub>17</sub>	9,377	5,911x10 <sup>3</sup>	2,052x10 <sup>7</sup>	2,480x10 <sup>4</sup>
f <sub>18</sub>	9,448	9,725x10 <sup>3</sup>	3,427x10 <sup>7</sup>	3,241x10 <sup>4</sup>

As Figuras 83 até 92 apresentam os dez primeiros modos de vibração do piso do edifício, ilustrando o comportamento modal do piso relacionado ao fenômeno de flexão de placa no plano XZ. Esses modos de vibração podem influenciar a distribuição das deformações e os padrões de movimento característicos da estrutura. É importante destacar que as figuras dos modos de vibração adicionais (do 11° ao 18°) podem ser encontradas no Apêndice D.



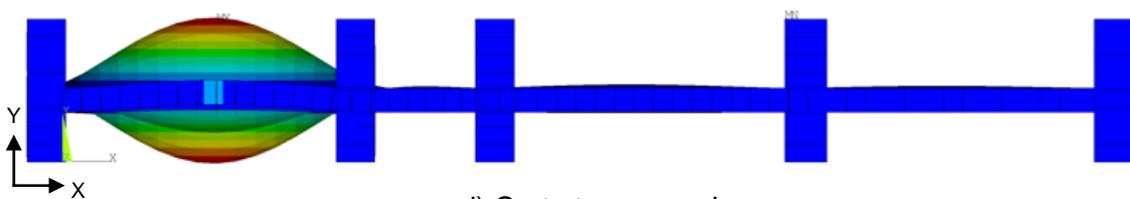
a) Vista isométrica



b) Vista planta

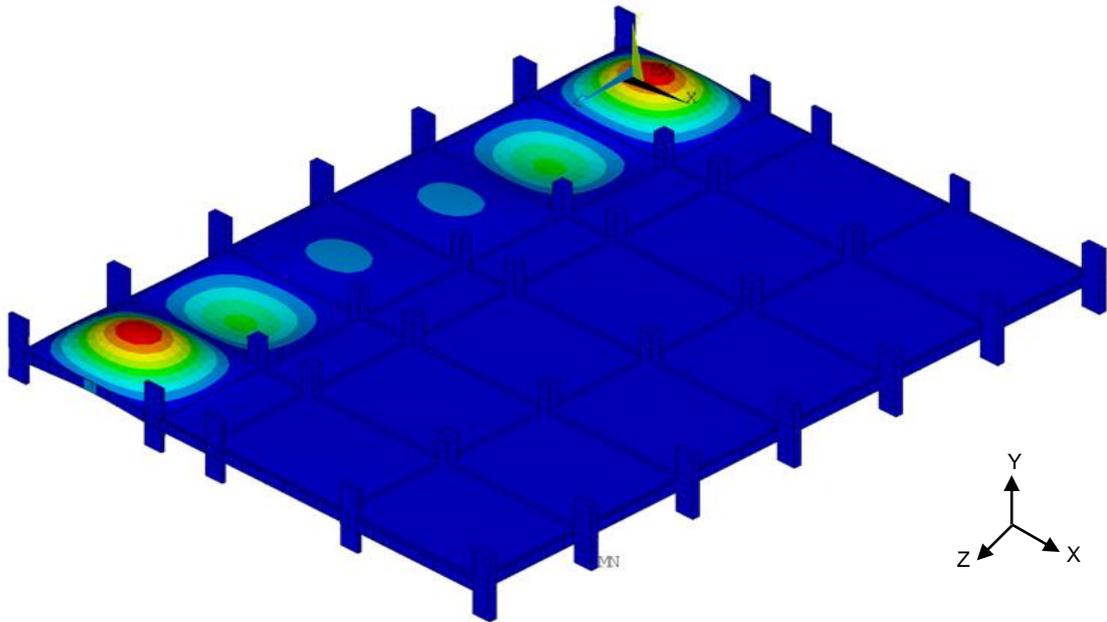


c) Corte longitudinal

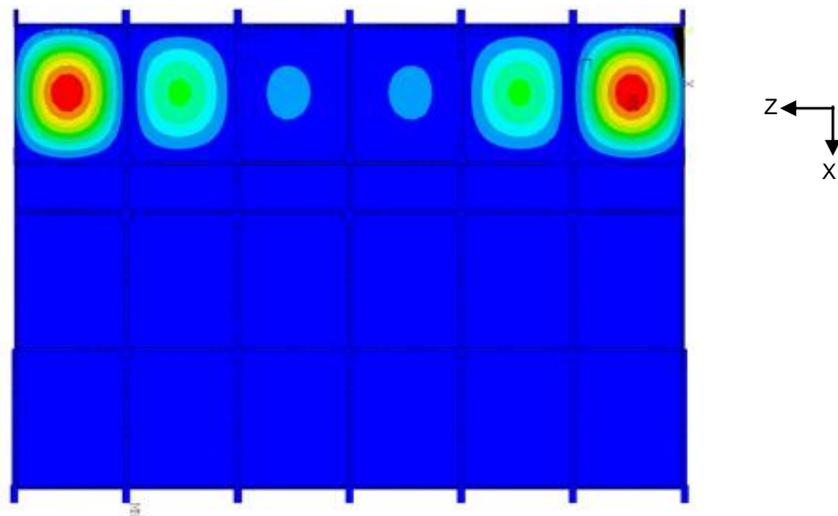


d) Corte transversal

Figura 83 - 1° modo de vibração ( $f_{01} = 7,89$  Hz)



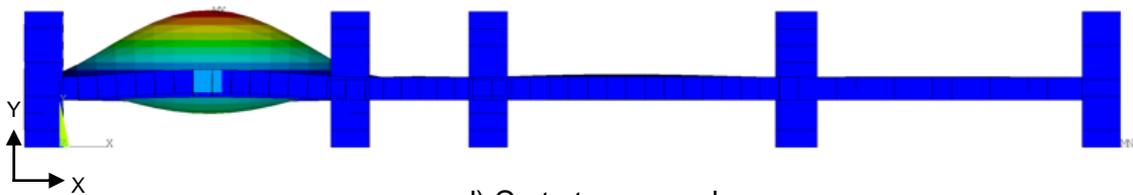
a) Vista isométrica



b) Vista planta

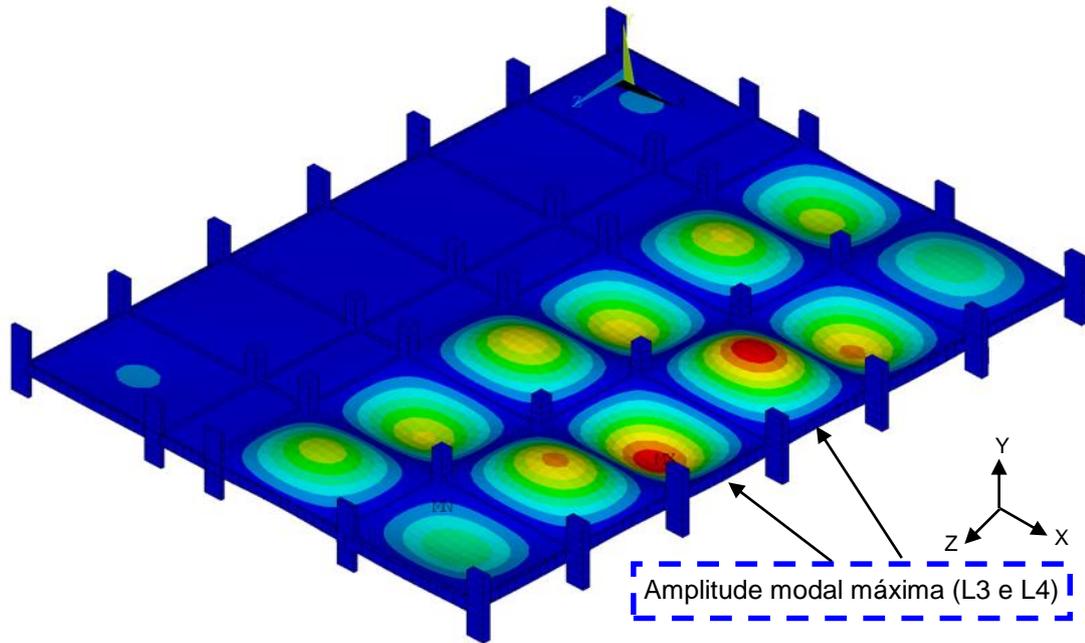


c) Corte longitudinal

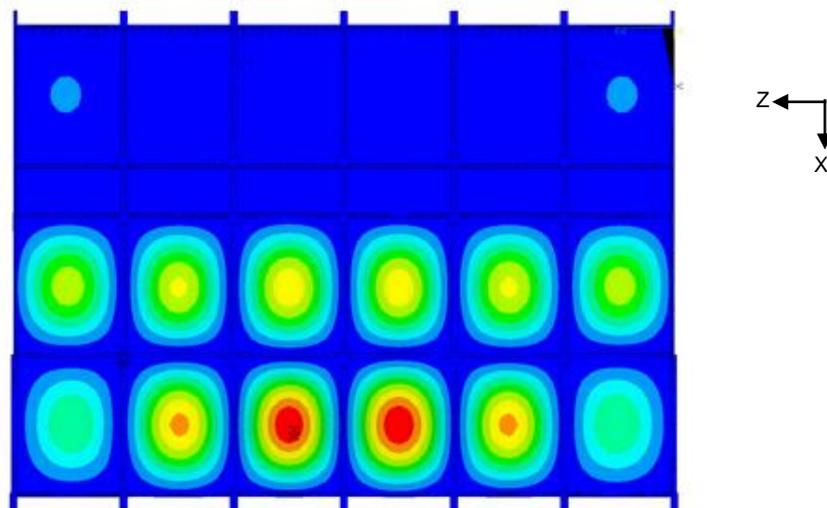


d) Corte transversal

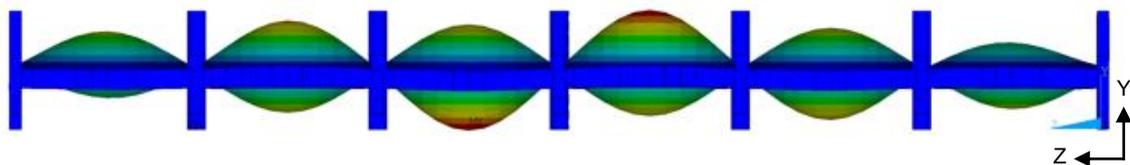
**Figura 84 - 2° modo de vibração ( $f_{02} = 7,90$  Hz)**



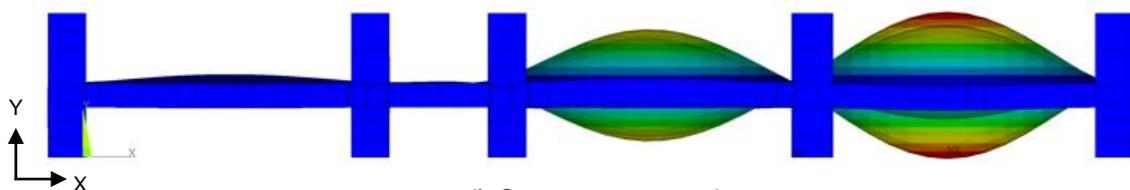
a) Vista isométrica



b) Vista planta

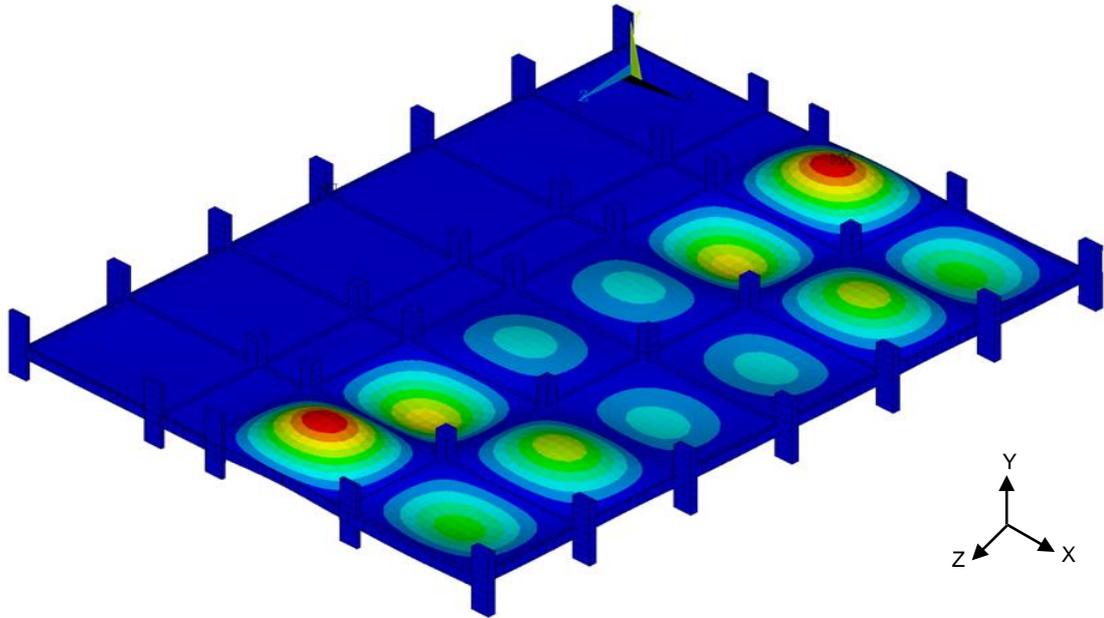


c) Corte longitudinal

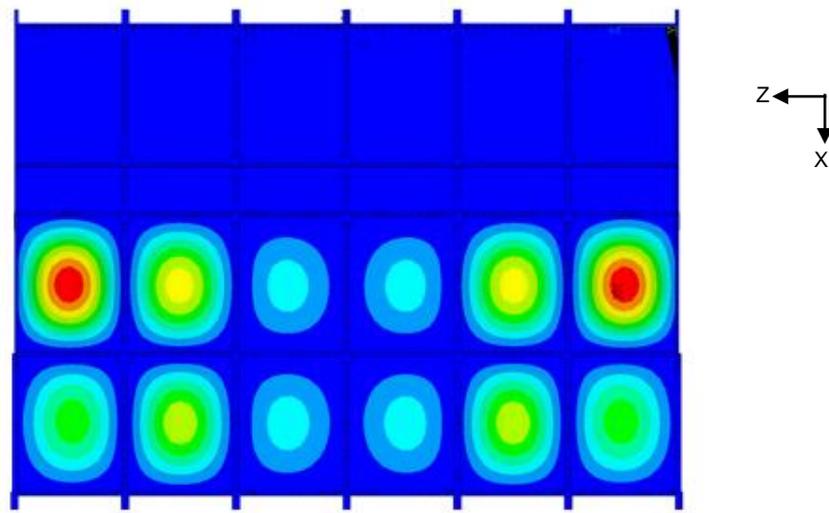


d) Corte transversal

**Figura 85 - 3° modo de vibração ( $f_{03} = 8,02$  Hz)**



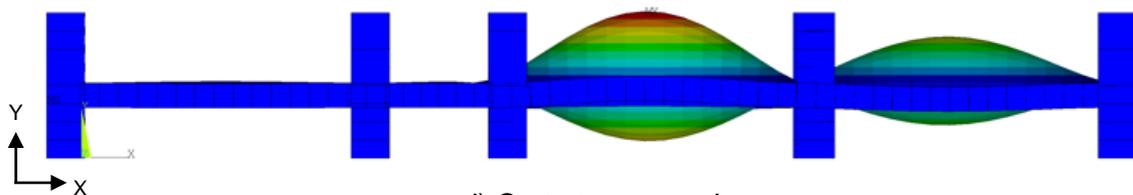
a) Vista isométrica



b) Vista planta

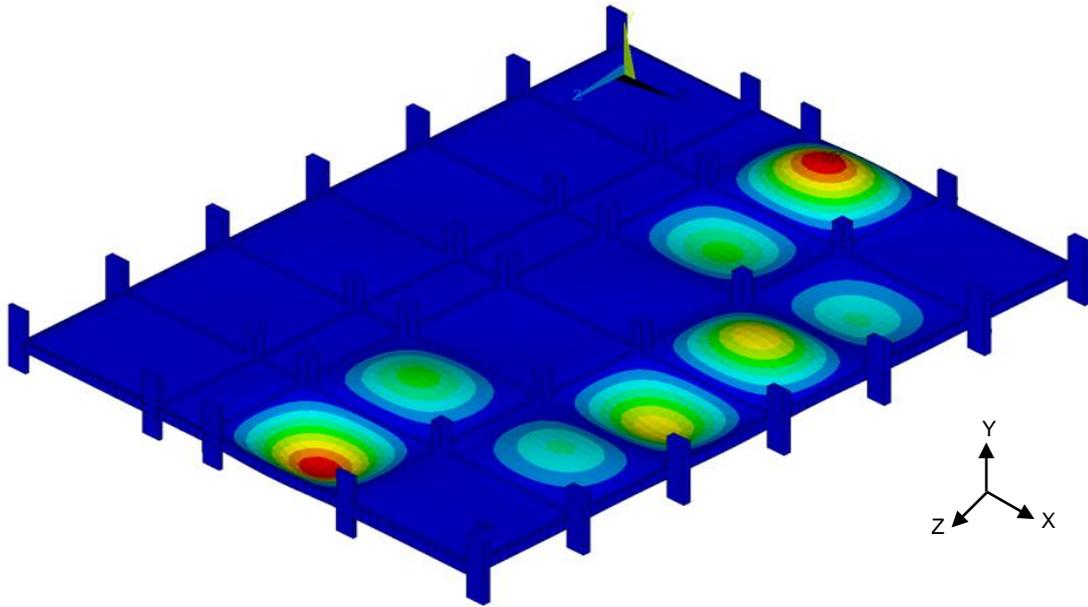


c) Corte longitudinal

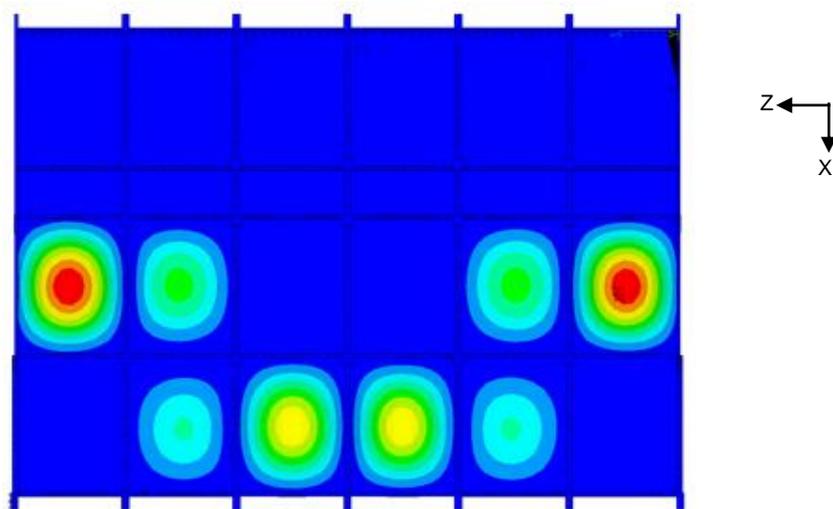


d) Corte transversal

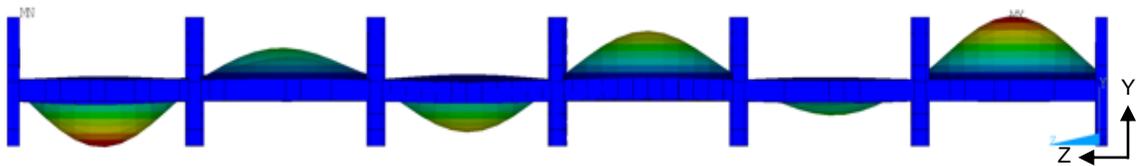
**Figura 86 - 4° modo de vibração ( $f_{04} = 8,12$  Hz)**



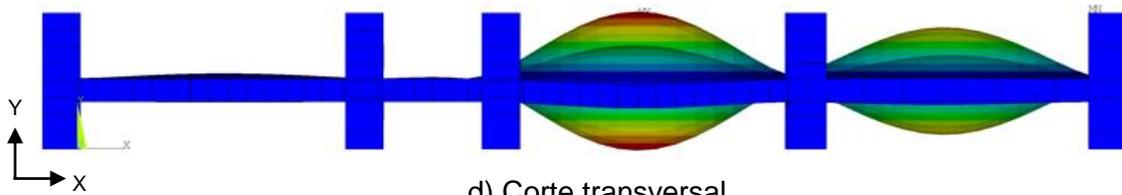
a) Vista isométrica



b) Vista planta

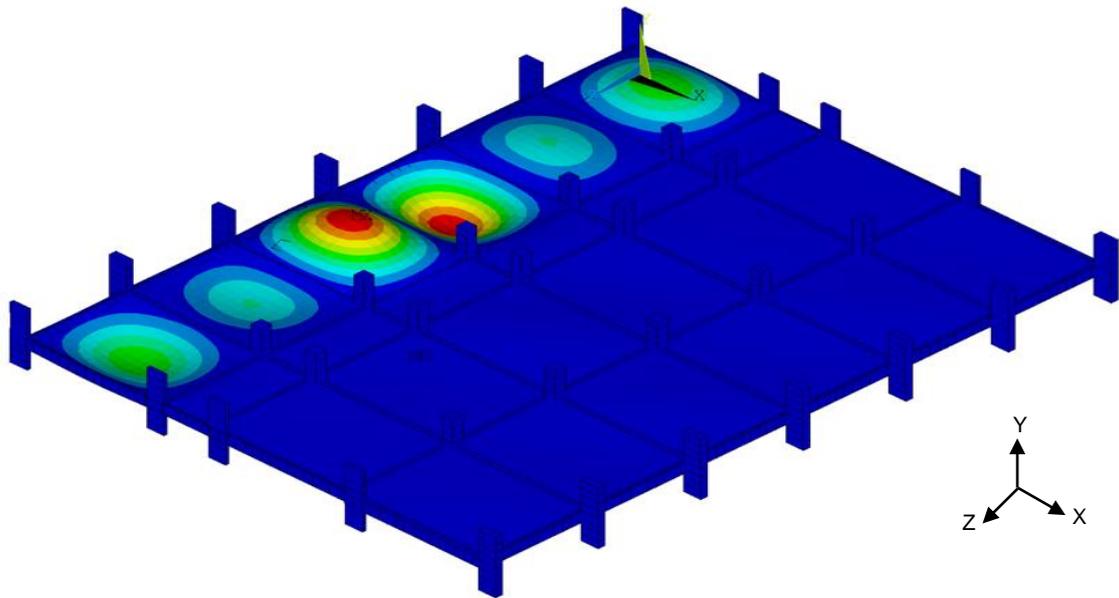


c) Corte longitudinal

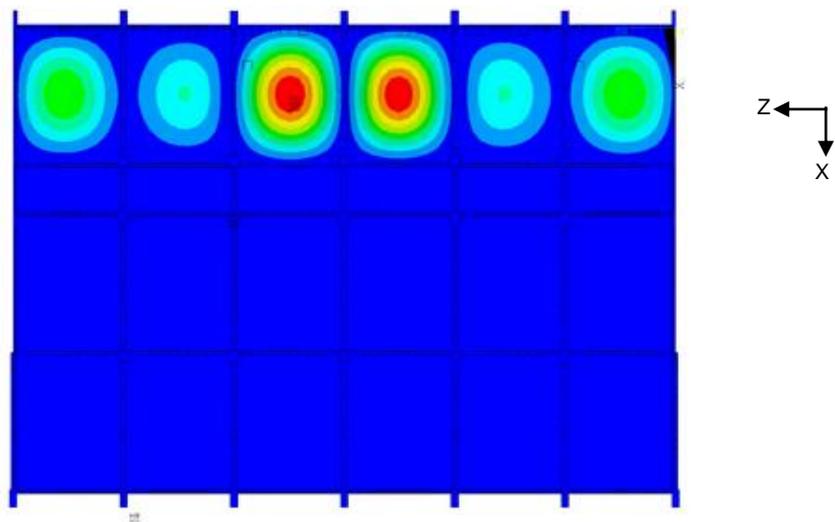


d) Corte transversal

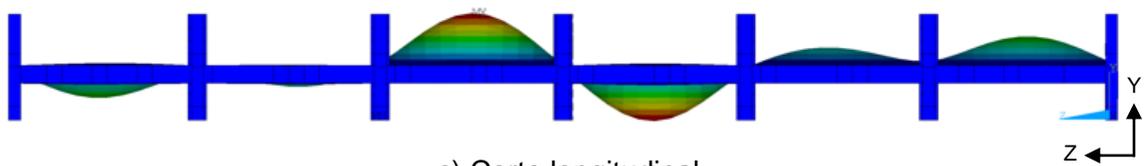
**Figura 87 - 5° modo de vibração ( $f_{05} = 8,14$  Hz)**



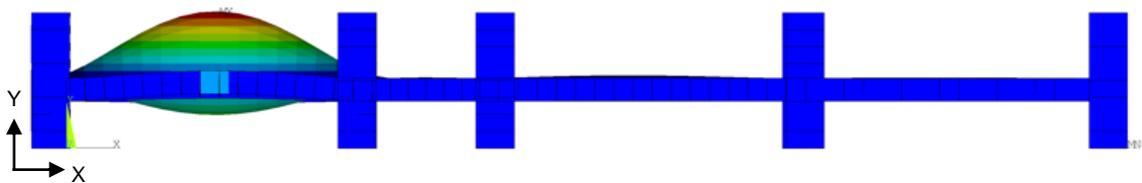
a) Vista isométrica



b) Vista planta

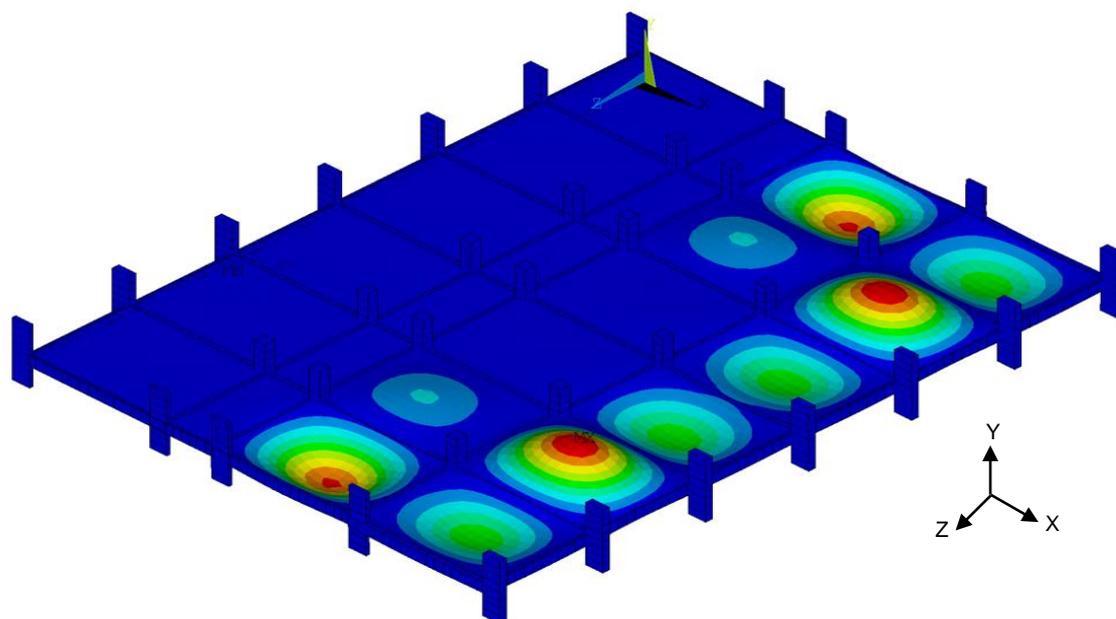


c) Corte longitudinal

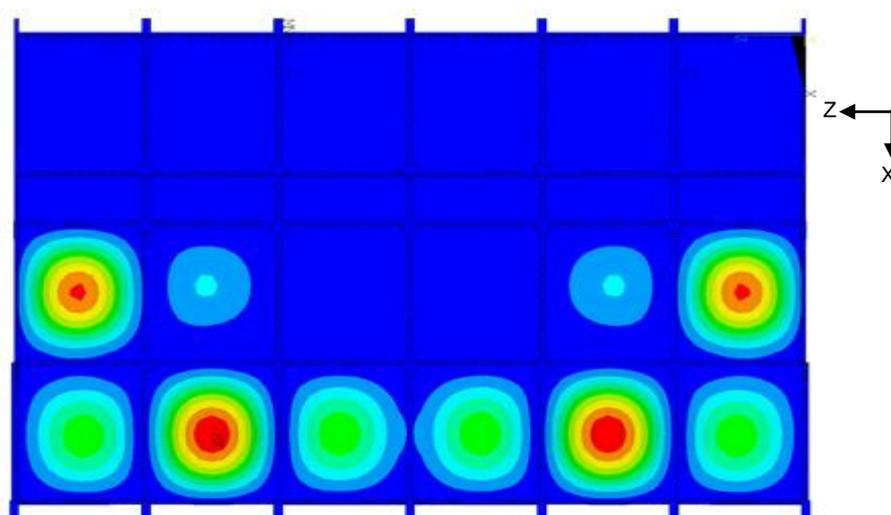


d) Corte transversal

**Figura 88 - 6° modo de vibração ( $f_{06} = 8,25$  Hz)**



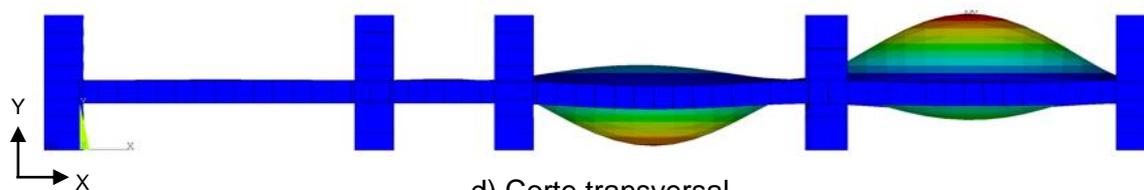
a) Vista isométrica



b) Vista planta

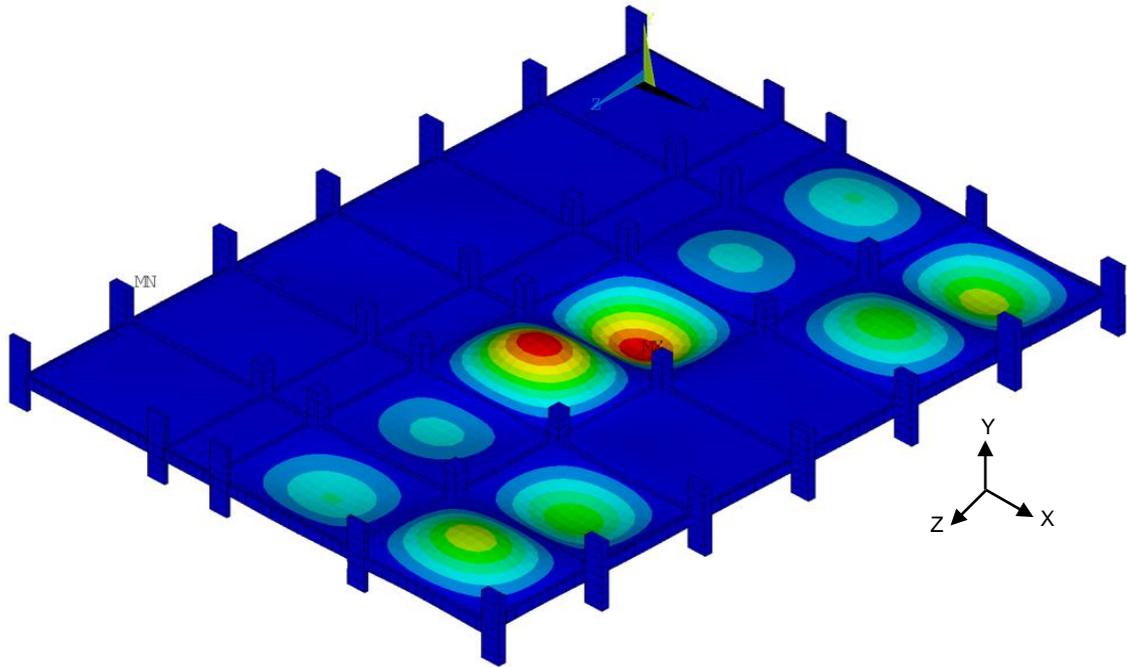


c) Corte longitudinal

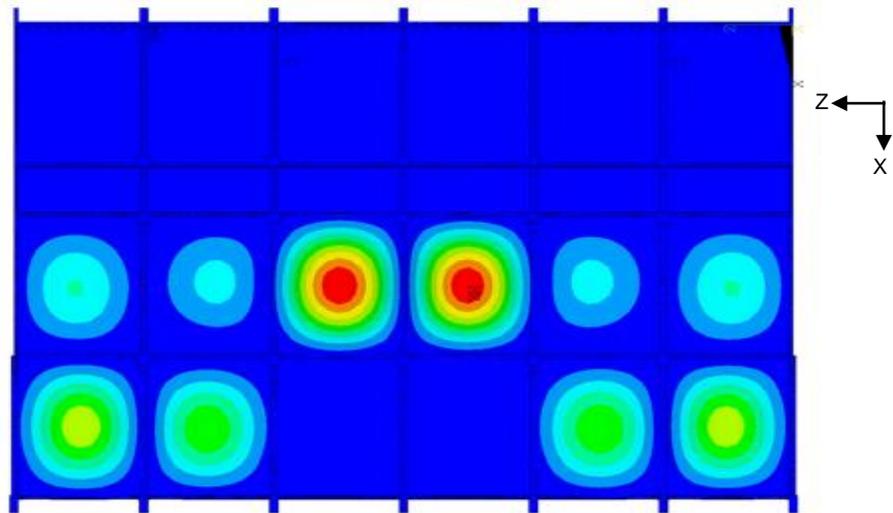


d) Corte transversal

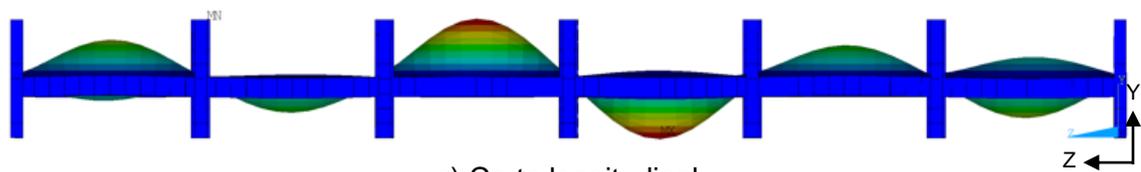
**Figura 89 - 7° modo de vibração ( $f_{07} = 8,32$  Hz)**



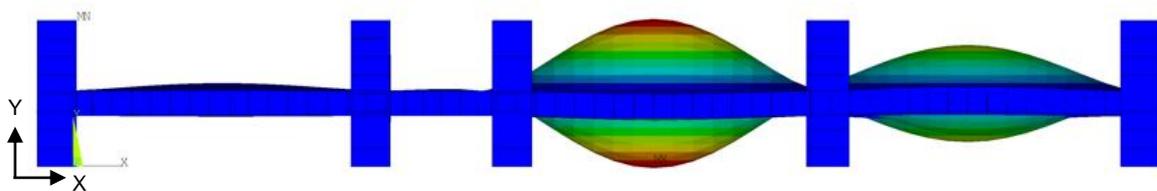
a) Vista isométrica



b) Vista planta

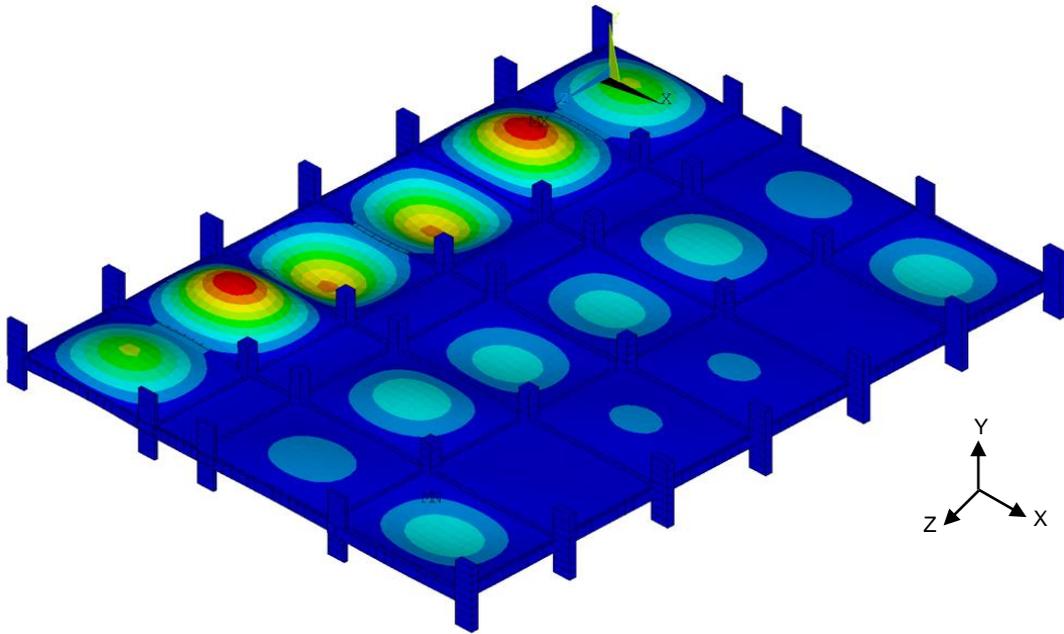


c) Corte longitudinal

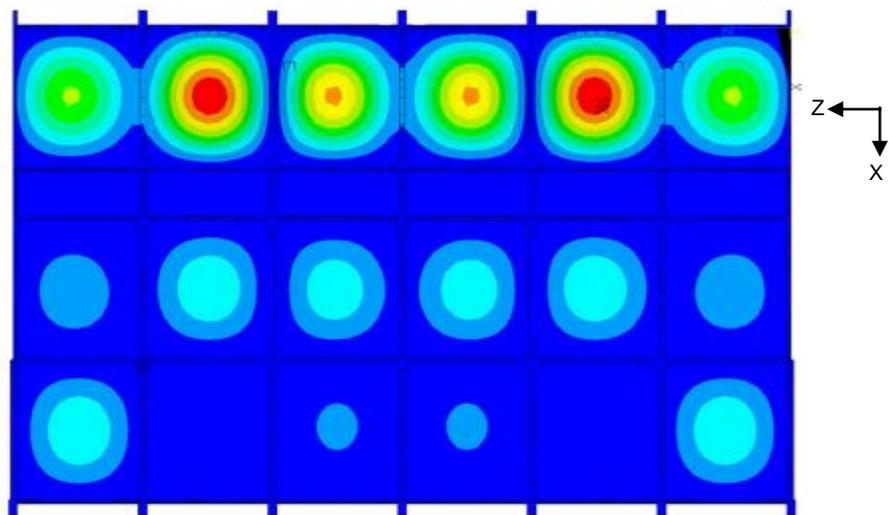


d) Corte transversal

**Figura 90 - 8° modo de vibração ( $f_{08} = 8,41$  Hz)**



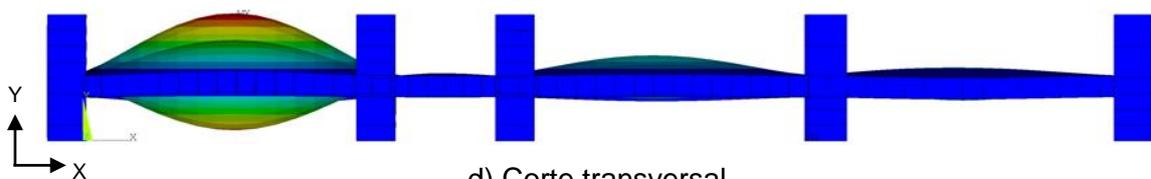
a) Vista isométrica



b) Vista planta

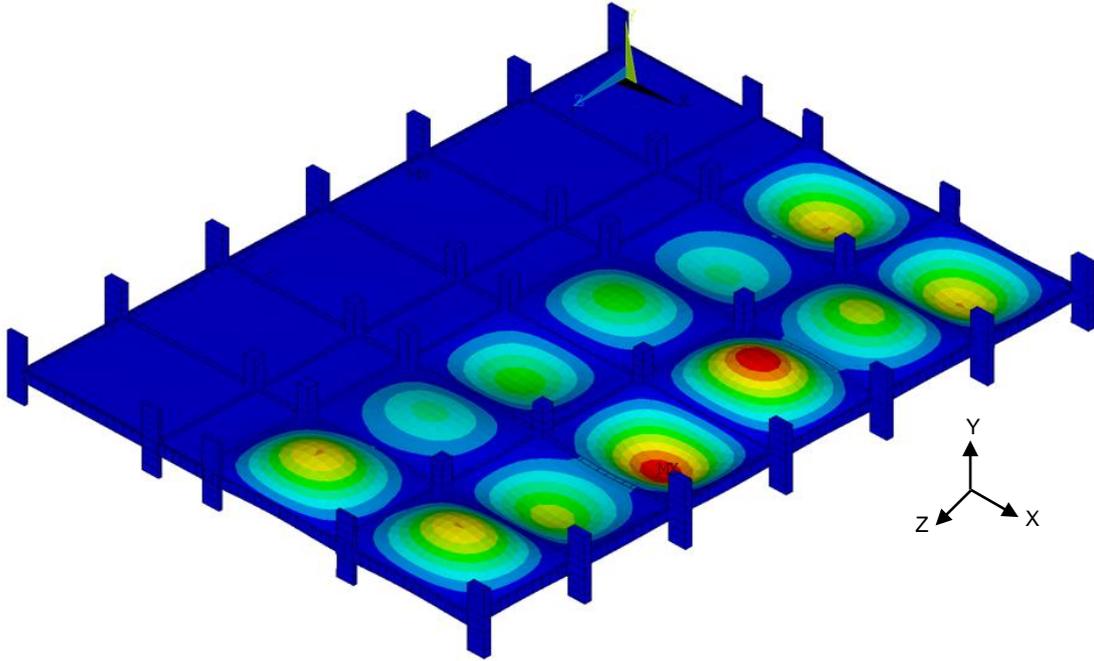


c) Corte longitudinal

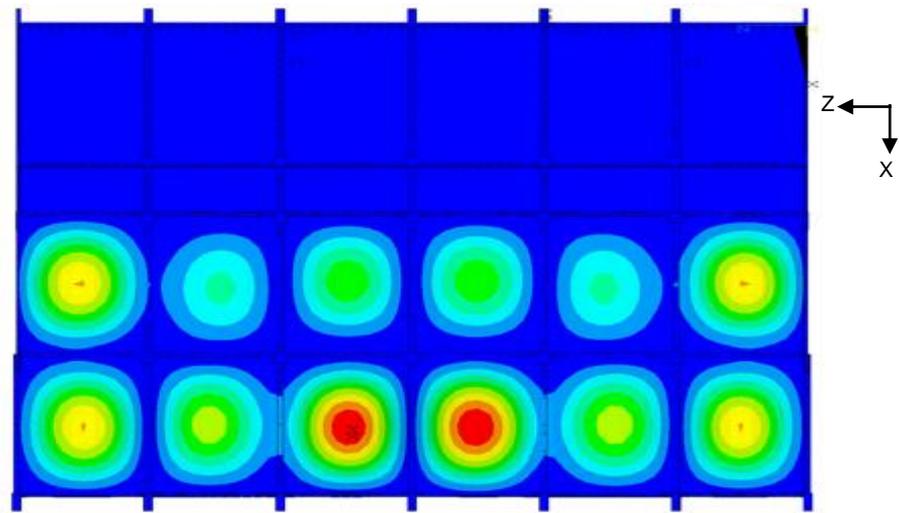


d) Corte transversal

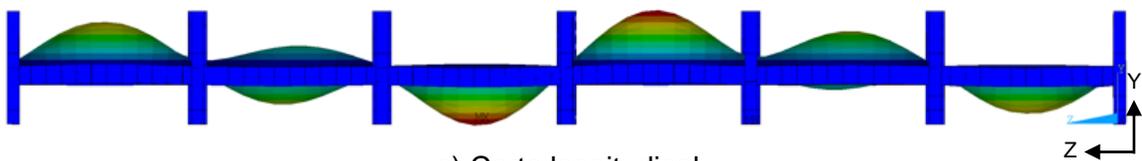
Figura 91 - 9º modo de vibração ( $f_{09} = 8,44$  Hz)



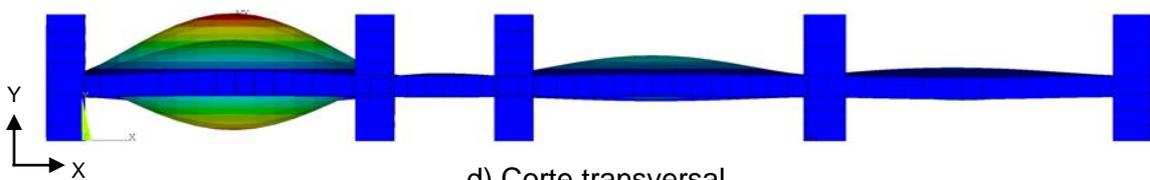
a) Vista isométrica



b) Vista planta



c) Corte longitudinal



d) Corte transversal

Figura 92 - 10° modo de vibração ( $f_{10} = 8,66$  Hz)

Através da análise dos resultados presentes nas Figuras 83 até 92, que representam os dez primeiros modos de vibração do piso associados à flexão, observa-se que os valores de amplitude modal máximos presentes associadas ao primeiro e segundo modo de vibração, encontram-se fora da área da academia de ginástica investigada neste estudo (lajes: L1 até L12). Por outro lado, ao examinar o terceiro modo de vibração ( $f_{03} = 8,02$  Hz, ver Figura 85), é claramente perceptível que as seções de maior amplitude modal do piso estão localizadas no interior da academia de ginástica, mais especificamente nas lajes L3 e L4. Desta forma, cabe ressaltar que essas lajes podem estar mais suscetíveis a excitações decorrentes das atividades desenvolvidas sobre o piso em estudo.

## 5.2 Análise modal: piso ocupado

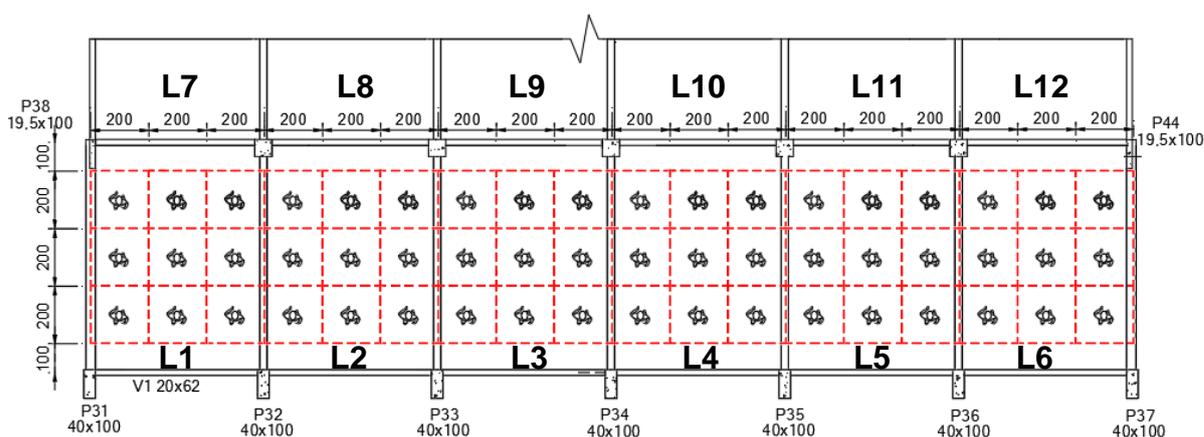
Os trabalhos de pesquisa de (Shahabpoor et al. [115], Brownjohn [35], Cappellini [94], Ellis and Ji [54], He et al. [43], Salyards and Firman [135], Salyards and Noss [38], Sim [56], and Takabatake [136]) investigaram a influência dos indivíduos sobre os parâmetros modais dos sistemas estruturais, os resultados das pesquisas indicaram que as propriedades do piso podem ser modificadas em função do número de pessoas presentes sobre a edificação.

Diante do exposto, são desenvolvidas análises modais numéricas com o intuito de investigar os parâmetros modais do piso com base na ocupação do mesmo por diferentes grupos de pessoas. Assim sendo, serão investigados os parâmetros modais do piso em referência aos três primeiros modos de vibração. Neste sentido, cabe ressaltar que, para representar os indivíduos no modelo de elementos finitos, utilizou-se modelos biodinâmicos representados através do elemento (COMBIN40), onde cada indivíduo é representado de maneira estática. Neste entendimento, é importante destacar que as características dinâmicas de cada indivíduo (massa, amortecimento e rigidez) são introduzidas conforme dados apresentados no Apêndice A.

Diante do exposto, serão investigados os parâmetros modais do piso (frequência natural, massa modal, rigidez modal e amortecimento modal) quando este estiver sob a ocupação por diferentes grupos de pessoas, incluindo 9, 18, 27, 36, 45, 54, 72, 108, 216 e 432 pessoas. Desta forma, é importante destacar que, nos casos em que o número ultrapassa 100 (cem) indivíduos, os mesmos participantes são

repetidos na análise e, além disso, esses indivíduos são posicionados sobre as lajes da academia de ginástica (L1 até L12).

Contudo, é importante salientar que as análises desenvolvidas com número superior a 54 pessoas são apenas para avaliar o comportamento estrutural dinâmico do piso através da modelagem numérica, pois um número de pessoas superior a 54 sobre o piso não corresponde com a realidade, uma vez que excede a capacidade máxima do piso para práticas de atividades rítmicas. Neste contexto, a Figura 93 ilustra o caso de distribuição de 54 indivíduos sobre a academia de ginástica, e observa-se que cada indivíduo em uma aula aeróbica ocupa cerca de 4 m<sup>2</sup>. Na sequência, as Tabelas 18 até 20 apresentam os resultados dos parâmetros modais do piso referentes aos três primeiros modos quando o piso se encontra ocupado por diferentes grupos de pessoas.



**Figura 93 - 54 pessoas distribuídas ao longo da academia de ginástica**

**Tabela 18 - Propriedades modais do piso ocupado: 1º modo de vibração**

Número de Pessoas sobre o piso	Frequência (Hz)	Massa modal (kg)	Rigidez modal (N/m)	Amortecimento modal (Ns/m)	Taxa de amortecimento $\xi$ (%)
0	7,88670	$4,724 \times 10^3$	$1,160 \times 10^7$	$1,953 \times 10^4$	1,21
9	7,88670	$4,724 \times 10^3$	$1,160 \times 10^7$	$2,006 \times 10^4$	1,24
18	7,88670	$4,724 \times 10^3$	$1,160 \times 10^7$	$2,061 \times 10^4$	1,26
27	7,88670	$4,683 \times 10^3$	$1,150 \times 10^7$	$2,119 \times 10^4$	1,29
36	7,88670	$4,683 \times 10^3$	$1,150 \times 10^7$	$2,177 \times 10^4$	1,32
45	7,88669	$4,695 \times 10^3$	$1,153 \times 10^7$	$2,237 \times 10^4$	1,35
54	7,88669	$4,720 \times 10^3$	$1,159 \times 10^7$	$2,297 \times 10^4$	1,37
72	7,88669	$4,606 \times 10^3$	$1,131 \times 10^7$	$2,435 \times 10^4$	1,43
108	7,88668	$4,500 \times 10^3$	$1,105 \times 10^7$	$2,727 \times 10^4$	1,55
216	7,88666	$4,630 \times 10^3$	$1,137 \times 10^7$	$3,614 \times 10^4$	1,88
432	7,86017	$7,450 \times 10^3$	$1,817 \times 10^7$	$4,203 \times 10^4$	2,04

**Tabela 19 - Propriedades modais do piso ocupado: 2º modo de vibração**

Número de Pessoas sobre o piso	Frequência (Hz)	Massa modal (kg)	Rigidez modal (N/m)	Amortecimento modal (Ns/m)	Taxa de amortecimento $\xi$ (%)
0	7,89824	4,349x10 <sup>3</sup>	1,071x10 <sup>7</sup>	1,798x10 <sup>4</sup>	1,38
9	7,89810	4,349x10 <sup>3</sup>	1,071x10 <sup>7</sup>	1,852x10 <sup>4</sup>	1,41
18	7,89782	4,361x10 <sup>3</sup>	1,074x10 <sup>7</sup>	1,907x10 <sup>4</sup>	1,44
27	7,89757	4,329x10 <sup>3</sup>	1,066x10 <sup>7</sup>	1,964x10 <sup>4</sup>	1,47
36	7,89728	4,342x10 <sup>3</sup>	1,069x10 <sup>7</sup>	2,022x10 <sup>4</sup>	1,50
45	7,89704	4,354x10 <sup>3</sup>	1,072x10 <sup>7</sup>	2,082x10 <sup>4</sup>	1,53
54	7,89680	4,383x10 <sup>3</sup>	1,079x10 <sup>7</sup>	2,141x10 <sup>4</sup>	1,56
72	7,89617	4,302x10 <sup>3</sup>	1,059x10 <sup>7</sup>	2,277x10 <sup>4</sup>	1,62
108	7,89483	4,255x10 <sup>3</sup>	1,047x10 <sup>7</sup>	2,560x10 <sup>4</sup>	1,74
216	7,88930	4,627x10 <sup>3</sup>	1,137x10 <sup>7</sup>	3,343x10 <sup>4</sup>	2,05
432	7,88662	4,691x10 <sup>3</sup>	1,152x10 <sup>7</sup>	5,521x10 <sup>4</sup>	2,70

**Tabela 20 - Propriedades modais do piso ocupado: 3º modo de vibração**

Número de Pessoas sobre o piso	Frequência (Hz)	Massa modal (kg)	Rigidez modal (N/m)	Amortecimento modal (Ns/m)	Taxa de amortecimento $\xi$ (%)
0	8,01954	1,148x10 <sup>4</sup>	2,916x10 <sup>7</sup>	1,708x10 <sup>4</sup>	1,91
9	8,01954	1,148x10 <sup>4</sup>	2,916x10 <sup>7</sup>	1,717x10 <sup>4</sup>	1,92
18	8,01954	1,148x10 <sup>4</sup>	2,916 x10 <sup>7</sup>	1,725x10 <sup>4</sup>	1,92
27	8,01954	1,148x10 <sup>4</sup>	2,915x10 <sup>7</sup>	1,734x10 <sup>4</sup>	1,93
36	8,01954	1,148x10 <sup>4</sup>	2,915x10 <sup>7</sup>	1,743x10 <sup>4</sup>	1,93
45	8,01954	1,148x10 <sup>4</sup>	2,915x10 <sup>7</sup>	1,752x10 <sup>4</sup>	1,94
54	8,01954	1,148x10 <sup>4</sup>	2,916x10 <sup>7</sup>	1,761x10 <sup>4</sup>	1,94
72	8,01954	1,148x10 <sup>4</sup>	2,915x10 <sup>7</sup>	1,778x10 <sup>4</sup>	1,95
108	8,01954	1,147x10 <sup>4</sup>	2,913x10 <sup>7</sup>	1,814x10 <sup>4</sup>	1,97
216	8,01954	1,148x10 <sup>4</sup>	2,915x10 <sup>7</sup>	1,924x10 <sup>4</sup>	2,03
432	7,96031	9,834x10 <sup>3</sup>	2,460x10 <sup>7</sup>	2,231x10 <sup>4</sup>	2,19

Com base nos resultados apresentados nas Tabelas 18 a 20, observa-se que ocorre uma diminuição na frequência natural do piso conforme o número de pessoas é ampliado sobre o piso. Além disso, verifica-se um aumento da taxa de amortecimento e, conseqüentemente, um aumento no valor do amortecimento modal. Nota-se claramente uma relação inversa entre a taxa de amortecimento modal e a frequência natural do piso à medida que o número de pessoas aumenta sobre o piso.

No que diz respeito à massa modal e rigidez modal, é importante destacar que ao analisar os resultados referentes ao terceiro modo de vibração, fica claro uma redução nos parâmetros de massa modal e rigidez modal do piso. No entanto, ao

avaliar os valores referentes ao primeiro e segundo modos de vibração, observa-se uma ampliação, conforme demonstrado nas tabelas. Tais resultados podem ser justificados pelo fato de as pessoas estarem posicionadas na região da academia, ou seja, mais próximas dos pontos de amplitude modal máxima associados ao terceiro modo de vibração. Neste seguimento, a Tabela 21 resumem os valores da taxa de amortecimento e frequência natural para os três primeiros modos de vibração, tanto quando a estrutura está vazia quanto quando está ocupada por 432 pessoas, enquanto a Tabela 22 apresenta os valores de massa modal e rigidez modal para as mesmas situações.

**Tabela 21 - Estrutura ocupada x vazia: frequência natural e amortecimento**

Número de Pessoas	1° modo de vibração		2° modo de vibração		3° modo de vibração	
	Frequência (Hz)	$\xi$ (%)	Frequência (Hz)	$\xi$ (%)	Frequência (Hz)	$\xi$ (%)
0	7,88670	1,21	7,89824	1,38	8,01954	1,91
54	7,88669	1,37	7,89680	1,56	8,01954	1,94
432	7,86017	2,04	7,88662	2,70	7,96031	2,19

**Tabela 22 - Estrutura ocupada x vazia: massa modal e rigidez modal**

Número de Pessoas	1° modo de vibração		2° modo de vibração		3° modo de vibração	
	Massa modal (kg)	Rigidez modal (N/m)	Massa modal (kg)	Rigidez modal (N/m)	Massa modal (kg)	Rigidez modal (N/m)
0	$4,724 \times 10^3$	$1,160 \times 10^7$	$4,349 \times 10^3$	$1,071 \times 10^7$	$1,148 \times 10^4$	$2,916 \times 10^7$
54	$4,383 \times 10^3$	$1,079 \times 10^7$	$4,383 \times 10^3$	$1,079 \times 10^7$	$1,148 \times 10^4$	$2,916 \times 10^7$
432	$7,450 \times 10^3$	$1,817 \times 10^7$	$4,691 \times 10^3$	$1,152 \times 10^7$	$9,834 \times 10^3$	$2,460 \times 10^7$

Ao avaliar os resultados presentes nas Tabelas 21 e 22, nota-se que a ocupação do piso por um grupo de 432 pessoas resultou em modificações nos valores das frequências naturais e do amortecimento da estrutura. Ao comparar os valores associados ao primeiro modo de vibração do piso, observou-se uma redução de 0,38% na frequência natural, passando de 7,89 Hz ( $f_{01} = 7,89$  Hz; piso vazio) para 7,86 Hz ( $f_{01} = 7,86$  Hz; piso ocupado: 432 pessoas). Além disso, verificou-se um aumento na taxa de amortecimento estrutural, com valores de 1,21% ( $\xi = 1,21$  %; piso vazio) e 2,04% ( $\xi = 2,04$ %; piso ocupado: 432 pessoas), evidenciando a influência dos indivíduos sobre esses parâmetros modais do piso investigado.

Esses resultados ressaltam a importância de considerar a presença de pessoas na análise estrutural e destacam a capacidade dessas atividades em modificar as

propriedades modais do piso. No entanto, é importante ressaltar que o número de pessoas utilizado na modelagem numérica não corresponde à realidade de uma aula de atividades aeróbicas devido às dimensões do piso da academia de ginástica não serem suficientes para desenvolvimento de uma aula de ginástica. Deste modo, para que haja uma modificação significativa nos parâmetros, seria necessário um número de pessoas sobre o piso muito acima da capacidade real do piso avaliado, em função da elevada rigidez do sistema estrutural.

### 5.3 Considerações finais

No presente capítulo, foi investigado os parâmetros modais do piso de concreto armado através de duas estratégias de análise, a primeira referente ao piso vazio, ou seja, sem a presença de carga humana, e a segunda relacionada à ocupação da estrutura por diferentes grupos de indivíduos, dispostos sobre o piso de forma estática. Assim sendo, no que se refere à influência dos indivíduos sobre os parâmetros modais percebe-se uma redução nas frequências naturais do piso e um aumento no amortecimento modal conforme o número de pessoas era ampliado sobre o piso.

No entanto, com base nos resultados apresentados percebe-se que o impacto do número de pessoas sobre as modificações dos parâmetros modais do piso não é tão relevante sob o ponto de vista da análise dinâmica. Além disso, é importante ressaltar que a situação de carregamento sobre a laje de concreto com um grupo muito elevado de pessoas, por exemplo, superior a 50 indivíduos, não corresponde com a realidade de uma aula de ginástica aeróbica, uma vez que as dimensões do piso não seriam adequadas para o desenvolvimento destas atividades. Portanto, para que ocorra uma modificação significativa nos parâmetros modais do piso em estudo, seria necessário um número de pessoas sobre a edificação muito acima de sua capacidade real. No próximo capítulo, será exposta a realização dos testes de monitoração dinâmica experimental conduzidos no piso sob investigação, com o objetivo de avaliar os parâmetros modais *in loco*. Cabe ressaltar que os pontos estratégicos para a condução da monitoração dinâmica experimental foram definidos com base nos resultados obtidos no presente capítulo, por meio da modelagem numérica relacionada às seções de amplitude modal máxima, as quais serão discutidas no capítulo subsequente.

## 6 ANÁLISE MODAL EXPERIMENTAL

### 6.1 Considerações iniciais

A análise modal experimental do piso de concreto armado é conduzida por meio de testes experimentais de monitoração experimental dinâmico realizado sobre o piso investigado, com o objetivo de investigar o comportamento dinâmico global da estrutura. As estratégias adotadas nos testes experimentais são baseadas no estudo preliminar fornecido com base nos resultados da análise modal numérica, apresentado no Capítulo 5. Deste modo, são investigados experimentalmente os parâmetros modais das lajes L1, L2, L3 e L4, sendo que as lajes L3 e L4 apresentam as seções com maiores amplitudes modais associadas ao terceiro modo de vibração, conforme identificado na análise modal numérica. Cabe ressaltar que a escolha dessas lajes é decorrente dos resultados obtidos associado as seções de amplitude modal máxima correspondente ao terceiro modo de vibração do piso (ver Figura 85). Com base nos resultados experimentais obtidos no contexto dessa análise, serão realizadas calibrações no modelo de elementos finitos desenvolvido.

Ao longo dos anos uma série de trabalhos de pesquisas (Cunha e Caetano [73], Brandt [124], Debona [137], Mayes et al. [138], Prazzo [139], Farajian [140], Chopra [141], Zhang et al. [142] e Maia [143]) foram desenvolvidos com a intenção de avaliar o comportamento estrutural dinâmico com base no emprego de técnicas de monitoração dinâmica experimental. Ressalta-se que neste contexto de análise duas metodologias podem ser empregadas nos testes experimentais: SIMO (single-input multiple-output - única entrada e várias saídas) e SISO (single-input single-output - única entrada e uma saída). No método SIMO, as respostas estruturais dinâmicas são medidas em várias seções da estrutura em resposta a uma única excitação em um ponto da estrutura. Por outro lado, o método SISO, a força de excitação é aplicada em uma seção da estrutura e a resposta é obtida individualmente em cada seção da estrutura. Assim, o método SIMO (Single-Input Multiple-Output) apresenta uma vantagem em relação ao método SISO (Single-Input Single-Output), pois requer um número menor de ensaios experimentais sobre a estrutura, uma vez que a resposta dinâmica da estrutura pode ser mensurada apenas uma vez por ensaio, independentemente do número de seções monitoradas.

Dessa forma, o presente capítulo tem como objetivo investigar os parâmetros modais experimentais do piso com base na aplicação de três diferentes metodologias: Teste Experimental I (amortecimento estrutural experimental); Teste Experimental II (impacto com martelo sobre o piso); Teste Experimental III (excitação por um shaker). Esses testes são desenvolvidos com o intuito de obter informações detalhadas a respeito do comportamento modal do piso, permitindo assim uma análise modal experimental da laje de concreto armado.

Assim sendo, o Teste Experimental I tem como objetivo principal a determinação dos valores de amortecimento modal experimental do piso. Por outro lado, os Testes Experimentais II e III são desenvolvidos com a finalidade de investigar as frequências naturais do piso em estudo.

## 6.2 Teste experimental I: determinação do amortecimento experimental

O primeiro teste experimental de análise modal, Teste experimental I: amortecimento estrutural experimental, tem como objetivo analisar a resposta dinâmica do piso por meio da medição da aceleração do piso durante saltos humanos executados sobre o mesmo. A abordagem visa investigar o amortecimento estrutural do piso e sua influência no comportamento dinâmico da estrutura. Os resultados do teste fornecem informações importantes a respeito do amortecimento do piso de concreto armado, contribuindo assim para a análise e compreensão dos efeitos do amortecimento estrutural.

### 6.2.1 Descrição dos equipamentos

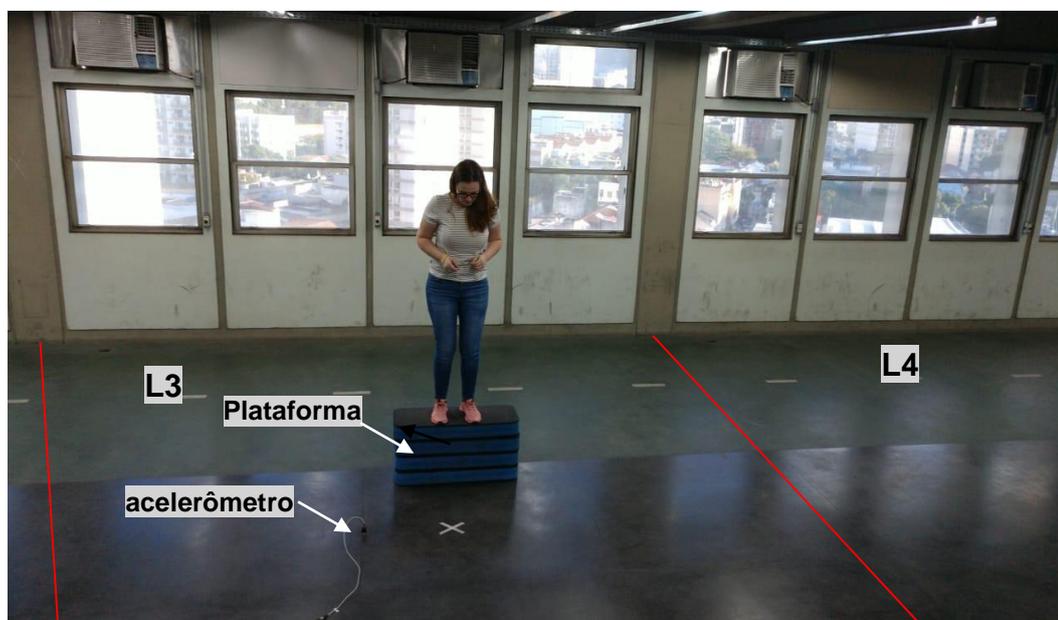
A resposta estrutural dinâmica do piso, em termos de aceleração, é registrada no presente estudo utilizando um sistema de aquisição de dados da marca LYNX Electronic (modelo ADS-2500) em conjunto com um acelerômetro da marca PCB Piezotronics (modelo 393B04). As especificações técnicas desses equipamentos podem ser encontradas na seção 2.4.2 desta tese.

### 6.2.2 Procedimentos experimentais

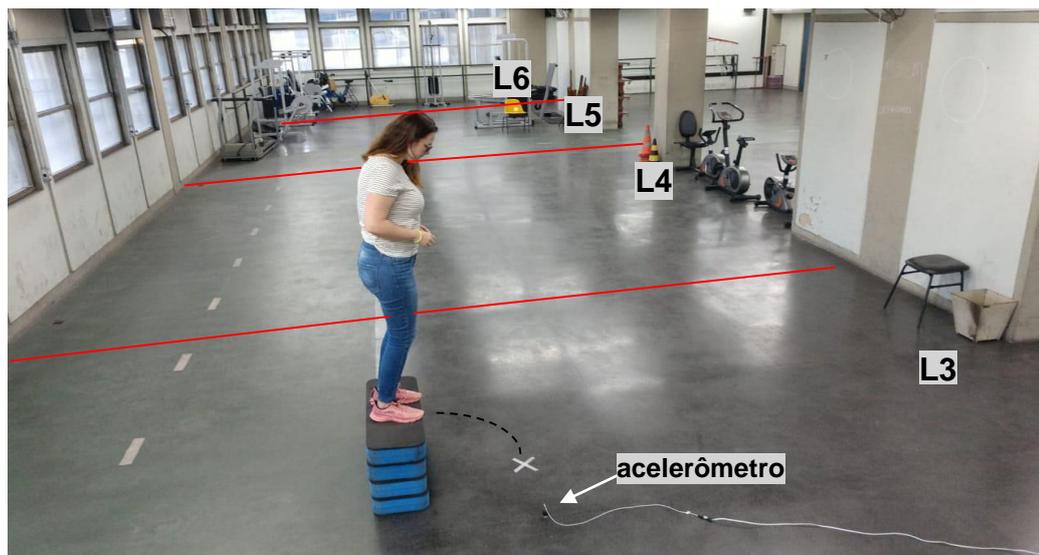
Os testes experimentais são realizados sobre a laje de concreto com o objetivo de determinar o amortecimento da estrutura, com base no emprego da Equação 26. Durante o teste, as acelerações do piso são monitoradas por meio de um acelerômetro posicionado sobre a superfície do piso. Para isso, a resposta do piso é medida enquanto uma pessoa realiza cinco saltos sobre o mesmo. Em seguida, o amortecimento experimental é determinado mediante emprego do método de decremento logarítmico.

$$\xi = \ln \frac{a_i}{a_{i+j}} \frac{1}{2\pi j} \quad (26)$$

Onde,  $\xi$  representa o amortecimento estrutural; o subscrito " $a_{i+j}$ " significa que " $i$ " se refere aos picos máximos de amplitude observados nos gráficos de aceleração no domínio do tempo. Na sequência, as Figuras 94 e 95 ilustram detalhes do experimento realizado sobre o piso.



**Figura 94 - Vista frontal teste experimental I**

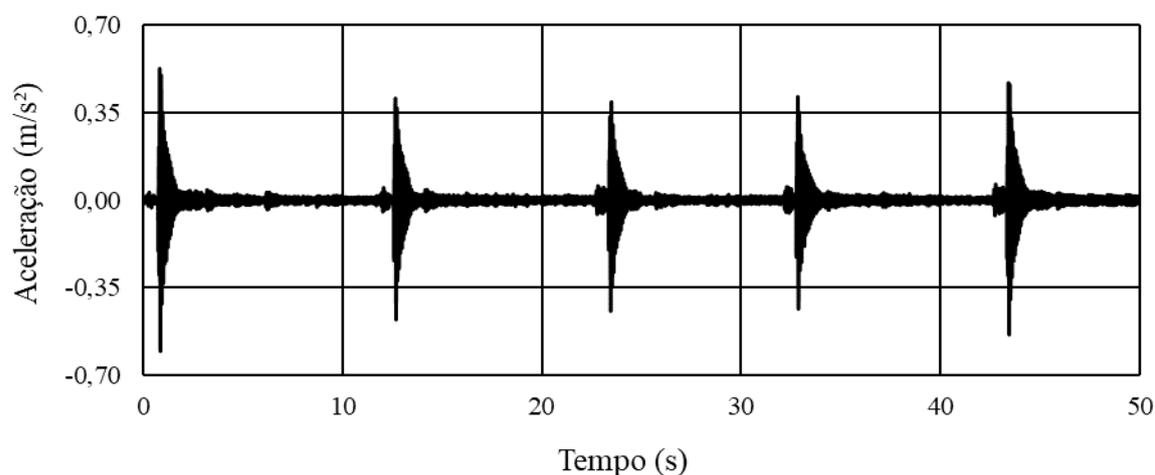


**Figura 95 - Vista lateral teste experimental I**

No que diz respeito ao participante dos testes experimentais, as características são as seguintes: massa corporal de 69,75 kg e altura de 172 cm. É importante destacar que os saltos ocorrem a partir de uma plataforma com altura de 40 cm em relação à superfície do piso, e todos os saltos são executados a uma distância horizontal de 50 cm em relação a esse ponto de medição, após a dissipação da energia de impacto do sistema. Ademais, os testes são realizados na seção do piso correspondente à amplitude modal máxima do terceiro modo de vibração, localizada no centro da laje L3, conforme mencionado anteriormente.

### 6.2.3 Resultados experimentais

Com base nos resultados experimentais da aceleração do piso em função do tempo (ver Figura 96), foram determinados o amortecimento estrutural através do emprego do método do decremento logarítmico, considerando os cinco saltos realizados sobre o piso. Assim sendo, os resultados obtidos são apresentados na Tabela 23, revelando um valor médio de amortecimento da ordem de 2,77% ( $\xi = 2,77\%$ ).



**Figura 96 - Aceleração do piso no domínio do tempo (m/s<sup>2</sup>)**

**Tabela 23 - Características modais do modelo estrutural ocupada: 3º modo de vibração**

Excitação	1º salto	2º salto	3º salto	4º salto	5º salto	média
Amortecimento estrutural	2,75%	2,82%	2,80%	2,77%	2,73%	2.77 %

Ao avaliar os resultados presentes na Tabela 23 de forma comparativa, nota-se que o valor médio obtido experimentalmente para o amortecimento do piso equivale a 2,77% ( $\xi = 2,77\%$ ). Esse valor se aproxima do obtido pelos autores Cao et al. [144], que alcançaram experimentalmente uma taxa média da ordem de 2,3% ( $\xi = 2,3\%$ ), para um piso de concreto armado.

Além disso, observa-se que o guia de projeto AISC recomenda valores de taxa de amortecimento estrutural entre 2% e 5% para pisos. Neste contexto, uma série de normas técnicas e guias de projeto, como Chen et al. [145], Brownjohn [146], Mario e Leigh [147], Agarwal e Shrikhande [148] e Chopra [134], sugerem uma taxa de amortecimento de 5% para estruturas de concreto armado.

Essas referências fornecem informações para embasar a avaliação do amortecimento adequado em projetos de pisos de concreto. Portanto, o valor de amortecimento do piso determinado neste estudo é relativamente baixo em comparação com as recomendações para estruturas de concreto armado, indicando que o sistema estrutural investigado pode não ser capaz de absorver e dissipar eficientemente a energia associada à excitação dinâmica.

### 6.3 Teste experimental II: martelo de impacto sobre o piso

O segundo teste experimental (Teste experimental II: martelo de impacto sobre o piso) tem como objetivo desenvolver uma análise modal experimental com base na excitação do piso através de um martelo. Neste teste, é empregada a metodologia SISO (Single Input Single Output), que envolve a obtenção de um sinal de resposta através da combinação de um vibrômetro Polytec (modelo PDV-100) com um martelo de impacto Dytran (modelo 5802A). A correlação entre as respostas dinâmicas do piso e o impacto, permite realizar uma análise das frequências naturais do piso, por meio das Funções de Resposta em Frequência (FRFs), permitindo assim uma caracterização da resposta modal do piso. Na sequência, a Figura 97 ilustra os equipamentos utilizados durante o teste experimental.



**Figura 97 - Equipamentos utilizados no Teste II (Catálogo de equipamentos)**

Neste contexto de análise, diversos estudos de pesquisa têm empregado essa metodologia ao longo dos anos para avaliar o comportamento estrutural dinâmico das estruturas. Entre os estudos, destacam-se as seguintes pesquisas: Debona [137], Nicoletti et al. [149], Lourens e Van [150], Lin et al. [151], Clerck et al. [152], Avendaño e Rgüelles [153], Döhler et al. [154] e Desmet e Sas [155].

### 6.3.1 Descrição dos equipamentos

No que diz respeito ao vibrômetro Polytec (modelo PDV-100) utiliza a Laser Doppler Vibrometria (LDV), uma metodologia na qual um feixe de laser é focalizado sobre a estrutura em estudo. O movimento relativo entre o laser e a estrutura provoca o efeito Doppler, resultando em variações no comprimento de onda do feixe de laser e na frequência captada e transmitida sobre a estrutura. A Figura 98 e a Tabela 24 fornecem informações detalhadas sobre o equipamento utilizado no experimento.



Figura 98 - PDV 100 (Catálogo de equipamentos)

Tabela 24 - Especificações técnica do PDV 100

Decodificado	Decodificador de velocidade DSP, com 3 faixas de medição.		
Faixa de frequência.	0 ... 22 kHz (saída digital); 0,5 Hz ... 22 kHz (saída analógica)		
Faixas de medição	3		
Amplitude máxima de pico (mm/s) para a escala completa.	20	100	500
Fator de escala (mm/s por V).	5	25	125
Resolução de velocidade ( $\mu\text{m/s}/\sqrt{\text{Hz}}$ ).	< 0,02	< 0,02	<0,1
Aceleração máxima ( $\text{m/s}^2$ )	2.760	13.800	69.000
Distância de trabalho	0,1 m até 30 m.		
Segurança do laser	Laser visível classe II de segurança ocular HeNe (hélio-neônio)		

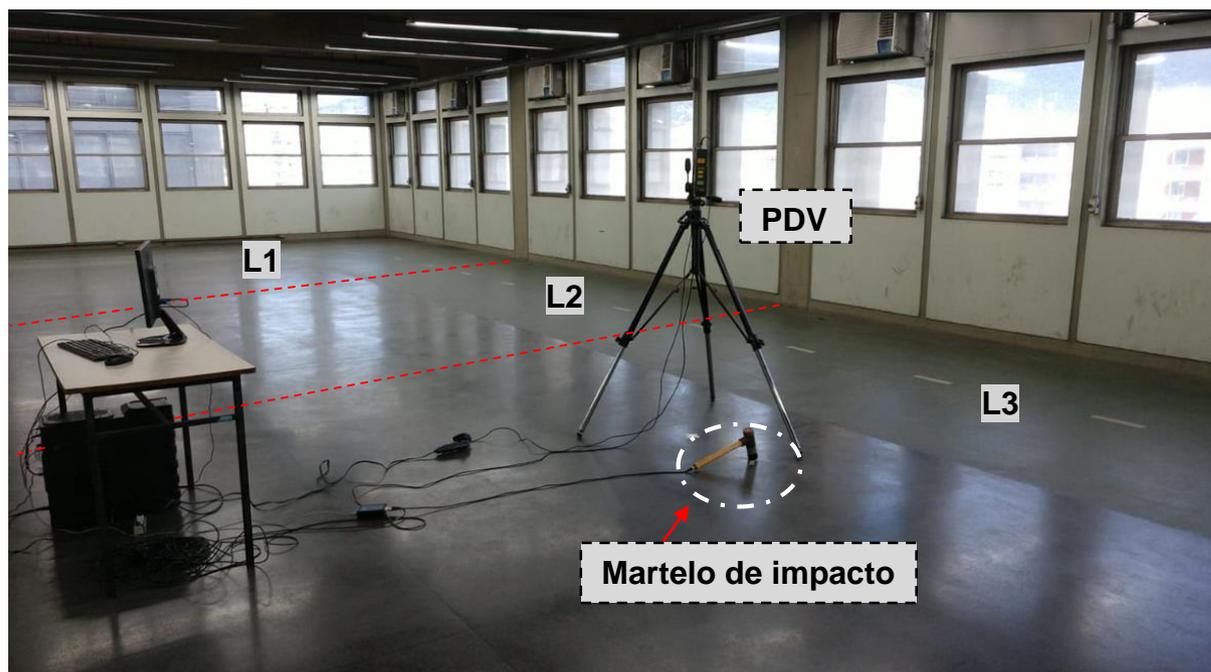
No que se refere ao martelo de impacto, é utilizado com a finalidade de excitar a estrutura de maneira conveniente. Nos testes experimentais, está sendo utilizado o modelo 5802A da Dytran Instruments, conforme ilustrado na Figura 99. O modelo apresenta uma sensibilidade de 1 mV/lbf, massa de 1,4 kg e uma faixa de medição disponível de até 2.250 kg. Neste contexto, destaca-se que o martelo dispõe de ponteiros com diferentes rigidezes. Por exemplo, a ponteira laranja é recomendada para impactos suaves, a ponteira vermelha é adequada para forças mais intensas e a ponteira preta possui uma rigidez superior às mencionadas anteriormente. Para este estudo específico, foi escolhida a ponteira preta devido à natureza da estrutura avaliada, que se refere à um piso de concreto armado.



**Figura 99 - Martelo de impacto (Catálogo de equipamentos)**

### 6.3.2 Procedimentos experimentais

Com relação aos procedimentos experimentais adotados, são monitoradas a resposta estrutural dinâmica do piso (velocidade) na seção estrutural de interesse (centro da Laje L3, conforme ilustrado na Figura 85). Deste modo, os resultados são mensurados com base no sinal de vibrometria a laser. Para esse fim, o piso está sendo excitado cinco vezes utilizando o martelo de impacto, a uma distância de 50 cm em relação à seção central da laje L3. A Figura 100 apresenta mais detalhes do ensaio experimental realizado sobre o piso de concreto armado.

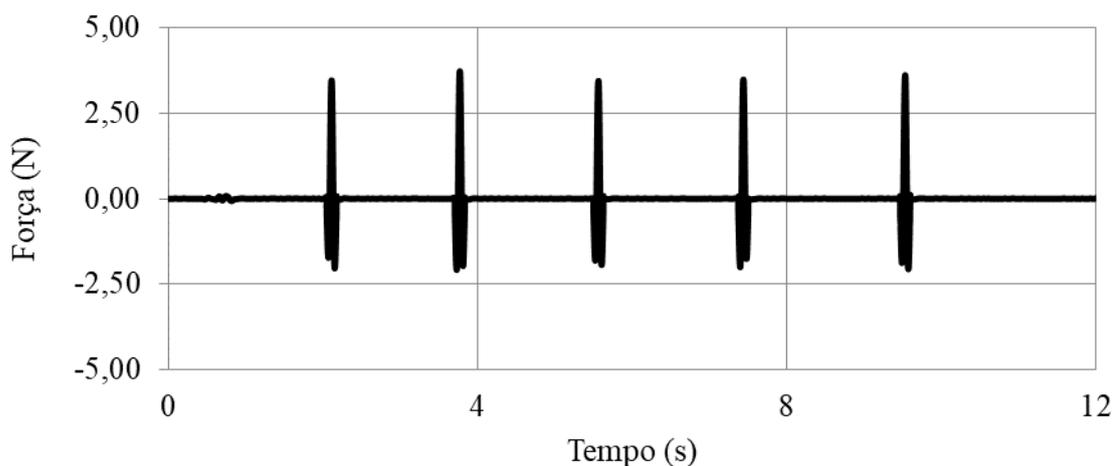


**Figura 100 - Teste experimental II (martelo de impacto)**

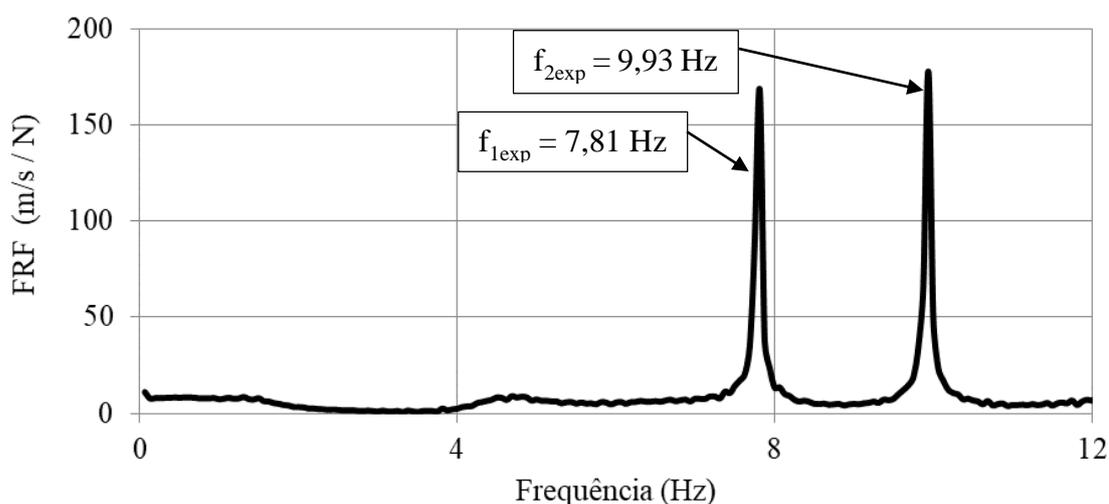
### 6.3.3 Resultados experimentais

Em relação aos resultados obtidos no teste experimental, a Figura 101 apresenta a força aplicada sobre o piso no domínio do tempo. Ao analisar o gráfico, observa-se que os impactos são realizados de maneira cuidadosa e uniforme, visando minimizar qualquer interferência indesejada durante os procedimentos experimentais.

Em seguida, a Função de Resposta em Frequência (FRF) é obtida com base na correlação entre a força de impacto aplicada ao piso de concreto e o sinal de vibrometria a laser. Deste modo, a análise da FRF revela uma frequência experimental do piso da ordem de 7,80 Hz ( $f_{01exp} = 7,80$  Hz), esta se aproxima da terceira frequência natural do piso obtida através da modelagem numérica ( $f_{03num} = 8,02$  Hz, ver Figura 85). Além disso, é identificado outro pico de transferência de energia equivalente a 9,93 Hz ( $f_{02exp} = 9,93$  Hz), associado a um dos modos de vibração da estrutura, conforme resultados ilustrados na Figura 102. Tais resultados destacam a influência desses modos de vibração nas lajes de concreto investigadas neste trabalho.



**Figura 101 - Força aplicada sobre o piso, por meio do martelo de impacto**

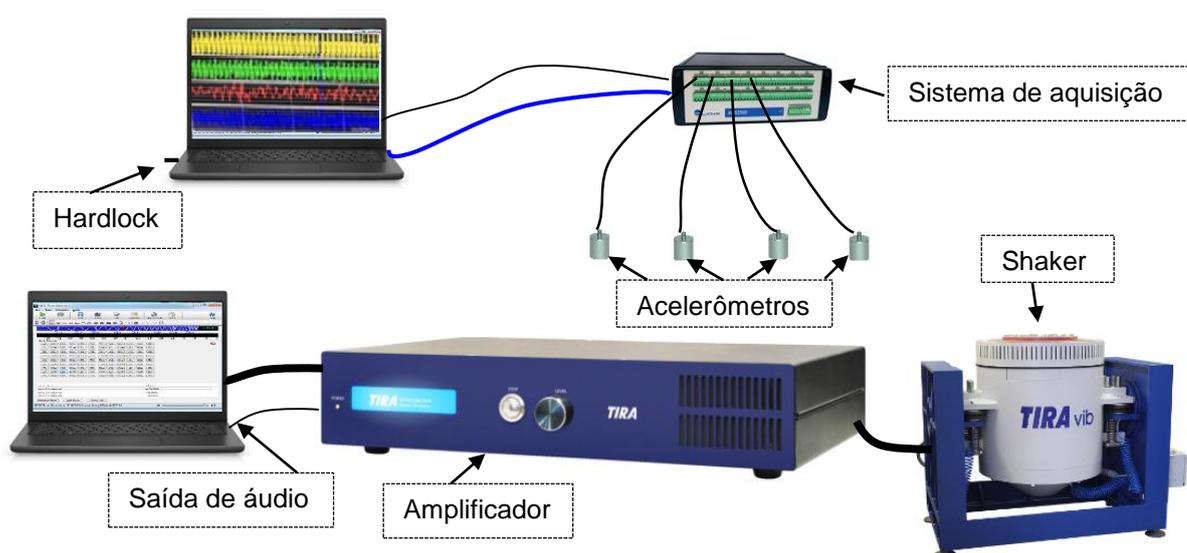


**Figura 102 - FRF no domínio da frequência**

#### 6.4 Teste experimental III: excitação por um shaker

O terceiro Teste Experimental III (Teste III: excitação por um shaker) é realizado mediante emprego do shaker eletrodinâmico, que tem a função de excitar a estrutura de forma controlada, permitindo assim a identificação dos modos de vibração característicos do piso. Tal metodologia é amplamente utilizada na análise modal de estruturas, e foi empregada em diversos trabalhos de pesquisa tais como: Debona [137], Li et al. [156], Sun et al. [157], Díaz e Magalhães [158], Peláez et al. [159] e López et al. [160].

Neste trabalho, o foco concentração na monitoração da resposta estrutural dinâmica das lajes L1, L2, L3 e L4 quando são submetidas à excitação por um shaker. É importante destacar que os pontos de monitoramento são escolhidos estrategicamente, no centro de cada laje, onde se encontram as seções de amplitude modal máxima. Portanto, neste capítulo são apresentadas as respostas do piso quando o shaker está posicionado sobre a laje L3. No entanto, são realizados outros testes experimentais com base na variação da posição do shaker ao longo do piso investigado. Neste sentido, os demais resultados podem ser encontrados no Apêndice E. No que diz respeito aos equipamentos utilizados na análise, a Figura 103 apresenta detalhes sobre o projeto de monitoramento dinâmico experimental.



**Figura 103 - Equipamentos utilizados no Teste III (Catálogo de equipamentos)**

#### 6.4.1 Descrição dos equipamentos

Com a finalidade de executar o Teste Experimental III, são utilizados os seguintes equipamentos: dois computadores, um sistema de aquisição de dados ADS 2500, quatro acelerômetros PCB Piezotronics, um shaker modelo S51140-M da TIRAvib e um amplificador BBA-1000. As especificações técnicas do acelerômetro e do sistema de aquisição de dados podem ser encontradas na seção 2.4.2. É importante ressaltar que, neste estudo, um dos computadores é utilizado para

transmitir o sinal de áudio para o amplificador, mas poderia ser substituído por um tablet ou celular.

No que se refere ao shaker S51140-M, trata-se de um excitador de vibração que utiliza um transdutor eletromagnético para gerar vibrações, onde a sua faixa de frequência varia de 5 a 5000 Hz, podendo alcançar uma força de até 400 N, permitindo assim a geração de sinais de onda senoidais ou aleatória de acordo com o sinal transmitido mediante emprego do amplificador de potência. Deste modo, as especificações técnicas detalhadas do shaker S51140-M e do amplificador de potência BAA 1000 da TIRA podem ser encontradas nas Tabelas 25 e 26, respectivamente.

**Tabela 25 - Especificações técnicas do Shaker modelo S 51140-M**

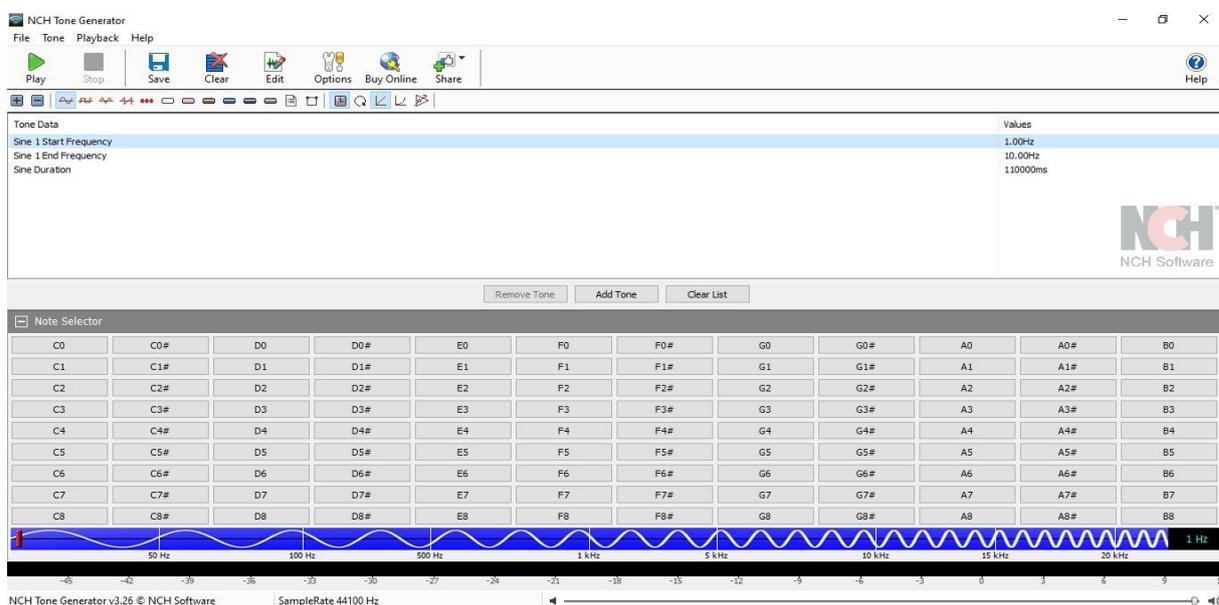
Descrição	Unidade	Valor
Pico de força (senoidal / aleatório)	N	400 / 311
Faixa de frequência	Hz	5 - 5000
Consumo máximo de energia a 230 V	kVa	1,22
Corrente admissível máxima (com / sem	A <sub>rms</sub>	18 / 5,5
Movimento de massa efetiva	kg	0,4
Velocidade máxima (senoidal / aleatório)	m/s	1,5
Peso	kg	18
Acoplamento	-	M6

**Tabela 26 - Especificações técnicas do Amplificador de potência BAA 1000**

Descrição	Unidade	Valor
Potência de saída	VA	1200
Faixa de frequência	Hz	2 - 2000
Tensão de saída máxima	V <sub>rms</sub>	72
Corrente admissível máxima	A <sub>rms</sub>	18
Dimensões (L / A / P)	mm	438 / 190 / 600
Peso	kg	45

Com relação ao *software* NCH Tone Generator, este é utilizado neste estudo com intuito de gerar e transmitir sinais sonoros controlados para o shaker. O programa é versátil e oferece recursos para a geração de sinais de áudio com diferentes frequências, amplitudes e formas de onda, como senoidal, quadrada, triangular e de pulso. Desta forma, é possível ajustar a frequência de excitação, amplitude e duração

do sinal, além de oferecer opções avançadas de reprodução, como sequências de tons, criação de harmônicos e modulação de frequência. A Figura 104 ilustra a tela principal do *software* NCH Tone Generator utilizado no contexto dessa análise.



**Figura 104 - Tela do *software* NCH Tone Generator**

#### 6.4.2 Procedimentos experimentais

Nos testes experimentais, o *software* NCH Tone Generator é utilizado com a finalidade de gerar uma função senoidal, que é transmitida para o amplificador de potência e, em seguida, alimenta o shaker responsável por excitar o piso em estudo. Dessa forma, é possível controlar a excitação aplicada ao piso, com uma variação gradual de frequência de 1 Hz a 10 Hz e uma duração da análise no intervalo de 110 segundos. Neste contexto, são avaliadas a resposta estrutural dinâmica do piso com base em 4 acelerômetros instalados nas seções centrais das lajes L1, L2, L3 e L4. Assim sendo, o objetivo do teste consiste em investigar os efeitos da excitação do shaker sobre o piso, variando a posição do mesmo ao longo do piso em estudo.

Na sequência, as Figuras 105 a 108 ilustram as diferentes posições do shaker em relação às lajes: Figura 105 - shaker sobre a laje L1; Figura 106 - shaker sobre a laje L2; Figura 107 - shaker sobre a laje L3; Figura 108 - shaker sobre a laje L4. Vale ressaltar que neste capítulo são apresentadas apenas as respostas gráficas do piso quando o shaker está posicionado sobre a laje com maior amplitude modal associada

ao terceiro modo de vibração (ver Figura 85). No entanto, as demais situações analisadas podem ser encontradas no Apêndice E.

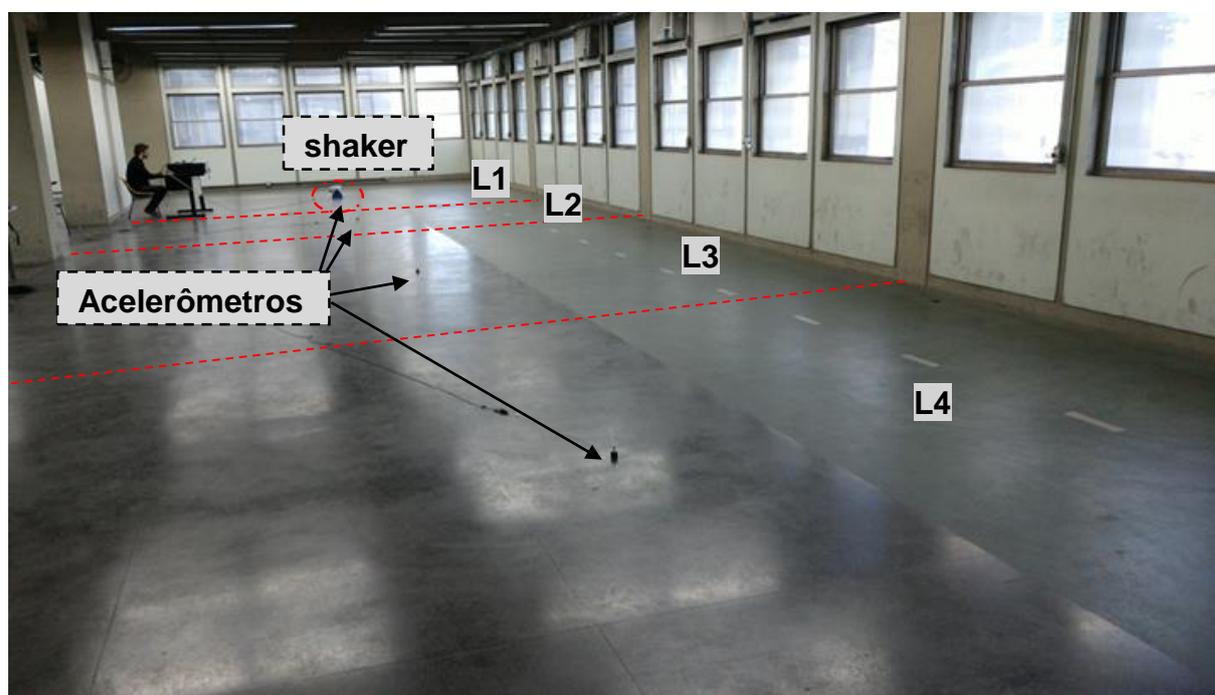


Figura 105 - Experimento I: shaker sobre a laje L1

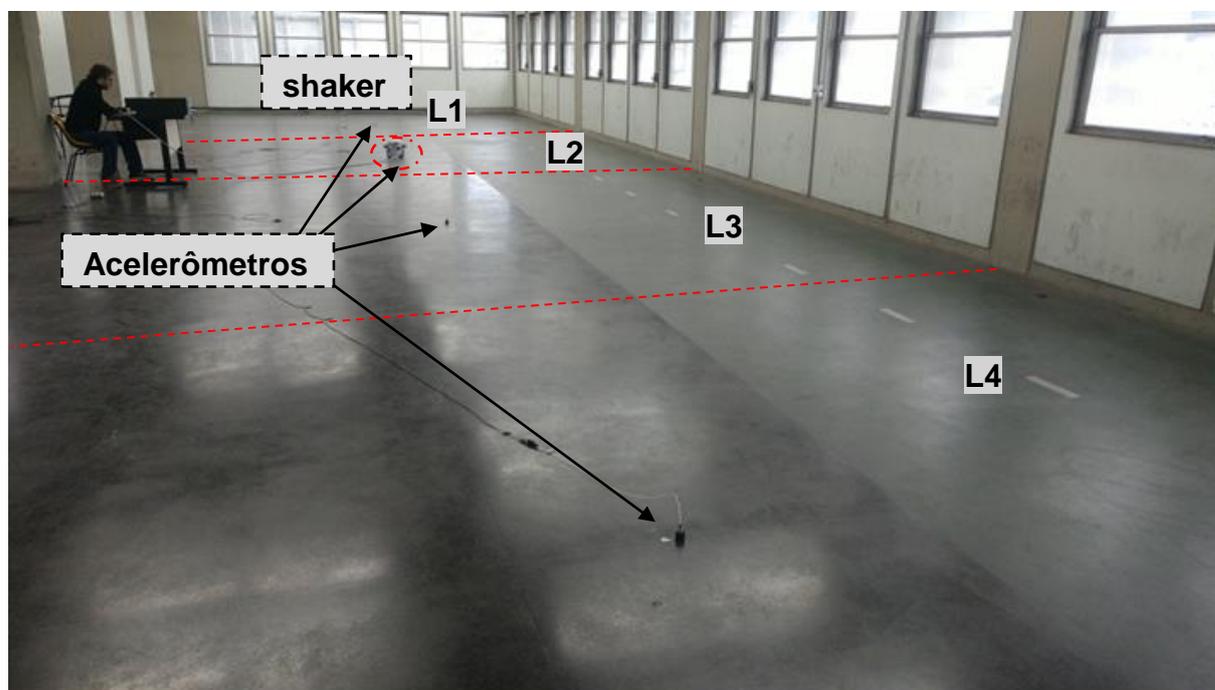


Figura 106 - Experimento II: shaker sobre a laje L2

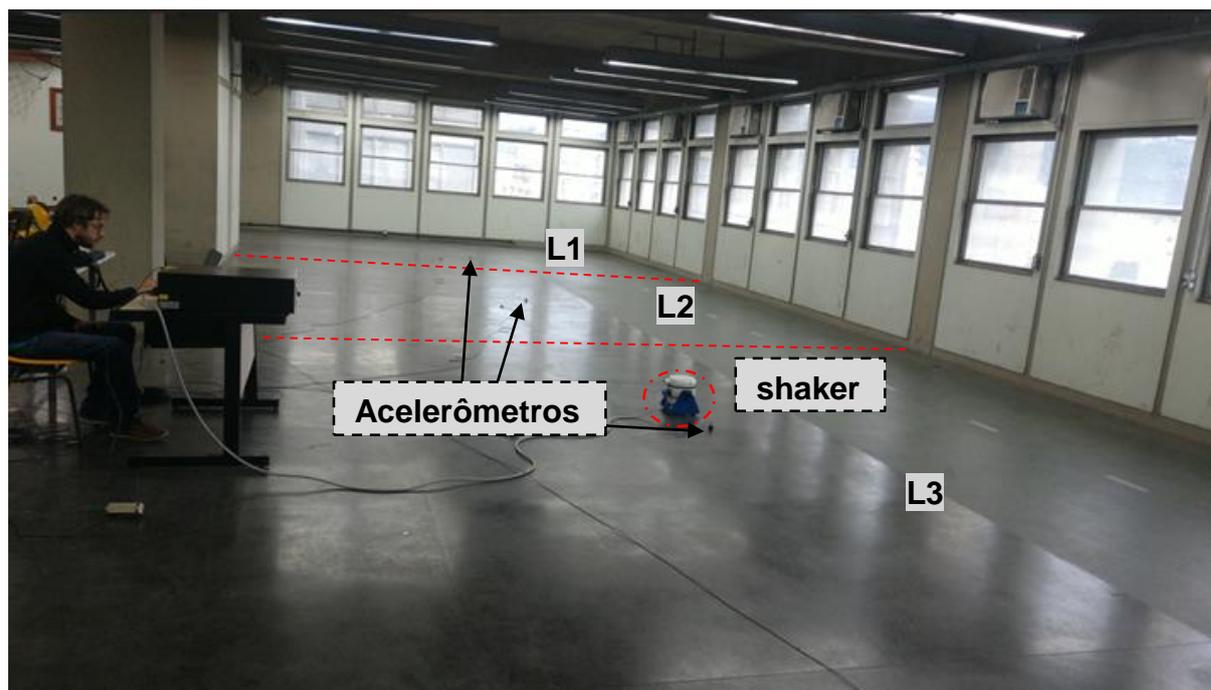


Figura 107 - Experimento III: shaker sobre a laje L3

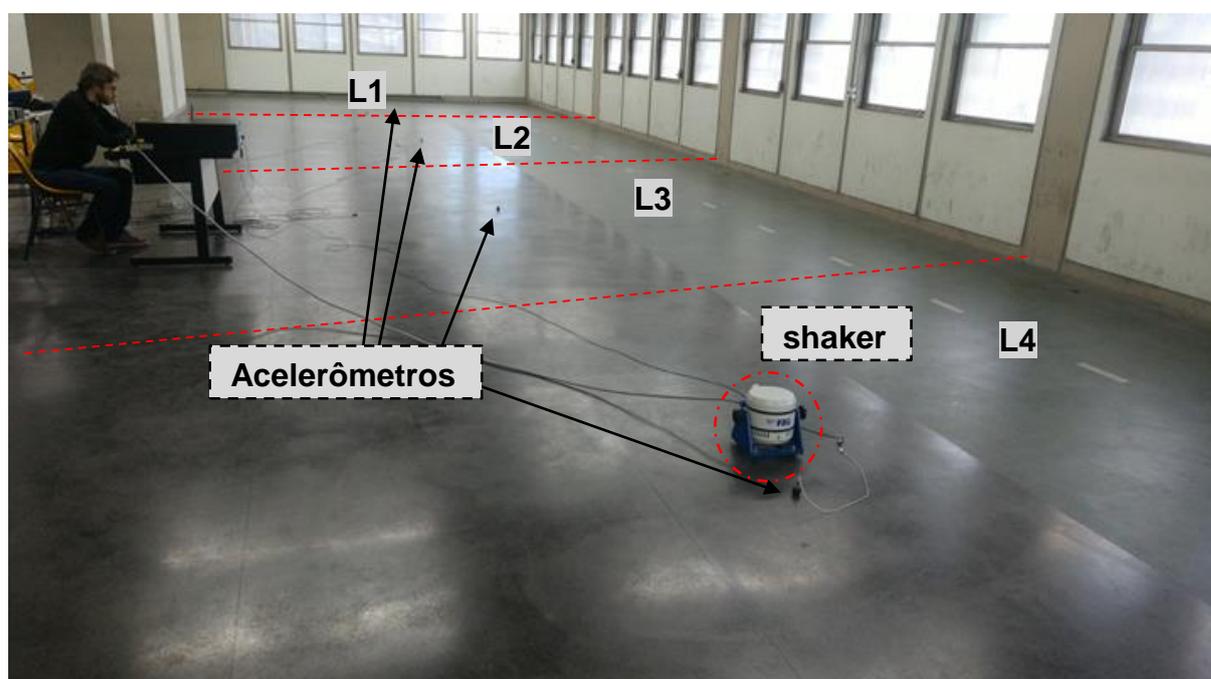
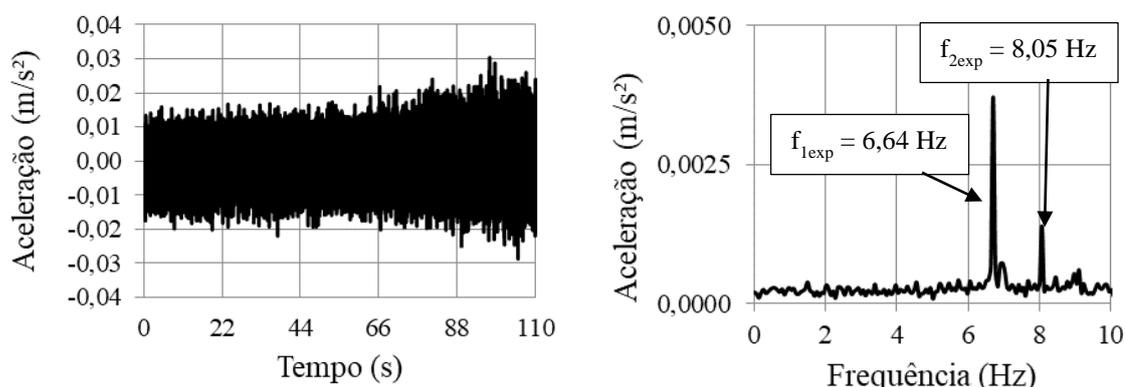


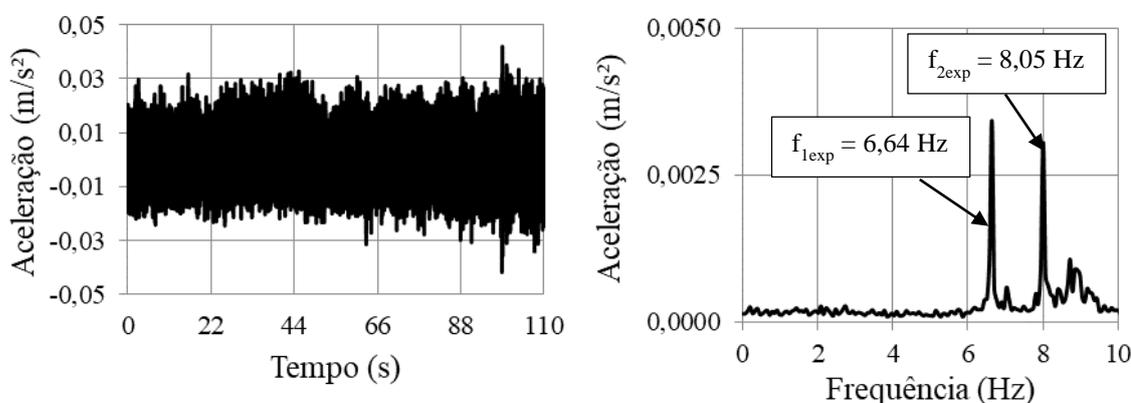
Figura 108 - Experimento IV: shaker sobre a laje L4

### 6.4.3 Resultados experimentais

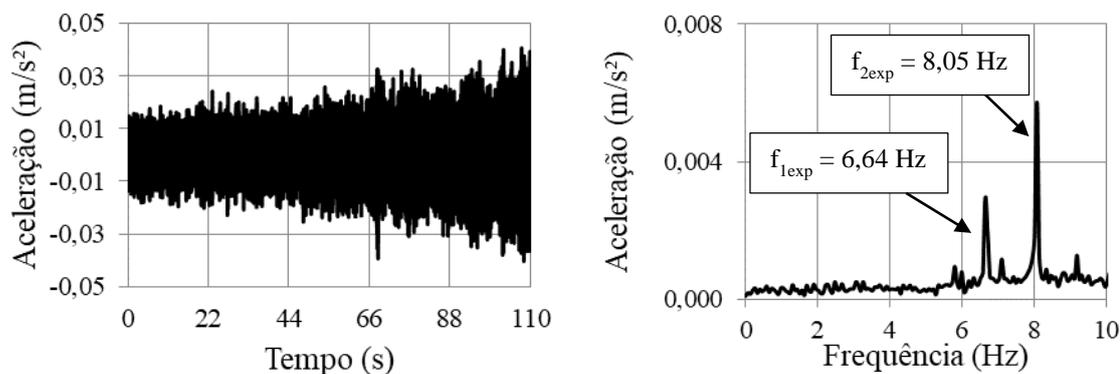
Nesta seção, são exibidos os resultados das respostas do piso, mais especificamente as respostas das lajes L1, L2, L3 e L4, quando submetidas à excitação por um dispositivo chamado "shaker", colocado sobre a laje L3. As Figuras 109 a 112 mostram os resultados das respostas dinâmicas (aceleração) das respectivas lajes (L1, L2, L3 e L4) quando o shaker é posicionado sobre a laje L3.



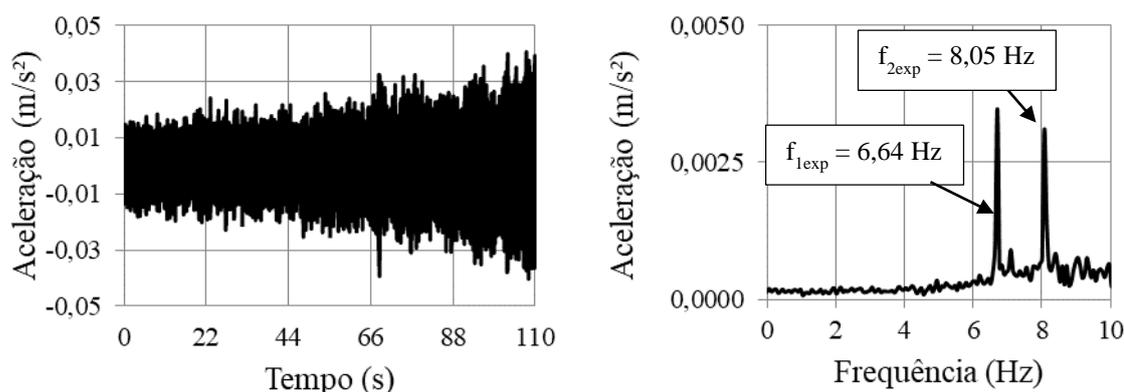
**Figura 109 - Resposta estrutural dinâmica da laje L1 (shaker sobre a laje L3)**



**Figura 110 - Resposta estrutural dinâmica da laje L2 (shaker sobre a laje L3)**



**Figura 111 - Resposta estrutural dinâmica da laje L3 (shaker sobre a laje L3)**



**Figura 112 - Resposta estrutural dinâmica da laje L4 (shaker sobre a laje L3)**

Ao analisar os resultados apresentados nas Figuras 109 a 112, referentes aos gráficos de aceleração em função do tempo e da frequência, é possível identificar nos resultados de aceleração no domínio da frequência claramente a existência de dois picos distintos. O primeiro pico corresponde à frequência de excitação do shaker ( $f_{1Exp} = 6,64 \text{ Hz}$ ), enquanto o segundo pico é atribuído à terceira frequência natural do piso ( $f_{2Exp} = 8,05 \text{ Hz}$ ).

Neste contexto, nota-se que o terceiro modo de vibração é excitado através do emprego do shaker, que está posicionado sobre a laje L3, onde se encontra o ponto de amplitude modal máxima. Desta forma, observa-se nos resultados apresentados na Figura 111 uma intensidade mais elevada em relação aos demais casos. Os resultados podem ser justificados pelo fato do shaker excitar essa referida laje e também por conter uma seção estrutural de amplitude modal máxima.

## 6.5 Comparação de resultados: numérico-experimental

Com a finalidade de validar o modelo em elementos finitos desenvolvido no âmbito desta pesquisa, são realizadas análises comparativas entre as frequências naturais do piso em relação aos resultados obtidos via monitoração experimental dinâmica e através do emprego da modelagem numérica. No que diz respeito às frequências naturais obtidas por meio dos testes experimentais realizados sobre o

piso investigado, ressalta-se que o Teste Experimental II, fornece um valor da ordem de 7,80 Hz ( $f_{Exp} = 7,80$  Hz), enquanto o Teste Experimental III, indica um resultado equivalente a 8,05 Hz ( $f_{Exp} = 8,05$  Hz).

Neste sentido, com o intuito de calibrar as respostas dinâmicas foi adicionado ao modelo em elementos finitos um incremento de massa correspondente ao revestimento aplicado sobre o piso de concreto armado investigado. Esse acréscimo resulta em um aumento de 5% na massa total do piso, equivalente a 12.707,03 kg ( $m_{rev.} = 12.707,03$  kg), modificando assim a massa total do piso para 296.346,2 kg ( $m_t = 296.346,2$  kg). Assim sendo, é importante ressaltar que os resultados apresentados no capítulo anterior, referentes à análise modal numérica, são obtidos com o modelo numérico devidamente ajustado com base nos dados de monitoração dinâmica experimental presentes neste capítulo.

Neste contexto, ao comparar a frequência natural do piso devidamente calibrado, observa-se que o valor referente ao terceiro modo de vibração, da ordem de 8,02 Hz ( $f_{03N} = 8,02$  Hz, ver Figura 85), aproxima-se dos obtidos experimentalmente. Observam-se diferenças percentuais de 2,62% em relação ao Teste Experimental II e de 0,37% em relação ao Teste Experimental III, conforme resultados expressos na Tabela 27. Deste modo, percebe-se que existe uma boa concordância entre os resultados experimentais e numéricos, reforçando assim a validação do modelo numérico proposto neste trabalho de pesquisa.

**Tabela 27 - Comparação entre frequência experimental e frequência numérica**

Testes	Frequência natural (Hz)		
	Testes Experimentais	MEF	Diferenças (%)
II	$f_{exp} = 7,81$ Hz	$f_{03} = 8,02$ Hz	2,62
III	$f_{exp} = 8,05$ Hz	$f_{03} = 8,02$ Hz	0,37

## 6.6 Considerações finais

Neste capítulo, foi realizada uma avaliação experimental dos parâmetros modais do piso de concreto armado, com o propósito de calibrar e validar o modelo

em elementos finitos proposto neste estudo. Neste sentido, é importante ressaltar que todas as análises subsequentes realizadas via modelagem numérica são desenvolvidas após esse processo de calibração do modelo, levando em consideração todas as condições verificadas sobre o piso *in loco*. Dessa forma, é possível estabelecer uma validação confiável, bastante satisfatório, do modelo numérico em elementos finitos em relação aos resultados experimentais. No próximo capítulo, serão apresentados os resultados dos testes experimentais de vibração forçada realizados sobre o piso.

## 7 ANÁLISE DE VIBRAÇÃO FORÇADA EXPERIMENTAL

### 7.1 Considerações iniciais

O presente capítulo dedica-se à investigação da interação dinâmica pessoa-estrutura mediante testes experimentais de vibração forçada desenvolvidos sobre o piso da academia de ginástica, os quais são provocados por carregamento dinâmico humano, mais precisamente atividades aeróbicas. Para tal, são apresentados os procedimentos adotados durante os testes experimentais, visando assim analisar o comportamento estrutural dinâmico do piso, mediante o emprego de diferentes cenários de carregamento. Ademais, esses resultados serão posteriormente confrontados com os obtidos via modelagem numérica (Capítulo 8).

Com a finalidade de mensurar a resposta estrutural dinâmica (aceleração) no domínio do tempo, são utilizados acelerômetros de alta sensibilidade, do tipo PCB Piezotronic, posicionados estrategicamente nos pontos de máxima amplitude modal, localizados na seção central das lajes L3 e/ou L4 (conforme ilustrado na Figura 85). Além disso, outros equipamentos também são utilizados nos testes experimentais, tais como sistema de aquisição de dados ADS 2500, um computador e um metrônomo. Neste sentido, vale ressaltar que as informações relacionadas as especificações técnicas desses equipamentos encontram-se na seção 2.4.2 desta tese. Na sequência, são apresentados mais detalhes acerca das técnicas empregadas durante a monitoração dinâmica experimental das lajes de concreto armado em estudo.

### 7.2 Modelos de carregamento analisados

Diante do exposto, são estudadas diferentes composições de carregamento dinâmico, constituídos por diferentes grupos de pessoas praticando atividades humanas rítmicas (ginástica aeróbica) sobre as diferentes lajes de concreto. Assim sendo, são analisados experimentalmente nove casos distintos, com base na variação do número de pessoas ou redistribuição ao longo do piso em estudo. Na sequência,

a Tabela 28 apresenta os detalhes dos diferentes modelos de carregamento (MC) investigados neste trabalho de doutorado.

Vale ressaltar que as atividades humanas rítmicas, especificamente a ginástica aeróbica, realizadas sobre o piso em estudo foram controladas com base nos estímulos sonoros fornecidos por um metrônomo. Para garantir a confiabilidade dos resultados experimentais, foram realizadas repetições e analisados os dados da resposta dinâmica do piso expressa em aceleração.

Com base nos resultados de aceleração no domínio da frequência obtidos através da Transformada Rápida de Fourier (FFT), avaliou-se se os saltos estavam em consonância com a frequência de excitação ( $f = 2$  Hz). Além do pico da frequência de excitação, também são identificados outros picos associados à transferência de energia, que são os múltiplos desse valor, bem como as frequências naturais identificadas do piso.

**Tabela 28 - Modelos de carregamento investigados**

Modelo de carregamento (MC)	Aplicação do carregamento
MC-I	1 Pessoa sobre a laje L3
MC-II	1 Pessoa sobre a laje L4
MC-III	2 Pessoas (1 sobre a laje L3 e 1 sobre a laje L4)
MC-IV	3 Pessoas sobre a laje L3
MC-V	3 Pessoas sobre a laje L4
MC-VI	6 Pessoas (3 sobre a laje L3 e 3 sobre a laje L4)
MC-VII	9 Pessoas sobre a laje L3
MC-VIII	9 Pessoas sobre a laje L4
MC-IX	18 Pessoas (9 sobre a laje L3 e 9 sobre a laje L4)

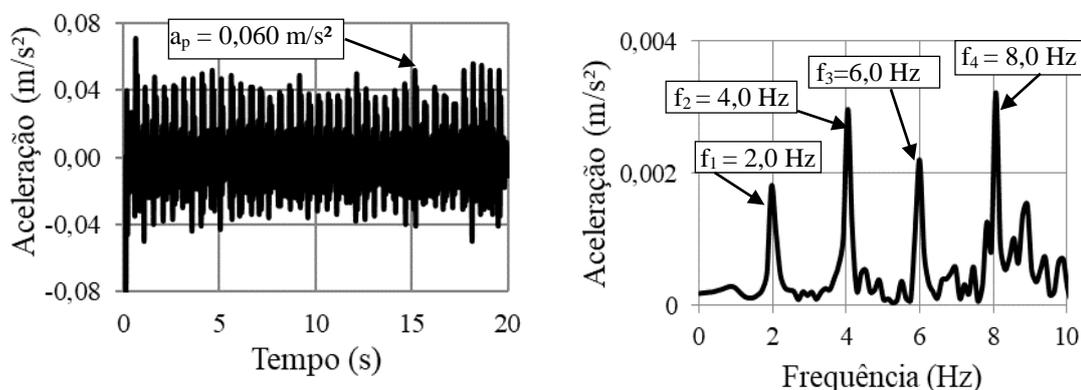
### 7.2.1 Modelo de carregamento I (MC-I)

O modelo de carregamento I (MC-I: 1 pessoa) se refere a um teste experimental realizado sobre a laje L3 por uma única pessoa, com massa corporal equivalente a 81,4 kg (ver Figura 113). É importante destacar que os saltos realizados pelo indivíduo estão próximos da seção de amplitude modal máxima, mais precisamente a uma distância de 50 cm do centro da laje L3. Durante esse teste, a resposta estrutural dinâmica do piso é monitorada por meio de um acelerômetro instalado sobre o piso

(centro laje L3). Na sequência, são apresentados na Figura 114 os resultados da aceleração do piso, tanto no domínio do tempo quanto no domínio da frequência.



**Figura 113 - Modelo de carregamento I (1 Pessoa sobre a Laje L3)**

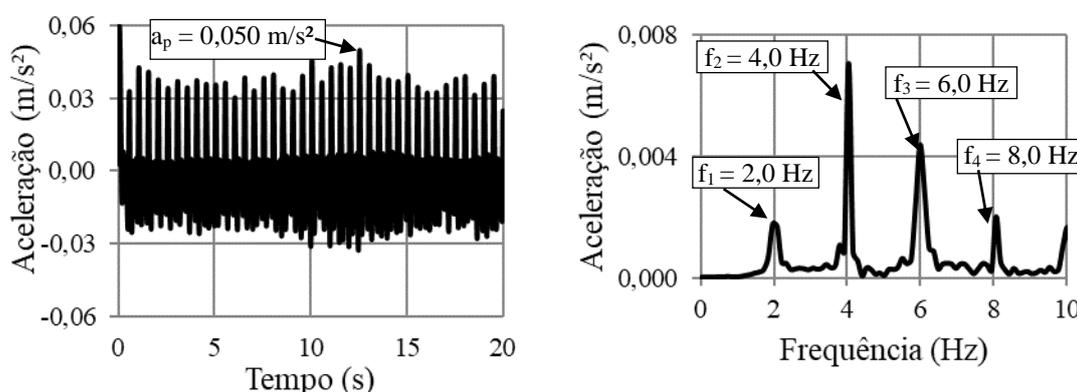


**Figura 114 - Resposta dinâmica do piso: MC-I (1 pessoa;  $f = 2,0 \text{ Hz}$ ; Laje L3)**

Ao avaliar o resultado apresentado na Figura 114, é possível observar nos gráficos de aceleração no domínio da frequência um primeiro pico correspondente à frequência de excitação de 2 Hz ( $f = 2 \text{ Hz}$ ). Ademais, há a presença de outros picos associados à transferência de energia em múltiplos de 2 Hz, como 4,0 Hz, 6,0 Hz e 8,0 Hz. Além das informações no domínio da frequência, é relevante mencionar que a aceleração máxima registrada sobre o piso estudado, na seção central da laje L3, corresponde a  $0,060 \text{ m/s}^2$  ( $a_p = 0,060 \text{ m/s}^2$ ), conforme ilustrado no gráfico de aceleração no domínio do tempo.

### 7.2.2 Modelo de carregamento II (MC-II)

O modelo de carregamento II [MC-II: 1 pessoa] refere-se ao caso de carregamento dinâmico excitado pelo mesmo participante do MC-I, porém o indivíduo encontra-se posicionado sobre a Laje L4. Na sequência, a Figura 115 apresenta os resultados de aceleração no domínio do tempo e da frequência associados à seção central da laje L4.



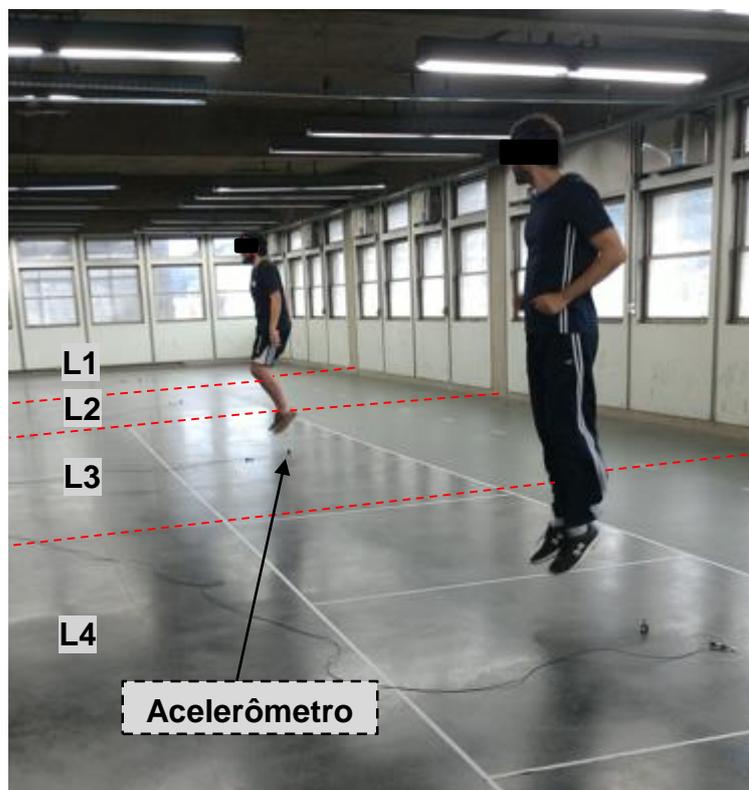
**Figura 115 - Resposta dinâmica do piso: MC-II (1 pessoa;  $f = 2,0$  Hz; Laje L4)**

Ao analisar os resultados na Figura 115, nota-se uma aproximação nos valores de aceleração de pico entre os casos de carregamento [MC-I:  $a_p = 0,060$  m/s<sup>2</sup>; Laje L3] e [MC-II:  $a_p = 0,050$  m/s<sup>2</sup>; Laje L4], resultando em uma diferença da ordem de 0,01 m/s<sup>2</sup>. Essa diferença não é tão relevante sob o ponto de vista da análise dinâmica, pois as lajes L3 e L4 apresentam um comportamento semelhante devido à simetria do sistema estrutural.

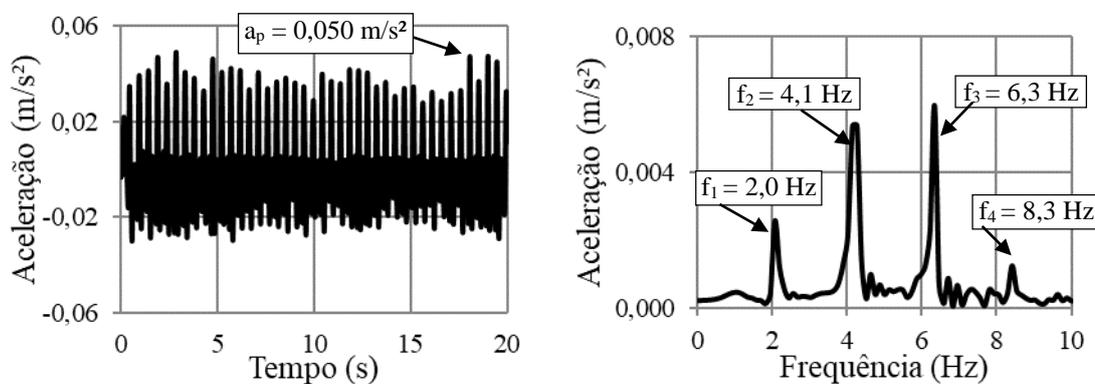
### 7.2.3 Modelo de carregamento III (MC-III)

O modelo de carregamento III [MC-III: 2 pessoas] consiste na investigação da resposta dinâmica do piso induzida por duas pessoas que realizaram saltos rítmicos na frequência de estudo ( $f = 2,0$  Hz). O primeiro indivíduo, com uma massa corporal de 81,4 kg, posicionou-se sobre a laje L3, enquanto o segundo indivíduo, com uma massa corporal de 66,85 kg, sobre a laje L4. A representação visual encontra-se na Figura 116, onde os indivíduos estão dispostos sobre as lajes L3 e L4. Em seguida, a

Figura 117, apresenta os resultados de aceleração no domínio do tempo e da frequência referente a laje L3.



**Figura 116 - Modelo de carregamento III (2 Pessoas sobre a Laje L3/L4)**



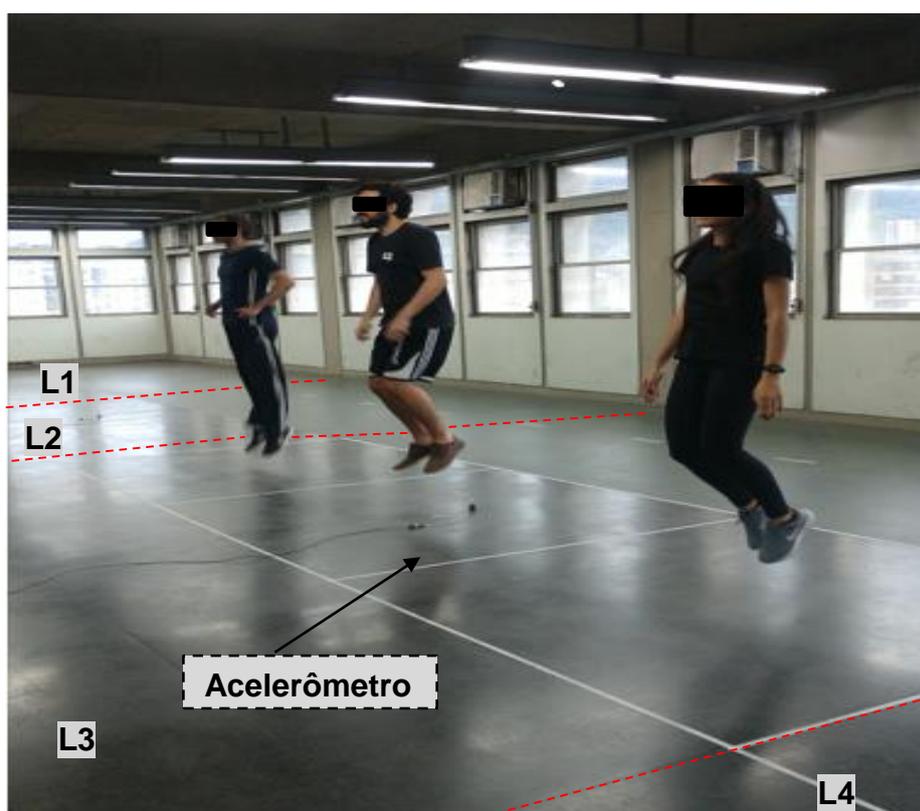
**Figura 117 - Resposta dinâmica do piso: MC-III (2 pessoas;  $f = 2,0$  Hz; Laje L3)**

Ao analisar os resultados presentes na Figura 117, percebe-se no gráfico de aceleração no domínio da frequência a presença de picos associados à transferência de energia no sistema estrutural, assim como nos casos estudados anteriormente (MC-I e MC-II). No entanto, devido ao teste ter sido realizado simultaneamente por dois indivíduos, é perceptível um leve deslocamento nos picos de transferência. Isso ocorre porque o piso investigado apresenta múltiplos modos de vibração próximos da faixa de 8 Hz, que também podem ser excitados através dos saltos executados pelos

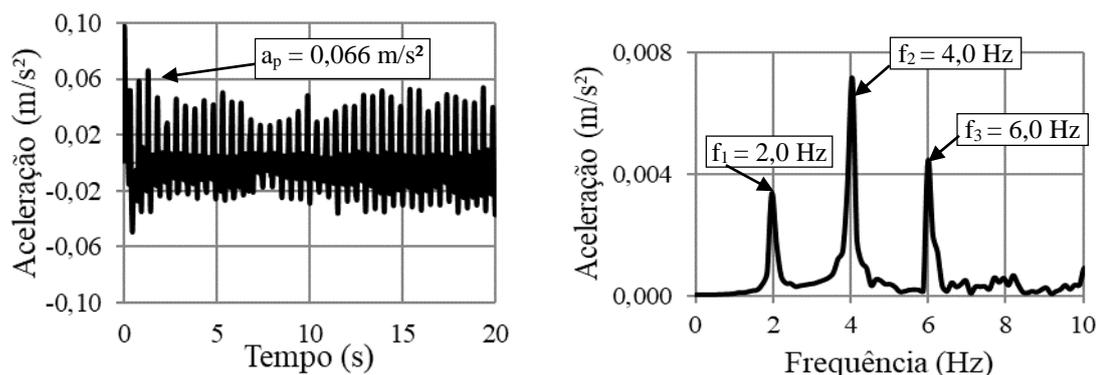
participantes. Com relação aos valores de aceleração de pico, observa-se resultados da ordem de  $0,050 \text{ m/s}^2$ , aproximando-se das respostas obtidas nos casos de carregamento investigados anteriormente (MC-I e MC-II). Isso indica que não há uma variação considerável na resposta estrutural dinâmica do piso ao considerar a presença de um único ou dois participantes.

#### 7.2.4 Modelo de carregamento IV (MC-IV)

O modelo de carregamento IV [MC-IV: 3 pessoas] consiste no teste realizado por três indivíduos saltando sobre a laje L3, conforme ilustrado na Figura 118. Os participantes selecionados apresentam massa corporal total equivalente a  $209,65 \text{ kg}$  ( $61,40 \text{ kg} + 81,40 \text{ kg} + 66,85 \text{ kg}$ ). Posteriormente, a Figura 119 mostra os resultados de aceleração no domínio do tempo e da frequência para a laje L3, mais precisamente seção central.



**Figura 118 - Modelo de carregamento IV (3 Pessoas sobre a Laje L3)**

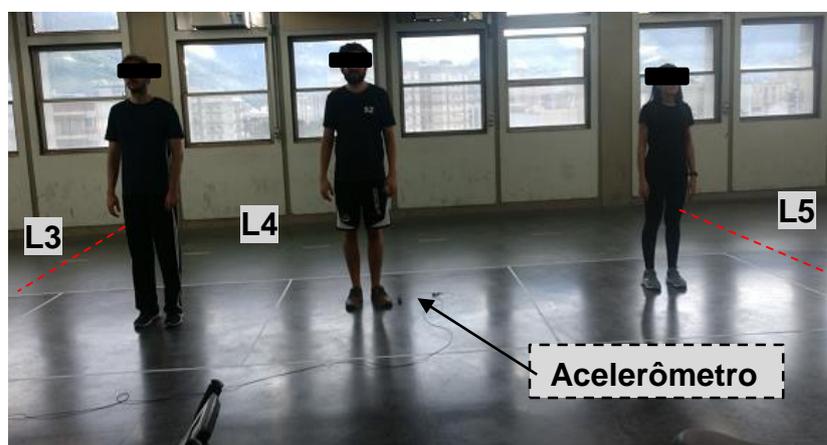


**Figura 119 - Resposta dinâmica do piso: MC-IV (3 pessoas;  $f = 2,0$  Hz; Laje L3)**

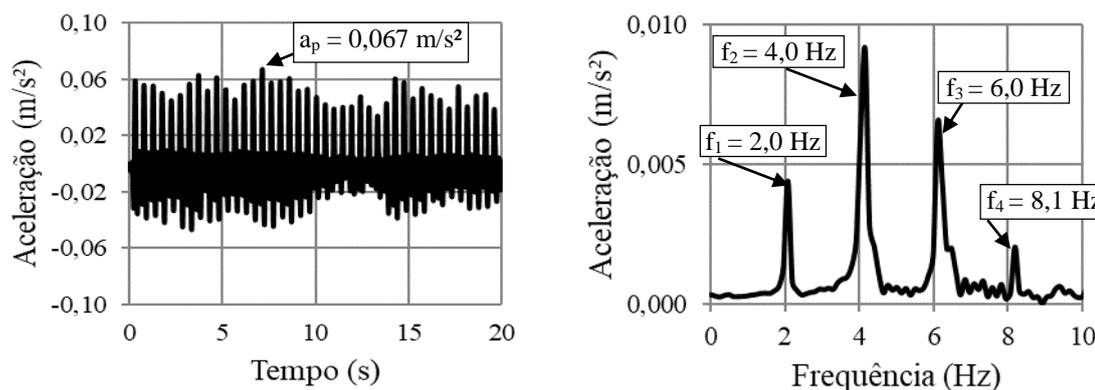
Ao analisar a Figura 119, é possível notar que o valor da aceleração máxima de piso obtido no âmbito do caso de carregamento MC-IV é da ordem de  $0,066 \text{ m/s}^2$ . Em comparação com os casos anteriores de carregamento estudados [MC-I:  $0,060 \text{ m/s}^2$ , MC-II:  $0,050 \text{ m/s}^2$ , MC-III:  $0,050 \text{ m/s}^2$ ], não se observa uma diferença relevante nos resultados, apesar do presente teste ter sido executado com um número maior de participantes. Neste contexto, a resposta estrutural dinâmica do piso não foi significativamente afetada em função do aumento do número de participantes realizando atividades humanas rítmicas sobre o piso investigado.

#### 7.2.5 Modelo de carregamento V (MC-V)

O modelo de carregamento V [MC-V: 3 pessoas] diz respeito ao teste executados pelos mesmos participantes dos testes [MC-IV], porém, desta vez, estes encontram-se posicionadas sobre a laje L4, conforme mostrado na Figura 120. Na sequência, a Figura 121 apresenta os resultados da resposta dinâmica da laje analisada (Laje L4; seção central).



**Figura 120 - Modelo de carregamento V (3 Pessoas sobre a Laje L4)**



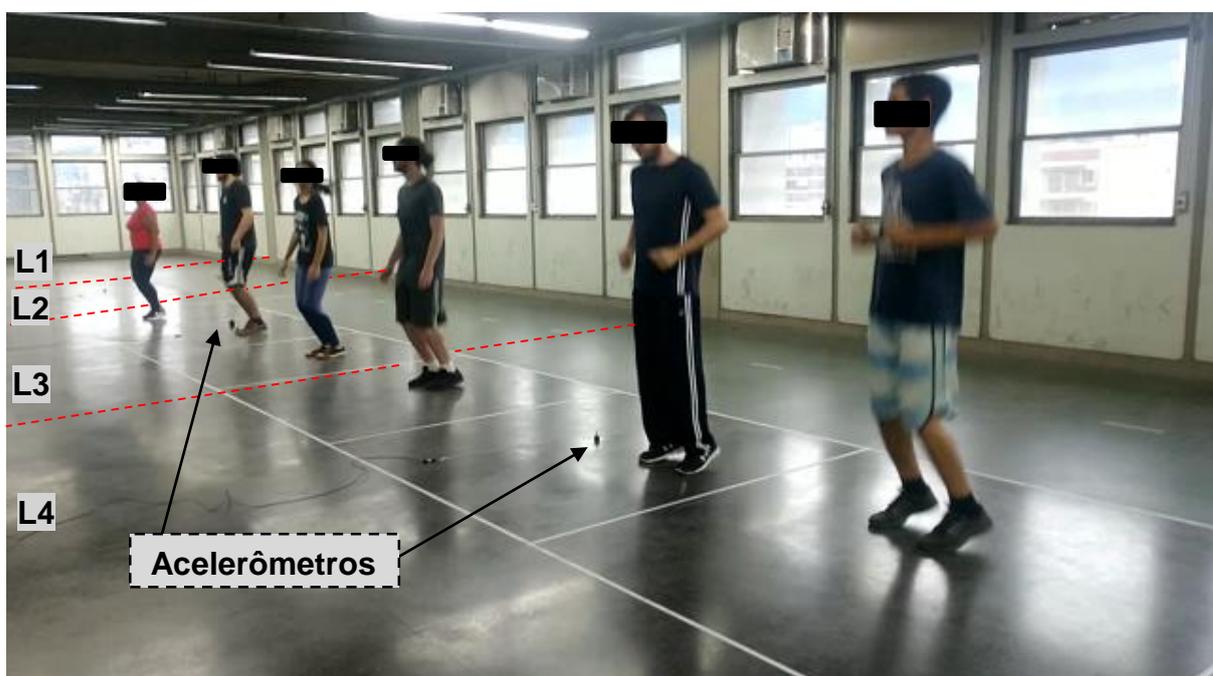
**Figura 121 - Resposta dinâmica do piso: MC-V (3 pessoas;  $f = 2,0$  Hz; Laje L4)**

Ao avaliar os resultados apresentados na Figura 121, nota-se um comportamento similar entre o caso de carregamento estudado anteriormente [MC-IV: 3 pessoas], que se refere ao teste executado pelos mesmos participantes, porém sobre lajes diferentes. Ao comparar os picos de aceleração associados a esses dois casos de carregamento [MC-IV:  $a_p = 0,066$  m/s<sup>2</sup>; Laje L3] e [MC-V:  $a_p = 0,067$  m/s<sup>2</sup>; Laje L4], percebe-se uma proximidade entre os valores máximos de aceleração observados sobre o piso, resultando em uma pequena diferença da ordem de 0,001, indicando que a diferença não é relevante sob o ponto de vista da análise dinâmica. Ademais, espera-se um comportamento estrutural dinâmico semelhante para a laje L4 em relação à laje L3, devido à geometria do sistema estrutural e ao fato do teste experimental ter sido executado pelos mesmos participantes.

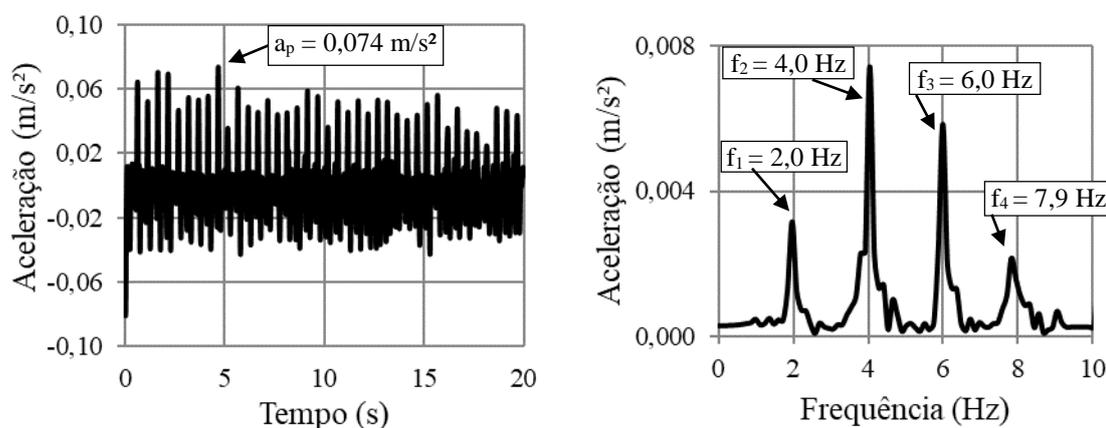
#### 7.2.6 Modelo de carregamento VI (MC-VI)

O modelo de carregamento VI [MC-VI: 6 pessoas] refere-se ao teste experimental realizado sobre as lajes L3 e L4, no qual o carregamento foi induzido por um grupo composto por seis indivíduos, conforme ilustrado na Figura 122. Assim sendo, foram dispostos três indivíduos sobre a laje L3, com massa total dos participantes equivalente a 217,05 kg (74,75 kg + 81,40 kg + 60,90 kg), enquanto sobre a laje L4, os demais indivíduos com massa total correspondente a 200 kg (58,15 kg + 66,85 kg + 75,00 kg). Neste contexto de análise, são monitoradas as acelerações dos pisos das lajes L3 e L4. Cabe ressaltar que embora o piso apresente uma

propriedade geométrica simétrica, o carregamento aplicado é assimétrico, uma vez que diferentes indivíduos são distribuídos ao longo das lajes. Ao comparar os valores máximos de aceleração registrados nas lajes L3 e L4, observa-se que a laje L3 apresentou valores um pouco mais elevados da ordem de  $0,074 \text{ m/s}^2$  ( $a_p = 0,074 \text{ m/s}^2$ ) em comparação com a laje L4  $0,070 \text{ m/s}^2$  ( $a_p = 0,070 \text{ m/s}^2$ ). Neste sentido, a Figura 123, apresenta os resultados de aceleração no domínio do tempo e da frequência em referência à seção estrutural com resposta dinâmica mais crítica (laje L3)



**Figura 122 - Modelo de carregamento VI (6 Pessoas sobre a Laje L3/L4)**



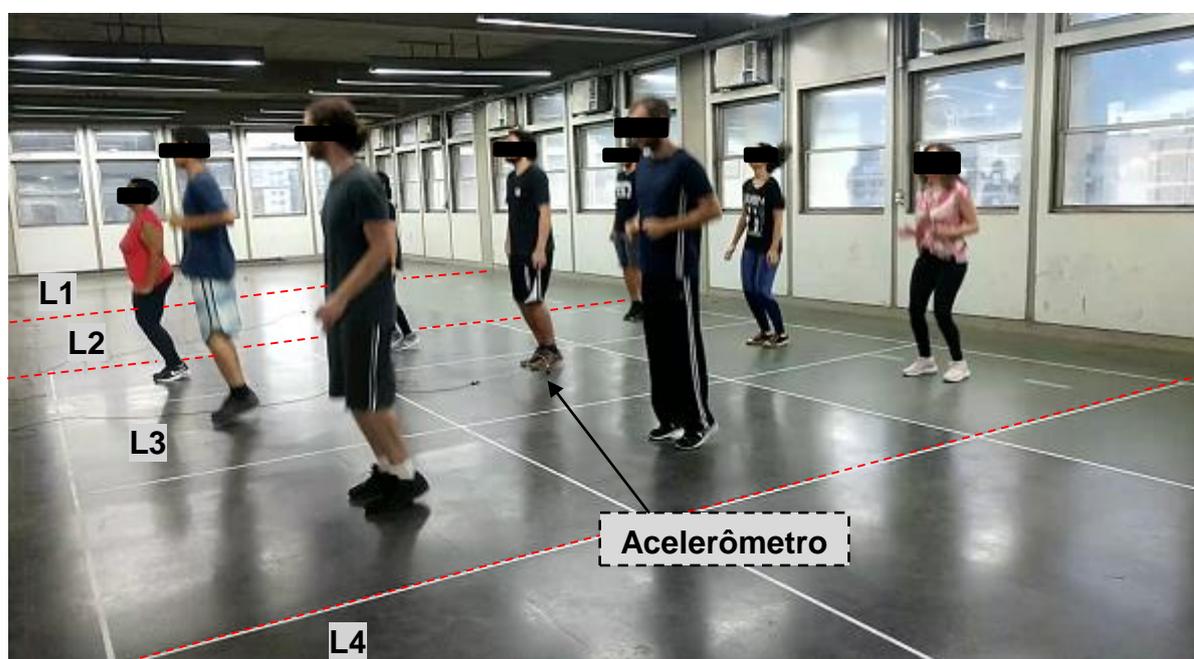
**Figura 123 - Resposta dinâmica do piso: MC-VI (6 pessoas;  $f = 2,0 \text{ Hz}$ ; Laje L3)**

Ao analisar os resultados da Figura 123, que mostra a resposta de aceleração do piso na seção central da laje L3, observa-se um valor máximo de aceleração de

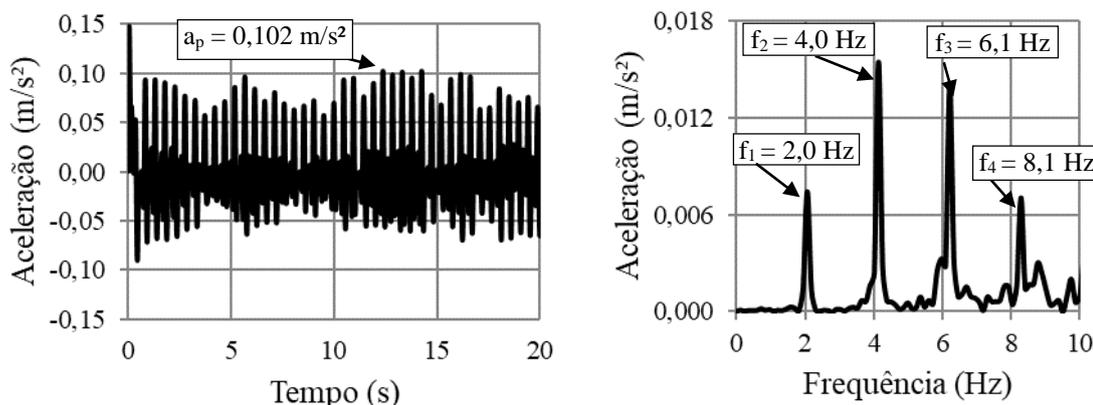
0,074 m/s<sup>2</sup> ( $a_p = 0,074$  m/s<sup>2</sup>). Ao comparar com os resultados registrados anteriormente nos casos de carregamento [MC-I: 1 pessoa; (ver Figura 113) até MC-V: 3 pessoas; (ver Figura 120)], nos quais são utilizados um número menor de pessoas para excitar o piso, verifica-se assim uma tendência de aumento sobre a resposta dinâmica do piso à medida que o número de pessoas é ampliado. Esses resultados reforçam a hipótese de que o aumento do número de participantes que excitam o piso pode resultar em um acréscimo da resposta dinâmica do mesmo.

### 7.2.7 Modelo de carregamento VII (MC-VII)

No modelo de carregamento VII [MC-VII: 9 pessoas], a laje de concreto armado (Laje L3) é excitada por um grupo composto por nove indivíduos, como ilustrado na Figura 124. A massa total dos participantes envolvidos no experimento corresponde a 632 kg, com base na soma das massas individuais de cada participante (81,40 kg, 66,85 kg, 61,40 kg, 74,75 kg, 58,15 kg, 75,00 kg, 97,75 kg, 60,90 kg e 55,80 kg). Neste contexto, é realizada a monitoração da resposta estrutural dinâmica do piso em estudo (Laje L3), como demonstrado nos resultados apresentados na Figura 125.



**Figura 124 - Modelo de carregamento VII (9 Pessoas sobre a Laje L3)**



**Figura 125 - Resposta dinâmica do piso: MC-VII (9 pessoas;  $f = 2,0$  Hz; Laje L3)**

Ao analisar os resultados presentes na Figura 125, referentes à aceleração do piso na seção central da laje L3, é possível observar um aumento significativo no valor máximo de aceleração de pico em comparação aos casos de carregamento estudados anteriormente, onde os testes são desenvolvidos com um número menor de participantes [MC-I: 1 pessoa; (ver Figura 113) até MC-VI: 6 pessoas; (ver Figura 124)].

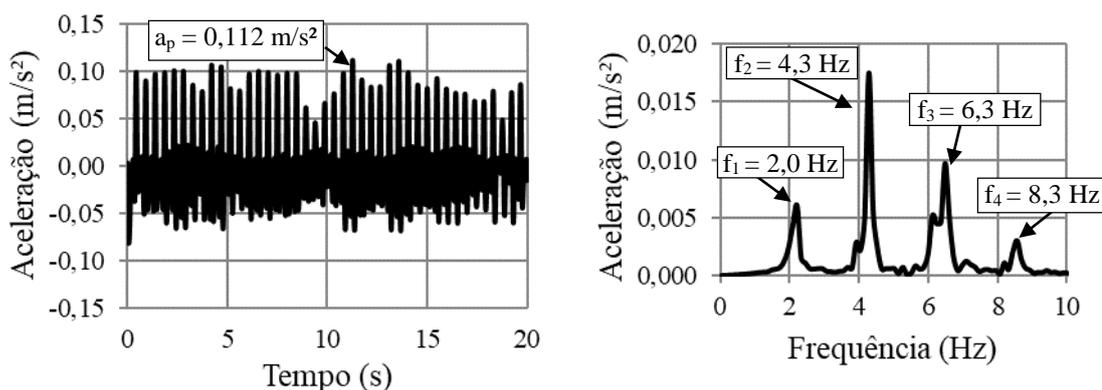
Por exemplo, ao comparar o valor de aceleração de pico sobre a laje L3 entre o [MC-I: 1 pessoa;  $a_p = 0,06$  m/s<sup>2</sup>] e o [MC-VII: 9 pessoas;  $a_p = 0,102$  m/s<sup>2</sup>], nota-se um acréscimo da ordem de 70% sobre a resposta dinâmica do piso. Esse resultado indica a influência significativa do número de participantes sobre a resposta estrutural dinâmica do piso da academia de ginástica.

#### 7.2.8 Modelo de carregamento VIII (MC-VIII)

O modelo de carregamento VIII [MC-VIII: 9 pessoas], ilustrado na Figura 126, diz respeito do teste experimental desenvolvido sobre o piso com os mesmos indivíduos descritos anteriormente (MC-VII), porém, desta vez, posicionados sobre a laje L4. Neste sentido, a Figura 127 apresenta os resultados obtidos referentes à aceleração do piso da laje L4.



**Figura 126 - Modelo de carregamento VIII (9 Pessoas sobre a Laje L4)**

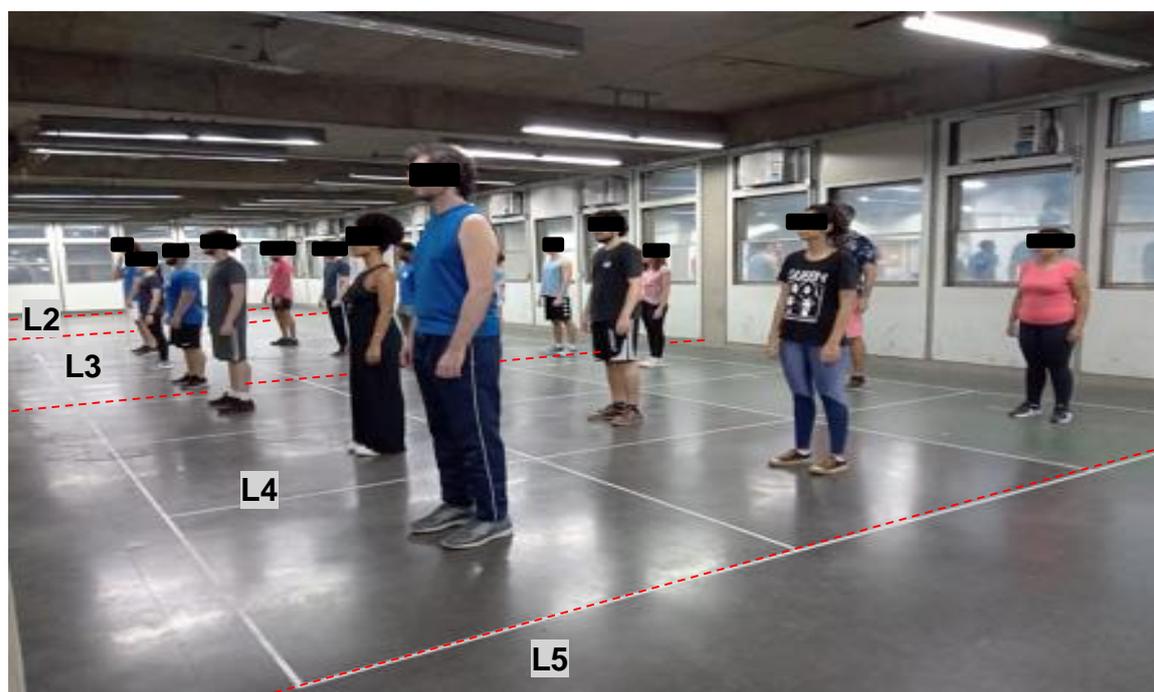


**Figura 127 - Resposta dinâmica do piso: MC-VIII (9 pessoas;  $f = 2,0$  Hz; Laje L4)**

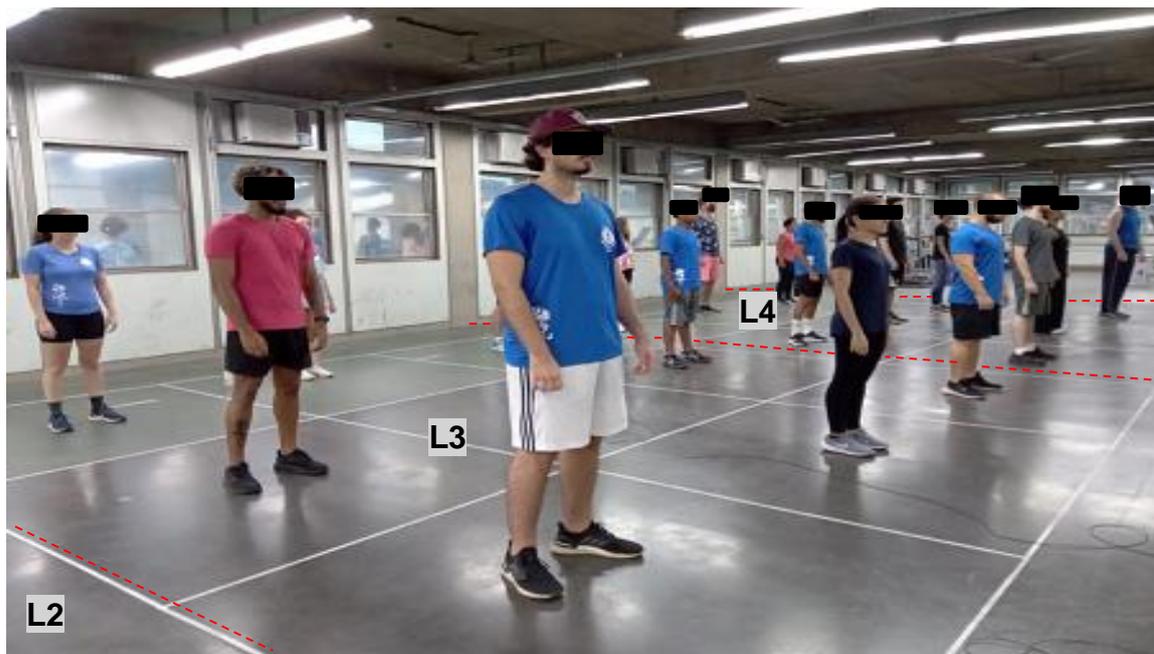
Com base nos resultados apresentados na Figura 127, referentes aos dados de aceleração do piso, observa-se um valor de aceleração do piso da ordem de  $0,112 \text{ m/s}^2$  [MC-VIII:  $a_p = 0,112 \text{ m/s}^2$ ; 9 pessoas]. Em comparação, ao caso visto anteriormente [MC-VII: 9 pessoas], que corresponde a um experimento similar, porém sobre a laje L3, nota-se um resultado de aceleração de pico da ordem de  $0,102 \text{ m/s}^2$  [MC-VII:  $a_p = 0,102 \text{ m/s}^2$ ; 9 pessoas], indicando assim uma diferença correspondente a  $0,01 \text{ m/s}^2$ . Esses resultados reforçam a hipótese de que o comportamento estrutural da laje L3 encontra-se próximo do observado sobre a laje L4, devido à simetria inerente ao sistema estrutural.

### 7.2.9 Modelo de carregamento IX (MC-IX)

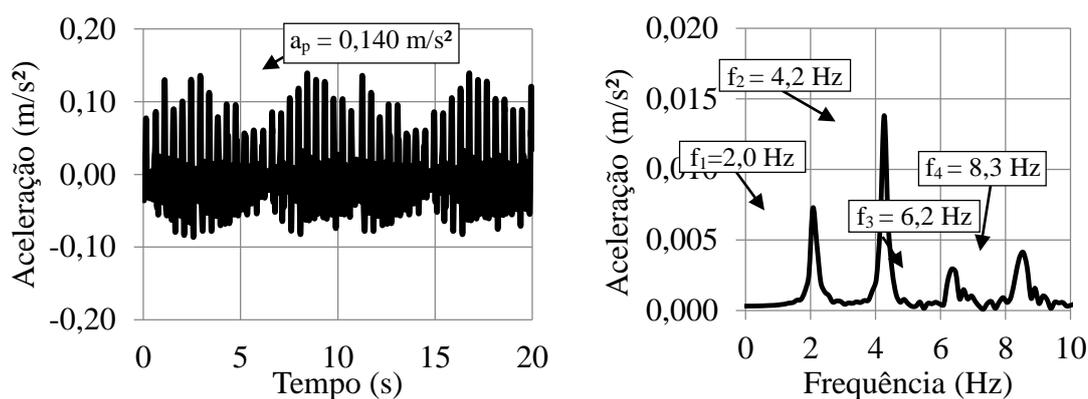
O modelo de carregamento IX [MC-IX: 18 pessoas] refere-se ao caso de carregamento dinâmico induzido por um grupo de 18 pessoas, sendo 9 pessoas posicionadas sobre a laje L3 e 9 pessoas sobre a laje L4, conforme ilustrado nas Figuras 128 e 129. Os participantes foram distribuídos da seguinte forma: sobre a laje L3, a massa total dos participantes corresponde a 775,40 kg (89,80 + 67,10 + 105,40 + 101,70 + 75,90 + 76,00 + 77,70 + 78,00 + 103,80), enquanto sobre a laje L4, a massa total equivale a 752,05 kg (63,45 + 78,55 + 84,50 + 69,95 + 100,2 + 79,15 + 91,80 + 104,3 + 80,05). Neste contexto, a Figura 130 apresenta os resultados de aceleração do piso, no domínio do tempo e da frequência, referentes ao caso mais crítico de carregamento dinâmico, ou seja, a seção central da laje L3 que corresponde ao ponto de amplitude modal máxima associado ao terceiro modo de vibração do piso ( $f_{03} = 8,02$  Hz; ver Figura 85).



**Figura 128 - Modelo de carregamento IX (18 Pessoas sobre a Laje L3/L4)**



**Figura 129 - Modelo de carregamento IX (18 Pessoas sobre a Laje L3/L4)**



**Figura 130 - Resposta dinâmica do piso: MC-IX (18 pessoas;  $f = 2.0$  Hz; Laje L3)**

Ao analisar os resultados apresentados na Figura 130, relacionados à aceleração do piso sobre a Laje L3, constata-se um pico de aceleração equivalente a  $0,140 \text{ m/s}^2$  ( $a_p = 0,140 \text{ m/s}^2$ ). Ao comparar com o caso de carregamento estudado anteriormente [MC-VII: 9 pessoas;  $a_p = 0,102 \text{ m/s}^2$ ], percebe-se a elevação da resposta dinâmica do piso em 37% quando o número total de pessoas sobre o piso é dobrado, em função dos efeitos de sincronismo do carregamento dinâmico de multidão, podendo assim excitar outros modos de vibração do piso investigado.

### 7.3 Considerações finais

Este capítulo apresentou nove testes experimentais de vibração forçada realizados no piso de concreto armado estudado, abrangendo diferentes casos de carregamento dinâmico. Cabe ressaltar que, para fins comparativos com a resposta estrutural numérica, todos os testes experimentais também foram realizados com uma frequência de excitação de 2,2 Hz ( $f = 2,2$  Hz). Entretanto, devido às limitações de espaço e ao objetivo específico deste trabalho, que consiste em analisar a resposta estrutural do piso em ressonância com o terceiro modo de vibração, somente os resultados relacionados à frequência de 2 Hz ( $f = 2$  Hz) foram apresentados neste capítulo. No próximo capítulo, serão realizadas comparações entre as respostas dinâmicas experimentais do piso investigado com as obtidas através da modelagem numérica via sistemas biodinâmicos.

## 8 VIBRAÇÃO FORÇADA: NUMÉRICO-EXPERIMENTAL

### 8.1 Considerações iniciais

Este capítulo tem como objetivo principal comparar a resposta estrutural dinâmica do piso obtida experimentalmente com aquela gerada por meio da modelagem numérica, utilizando sistemas biodinâmicos para representar as ações humanas sobre o piso em estudo. Neste sentido, o capítulo visa avaliar os efeitos a interação dinâmica pessoa-estrutura, obtida por meio da aplicação dos modelos de carregamento dinâmico [MC-I até MC-VIII]. Para tal, são realizadas análise quantitativas e qualitativas mediante emprego de parâmetros estatísticos, para uma avaliação comparativa entre os resultados numéricos e experimentais, objetivando verificar a concordância entre essas diferentes metodologias de análise.

### 8.2 Análise transiente

No contexto da análise transiente, o foco principal desta pesquisa consiste em investigar os efeitos ressonantes do piso em estudo, particularmente relacionados ao terceiro modo de vibração ( $f_{03} = 8,02$  Hz). Deste modo, é avaliado o comportamento estrutural dinâmico do piso quando este encontra-se submetido a uma frequência de excitação de 2 Hz ( $f = 2$  Hz), objetivando a excitação do terceiro modo de vibração devido à proximidade ou compatibilidade com um dos harmônicos associados às atividades humanas rítmicas. No entanto, para fins comparativos, também se avaliou a resposta dinâmica do piso utilizando o modelo biodinâmico proposto por Campista [95], que foi desenvolvido com uma frequência de excitação de 2,2 Hz ( $f = 2,2$  Hz). Os resultados dessa análise podem ser encontrados no Apêndice F.

As análises transientes são realizadas utilizando o *software* ANSYS [130], com um intervalo de tempo de 0,002 segundos e duração total da análise de 20 segundos. Além disso, os coeficientes multiplicadores da matriz de massa ( $\alpha = 1,39$ ) e da matriz

de rigidez ( $\delta = 0,0005$ ) são determinados com base nos valores médios do amortecimento modal experimental ( $\xi = 2,77\%$ ) e nas duas primeiras frequências naturais da estrutura. Tais coeficientes são empregados na análise transiente desenvolvida no *software* ANSYS [130].

### 8.3 Validação do modelo biodinâmico proposto

Com a finalidade de validar o modelo biodinâmico proposto neste trabalho de pesquisa, são realizadas comparações entre a resposta dinâmica obtida experimentalmente sobre o piso, denominada comumente de “*Experimental*”, e os resultados determinados via simulações numéricas. Inicialmente, o modelo biodinâmico é calibrado comparando-se a resposta dinâmica da plataforma, conforme descrito anteriormente (ver capítulo 2). Deste modo, para uma validação mais confiável das análises realizadas, torna-se necessário uma avaliação comparativa entre os resultados fornecidos via monitoração dinâmica experimental sobre a estrutura, com aqueles obtidos através da modelagem numérica, com base no uso de sistemas biodinâmicos, relacionados à força experimental ( $F_{Exp}$ ) e à força otimizada ( $F_{Optm}$ ), onde a força experimental refere-se à força medida durante os testes experimentais via uso de células de carga acopladas a plataforma de carga dinâmica (plataforma MDF), enquanto que a força otimizada é obtida através da modelagem numérica via processo de otimização [Algoritmo Genético (AG)].

No que diz respeito aos testes de monitoração experimental dinâmica desenvolvidos sobre o piso apresentados no capítulo 7, é importante enfatizar que, com o objetivo de representar de maneira mais realista os indivíduos no modelo numérico, mediante emprego de sistemas biodinâmicos, é adotada uma simplificação na modelagem, uma vez que nem todos os participantes que realizaram os testes experimentais sobre o piso tiveram as suas propriedades referentes aos modelos biodinâmicos (massa, amortecimento e rigidez) monitoradas via testes experimentais realizados em laboratório. Portanto, com a finalidade de selecionar os indivíduos a serem implementados no modelo de elementos finitos, utiliza-se o parâmetro da massa corporal como critério, com base em uma tolerância fixada em cerca de  $\pm 2$  kg. Neste contexto, destaca-se que as propriedades dinâmicas dos indivíduos estão apresentadas no Apêndice A.

Diante do exposto, são realizadas análises comparativas (quantitativas e qualitativas) referentes à resposta estrutural dinâmica do piso, utilizando a modelagem numérica com base no emprego de sistemas biodinâmicos ( $F_{Exp}$  e  $F_{Otm}$ ), e a resposta experimental dinâmica observada no piso "Experimental". Neste sentido, os resultados de acelerações do piso são avaliados no domínio do tempo e da frequência, onde os espectros das respostas dinâmicas no domínio da frequência são determinados por meio da Transformada Rápida de Fourier (FFT) utilizando o programa MATLAB [125].

Assim sendo, são apresentadas análises quantitativas dos resultados utilizando os seguintes parâmetros: aceleração do pico ( $a_p$ ) e variáveis estatísticas, como média ( $\mu$ ), média quadrática ( $\mu_q$ ), variância ( $\sigma^2$ ), desvio padrão ( $\sigma$ ) e coeficiente de correlação de Pearson (CCP). Os parâmetros estatísticos são determinados tendo como referência o sinal obtido em cada teste experimental dinâmico realizado sobre o piso. Neste contexto, foram analisados os gráficos dos espectros de resposta no domínio da frequência, com a finalidade de avaliar os sinais experimentais de maneira mais adequada, ou seja, estes resultados deveriam apresentar 'picos' referente à frequência de excitação utilizada nos testes experimentais, bem como os valores associados à transferência de energia para o sistema.

Por fim, são realizadas análises numéricas suplementares, onde são avaliados os resultados com base na aplicação do modelo biodinâmico proposto por Campista [95], onde os resultados encontram-se expressos no Apêndice F. Neste seguimento, cabe ressaltar que o objetivo da referida análise consiste em verificar a consistência entre os resultados do modelo biodinâmico proposto por Campista com o modelo proposto de sistemas biodinâmicos proposto no âmbito deste trabalho de pesquisa.

### 8.3.1 Modelo de carregamento I (MC-I)

O Modelo de Carregamento I [MC-I: 1 pessoa], descrito experimentalmente na seção 7.2.3 e ilustrado nas Figuras 131 (planta) e 132 (tridimensional), representa o caso de carregamento dinâmico executado por um único indivíduo. Com o objetivo de comparar a resposta dinâmica experimental do piso com os resultados alcançados via

modelagem numérica utilizando sistemas biodinâmicos ( $F_{Exp}$  e  $F_{Otm}$ ). Cabe ressaltar que as propriedades do modelo biodinâmico associado ao indivíduo estão detalhadas no Apêndice A, sendo a seleção do modelo determinada com base na massa do participante que realizou o teste experimental no piso de concreto armado. Os resultados relativos à resposta estrutural dinâmica do piso, observados no centro da laje L3, são apresentados na Figura 133 e na Tabela 29 para fins de análise comparativa entre os resultados fornecidos através do emprego de sistemas biodinâmicos ( $F_{Exp}$  e  $F_{Otm}$ ) e a resposta experimental do piso investigado, denominada como "Experimental".

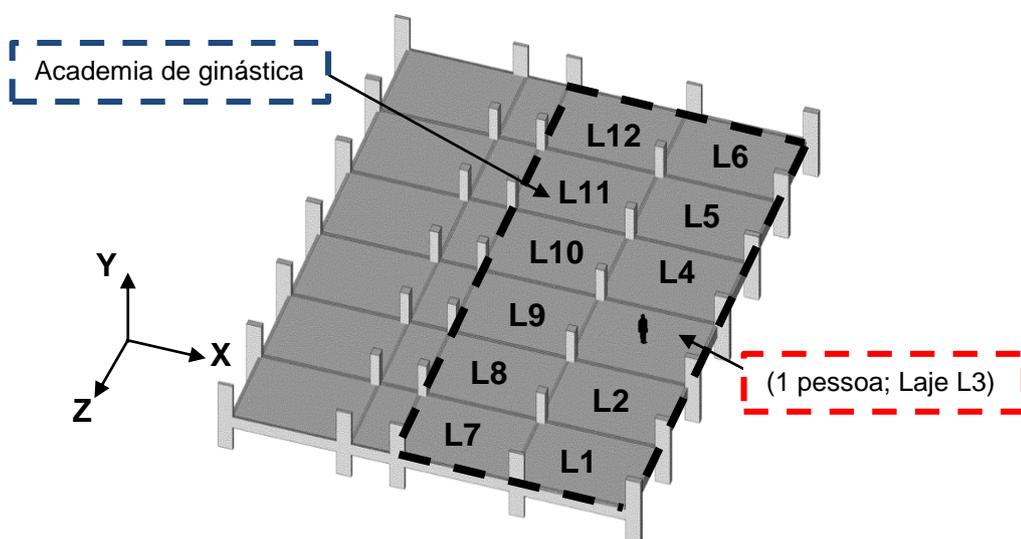


Figura 131 - Vista isométrica (academia de ginástica)

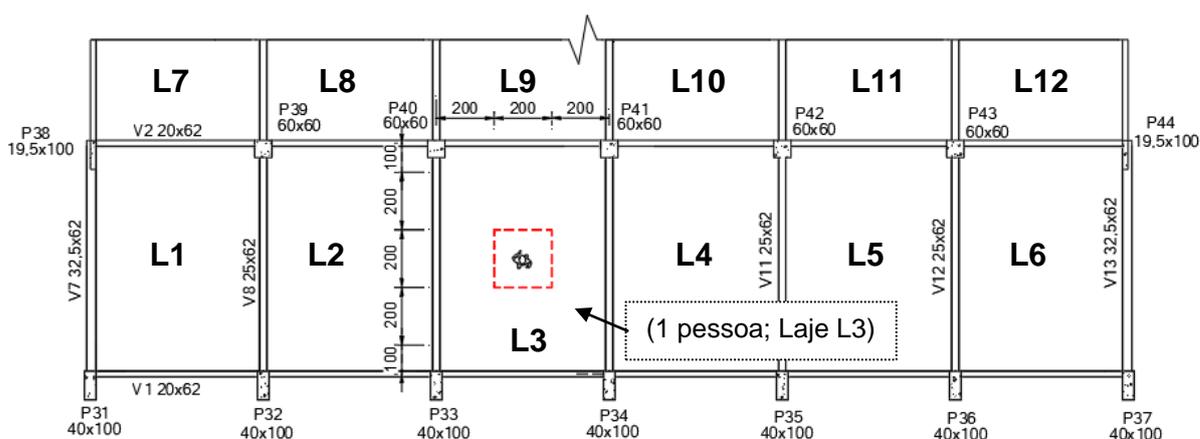
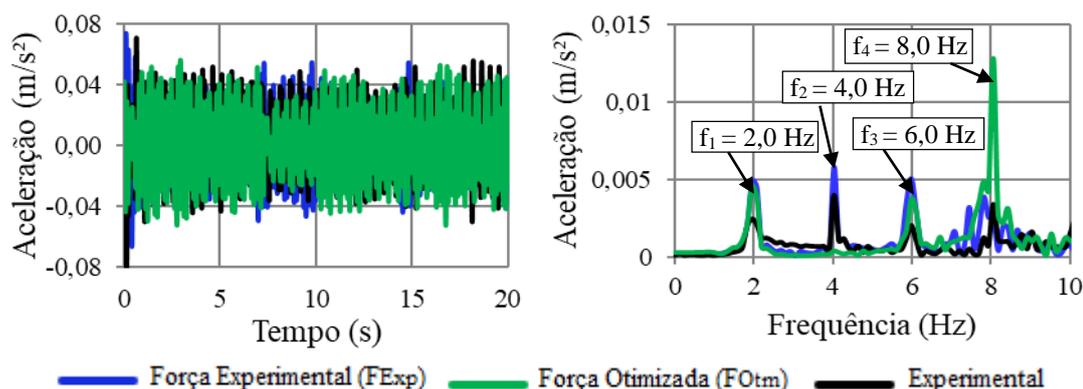


Figura 132 - Modelo de carregamento I (MC I)



**Figura 133 - Comparação da resposta estrutural dinâmica (Laje L3): MC-I**

**Tabela 29 - Correlação estatística entre a resposta dinâmica numérica e experimental: MC-I (1 pessoa;  $f = 2$  Hz; Laje L3)**

MC-I	$a_p$ ( $m/s^2$ )	$\mu$ ( $m/s^2$ )	$\mu_q$ ( $m/s^2$ )	$\sigma^2$ ( $\times 10^{-4}$ ) ( $m/s^2$ ) <sup>2</sup>	$\sigma$ ( $\times 10^{-2}$ ) ( $m/s^2$ )	CCP
$F_{Exp}$	0,060	0,015	0,019	1,08	1,04	0,92
$F_{Otm}$	0,060	0,019	0,024	1,46	1,21	0,87
Experimental	0,060	0,015	0,018	1,25	1,12	1,00

Ao examinar os resultados expressos na Tabela 29, nota-se uma convergência nos valores da aceleração de pico ( $a_p = 0,060$   $m/s^2$ ) para as três situações analisadas ( $F_{Exp}$ ,  $F_{Otm}$  e Experimental). Além disso, a resposta dinâmica exibida graficamente (Figura 133) indica um próximo alinhamento entre esses parâmetros. Ao avaliar quantitativamente os resultados, constata-se uma correlação satisfatória entre os valores dos coeficientes de correlação de Pearson (CCP) entre as variáveis da análise do modelo biodinâmico ( $F_{Exp}$  e  $F_{Otm}$ ) e o resultado experimental (Experimental), apresentando valores de 0,92 [CCP = 0,92 ;  $F_{Exp}$  x Experimental] e 0,87 [CCP = 0,87 ;  $F_{Otm}$  x Experimental]. Adicionalmente, os valores obtidos para a aceleração média ( $\mu = 0,015$   $m/s^2$ ) foram os mesmos para os parâmetros  $F_{Exp}$  e Experimental. Esses resultados fornecem fortes indícios de que a modelagem de sistemas biodinâmicos pode ser empregada para representar de maneira mais realista a ação do indivíduo sobre a estrutura.

### 8.3.2 Modelo de carregamento II (MC-II)

Em referência ao Modelo de Carregamento II [MC-II: 1 pessoa], abordado de forma experimental na seção 7.2.2, apresenta-se na sequência uma análise numérica (modelagem de sistemas biodinâmicos), almejando uma avaliação comparativa com os resultados experimentais. Para tanto, utilizaram-se as mesmas características inerentes ao modelo biodinâmico previamente descritas no contexto do MC-I, uma vez que essa análise se baseou no experimento executado pelo mesmo participante, porém com posicionamento sobre a laje L4 (ver Figuras 134 e 135). Em continuidade, a Figura 136 e a Tabela 30 apresentam os resultados relativos à resposta estrutural dinâmica do piso, observados no centro da laje L4. Esses resultados referem-se a análise comparativa com base no emprego de sistemas biodinâmicos ( $F_{Exp}$  e  $F_{Otm}$ ) e a resposta experimental do piso investigado “Experimental”.

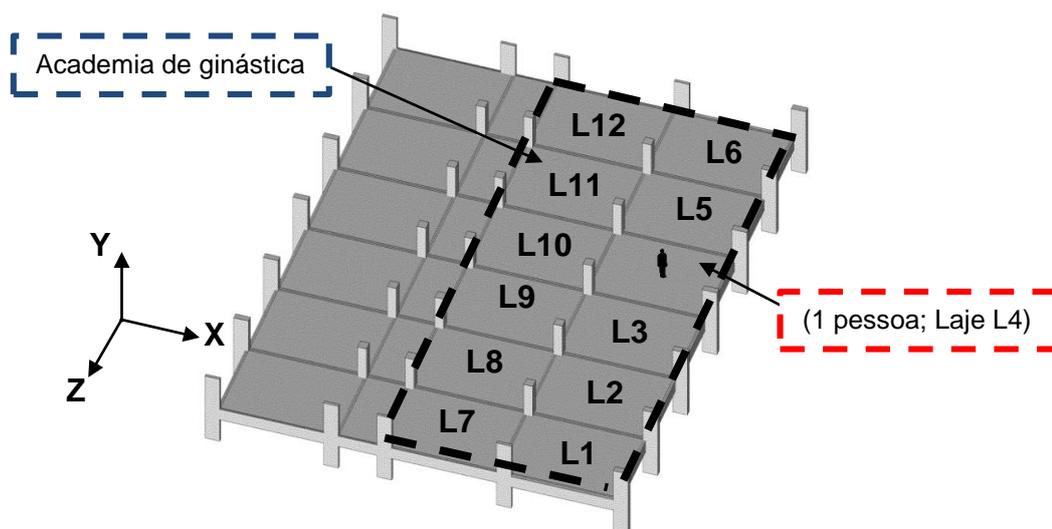


Figura 134 - MC-II (1 pessoa; Laje L4) [dimensões em cm]

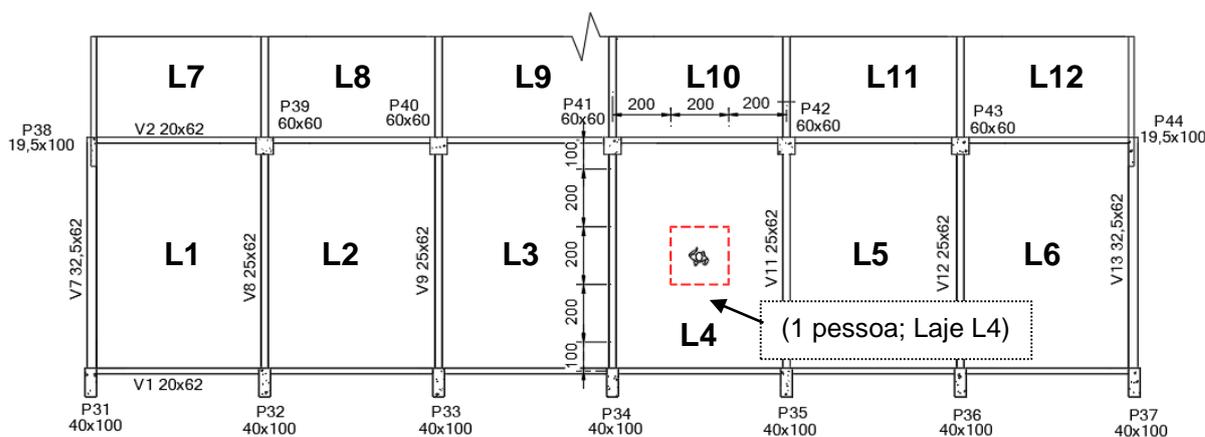


Figura 135 - MC-II (1 pessoa; Laje L4) [dimensões em cm]

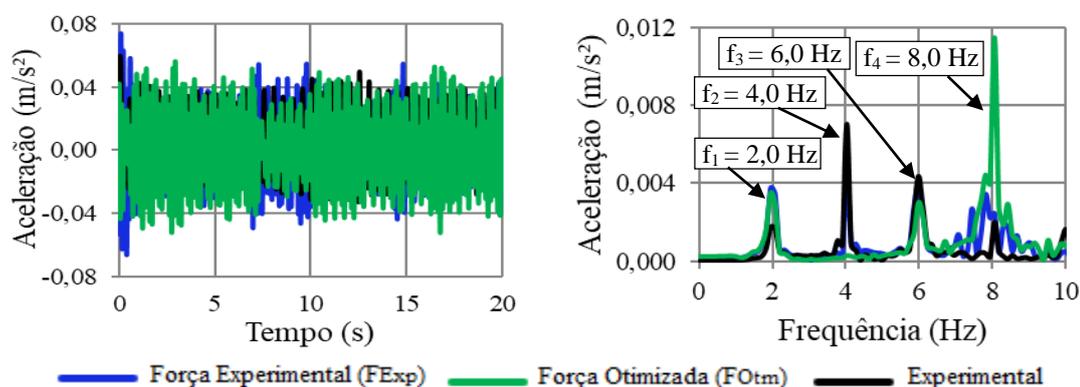


Figura 136 - Comparação da resposta estrutural dinâmica (Laje L4): MC-II

Tabela 30 - Correlação estatística entre a resposta dinâmica numérica e experimental: MC-II (1 pessoa;  $f = 2$  Hz; Laje L4)

MC-II	$a_p$ ( $m/s^2$ )	$\mu$ ( $m/s^2$ )	$\mu_q$ ( $m/s^2$ )	$\sigma^2$ ( $\times 10^{-4}$ ) ( $m/s^2$ ) <sup>2</sup>	$\sigma$ ( $\times 10^{-2}$ ) ( $m/s^2$ )	CCP
$F_{Exp}$	0,055	0,015	0,019	1,08	1,04	0,80
$F_{Otm}$	0,056	0,020	0,024	1,46	1,21	0,79
Experimental	0,050	0,011	0,016	1,14	1,07	1,00

Ao analisar os resultados da Figura 136 e Tabela 30, observa-se uma aproximação entre os valores das respostas estruturais do modelo numérico e os resultados experimentais. No entanto, em comparação com o caso descrito anteriormente (MC-I), percebe-se uma pequena redução nos valores das respostas dinâmicas do piso, resultando no resultado de aceleração máxima de  $0,050 \text{ m/s}^2$  ( $a_p = 0,050 \text{ m/s}^2$ ). Essas diferenças não são relevantes em termos de análise dinâmica de engenharia de estruturas, uma vez que os valores são da ordem de  $\pm 0,01 \text{ m/s}^2$ . No que se refere ao coeficiente de correlação de Pearson (CCP), percebe-se uma correlação satisfatória entre as variáveis analisadas ( $CCP > 0,7$ ), resultando em: [CCP = 0,80 ;  $F_{Exp}$  x Experimental] e [CCP = 0,79 ;  $F_{Otm}$  x Experimental]. Neste contexto, as semelhanças entre esses dois casos de carregamento (MC-I e MC-II) podem ser justificadas pelo fato de o modelo computacional representar um piso com geometria simétrica. Isso significa que o comportamento estrutural dinâmico da laje L3 tende a ser próximo ou equivalente ao da laje L4. Além disso, os testes experimentais são desenvolvidos por um mesmo indivíduo. Neste sentido, espera-se uma convergência ou proximidade entre as variáveis dinâmicas analisadas.

### 8.3.3 Modelo de carregamento III (MC-III)

O Modelo de Carregamento III [MC-III: 2 pessoas], investigado experimentalmente na seção 7.2.3, se refere à análise da resposta dinâmico do piso decorrente da excitação por duas pessoas, conforme expresso nas Figuras 137 e 138. Deste modo, avalia-se as respostas fornecidas através do emprego de sistemas biodinâmicos ( $F_{Exp}$  e  $F_{Otm}$ ) via modelagem numérica, com base nos parâmetros do modelo biodinâmico relacionados à característica dinâmica do indivíduo (massa, amortecimento e rigidez) detalhados no Apêndice A. Para tal, os indivíduos são definidos em função da massa dos participantes que realizaram o teste experimental sobre o piso de concreto armado. Os resultados referentes à análise da resposta estrutural dinâmica da Laje L3 são expressos na Figura 139 e Tabela 31.

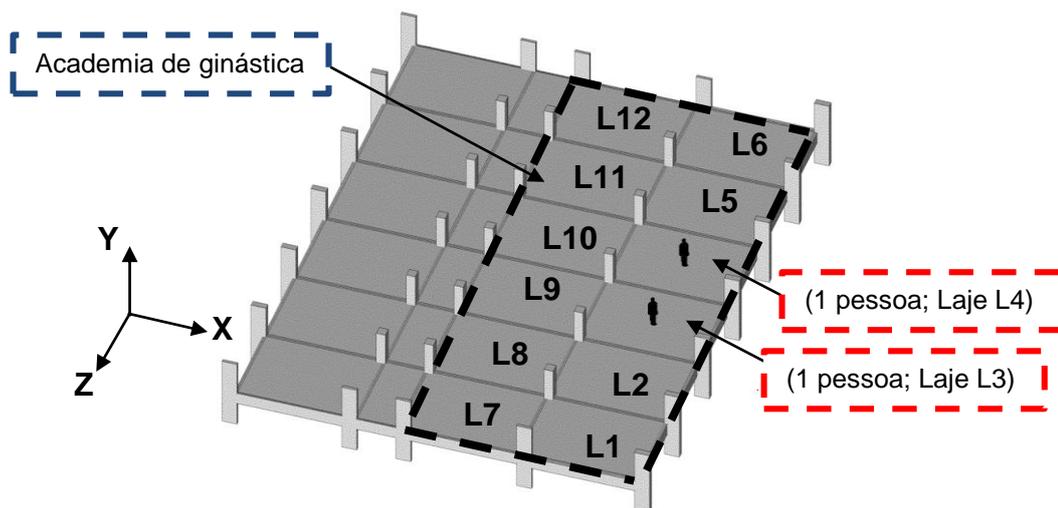


Figura 137 - Vista MC-III (1 pessoa; Laje L3) e (1 pessoa; Laje L4)

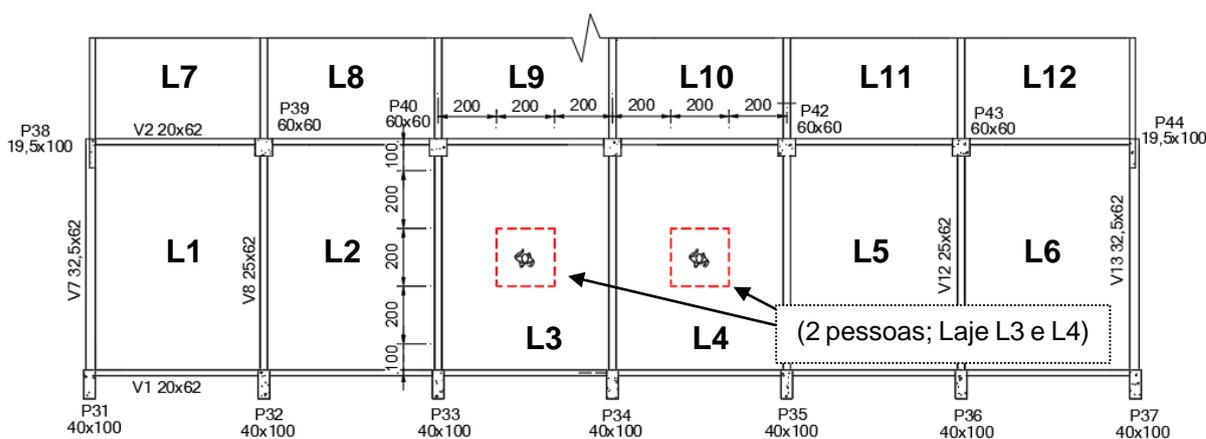
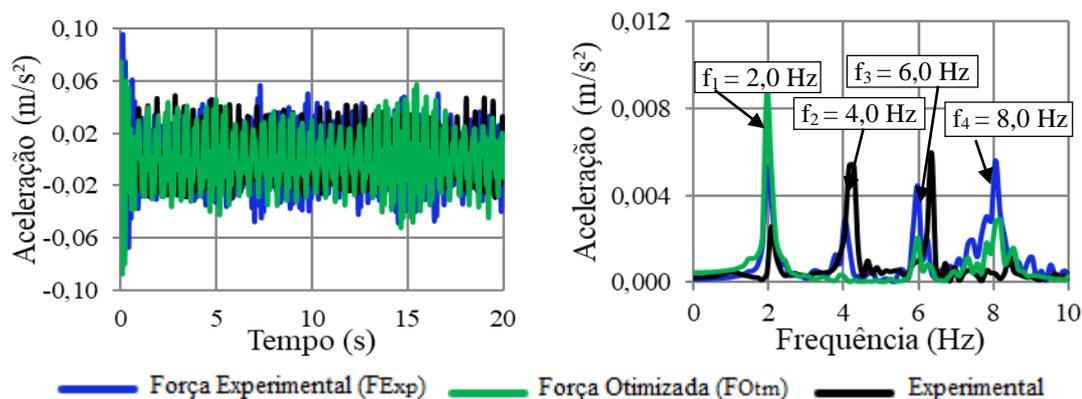


Figura 138 - MC-III (1 pessoa; Laje L3) e (1 pessoa; Laje L4) [dimensões em cm]



**Figura 139 - Comparação da resposta estrutural dinâmica (Laje L3): MC-III**

**Tabela 31- Correlação estatística entre a resposta dinâmica numérica e experimental: MC-III (2 pessoas;  $f = 2$  Hz; Laje L3)**

MC-III	$a_p$ (m/s <sup>2</sup> )	$\mu$ (m/s <sup>2</sup> )	$\mu_q$ (m/s <sup>2</sup> )	$\sigma^2$ ( $\times 10^{-4}$ ) (m/s <sup>2</sup> ) <sup>2</sup>	$\sigma$ ( $\times 10^{-2}$ ) (m/s <sup>2</sup> )	CCP
$F_{Exp}$	0,057	0,016	0,020	1,18	1,08	0,86
$F_{Otm}$	0,058	0,016	0,019	1,14	1,07	0,81
Experimental	0,049	0,011	0,016	1,16	1,08	1,00

Ao analisar os resultados da Figura 139 que representa a resposta estrutural dinâmica de aceleração no domínio do tempo e da frequência, observa-se uma concordância satisfatória entre os resultados obtidos mediante emprego de modelo biodinâmico ( $F_{Exp}$  e  $F_{Otm}$ ) e via testes experimentais (Experimental). Além disso, em relação aos resultados de aceleração no domínio da frequência, fica evidente que os picos de transferência de energia estão claramente delineados nos resultados provenientes da modelagem numérica.

A partir dos resultados apresentados na Tabela 31, observa-se que os coeficientes de correlação de Pearson (CCP) entre a resposta experimental e a estratégia desenvolvida nesta pesquisa, correspondem a: [CCP = 0,86 ;  $F_{Exp}$  x Experimental] e [CCP = 0,81 ;  $F_{Otm}$  x Experimental], indicando assim uma forte correlação entre essas variáveis (CCP > 0,7).

#### 8.3.4 Modelo de carregamento IV (MC-IV)

No âmbito do Modelo de Carregamento IV [MC-IV: 3 pessoas], descrito experimentalmente na seção 7.2.4 e representado nas Figuras 140 e 141, são realizadas análises comparativas entre a resposta experimental da laje L3 e a estratégia desenvolvida nesta pesquisa (sistemas biodinâmicos). Desta forma, as

propriedades do modelo biodinâmico empregadas na modelagem numérica estão detalhadas no Apêndice A e os indivíduos são selecionados com base na massa corporal dos participantes, tendo como referência os indivíduos participantes do teste realizado sobre a estrutura real investigada. No que tange à resposta estrutural dinâmica (aceleração do piso) na seção central da laje L3, tais resultados são expressos nos domínios do tempo e da frequência na Figura 142, e os resultados referentes à análise quantitativa encontram-se presentes na Tabela 32.

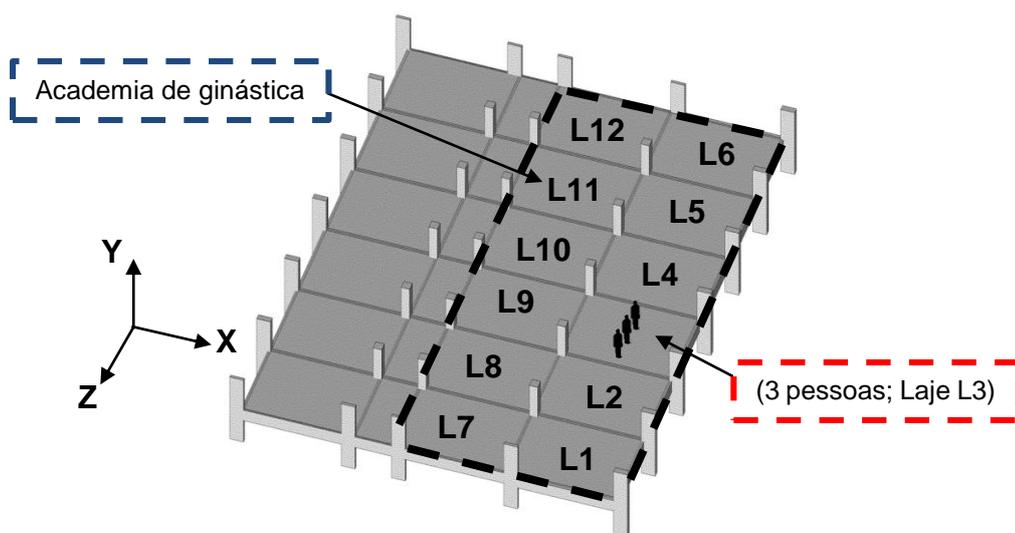


Figura 140 - Vista MC-IV (3 pessoas; Laje L3)

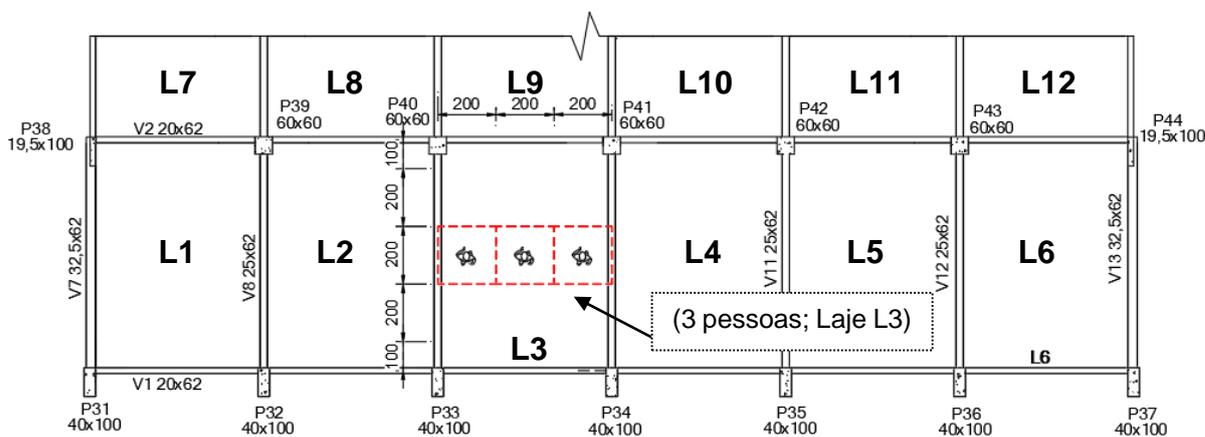
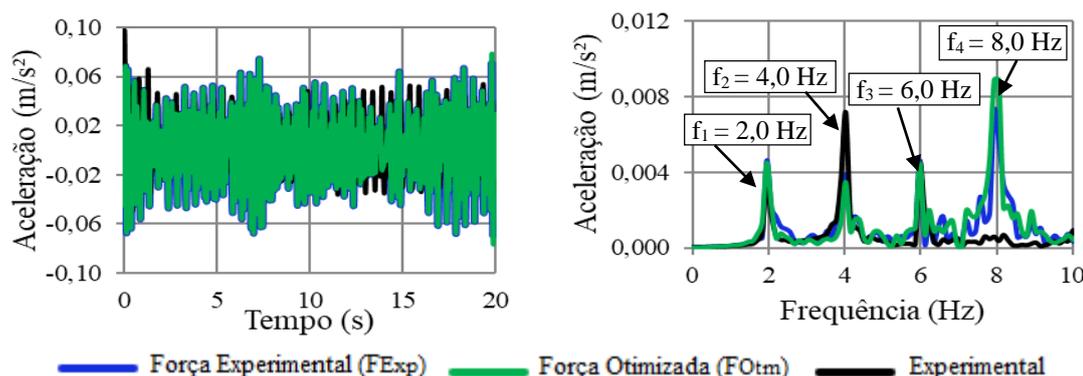


Figura 141 - MC-IV (3 pessoas; Laje L3) [dimensões em cm] .



**Figura 142 - Comparação da resposta estrutural dinâmica (Laje L3): MC-IV**

**Tabela 32 - Correlação estatística entre a resposta dinâmica numérica e experimental: MC-IV (3 pessoas;  $f = 2$  Hz; Laje L3)**

MC-IV	$a_p$ (m/s <sup>2</sup> )	$\mu$ (m/s <sup>2</sup> )	$\mu_q$ (m/s <sup>2</sup> )	$\sigma^2$ ( $\times 10^{-4}$ ) (m/s <sup>2</sup> ) <sup>2</sup>	$\sigma$ ( $\times 10^{-2}$ ) (m/s <sup>2</sup> )	CCP
$F_{Exp}$	0,074	0,020	0,025	2,19	1,48	0,80
$F_{Otm}$	0,079	0,020	0,025	2,20	1,50	0,77
Experimental	0,066	0,012	0,017	1,41	1,19	1,00

Ao examinar a Figura 142, referentes aos dados de aceleração no domínio do tempo e da frequência, nota-se uma forte correlação entre as variáveis. No que diz respeito aos resultados apresentados na Tabela 32, referentes o emprego de sistemas biodinâmicos ( $F_{Exp}$  e  $F_{Otm}$ ), observa-se uma convergência entre essas variáveis estatísticas: [ $\mu$  : 0,020 m/s<sup>2</sup> :  $F_{Exp}$ ;  $F_{Otm}$ ] e [ $\mu_q$ : 0,025 m/s<sup>2</sup> :  $F_{Exp}$ ;  $F_{Otm}$ ]. Por outro lado, ao comparar os resultados de aceleração máxima obtidas via sistemas biodinâmicos com a resposta experimental, foram registrados os seguintes resultados: [ $a_p$  : 0,074 m/s<sup>2</sup> ;  $F_{Exp}$ ], [ $a_p$  : 0,079 m/s<sup>2</sup> ;  $F_{Otm}$ ] e [ $a_p$  : 0,066 m/s<sup>2</sup> ; Experimental], indicando assim uma diferença da ordem de 12,1% e 19,6%, respectivamente. Além disso, cabe ressaltar que os resultados de CCP referente à correlação entre os parâmetros do modelo biodinâmico e o resultado experimental indicam uma forte correlação entre tais variáveis (CCP>0,7).

### 8.3.5 Modelo de carregamento V (MC-V)

Com relação ao Modelo de Carregamento V [MC-V: 3 pessoas], abordado de forma experimental na seção 7.2.5, no âmbito desta investigação realizou-se com a uma avaliação comparativa com os resultados fornecidos experimentalmente e via

modelagem numérica (sistemas biodinâmicos). Para tanto, utilizaram-se as mesmas características inerentes ao modelo biodinâmico previamente descritas no contexto do MC-IV, uma vez que essa análise se baseou no experimento executado pelo mesmo participante, porém com posicionamento sobre a laje L4 (ver Figuras 143 e 144).

Em seguida, a Figura 145 e a Tabela 33, por sua vez, exibem a comparação dos resultados decorrente do emprego da modelagem numérica e monitoração experimental dinâmica “Experimental”, retratando os valores de aceleração do piso associados à seção central da laje L4.

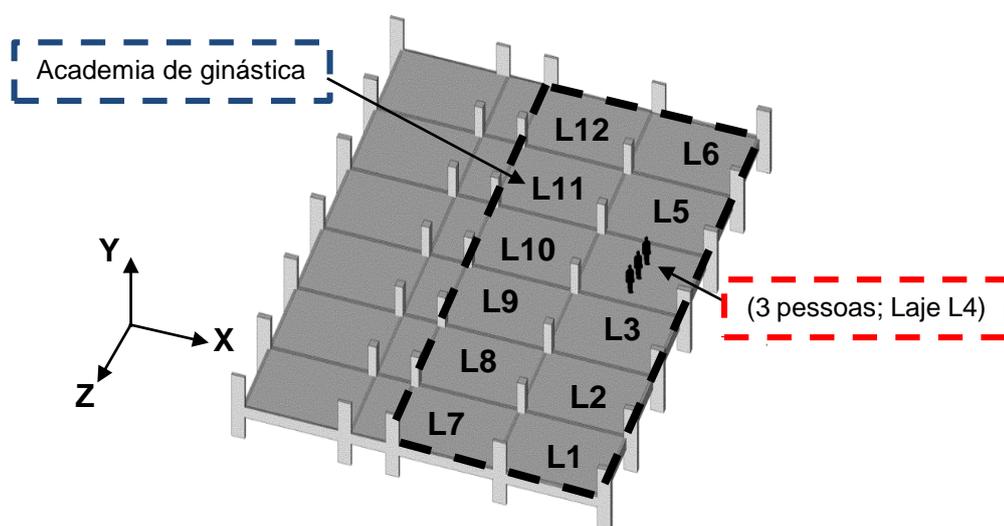


Figura 143 - MC-V (3 pessoas; Laje L4)

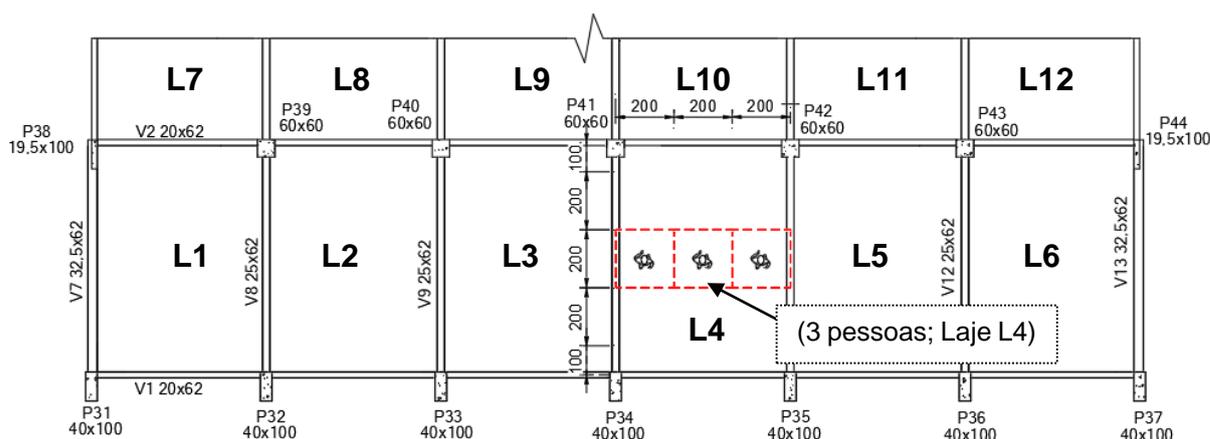
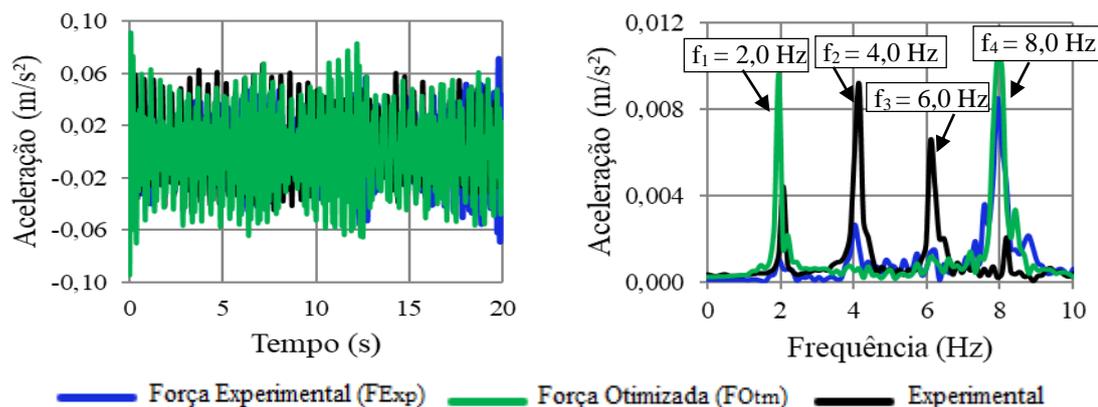


Figura 144 - MC-V (3 pessoas; Laje L4) [dimensões em cm]



**Figura 145 - Comparação da resposta estrutural dinâmica (Laje L4): MC-V**

**Tabela 33 - Correlação estatística entre a resposta dinâmica numérica e experimental: MC-V (3 pessoas;  $f = 2$  Hz; Laje L4)**

MC-V	$a_p$ ( $m/s^2$ )	$\mu$ ( $m/s^2$ )	$\mu_q$ ( $m/s^2$ )	$\sigma^2$ ( $\times 10^{-4}$ ) ( $m/s^2$ ) <sup>2</sup>	$\sigma$ ( $\times 10^{-2}$ ) ( $m/s^2$ )	CCP
$F_{Exp}$	0,071	0,017	0,022	1,56	1,25	0,87
$F_{Otm}$	0,083	0,023	0,028	2,50	1,58	0,89
Experimental	0,067	0,014	0,021	2,05	1,43	1,00

Ao analisar os resultados presentes na Tabela 33 e Figura 145, nota-se uma aproximação satisfatória entre os resultados experimentais e os obtidos via modelo biodinâmico, especialmente mediante o emprego da variável  $F_{Exp}$ , indicando assim as seguintes respostas: [ $F_{Exp}$  :  $a_p = 0,071$   $m/s^2$ ;  $\mu = 0,017$   $m/s^2$ ;  $\mu_q = 0,022$   $m/s^2$ ] e [Experimental:  $a_p = 0,067$   $m/s^2$ ,  $\mu = 0,014$   $m/s^2$ ;  $\mu_q = 0,021$ ], resultando em uma diferença percentual da ordem de 5,9%, 21,4% e 4,76%, respectivamente. Deste modo, verifica-se uma forte correlação entre essas variáveis. Essa correlação também pode ser observada qualitativamente nos gráficos expressos na Figura 145.

Além disso, ao comparar as correlações de Pearson (PCC) entre os parâmetros  $F_{Otm}$  e  $F_{Exp}$  e a resposta experimental do piso, foram observados os seguintes resultados: [CCP = 0,89 ;  $F_{Exp}$  x Experimental] e [CCP = 0,87 ;  $F_{Otm}$  x Experimental]. Tais valores indicam uma forte correlação entre essas variáveis, reforçando que o modelo biodinâmico se encontra alinhado com os resultados obtidos via monitoração experimental dinâmica.

### 8.3.6 Modelo de carregamento VI (MC-VI)

No contexto do Modelo de Carregamento VI (MC-VI: 6 pessoas), onde os testes experimentais são descritos na seção 7.2.6 e ilustrados nas Figuras 146 e 147, refere-se ao caso de carregamento dinâmico executado por 6 indivíduos. Neste sentido, é monitorada a resposta estrutural dinâmica da seção mais crítica, laje L3, mediante o emprego de sistemas biodinâmicos. No que se refere às propriedades dos sistemas biodinâmicos empregadas no modelo de elementos finitos, essas podem ser encontradas no Apêndice A, onde a seleção dos indivíduos é definida com base na massa corporal dos participantes que realizaram o teste experimental sobre o piso. Diante do exposto, os resultados referentes à seção central (laje L3) são apresentados na Figura 148 e Tabela 34.

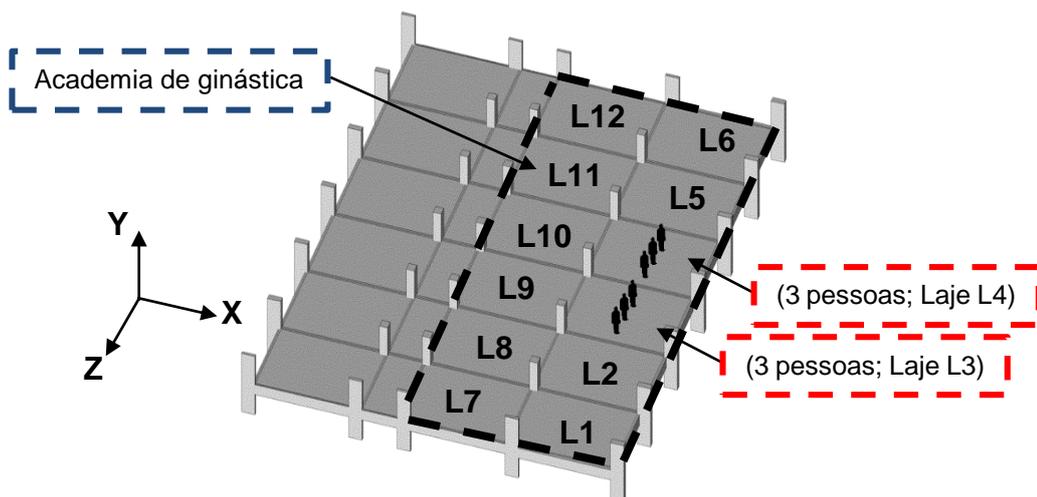


Figura 146 - MC-VI (3 pessoas; Laje L4)

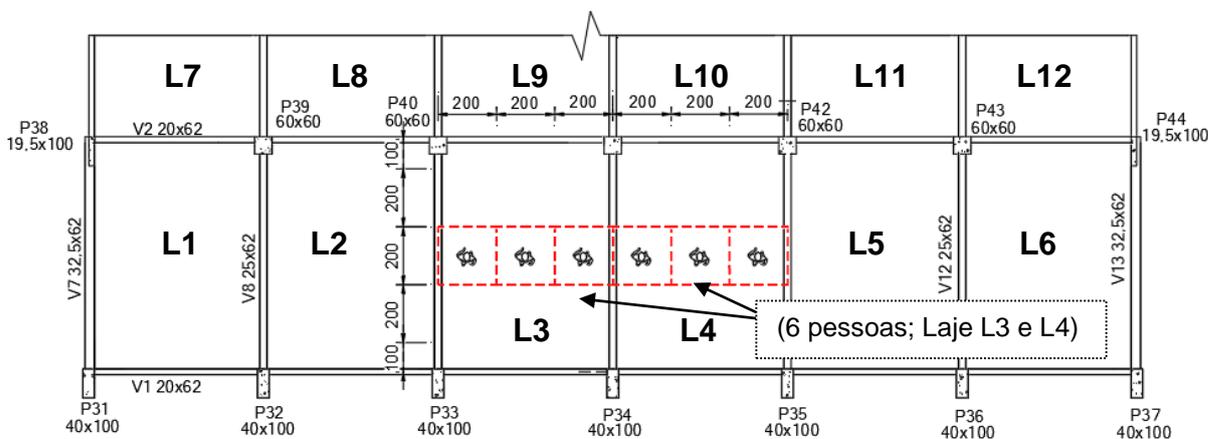


Figura 147 - MC-VI (3 pessoas; Laje L3)(3 pessoas; Laje L4) [dimensões em cm]

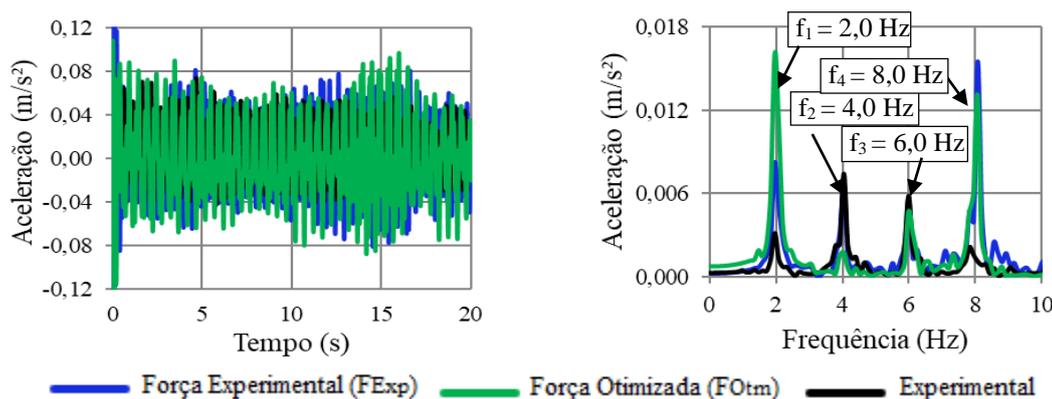


Figura 148 - Comparação da resposta estrutural dinâmica (Laje L3): MC-VI

Tabela 34 - Correlação estatística entre a resposta dinâmica numérica e experimental: MC-VI (6 pessoas;  $f = 2$  Hz; Laje L3)

MC-VI	$a_p$ (m/s <sup>2</sup> )	$\mu$ (m/s <sup>2</sup> )	$\mu_q$ (m/s <sup>2</sup> )	$\sigma^2$ ( $\times 10^{-4}$ ) (m/s <sup>2</sup> ) <sup>2</sup>	$\sigma$ ( $\times 10^{-2}$ ) (m/s <sup>2</sup> )	CCP
F <sub>Exp</sub>	0,082	0,026	0,031	3,09	1,76	0,78
F <sub>Otm</sub>	0,097	0,031	0,037	3,99	2,00	0,92
Experimental	0,074	0,013	0,020	1,76	1,33	1,00

Ao examinar os resultados apresentados na Tabela 34 e compará-los com os resultados experimentais com o modelo biodinâmico referente à  $F_{Exp}$ , observa-se uma boa aproximação nos valores de aceleração de pico ( $a_p$ ). Enquanto o modelo biodinâmico apresenta [ $F_{Exp}$ :  $a_p = 0,082$  m/s<sup>2</sup>], os resultados experimentais registram [Experimental:  $a_p = 0,074$  m/s<sup>2</sup>], resultando em uma diferença percentual da ordem de 10,8%. Essa proximidade indica uma correlação satisfatória entre esses parâmetros, o que também é evidenciado qualitativamente nos resultados apresentados na Figura 145.

Adicionalmente, ao considerar as estratégias  $F_{Otm}$  e  $F_{Exp}$  na análise, verifica-se que o modelo biodinâmico demonstra uma correlação de Pearson (PCC) forte com a resposta experimental “Experimental”, apresentando valores de PCC da ordem de [CCP = 0,78 ;  $F_{Exp}$  x Experimental] e [CCP = 0,92 ;  $F_{Otm}$  x Experimental]. Essa observação reforça a adequação do modelo biodinâmico para simular a resposta dinâmica do piso em estudo, o que é consistente com os resultados determinados via testes experimentais realizados sobre o piso.

### 8.3.7 Modelo de carregamento VII (MC-VII)

No que diz respeito ao Modelo de Carregamento VII [MC-VII: 9 pessoas], investigado experimentalmente na seção 7.2.7 e ilustrado nas Figuras 149 e 150, são realizadas análises numéricas com o objetivo de comparar os resultados experimentais de aceleração sobre a laje L3 com os valores de resposta do piso obtidos por meio da modelagem proposta no âmbito dessa pesquisa (sistemas biodinâmicos). Neste contexto, na modelagem de sistemas biodinâmico são consideradas as características dos participantes de acordo com os testes experimentais, onde essas propriedades podem ser encontradas no Apêndice A. Assim sendo, a Figura 151 e a Tabela 35 apresentam os resultados de aceleração observados na seção central da laje L3.

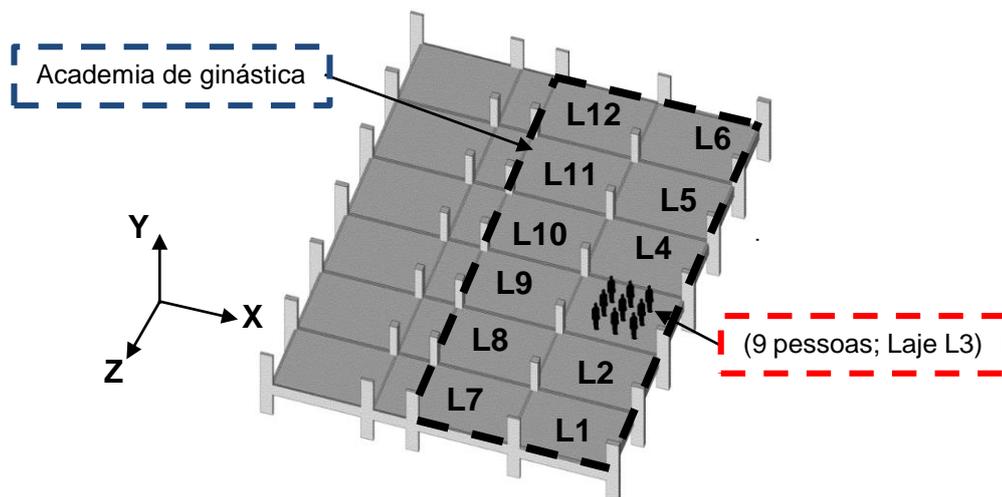


Figura 149 - Comparação da resposta estrutural dinâmica (Laje L3): MC-VII

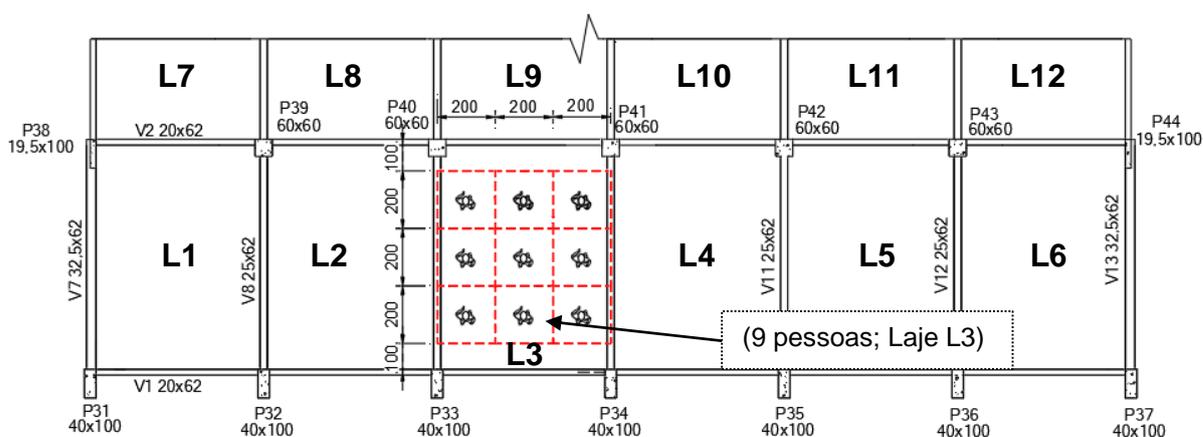
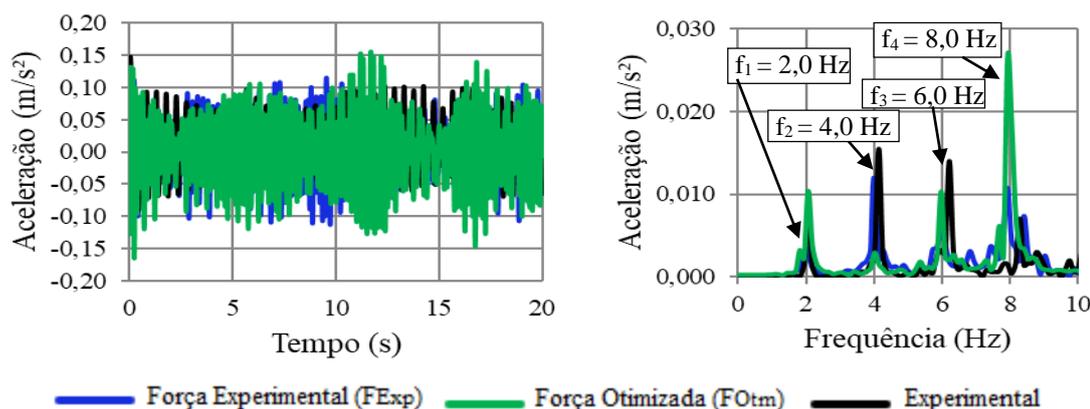


Figura 150 - MC-VII (9 pessoas; Laje L3) [dimensões em cm]



**Figura 151 - Comparação da resposta estrutural dinâmica (Laje L3): MC-VII**

**Tabela 35 - Correlação estatística entre a resposta dinâmica numérica e experimental: MC-VII (9 pessoas;  $f = 2$  Hz; Laje L3)**

MC-VII	$a_p$ (m/s <sup>2</sup> )	$\mu$ (m/s <sup>2</sup> )	$\mu_q$ (m/s <sup>2</sup> )	$\sigma^2$ (x10 <sup>-4</sup> ) (m/s <sup>2</sup> ) <sup>2</sup>	$\sigma$ (x10 <sup>-2</sup> ) (m/s <sup>2</sup> )	CCP
F <sub>Exp</sub>	0,115	0,033	0,044	5,99	2,45	0,88
F <sub>Otm</sub>	0,160	0,045	0,053	8,75	2,96	0,89
Experimental	0,102	0,025	0,035	5,29	2,30	1,00

A partir da análise dos dados apresentados na Tabela 35 e da comparação com os resultados experimentais obtidos via sistemas biodinâmicos, percebe-se uma correlação satisfatória entre tais parâmetros, especialmente em relação à F<sub>Exp</sub>, onde foram observados os seguintes valores de aceleração de pico ( $a_p$ ): [F<sub>Exp</sub>:  $a_p = 0,115$  m/s<sup>2</sup>]. Os resultados experimentais registram [Experimental:  $a_p = 0,102$  m/s<sup>2</sup>], indicando assim uma diferença percentual da ordem de 12,8%.

Ao avaliar qualitativamente as respostas apresentadas nos gráficos de aceleração no domínio do tempo e da frequência (Figura 145), nota-se claramente uma forte correlação entre essas variáveis, que podem ser expressas estatisticamente mediante o emprego da correlação de Pearson (PCC), resultando em: [CCP = 0,88 ; F<sub>Exp</sub> x Experimental] e [CCP = 0,89 ; F<sub>Otm</sub> x Experimental]. Isso reforça a aplicação da modelagem de sistemas biodinâmicos frente às respostas do piso no contexto realista.

### 8.3.8 Modelo de carregamento VIII (MC-VIII)

Com relação ao Modelo de Carregamento VIII [MC-VIII: 9 pessoas], investigado experimentalmente na seção 7.2.8 e ilustrado nas Figuras 152 (planta) e Figura 153

(tridimensional), realiza-se uma análise numérica empregando modelagem de sistemas biodinâmicos, objetivando assim uma avaliação comparativa da resposta estrutural dinâmica do piso entre os resultados numéricos e experimentais. Com a finalidade de representar os indivíduos sobre o modelo numérico, utilizou-se as mesmas características inerentes ao modelo biodinâmico previamente descritas no contexto do MC-VII, uma vez que essa análise se baseou no experimento executado pelos mesmos participantes, porém com posicionamento sobre a laje L4. A Figura 154 e a Tabela 36 exibem a comparação dos resultados obtidos na modelagem numérica e na monitoração dinâmica experimental.

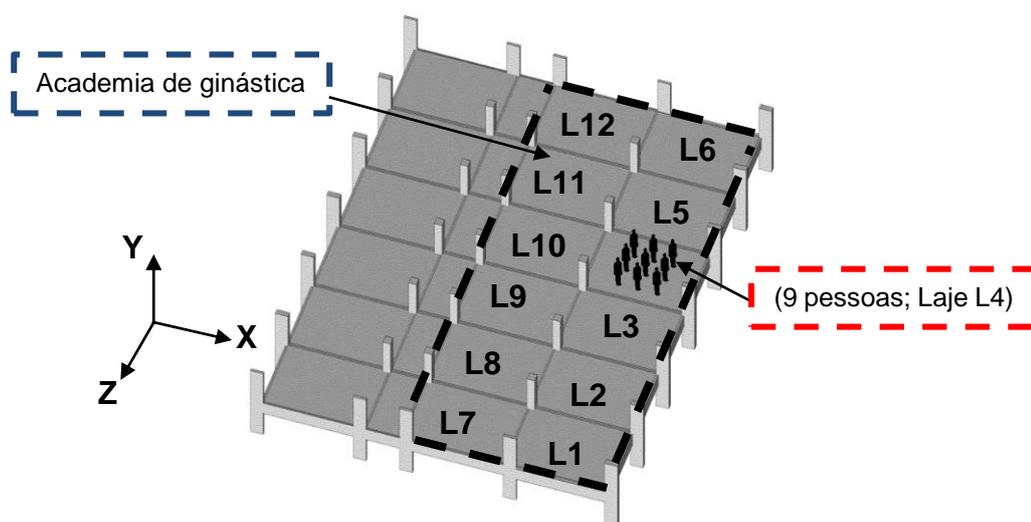


Figura 152 - MC-VIII (9 pessoas; Laje L4)

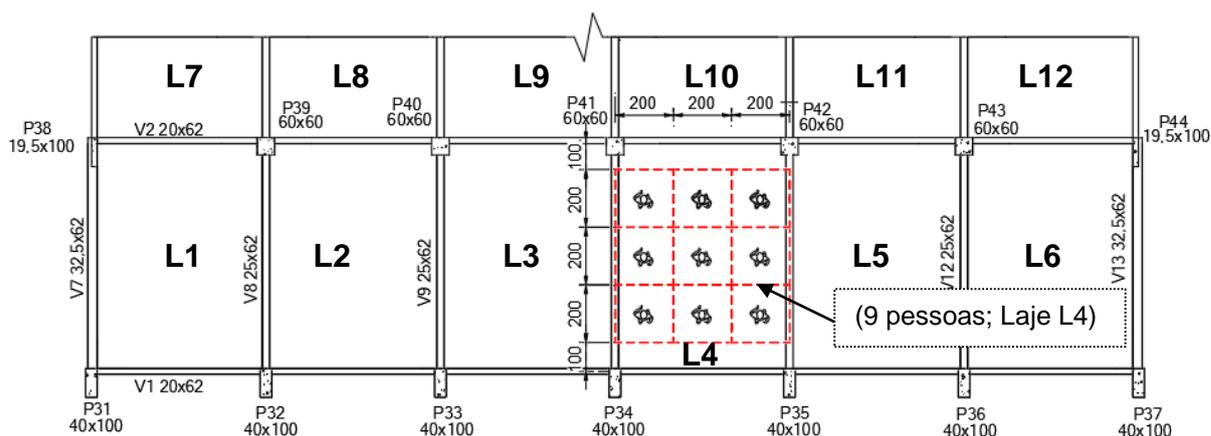
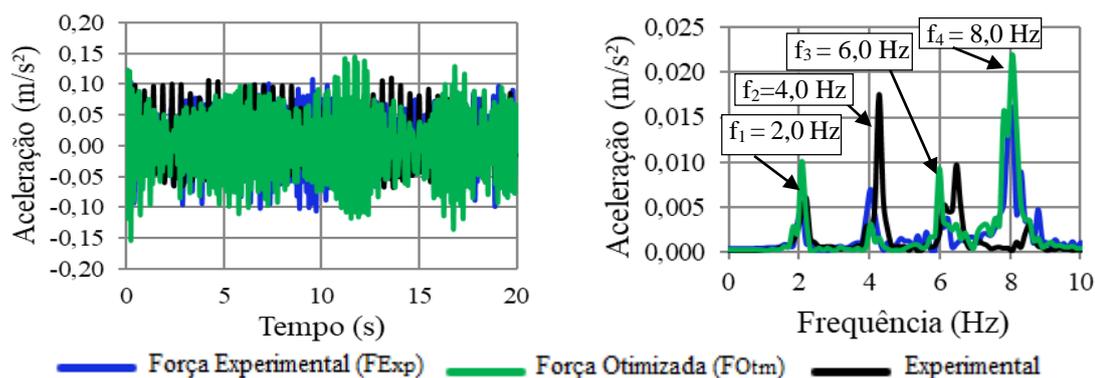


Figura 153 - MC-VIII (9 pessoas; Laje L4)



**Figura 154 - Comparação da resposta estrutural dinâmica (Laje L3): MC-VIII**

**Tabela 36 - Correlação estatística entre a resposta dinâmica numérica e experimental: MC-VIII (9 pessoas;  $f = 2$  Hz; Laje L4)**

MC-VIII	$a_p$ (m/s <sup>2</sup> )	$\mu$ (m/s <sup>2</sup> )	$\mu_q$ (m/s <sup>2</sup> )	$\sigma^2$ ( $\times 10^{-4}$ ) (m/s <sup>2</sup> ) <sup>2</sup>	$\sigma$ ( $\times 10^{-2}$ ) (m/s <sup>2</sup> )	CCP
$F_{Exp}$	0,110	0,031	0,040	5,21	2,28	0,75
$F_{Otm}$	0,145	0,041	0,049	7,39	2,72	0,78
Experimental	0,110	0,026	0,037	6,11	2,47	1,00

Ao analisar os resultados apresentados na Tabela 36, observa-se uma boa aproximação entre o valor experimental da aceleração de pico e da média quadrática [Experimental:  $a_p = 0,110$  m/s<sup>2</sup>;  $\mu_q = 0,037$  m/s<sup>2</sup>] e os valores obtidos por meio do modelo biodinâmico [ $F_{Exp}$ :  $a_p = 0,110$  m/s<sup>2</sup>,  $\mu_q = 0,040$  m/s<sup>2</sup>;  $F_{Otm}$ :  $a_p = 0,145$  m/s<sup>2</sup>,  $\mu_q = 0,049$  m/s<sup>2</sup>]. Portanto, com base nos valores da média quadrática, nota-se uma correlação entre essas variáveis, especialmente na comparação entre a resposta experimental do piso e a obtida via sistemas biodinâmicos ( $F_{Exp}$ ), resultando em uma diferença da ordem de 8%.

Além disso, os coeficientes de correlação de Pearson (PCC) demonstram uma correlação forte entre essas variáveis, com os seguintes resultados: [CCP = 0,75;  $F_{Exp}$  x Experimental] e [CCP = 0,78;  $F_{Otm}$  x Experimental], uma vez que os valores são superiores a 0,7. Diante dos resultados, percebe-se que o emprego de sistemas biodinâmicos utilizado para representar as ações humanas sobre os sistemas estruturais indica uma boa concordância com dados coletados via monitoração experimental do piso investigado.

#### 8.4 Considerações finais

Os resultados presentes neste capítulo evidenciam que o emprego de sistemas biodinâmicos pode ser considerado uma alternativa viável para representar a ação humana rítmica (atividades aeróbicas) sobre os pisos de edifícios, uma vez que os resultados da pesquisa demonstram uma boa proximidade com a resposta observada experimentalmente sobre a laje de concreto investigada.

Conseqüentemente, com base nos resultados obtidos para as diferentes situações de carregamento investigadas, percebe-se uma alta correlação entre a resposta dinâmica do piso, obtida por meio da modelagem experimental e por sistemas biodinâmicos ( $F_{Exp}$  e  $F_{Otm}$ ), pois os coeficientes de Pearson, em todas as análises investigadas, são superiores a 0,7 ( $CCP > 0,7$ ), indicando, assim, uma forte correlação entre essas variáveis. Além disso, é claramente observada uma aproximação entre a resposta do piso (Experimental) e a obtida por meio da aplicação de sistemas biodinâmicos, especialmente utilizando a estratégia  $F_{Exp}$ .

Dessa forma, os resultados desta pesquisa destacam a aplicabilidade dos modelos biodinâmicos, pois essa metodologia de análise contribui para uma melhor compreensão dos efeitos das interação dinâmica pessoa-estrutura, bem como aprimoramento de projeto de pisos de edifícios em termos do conforto humano.

## 9 VIBRAÇÃO FORÇADA: EXPERIMENTAL x BIODINÂMICO x "FORÇA-DURA"

### 9.1 Considerações iniciais

O presente capítulo tem como objetivo realizar uma avaliação do comportamento estrutural dinâmico do piso, tendo como referência a comparação das respostas estruturais dinâmicas do piso obtidas por meio da aplicação de funções matemáticas para carregamento dinâmico, modelos tradicionais ("força-dura": Faisca [28], SCI [57] e AISC [3]), e a estratégia de modelagem biodinâmica proposta neste estudo.

Para tal, é analisada a resposta experimental da estrutura dinâmica do piso mediante o emprego do caso de carregamento dinâmico Modelo de Carregamento IX [MC-IX: 18 pessoas], o qual está relacionado à excitação decorrente de atividades humanas rítmicas desenvolvidas sobre o piso em estudo. Portanto, são comparadas as respostas obtidas por meio de monitoração dinâmica experimental e modelagem numérica. Deste modo, objetiva-se avaliar de maneira mais abrangente a interação dinâmica pessoa-estrutura, considerando-se a utilização das diferentes metodologias de análise associadas ao carregamento dinâmico.

### 9.2 Critérios adotados na modelagem numérica

No âmbito das análises de vibração forçada, é realizada uma avaliação comparativa entre os resultados obtidos via monitoração dinâmica experimental do piso e aqueles fornecidos através do uso de modelagem em elementos finitos. Neste contexto, investiga-se a resposta dinâmica da seção central da laje L3, correspondendo ao ponto de amplitude modal máxima do sistema, relacionado ao terceiro modo de vibração do piso. Para tal, considera-se na análise um grupo de 18 pessoas saltando sobre a laje de concreto com uma frequência de 2 Hz ( $f = 2$  Hz) [MC-IX: 18 pessoas (ver Figura 155)].

Em relação às características dinâmicas dos sistemas biodinâmicos, foram selecionados indivíduos com massa corporal próxima ou equivalente dos participantes

dos ensaios experimentais realizados sobre o piso investigado, conforme detalhado na seção 7.2.9 deste trabalho. Ressalta-se que a modelagem via sistemas biodinâmicos se empregou força experimental que se refere à força medida durante os testes experimentais via uso de células de carga acopladas a plataforma de carga dinâmica (plataforma MDF). No que diz respeito às funções matemáticas de carregamento dinâmico (Faisca [28], SCI [57] e AISC [3]), utilizou-se para fins de análise o valor médio correspondente a relação entre massa total dos participantes com o número total de participantes do teste ( $1527,45/18 \cong 84,9$  kg).

Diante do exposto, a Tabela 37 apresenta os critérios utilizados na modelagem com base na aplicação das funções de carregamento dinâmico, modelos tradicionais ("força-dura"). Mais detalhes sobre essas variáveis utilizadas nessas metodologias de análise podem ser encontrados na seção 1.5.2 desta tese.

**Tabela 37 - Parâmetros utilizados nos modelos de "força-dura"**

Faisca [28]	CD	T(s)	T <sub>c</sub> (s)	K <sub>p</sub>	P(N)		f <sub>p</sub> (Hz)	
	0,93	0,5	0,34	2,78	832		2,00	
SCI [57]	R <sub>1,v</sub>	R <sub>2,v</sub>	R <sub>3,v</sub>	φ <sub>1</sub>	φ <sub>2</sub>	φ <sub>3</sub>	P(N)	f <sub>p</sub> (Hz)
	1,270	0,470	0,180	π/6	-π /6	π /2	832	2,00
AISC [3]	α <sub>1</sub>	α <sub>2</sub>	α <sub>3</sub>		P(N)		f <sub>p</sub> (Hz)	
	1,5	0,6	0,1		832		2,00	

### 9.3 Comparação da resposta dinâmica: numérico-experimental

Neste contexto de análise, são realizadas avaliações comparativas entre as funções matemáticas de carregamento dinâmico ("força-dura": Faisca [28], SCI [57] e AISC [3]) e a modelagem de sistemas biodinâmicos, tendo como referência o caso de carregamento [MC-IX: 18 pessoas] com a finalidade de investigar os efeitos da interação dinâmica pessoa-estrutura. Deste modo, os participantes foram estrategicamente distribuídos ao longo do piso em estudo, com nove deles posicionados sobre a laje L3 e os demais sobre a laje L4, conforme ilustrado nas Figuras 155 e 156. Assim sendo, destaca-se que essa distribuição de posicionamento está em conformidade com a disposição dos indivíduos sobre o piso, durante os testes experimentais realizados sobre a laje de concreto armado, conforme detalhado na seção 7.2.9 desta tese.

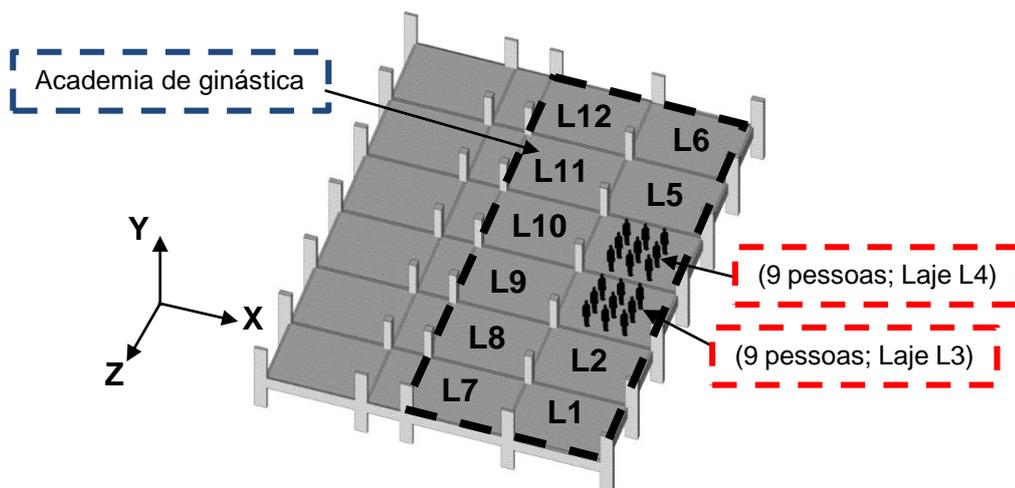


Figura 155 - MC-IX (9 pessoas; Laje L3) e (9 pessoas; Laje L4)

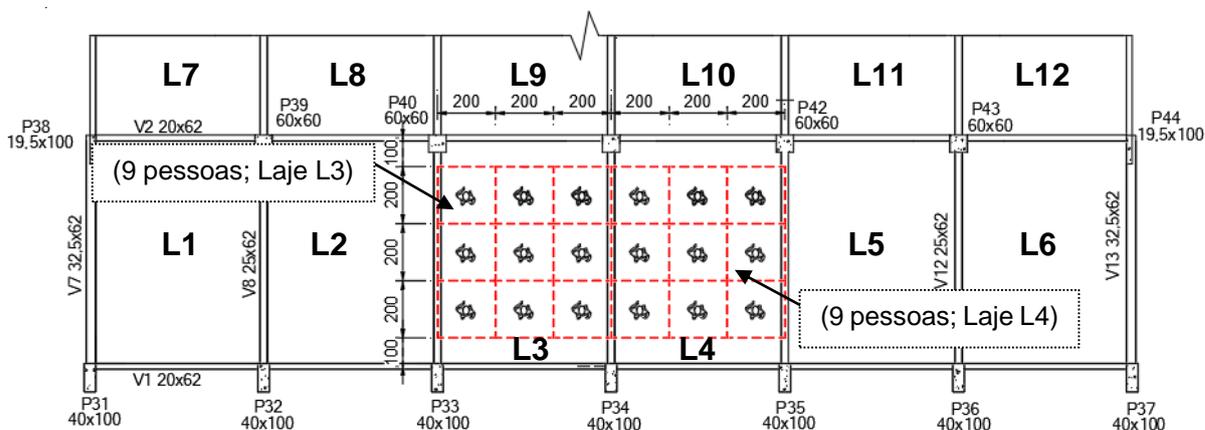


Figura 156 - MC-IX (9 pessoas; Laje L3) e (9 pessoas; Laje L4)

Diante do exposto, as Figuras 157 a 164 apresentam os resultados da aceleração, tanto no domínio do tempo quanto no da frequência, referente à seção central da laje L3, com base na aplicação das funções matemáticas de carregamento dinâmico (“força-dura”: Faisca [28], SCI [57] e AISC [3]) e modelo biodinâmico proposto neste estudo. Sendo assim, as Figuras 157 e 158 exibem os resultados da aceleração no domínio do tempo e da frequência, respectivamente, para o modelo biodinâmico. Em seguida, as Figuras 159 e 160 ilustram os resultados obtidos com base no modelo proposto por Faisca [28], apresentando as respostas no domínio do tempo e da frequência, respectivamente. Adicionalmente, as Figuras 161 e 162 representam os resultados referentes ao modelo SCI [57], apresentando as respostas no domínio do tempo e da frequência, respectivamente. Por sua vez, a resposta em função do tempo associadas ao modelo AISC [3] é exibida na Figura 163, enquanto a resposta no domínio da frequência encontra-se descrita na Figura 164. Posteriormente, a Tabela 38 apresenta um resumo dos resultados referentes à

resposta dinâmica obtida referente à aplicação de cada metodologia de análise estudada neste trabalho. Com o objetivo de avaliar claramente a resposta dinâmica do piso em relação ao caso de carregamento com maior número de participantes, investigado experimentalmente, os gráficos são dispostos em uma escala que permita uma melhor comparação, considerando-se diferentes abordagens estudadas.

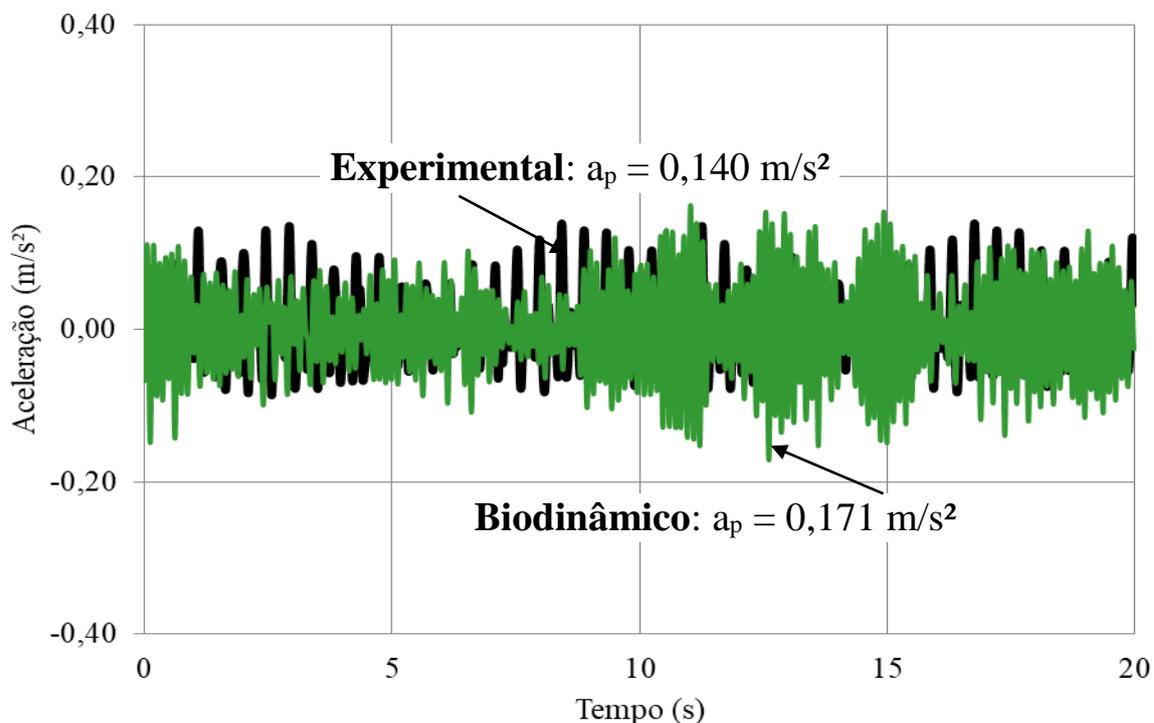


Figura 157 - Modelo Biodinâmico x Experimental: aceleração do piso (Laje L3)

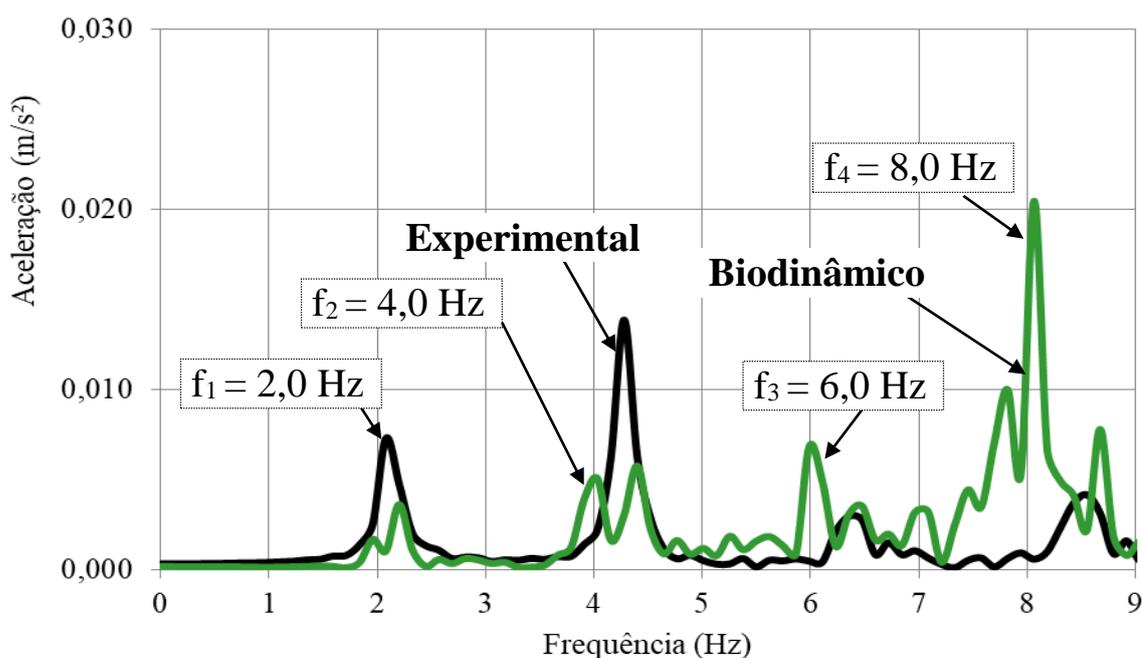


Figura 158 - Modelo Biodinâmico x Experimental: aceleração do piso (Laje L3)

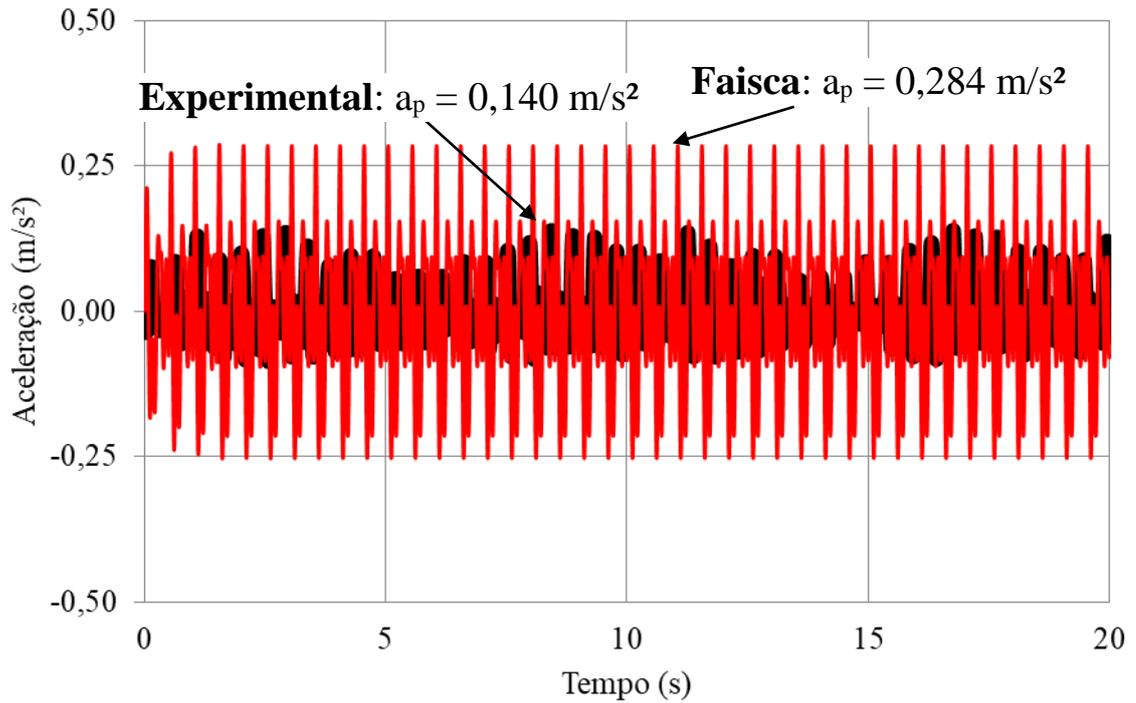


Figura 159 - Modelo Faisca x Experimental: aceleração do piso (Laje L3)

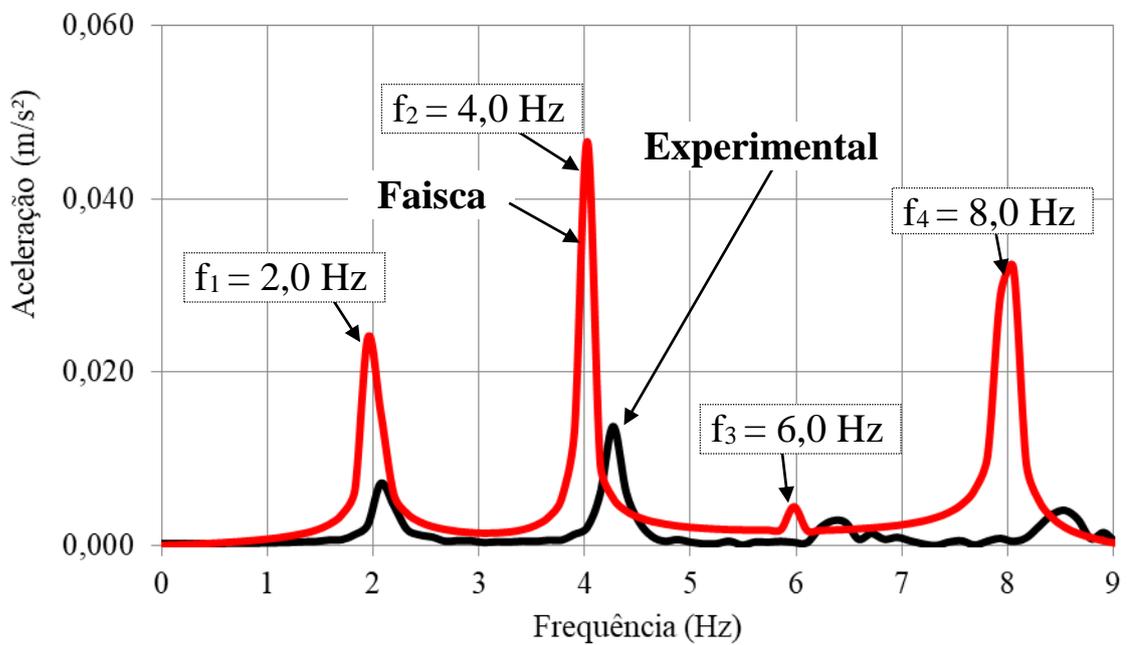


Figura 160 - Modelo Faisca x Experimental: aceleração do piso (Laje L3)

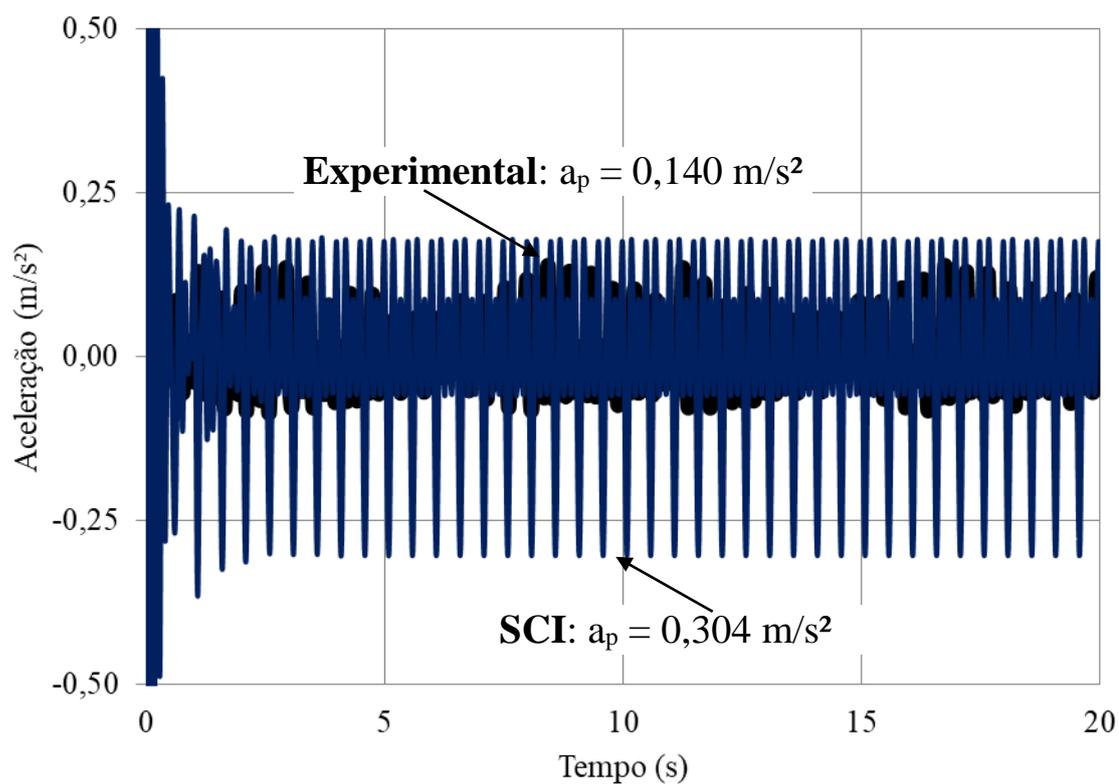


Figura 161 - Modelo SCI x Experimental: aceleração do piso (Laje L3)

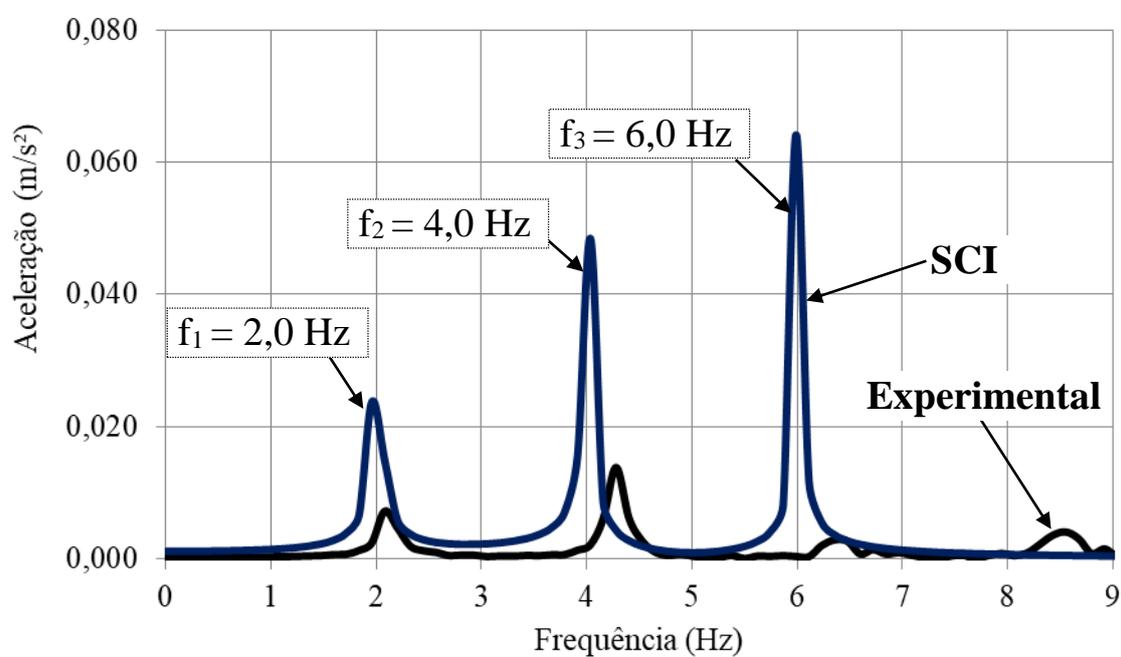


Figura 162 - Modelo SCI x Experimental: aceleração do piso (Laje L3)

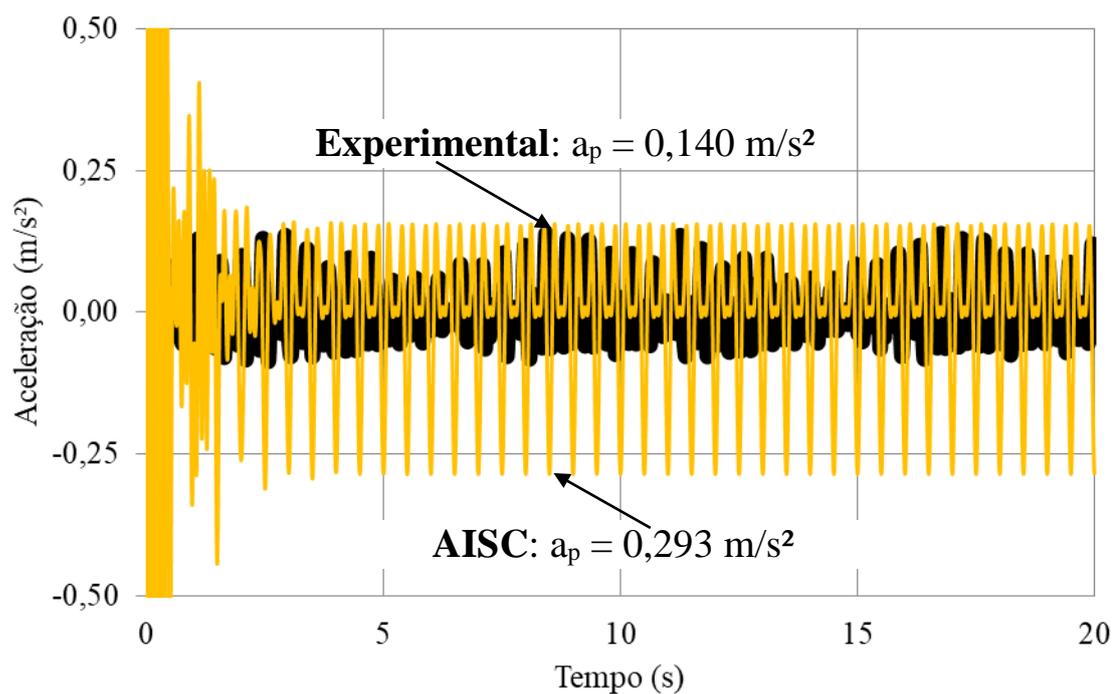


Figura 163 - Modelo AISC x Experimental: aceleração do piso (Laje L3)

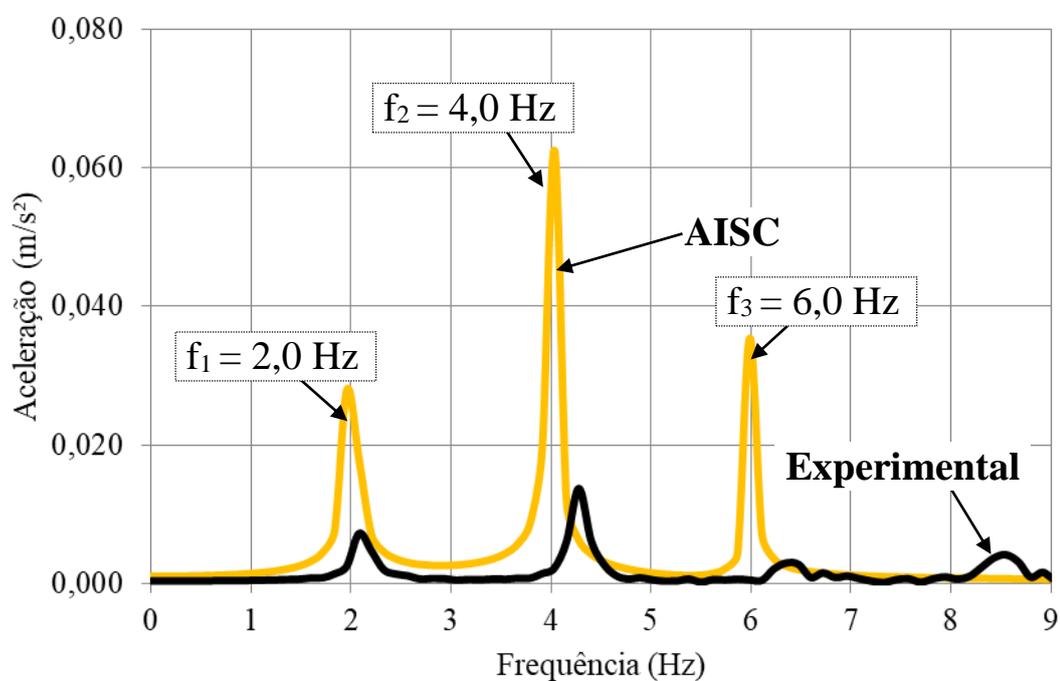


Figura 164 - Modelo AISC x Experimental: aceleração do piso (Laje L3)

**Tabela 38 - Comparação entre os resultados de aceleração máxima do piso**

Modelos	$a_p$ (m/s <sup>2</sup> )	Experimental (m/s <sup>2</sup> )	Diferenças (m/s <sup>2</sup> )	Diferenças (%)
Biodinâmico	0,170	0,140	0,032	23%
Faisca [28]	0,284		0,145	104%
SCI [57]	0,304		0,165	119%
AISC [3]	0,293		0,154	111%

Ao analisar os resultados de aceleração de pico apresentados na Tabela 38, referentes ao [MC-IX: 18 pessoas], constata-se que o uso de modelos biodinâmicos (análise numérica) resultou em valores da ordem de 0,17 m/s<sup>2</sup> [ $a_p = 0,17$  m/s<sup>2</sup>], enquanto os resultados experimentais apresentaram um valor equivalente a 0,14 m/s<sup>2</sup> [ $a_p = 0,14$  m/s<sup>2</sup>]. Isso representa uma diferença satisfatória da ordem de 20% entre essas duas abordagens. Por outro lado, com base no emprego dos modelos tradicionais de carregamento dinâmico (“força-dura”), é importante destacar que, essas metodologias de análise tendem a fornecer resultados mais conservadores, especialmente SCI [57] e AISC [3], com valores correspondentes a 0,304 m/s<sup>2</sup> e 0,293 m/s<sup>2</sup>, respectivamente, muitos superiores a resposta experimental. No entanto, ao comparar esses resultados com a resposta experimental, observa-se que o modelo proposto por Faisca [28] se aproxima mais dos resultados obtidos via modelagem experimental, com uma aceleração de pico da ordem de 0,284 m/s<sup>2</sup>, apresentando uma maior coerência com os resultados fornecidos via emprego de modelos biodinâmicos.

Portanto, os resultados da pesquisa indicam que os modelos tradicionais de carregamento dinâmico (“força-dura”: Faisca [28], SCI [57] e AISC [3]) tendem a apresentar respostas dinâmicas muito mais conservadoras, enquanto que a modelagem com base no uso de sistemas biodinâmicos fornece valores de resposta dinâmica mais próxima dos observados com base na resposta experimental medida durante a análise do piso. Assim sendo, a metodologia de análise proposta neste trabalho de pesquisa pode ser considerada uma alternativa mais realista para a caracterização das ações dinâmicas humanas rítmicas sobre pisos de edifícios, pois além do modelo biodinâmico considerar as características dinâmicas dos indivíduos (massa, amortecimento e rigidez), as ações dinâmicas dos inúmeros participantes não se encontram em fase, ou seja, não são aplicadas ao mesmo tempo, e com a mesma frequência de excitação em ressonância com a estrutura, sobre as lajes de concreto

do piso, o que seguramente tende a atenuar a resposta estrutural dinâmica das edificações.

#### 9.4 Considerações finais

Com base nos resultados apresentados neste capítulo, pode-se concluir que as funções matemáticas de carregamento dinâmico (“força-dura”: Faisca [28], SCI [57] e AISC [3]) tendem a apresentar respostas dinâmicas mais conservadoras, enquanto que a modelagem com base no emprego de sistemas biodinâmicos fornece valores de resposta dinâmica mais próximos do observado via monitoração experimental dinâmica do piso investigado. Deste modo, destaca-se que a metodologia de análise proposta neste trabalho de pesquisa pode ser considerada como sendo uma alternativa viável para a caracterização das ações dinâmicas humanas rítmicas sobre pisos de edifícios.

## 10 AVALIAÇÃO DO CONFORTO HUMANO DO PISO

### 10.1 Considerações iniciais

O principal objetivo deste capítulo consiste em conduzir um estudo paramétrico do piso através de modelagem numérica, com a finalidade de investigar o comportamento estrutural dinâmico em relação aos critérios de conforto humano, levando em consideração os limites estabelecidos pelas normas e critérios de projeto. Pretende-se, portanto, analisar as respostas estruturais dinâmicas do piso, como base nos valores de acelerações de pico ( $a_p$ ), aceleração RMS e valores de dose de vibração (VDV), estudando assim diferentes situações de carregamento dinâmico relacionadas a ações humanas rítmicas (atividades aeróbicas). Para tal, são aplicadas funções matemáticas tradicionais de carregamento dinâmico ("força-dura": Faisca [28], SCI [57] e AISC [3]), e a estratégia de modelagem biodinâmica proposta neste estudo.

### 10.2 Parâmetros empregados na modelagem

No que se refere aos parâmetros específicos utilizados em cada função matemática de carregamento dinâmico estudadas ("força-dura": Faisca [28], SCI [57] e AISC [3]), esses foram definidos com base nos critérios detalhados na seção 1.5.2 desta tese. Neste contexto, os parâmetros de cada uma dessas metodologias de análise foram definidos tendo em mente o número de pessoas. Dessa forma, foram estudadas seções estruturais ao longo das lajes de concreto com base na prática de atividades humanas rítmicas, onde foram examinados diferentes cenários de carregamento dinâmico, com base nos grupos de pessoas: 18, 27, 36, 45 e 54, distribuídas ao longo da academia de ginástica.

Diante do exposto, ressalta-se que o peso referente a cada indivíduos aplicado nas funções matemáticas de carregamento dinâmico "força-dura" foi definido com base no valor médio da massa das 100 (cem) pessoas que participaram dos ensaios

experimentais associado à modelagem de sistemas biodinâmicos, resultando assim em uma massa média da ordem de 76,5 Kg. As Tabelas 39, 40 e 41 apresentam os parâmetros utilizados no modelo de elementos finitos associados aos modelos tradicionais de carregamento dinâmico ("força-dura": Faisca [28], SCI [57] e AISC [3]), respectivamente. Assim sendo, a Tabela 39, apresenta o coeficiente de defasagem que possui um valor fixo em todas as simulações de carga, enquanto os demais parâmetros foram definidos com base nos dados tabelados fornecidos via modelo proposto por Faisca [28]. No que se refere aos critérios definidos no modelo proposto por Ellis e Ji [60], citado no SCI [57], os respectivos parâmetros são expressos na Tabela 40 definidos com base nos coeficientes da série de Fourier determinados em função do número de pessoas envolvidas nas atividades rítmicas. Por fim, os coeficientes dinâmicos adotados para representar a atividade humana rítmica são apresentados na Tabela 41, conforme dados presentes no guia de projeto AISC [3].

**Tabela 39 - Parâmetros do modelo proposto por Faisca [28]**

Casos	Número de pessoas	CD	T(s)	T <sub>c</sub> (s)	K <sub>p</sub>	P(N)	f <sub>p</sub> (Hz)
X até XII	18	0,93	0,5	0,34	2,78	750	2,00
XIII até XIV	27	0,92					
XV e XVI	36	0,91					
XVII e XVIII	45	0,89					
XIX	54	0,88					

**Tabela 40 - Parâmetros do modelo desenvolvido por SCI [57]**

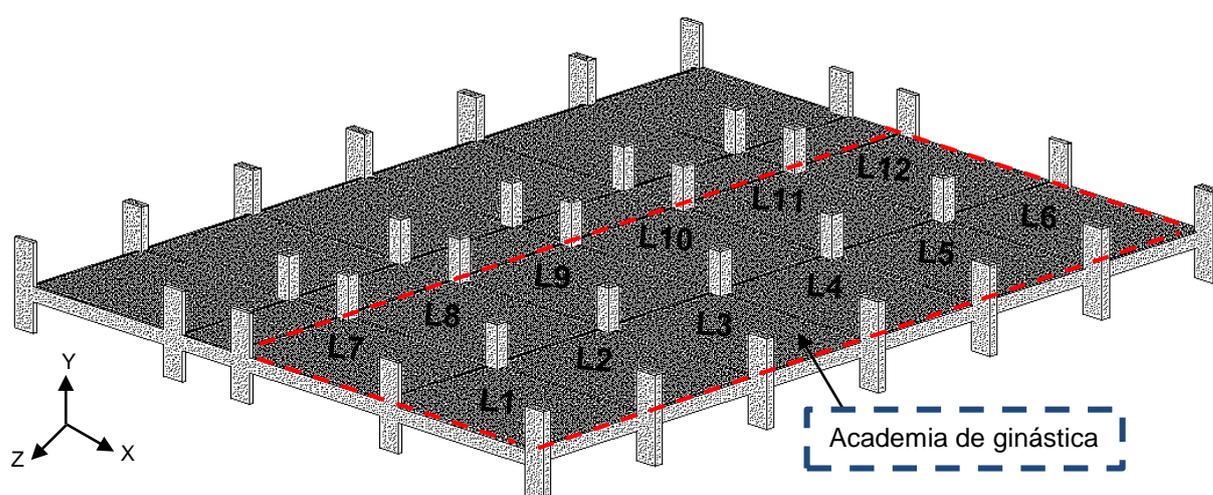
Casos	Número de pessoas	R <sub>1,v</sub>	R <sub>2,v</sub>	R <sub>3,v</sub>	φ <sub>1</sub>	φ <sub>2</sub>	φ <sub>3</sub>	P(N)	f <sub>p</sub> (Hz)
X até XII	18	1,270	0,470	0,180	π/6	-π/6	π/2	750	2,00
XIII até XIV	27	1,229	0,426	0,158					
XV e XVI	36	1,200	0,398	0,145					
XVII e XVIII	45	1,178	0,377	0,135					
XIX	54	1,161	0,361	0,128					

**Tabela 41 - Parâmetros da função matemática presente no AISC [3]**

Casos	Número de pessoas	α <sub>1</sub>	α <sub>2</sub>	α <sub>3</sub>	P(N)	f <sub>p</sub> (Hz)
X até XII	18	1,5	0,6	0,1	750	2,00
XIII até XIV	27					
XV e XVI	36					
XVII e XVIII	45					
XIX	54					

### 10.3 Avaliação do conforto humano

Com o propósito de investigar os níveis de conforto humano, realiza-se um estudo paramétrico do piso, submetendo-o a diferentes cenários de carregamento dinâmico, com o objetivo de analisar o comportamento estrutural dinâmico. Para tal, são selecionadas estrategicamente doze seções estruturais com base nos pontos de amplitude modal máxima de cada laje. Assim sendo, é importante ressaltar que essas seções estruturais investigadas estão localizadas precisamente no centro de cada laje (L1 até L12). A Figura 165 apresenta uma vista isométrica do piso de concreto armado analisado.



**Figura 165 - Vista isométrica do piso investigado**

Neste contexto, investiga-se as respostas dinâmicas nos centros das lajes (L1 até L12), em relação aos parâmetros, tais como aceleração de pico ( $a_p$ ), aceleração RMS ( $a_{w,rms}$ ) e valores de dose de vibração (VDV). Assim sendo, são estudadas nove situações distintas de carregamento dinâmico humano, permitindo assim uma análise comparativa entre os modelos tradicionais de carregamento dinâmico ("força-dura": Faisca [28], SCI [57] e AISC [3]) e o modelo biodinâmico desenvolvido neste trabalho de pesquisa. Neste sentido, a Tabela 42 apresenta um resumo das situações de carregamento avaliadas neste estudo. Cabe ressaltar que os parâmetros referentes aos modelos biodinâmicos investigados no âmbito deste estudo associados aos casos de carregamento analisados podem ser encontrados nos Apêndices A e G.

**Tabela 42 - Modelos de carregamento investigados: conforto humano**

(MC)	Aplicação do carregamento
MC-X	18 pessoas (9 pessoas em cada uma das lajes: L1 e L2)
MC-XI	18 pessoas (9 pessoas em cada uma das lajes: L5 e L6)
MC-XII	18 pessoas (9 pessoas em cada uma das lajes: L2 e L5)
MC-XIII	27 pessoas (9 pessoas em cada uma das lajes: L1, L2 e L3)
MC-XIV	27 pessoas (9 pessoas em cada uma das lajes: L4, L5 e L6)
MC-XV	36 pessoas (9 pessoas em cada uma das lajes: L1, L2, L3 e L4)
MC-XVI	36 pessoas (9 pessoas em cada uma das lajes: L2, L3, L4 e L5)
MC-XVII	45 pessoas (9 pessoas em cada uma das lajes: L1, L2, L3, L4 e L5)
MC-XVIII	45 pessoas (9 pessoas em cada uma das lajes: L2, L3, L4, L5 e L6)
MC-XIX	54 pessoas (9 pessoas em cada uma das lajes: L1, L2, L3, L4, L5 e L6)

Convém chamar a atenção do leitor de que, devido à formatação deste volume e às restrições de espaço, são apresentados ao longo deste capítulo os resultados das respostas estruturais dinâmicas (deslocamentos e acelerações) das seções mais críticas no domínio do tempo e da frequência para os seguintes modelos de carregamento: [MC-X; MC-XI; MC-XIV; MC-XVI]. Contudo, os resultados dos demais casos investigados encontram-se ilustrados no Apêndice H.

Considerando os aspectos abordados anteriormente, o objetivo deste estudo consiste na avaliação do comportamento estrutural dinâmico do piso em diferentes situações de carregamento, com ênfase na análise do conforto humano em um contexto específico, como o de uma academia de ginástica. Para tal, são empregados critérios de conforto humano definidos pelos seguintes autores: SCI [57], Ellis e Littler [60] e Setareh [161], onde as diretrizes são apresentadas na Tabela 43. Deste modo, mediante a aplicação dessas metodologias de análise pretende-se avaliar os efeitos da interação dinâmica pessoa-estrutura, a partir do emprego de sistemas biodinâmicos e das funções matemáticas de carregamento dinâmico ("força-dura").

**Tabela 43 - Critérios de conforto humano para as atividades humanas rítmicas**

SCI [57]	Ellis e Littler [60]	Setareh [161]	Reação das pessoas
$a_{w,rms}$ (m/s <sup>2</sup> )	VDV (m/s <sup>1,75</sup> )	VDV (m/s <sup>1,75</sup> )	
< 0,35	< 0,66	< 0,50	Limite aceitável
0,35 – 1,27	0,66 – 2,38	0,50 – 3,50	Perturbador
1,27 – 2,47	2,38 – 4,64	3,50 – 6,90	Inaceitável
> 2,47	> 4,64	> 6,90	Pânico
Valor Limite da aceleração de pico ( $a_p$ ) = 0,5 m/s <sup>2</sup> [3]			

### 10.3.1 Modelo de carregamento X (MC-X)

O Modelo de Carregamento X [MC-X: 18 pessoas] corresponde ao caso de carregamento dinâmico induzido por um grupo de 18 pessoas praticando atividades humanas rítmicas sobre o piso de concreto armado, sendo 9 pessoas posicionadas sobre cada uma das lajes L1 e L2, conforme ilustrado nas Figuras 166 e 167. Em seguida, as Figuras 168 a 175 apresentam graficamente as respostas dinâmicas (deslocamentos e acelerações) referente a seção estrutural mais crítica, de acordo com os resultados expressos na Tabela 44. As respostas foram obtidas através da aplicação das funções de carregamento dinâmico ("força-dura": Faisca [28], SCI [57] e AISC [3]), bem como o modelo biodinâmico desenvolvido neste trabalho de pesquisa.

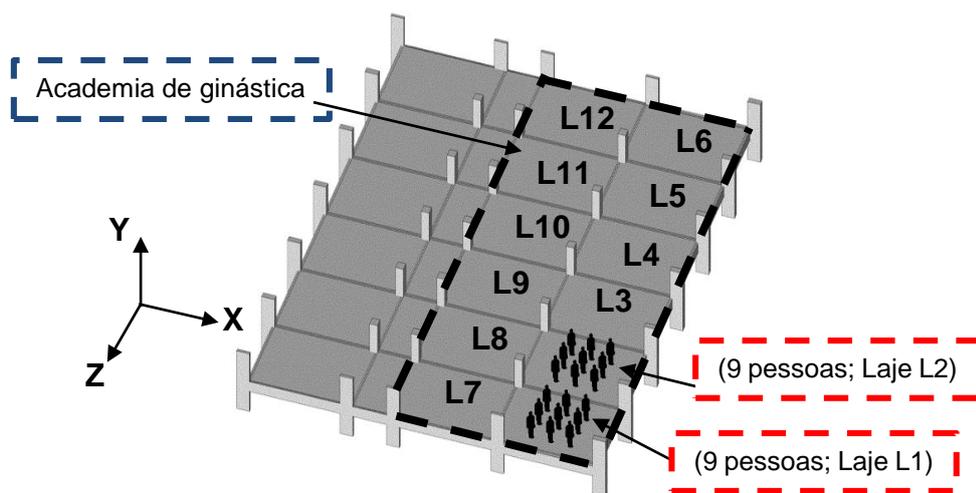


Figura 166 - Vista isométrica MC-X (18 Pessoas)

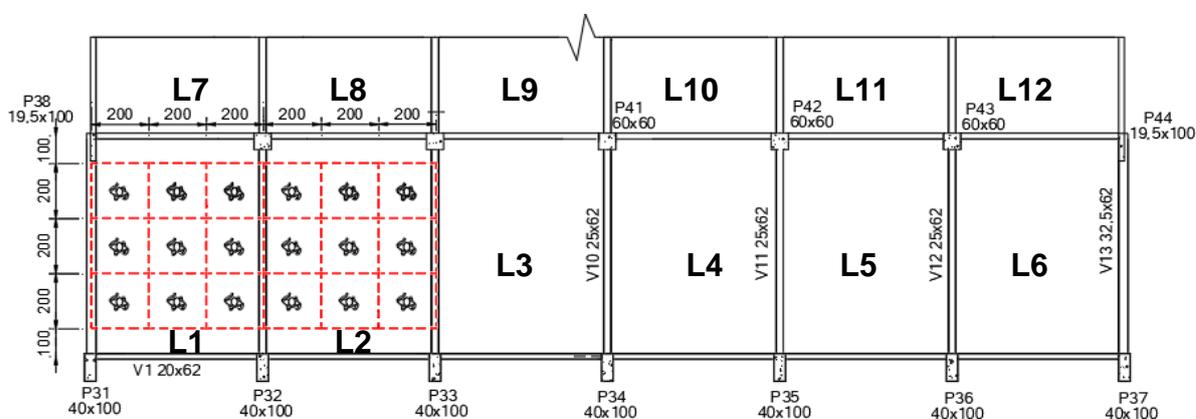
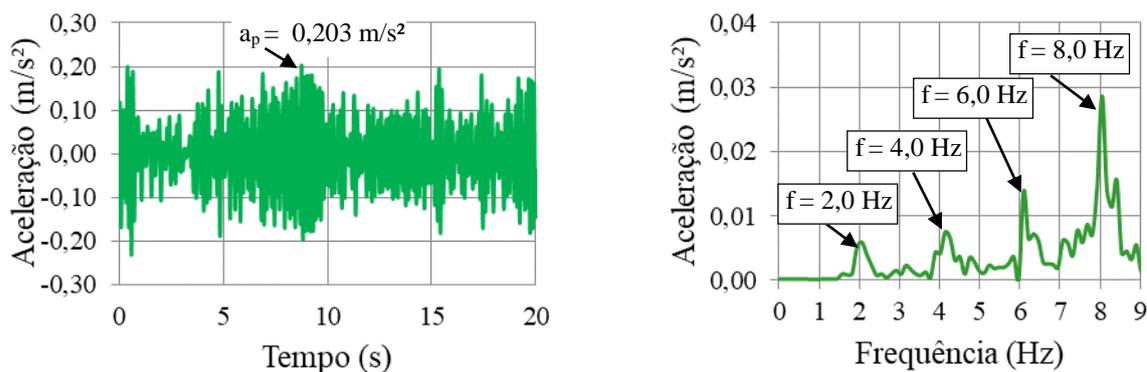
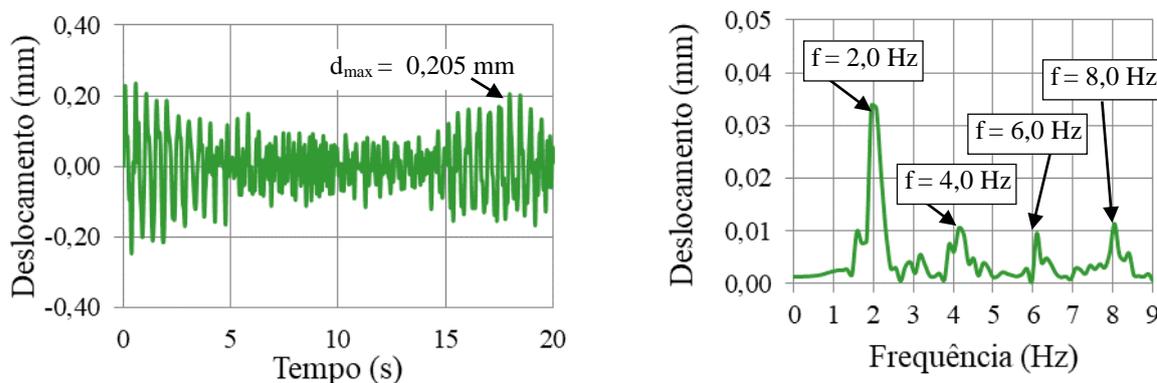


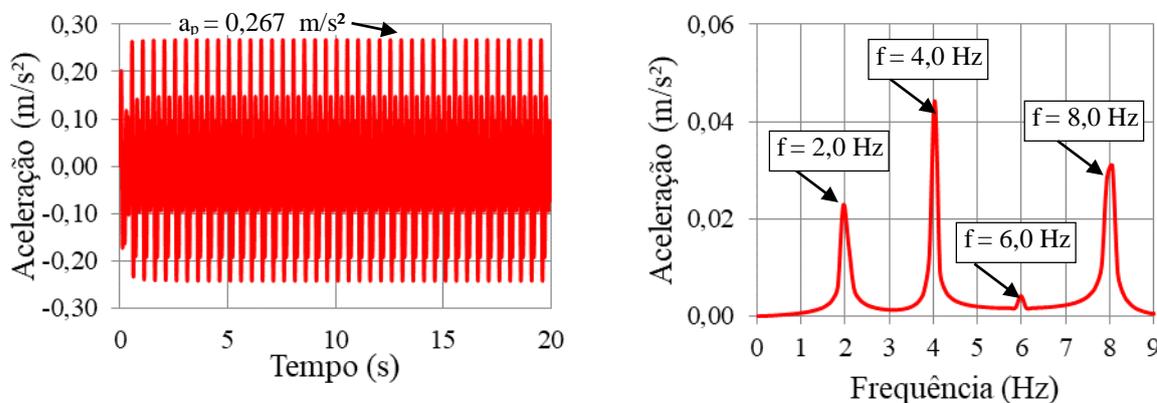
Figura 167 - Vista em planta MC-X (18 pessoas)



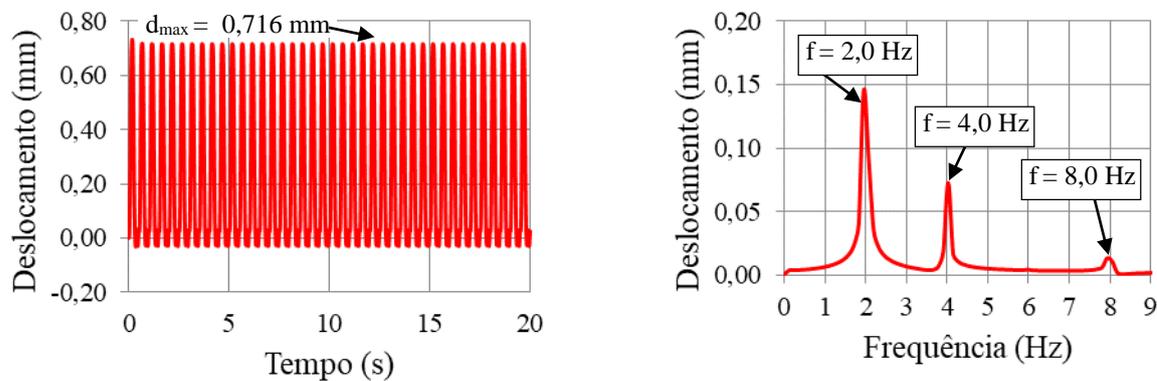
**Figura 168 - Aceleração na seção central da Laje L2 (MC-X; Biodinâmico)**



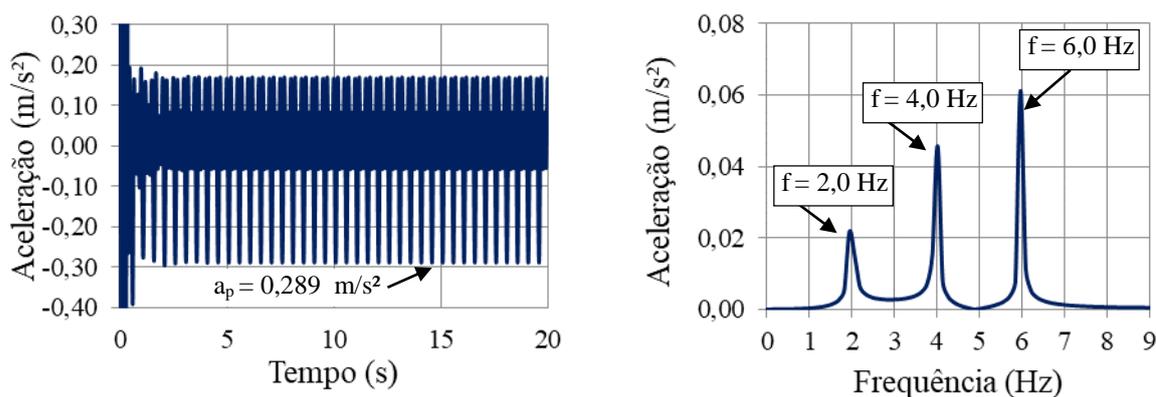
**Figura 169 - Deslocamento na seção central da Laje L2 (MC-X; Biodinâmico)**



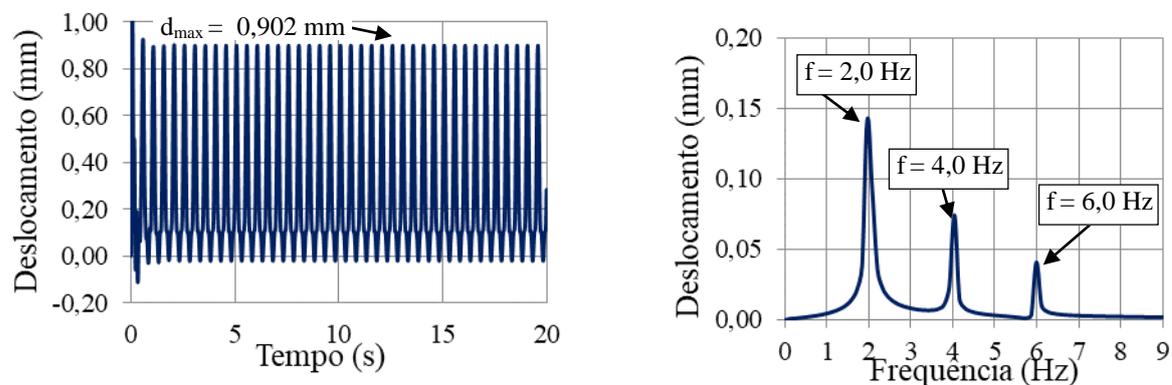
**Figura 170 - Aceleração na seção central da Laje L2 (MC-X; Faisca)**



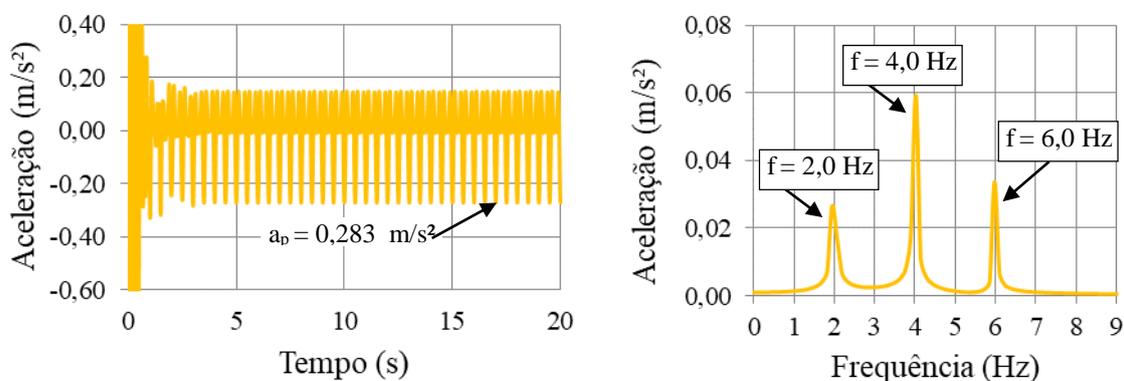
**Figura 171 - Deslocamento na seção central da Laje L2 (MC-X; Faisca)**



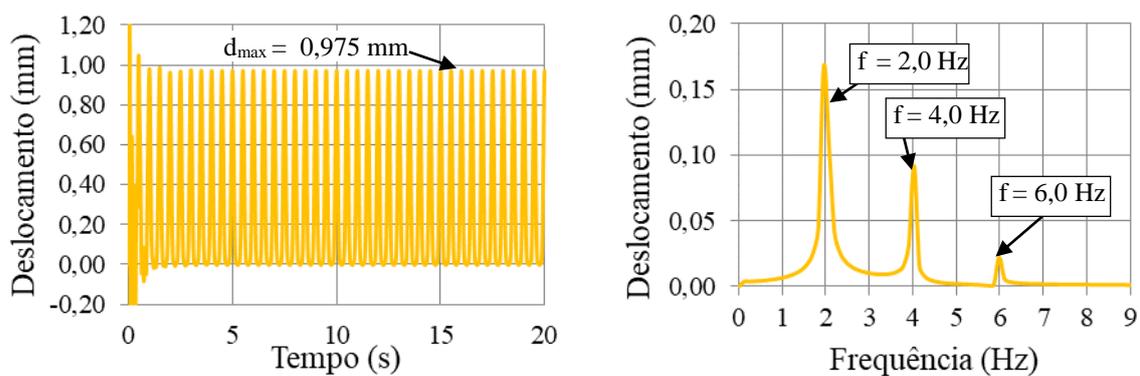
**Figura 172 - Aceleração na seção central da Laje L2 (MC-X; SCI)**



**Figura 173 - Deslocamento na seção central da Laje L2 (MC-X; SCI)**



**Figura 174 - Aceleração na seção central da Laje L2 (MC-X; AISC)**



**Figura 175 - Deslocamento na seção central da Laje L2 (MC-X; AISC)**

**Tabela 44 - Resposta estrutural dinâmica do piso investigado: MC-X**

LAJE	Biodinâmico			Faisca [28]			SCI [57]			AISC [3]		
	$a_p$	$a_{w,rms}$	VDV									
	m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>1,75</sup>	m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>1,75</sup>	m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>1,75</sup>	m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>1,75</sup>
<b>L1</b>	<b>0,172</b>	<b>0,062</b>	<b>0,183</b>	<b>0,243</b>	<b>0,116</b>	<b>0,344</b>	<b>0,296</b>	<b>0,151</b>	<b>0,448</b>	<b>0,282</b>	<b>0,277</b>	<b>0,821</b>
<b>L2</b>	<b>0,203</b>	<b>0,076</b>	<b>0,225</b>	<b>0,267</b>	<b>0,121</b>	<b>0,358</b>	<b>0,289</b>	<b>0,141</b>	<b>0,419</b>	<b>0,283</b>	<b>0,234</b>	<b>0,692</b>
L3	0,098	0,037	0,110	0,083	0,039	0,115	0,036	0,032	0,093	0,031	0,082	0,244
L4	0,048	0,018	0,053	0,042	0,022	0,064	0,007	0,017	0,051	0,010	0,050	0,149
L5	0,039	0,012	0,036	0,016	0,008	0,024	0,002	0,012	0,035	0,007	0,035	0,103
L6	0,037	0,010	0,029	0,010	0,005	0,015	0,004	0,011	0,032	0,011	0,032	0,095
L7	0,111	0,036	0,106	0,050	0,023	0,068	0,025	0,029	0,085	0,024	0,081	0,238
L8	0,071	0,026	0,076	0,067	0,030	0,090	0,033	0,043	0,127	0,032	0,120	0,354
L9	0,070	0,022	0,066	0,042	0,021	0,062	0,006	0,032	0,094	0,016	0,094	0,277
L10	0,067	0,022	0,064	0,024	0,012	0,036	0,006	0,032	0,094	0,006	0,065	0,193
L11	0,025	0,008	0,025	0,013	0,006	0,019	0,002	0,022	0,065	0,006	0,037	0,108
L12	0,024	0,008	0,023	0,007	0,004	0,011	0,002	0,013	0,037	0,007	0,019	0,057

A partir da análise dos resultados expressos na Tabela 44 referente ao caso de carregamento dinâmico [MC-X: 18 pessoas; sobre lajes L1 e L2], observa-se que os efeitos dinâmicos de maior amplitude ocorreram onde foram aplicados os carregamentos dinâmicos (Lajes L1 e L2). Ao comparar os resultados fornecidos mediante emprego de modelos "força-dura" e sistemas biodinâmicos, percebe-se uma diferença significativa, especialmente com base no uso modelo proposto pelo guia de projeto AISC [3].

Desta forma, em referência ao modelo AISC [3] as respostas dinâmicas máximas apresentam os seguintes valores [laje L1:  $a_p = 0,282$  m/s<sup>2</sup>;  $a_{w,rms} = 0,277$  m/s<sup>2</sup>; VDV = 0,821 m/s<sup>1,75</sup> (AISC)]. Enquanto ao considerar sistemas biodinâmicos são encontrados os seguintes resultados [laje L1:  $a_p = 0,172$  m/s<sup>2</sup>;  $a_{w,rms} = 0,062$  m/s<sup>2</sup>; VDV = 0,183 m/s<sup>1,75</sup> (sistemas biodinâmicos)]. Assim sendo, ressalta-se que essas diferenças registradas com base no emprego de sistemas biodinâmicos podem ser justificadas, pois o modelo incorpora na formulação matemática do método variáveis relacionadas as características dos indivíduos, como o amortecimento, que pode atenuar as respostas dinâmicas, podendo assim influenciar nos efeitos da interação dinâmica pessoa-estrutura.

Diante do exposto, os resultados obtidos mediante aplicação do modelo AISC [3] indica que os critérios de conforto humano não são atendidos, pois verifica-se um

valor máximo de VDV da ordem de  $0,821 \text{ m/s}^{1,75}$  [VDV:  $0,821 \text{ m/s}^{1,75}$  (Laje L1)], violando os critérios estabelecidos por Ellis e Littler [60] [VDV  $< 0,6 \text{ m/s}^{1,75}$ ] e Setareh [161] [VDV  $< 0,5 \text{ m/s}^{1,75}$ ].

### 10.3.2 Modelo de carregamento XI (MC-XI)

O Modelo de Carregamento XI [MC-XI: 18 pessoas] diz respeito à situação de carregamento dinâmico induzido por um grupo de 18 pessoas exercendo atividades humanas rítmicas sobre a laje de concreto armado, sendo 9 pessoas posicionadas sobre cada uma das lajes L5 e L6, conforme ilustrado nas Figuras 176 e 177. Na sequência, as Figuras 178 a 185 apresentam graficamente as respostas dinâmicas (deslocamentos e acelerações) da seção estrutural mais crítica, conforme resultados apresentados na Tabela 45. Neste sentido, esses resultados foram obtidos mediante o emprego das funções de carregamento dinâmico ("força-dura": Faisca [28], SCI [57] e AISC [3]) e o modelo biodinâmico desenvolvido neste estudo.

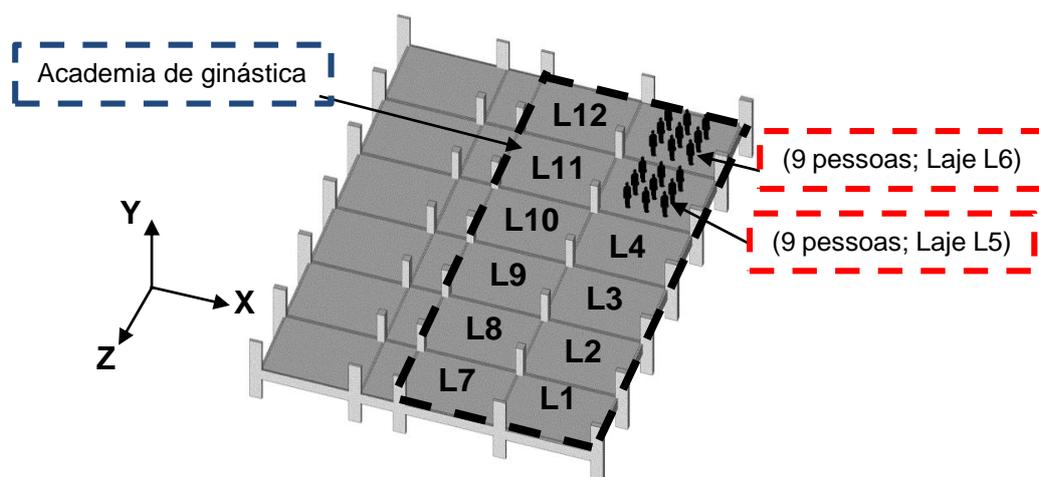


Figura 176 - Vista isométrica MC-XI (18 Pessoas)

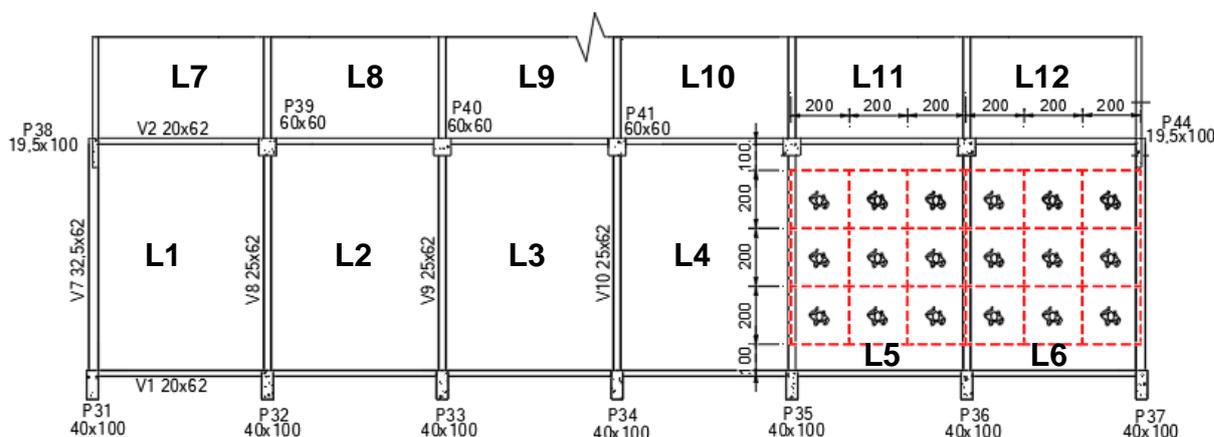
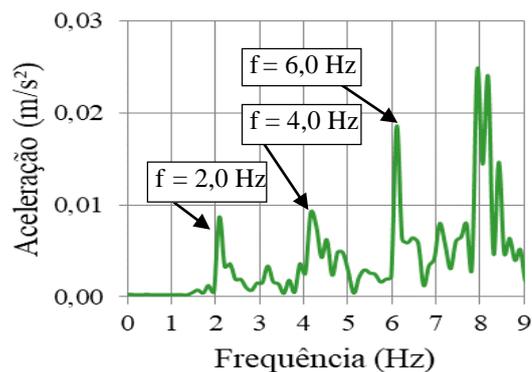
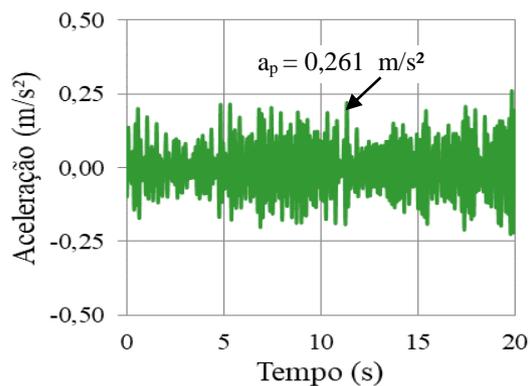
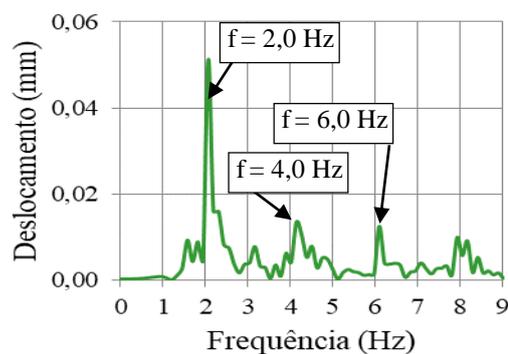
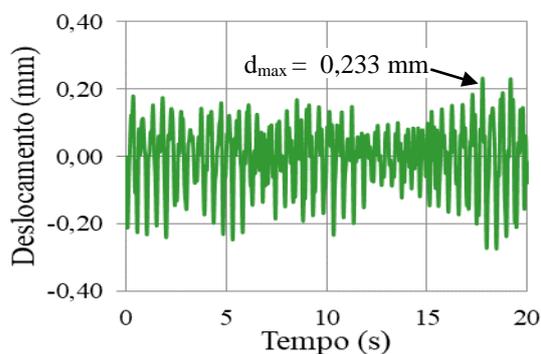


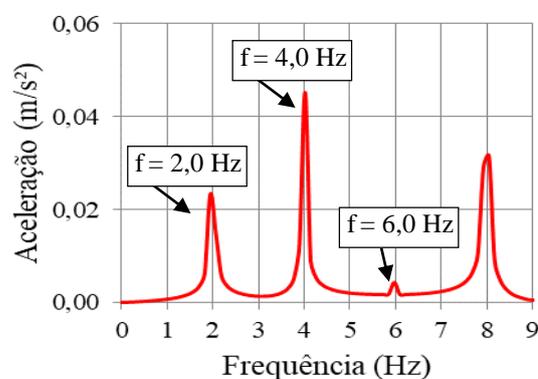
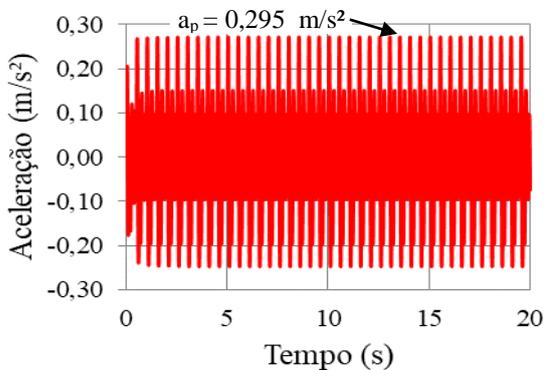
Figura 177 - Vista em planta MC-XI (18 pessoas)



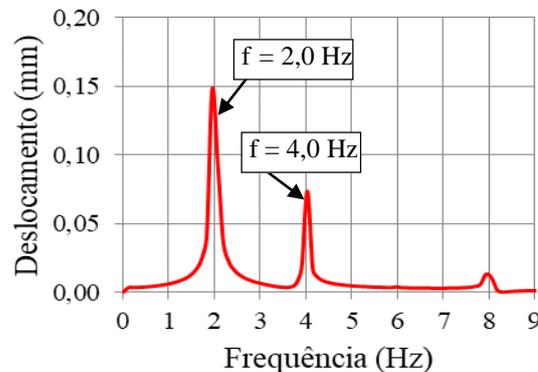
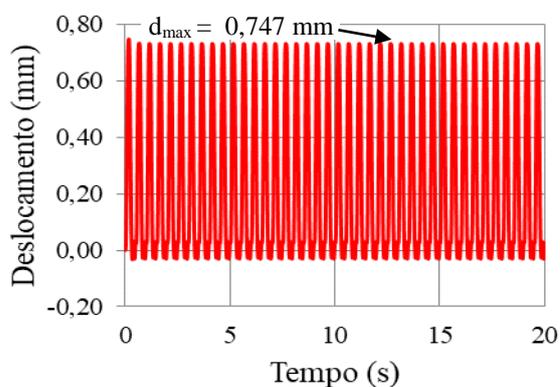
**Figura 178 - Aceleração na seção central da Laje L5 (MC-XI; Biodinâmico)**



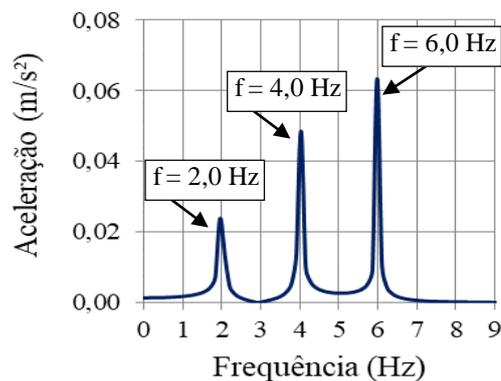
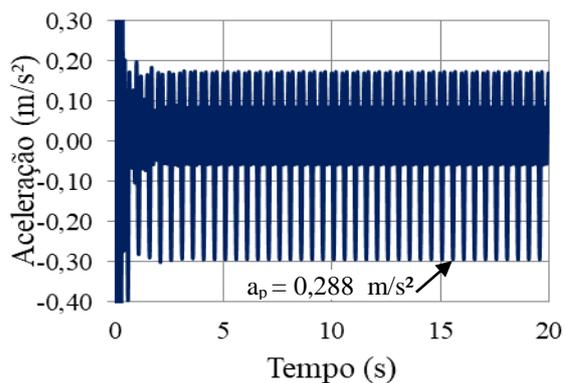
**Figura 179 - Deslocamento na seção central da Laje L5 (MC-XI; Biodinâmico)**



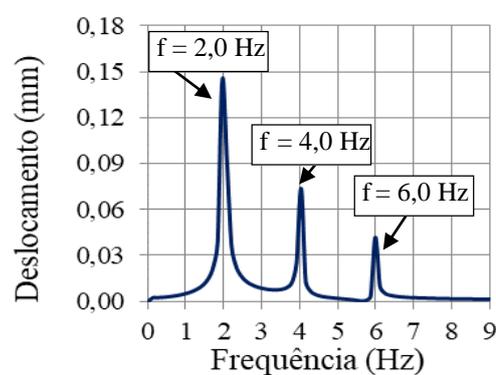
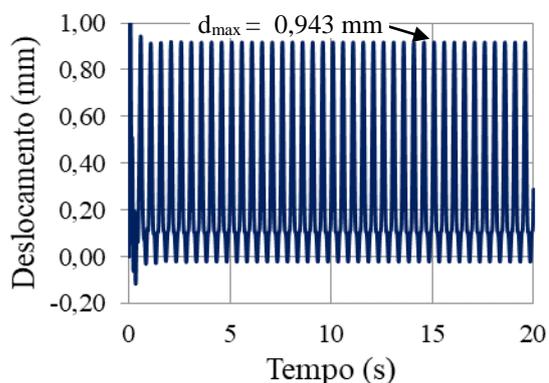
**Figura 180 - Aceleração na seção central da Laje L5 (MC-XI; Faisca)**



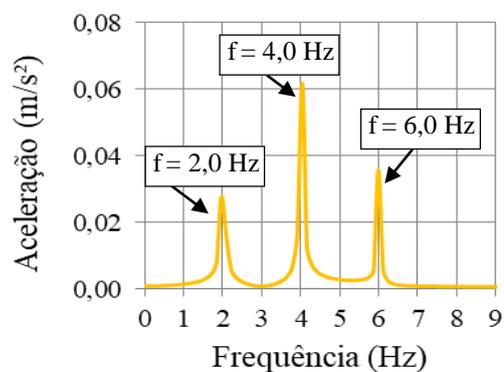
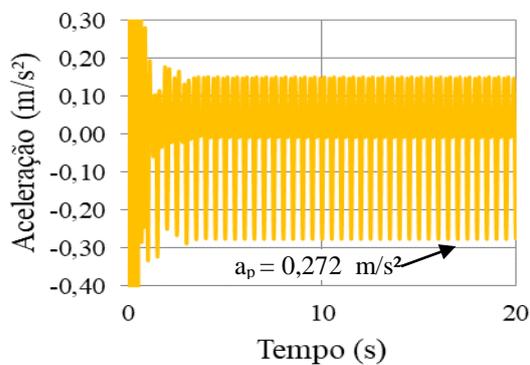
**Figura 181 - Deslocamento na seção central da Laje L5 (MC-XI; Faisca)**



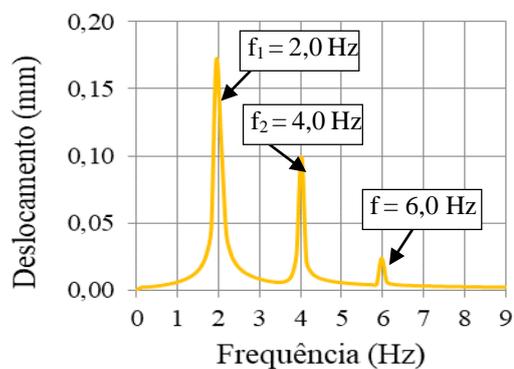
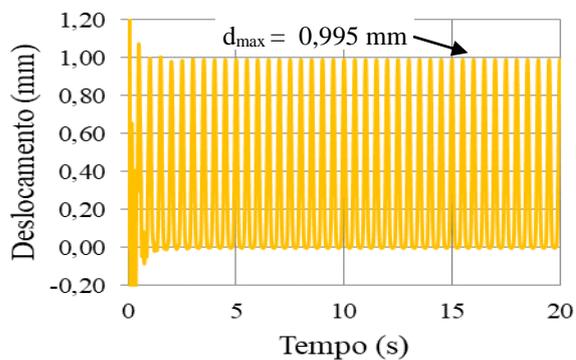
**Figura 182 - Aceleração na seção central da Laje L5 (MC-XI; SCI)**



**Figura 183 - Deslocamento na seção central da Laje L5 (MC-XI; SCI)**



**Figura 184 - Aceleração na seção central da Laje L5 (MC-XI; AISC)**



**Figura 185 - Deslocamento na seção central da Laje L5 (MC-XI; SCI)**

**Tabela 45 - Resposta estrutural dinâmica do piso investigado: MC-XI**

LAJE	Biodinâmico			Faisca [28]			SCI [57]			AISC [3]		
	$a_p$	$a_{w,rms}$	VDV									
	m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>1,75</sup>	m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>1,75</sup>	m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>1,75</sup>	m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>1,75</sup>
L1	0,024	0,008	0,025	0,004	0,011	0,032	0,011	0,032	0,095	0,010	0,005	0,015
L2	0,038	0,013	0,039	0,002	0,012	0,035	0,007	0,035	0,103	0,016	0,008	0,024
L3	0,060	0,020	0,059	0,007	0,017	0,051	0,010	0,050	0,149	0,042	0,022	0,064
L4	0,141	0,045	0,132	0,036	0,032	0,093	0,031	0,082	0,244	0,083	0,039	0,115
<b>L5</b>	<b>0,261</b>	<b>0,084</b>	<b>0,248</b>	<b>0,295</b>	<b>0,144</b>	<b>0,428</b>	<b>0,288</b>	<b>0,239</b>	<b>0,707</b>	<b>0,272</b>	<b>0,123</b>	<b>0,365</b>
<b>L6</b>	<b>0,167</b>	<b>0,060</b>	<b>0,178</b>	<b>0,296</b>	<b>0,151</b>	<b>0,448</b>	<b>0,300</b>	<b>0,277</b>	<b>0,821</b>	<b>0,243</b>	<b>0,116</b>	<b>0,344</b>
L7	0,030	0,009	0,027	0,002	0,007	0,019	0,007	0,019	0,057	0,007	0,004	0,011
L8	0,024	0,008	0,024	0,002	0,013	0,037	0,006	0,037	0,109	0,013	0,006	0,019
L9	0,061	0,019	0,057	0,002	0,022	0,065	0,006	0,065	0,193	0,024	0,012	0,036
L10	0,076	0,022	0,065	0,002	0,022	0,065	0,016	0,094	0,277	0,042	0,021	0,063
L11	0,074	0,026	0,077	0,006	0,032	0,094	0,031	0,119	0,353	0,067	0,030	0,090
L12	0,086	0,031	0,092	0,032	0,043	0,126	0,024	0,081	0,238	0,050	0,023	0,068

Conforme evidenciado na Tabela 45, referente ao caso de carregamento dinâmico [MC-XI: 18 pessoas; sobre as lajes L5 e L6], constata-se que os efeitos dinâmicos máximos ocorreram sobre as lajes onde o carregamento é aplicado. Assim sendo, no que se refere aos modelos matemáticos de carregamento dinâmico "forçada", os resultados mais elevados correspondem a: SCI [57], [Laje L6:  $a_p = 0,300$  m/s<sup>2</sup>;  $a_{w,rms} = 0,277$  m/s<sup>2</sup>; VDV = 0,821 m/s<sup>1,75</sup> (SCI)], Faisca [28], [Laje L6:  $a_p = 0,296$  m/s<sup>2</sup>;  $a_{w,rms} = 0,151$  m/s<sup>2</sup>; VDV = 0,448 m/s<sup>1,75</sup> (Faisca)] e AISC [3], [Laje L6:  $a_p = 0,243$  m/s<sup>2</sup>;  $a_{w,rms} = 0,116$  m/s<sup>2</sup>; VDV = 0,344 m/s<sup>1,75</sup> (AISC)].

Por outro lado, o modelo biodinâmico apresentou respostas dinâmicas de menor magnitude sobre o sistema estrutural, resultando em [Laje L6:  $a_p = 0,167$  m/s<sup>2</sup>;  $a_{w,rms} = 0,060$  m/s<sup>2</sup>; VDV = 0,178 m/s<sup>1,75</sup> (sistemas biodinâmicos)]. Tal fato ocorre em virtude da incorporação das características dinâmicas dos indivíduos, considerando a interação dinâmica pessoa-estrutura, bem como o amortecimento e a disposição das pessoas sobre o piso.

No que tange ao critério de conforto humano, ressalta-se que o modelo proposto por SCI [57] ultrapassa os critérios de conforto humano, pois o valor de VDV da ordem de 0,821 m/s<sup>1,75</sup> [VDV = 0,821 m/s<sup>1,75</sup>; Laje L6] excede os limites estabelecidos por Setareh [161] (VDV < 0,5) e Ellis e Littler [60] (VDV < 0,66).

### 10.3.3 Modelo de carregamento XII (MC-XII)

Em continuidade, o modelo de carregamento XII [MC-XII: 18 pessoas] corresponde ao caso de carregamento decorrente da excitação do piso de concreto por um grupo de 18 pessoas exercendo atividades humanas rítmicas, sendo 9 pessoas posicionadas sobre cada uma das lajes L2 e L5 (ver Figuras 186 e 187). Neste sentido, os resultados das respostas dinâmicas [aceleração de pico ( $a_p$ ), aceleração RMS ( $a_{w,rms}$ ) e valores de dose de vibração (VDV)] referentes à cada laje estudada no âmbito deste estudo são apresentados na Tabela 46. Ademais, com referência as respostas dinâmicas (deslocamentos e acelerações) para a seção estrutural mais crítica associadas aos modelos ("força-dura": Faisca [28], SCI [57] e AISC [3]), e o modelo biodinâmico, ressalta-se que estes gráficos encontram-se expressos no Apêndice H.

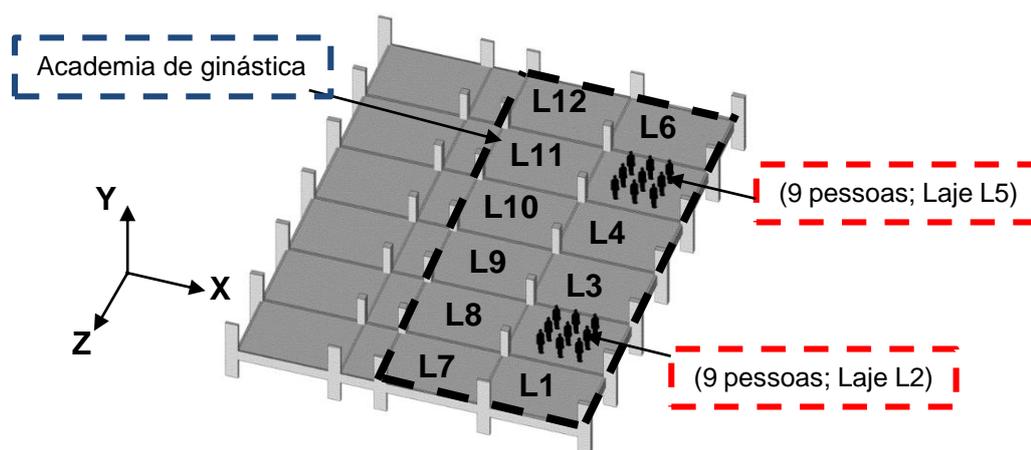


Figura 186 - Vista isométrica MC-XII (18 Pessoas)

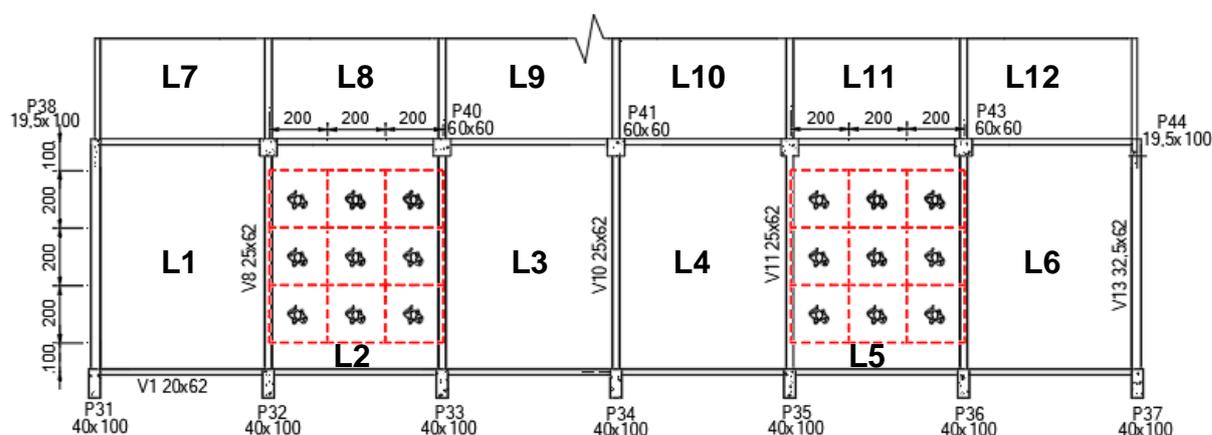


Figura 187 - Vista em planta MC-XII (18 pessoas)]

**Tabela 46 - Resposta estrutural dinâmica do piso investigado: MC-XII**

LAJE	Biodinâmico			Faisca [28]			SCI [57]			AISC [3]		
	$a_p$	$a_{w,rms}$	VDV									
	m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>1,75</sup>	m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>1,75</sup>	m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>1,75</sup>	m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>1,75</sup>
L1	0,130	0,043	0,128	0,091	0,044	0,130	0,039	0,040	0,119	0,041	0,110	0,324
<b>L2</b>	<b>0,267</b>	<b>0,088</b>	<b>0,261</b>	<b>0,316</b>	<b>0,146</b>	<b>0,432</b>	<b>0,330</b>	<b>0,158</b>	<b>0,468</b>	<b>0,326</b>	<b>0,250</b>	<b>0,740</b>
L3	0,149	0,048	0,141	0,087	0,040	0,117	0,035	0,033	0,099	0,043	0,089	0,264
L4	0,110	0,039	0,117	0,086	0,040	0,117	0,035	0,033	0,099	0,043	0,089	0,264
<b>L5</b>	<b>0,211</b>	<b>0,073</b>	<b>0,215</b>	<b>0,316</b>	<b>0,146</b>	<b>0,432</b>	<b>0,329</b>	<b>0,158</b>	<b>0,468</b>	<b>0,326</b>	<b>0,250</b>	<b>0,739</b>
L6	0,098	0,036	0,106	0,091	0,044	0,130	0,039	0,040	0,119	0,041	0,110	0,324
L7	0,060	0,025	0,075	0,049	0,028	0,084	0,004	0,025	0,074	0,013	0,076	0,226
L8	0,077	0,029	0,086	0,080	0,040	0,118	0,031	0,026	0,076	0,031	0,066	0,194
L9	0,068	0,022	0,066	0,044	0,022	0,066	0,003	0,027	0,080	0,009	0,079	0,234
L10	0,063	0,021	0,063	0,044	0,022	0,066	0,003	0,027	0,080	0,009	0,079	0,234
L11	0,069	0,025	0,075	0,080	0,040	0,117	0,003	0,027	0,080	0,031	0,066	0,194
L12	0,071	0,024	0,071	0,049	0,028	0,084	0,031	0,026	0,076	0,013	0,076	0,226

Com base nos resultados apresentados na Tabela 46, referente ao caso de carregamento dinâmico [MC-XII: 18 pessoas; sobre as lajes L2 e L5], observam-se diferenças nos valores das respostas dinâmicas obtidas mediante o emprego de sistemas biodinâmicos em comparação com as demais funções matemáticas de carregamento dinâmico "força-dura". Neste sentido, o modelo biodinâmico registra valores inferiores, a saber: [Laje L5:  $a_p = 0,211$  m/s<sup>2</sup>;  $a_{w,rms} = 0,073$  m/s<sup>2</sup>; VDV = 0,215 m/s<sup>1,75</sup> (sistemas biodinâmicos)]. Em contrapartida, os modelos "força-dura" de Faisca [28], SCI [57] e AISC [3] indicam valores máximos referente à aceleração de pico da ordem de 0,316 m/s<sup>2</sup>, 0,329 m/s<sup>2</sup> e 0,326 m/s<sup>2</sup>, respectivamente.

Cabe ressaltar, ademais, que diante dessa configuração de carregamento, o modelo preconizado pelo guia de projeto AISC [3] indica um valor de VDV correspondente a 0,736 m/s<sup>1,75</sup> [VDV: 0,736 m/s<sup>1,75</sup> ; laje L5], transgredindo, dessa forma, os parâmetros estabelecidos associados ao conforto humano, conforme limites expressos nas seguintes referências [(VDV < 0,5 [161] e < 0,66 [60])].

### 10.3.4 Modelo de carregamento XIII (MC-XIII)

Dando sequência no trabalho, o modelo de carregamento XIII [MC-XIII: 27 pessoas] refere-se ao caso de carregamento dinâmico (atividades humanas rítmicas) induzido por um grupo de 27 pessoas, sendo estas dispostas sobre as lajes L1, L2 e L3, conforme ilustrado nas Figuras 188 e 189. Diante do exposto, são expressos na Tabela 47 os resultados referentes as respostas obtidas em cada uma das lajes investigadas, tendo como referência os critérios de projeto de conforto humano. Adicionalmente, os resultados dos gráficos associados as respostas dinâmicas (deslocamentos e acelerações) observados para os casos mais críticos referentes à aplicação dos modelos de "força-dura" e sistemas biodinâmicos, são expressos no Apêndice H.

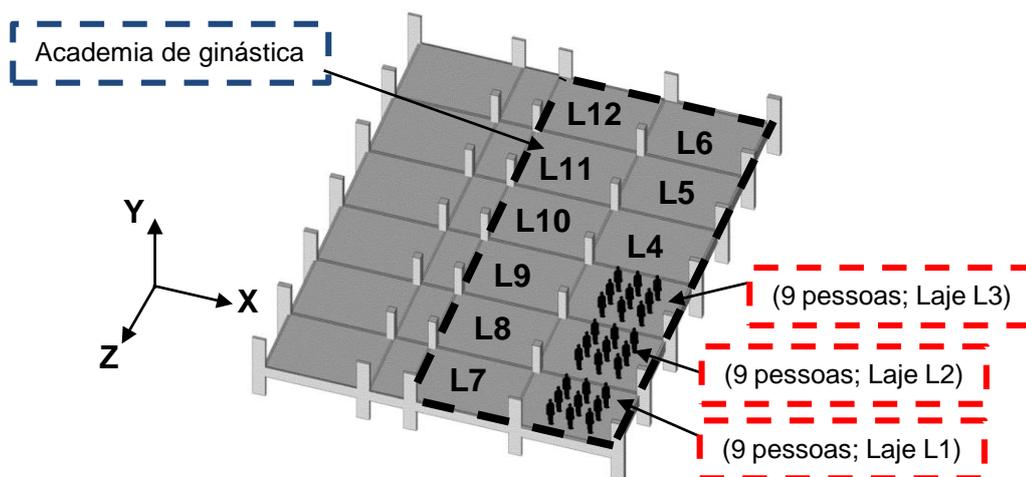


Figura 188 - Vista isométrica MC-XIII (27 Pessoas)

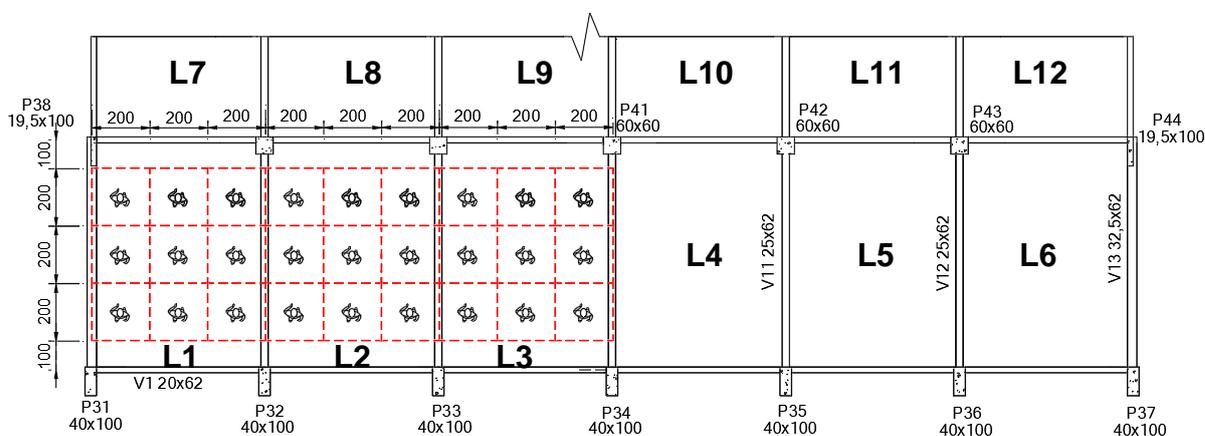


Figura 189 - Vista em planta MC-XIII (27 pessoas)

**Tabela 47 - Resposta estrutural dinâmica do piso investigado: MC-XIII**

LAJE	Biodinâmico			Faisca [28]			SCI [57]			AISC [3]		
	$a_p$	$a_{w,rms}$	VDV									
	m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>1,75</sup>	m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>1,75</sup>	m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>1,75</sup>	m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>1,75</sup>
L1	<b>0,159</b>	<b>0,054</b>	<b>0,159</b>	<b>0,263</b>	<b>0,120</b>	<b>0,356</b>	<b>0,272</b>	<b>0,139</b>	<b>0,412</b>	<b>0,289</b>	<b>0,257</b>	<b>0,760</b>
L2	<b>0,238</b>	<b>0,075</b>	<b>0,222</b>	<b>0,236</b>	<b>0,114</b>	<b>0,337</b>	<b>0,231</b>	<b>0,128</b>	<b>0,378</b>	<b>0,252</b>	<b>0,257</b>	<b>0,761</b>
L3	<b>0,219</b>	<b>0,067</b>	<b>0,200</b>	<b>0,302</b>	<b>0,134</b>	<b>0,396</b>	<b>0,280</b>	<b>0,138</b>	<b>0,409</b>	<b>0,294</b>	<b>0,237</b>	<b>0,702</b>
L4	0,115	0,035	0,104	0,087	0,043	0,127	0,032	0,033	0,096	0,036	0,086	0,255
L5	0,068	0,019	0,058	0,048	0,025	0,073	0,005	0,020	0,059	0,007	0,058	0,170
L6	0,033	0,010	0,029	0,015	0,008	0,023	0,003	0,011	0,032	0,009	0,031	0,091
L7	0,084	0,031	0,091	0,049	0,023	0,067	0,022	0,028	0,082	0,027	0,076	0,224
L8	0,065	0,024	0,072	0,076	0,040	0,117	0,031	0,060	0,178	0,033	0,170	0,503
L9	0,098	0,033	0,097	0,081	0,041	0,120	0,032	0,044	0,129	0,030	0,120	0,355
L10	0,080	0,027	0,079	0,051	0,026	0,077	0,032	0,044	0,129	0,005	0,073	0,217
L11	0,027	0,011	0,033	0,028	0,014	0,042	0,003	0,026	0,076	0,008	0,052	0,154
L12	0,041	0,013	0,039	0,015	0,008	0,023	0,003	0,018	0,054	0,011	0,029	0,086

Consoante à Tabela 47, é possível constatar que os efeitos dinâmicos máximos, referentes ao [MC-XIII: 27 pessoas; sobre as lajes L1, L2 e L3], manifestam-se sobre as lajes onde o carregamento é imposto. Ao comparar os resultados de aceleração do piso, com base na aplicação dos modelos "força-dura" e sistemas biodinâmicos, são observados os seguintes resultados para essas metodologias de análise: [laje L2:  $a_p = 0,238$  m/s<sup>2</sup> (sistemas biodinâmicos)]; [laje L3:  $a_p = 0,302$  m/s<sup>2</sup> (Faisca)]; [laje L3:  $a_p = 0,280$  m/s<sup>2</sup> (SCI)] e [laje L3:  $a_p = 0,294$  m/s<sup>2</sup> (AISC)], percebe-se respostas de menor intensidade mediante o emprego de sistemas biodinâmicos, sendo esses resultados justificados devido a implementação das características dos indivíduos durante a formulação matemática do método, o que pode reduzir a resposta dinâmica observada sobre o piso. Ao analisar os resultados com base no emprego do modelo AISC [3], nota-se um valor máximo de VDV correspondente a 0,761 m/s<sup>1,75</sup> [0,761 m/s<sup>1,75</sup>; Laje L2], violando assim os critérios estabelecidos associados ao conforto humano, conforme as referências [(VDV = 0,707 m/s<sup>1,75</sup> < 0,5 [161] e < 0,66 [60])].

### 10.3.5 Modelo de carregamento XIV (MC-XIV)

Nesta seção, apresenta-se o modelo de carregamento XIV [MC-XIV: 27 pessoas], este diz respeito à situação de carregamento dinâmico induzido por um grupo de 27 pessoas exercendo atividades humanas rítmicas sobre a laje de concreto armado, sendo 9 pessoas posicionadas sobre cada uma das lajes L4, L5 e L6, conforme ilustrado nas Figuras 190 e 191.

Na sequência, as Figuras 192 a 199 apresentam graficamente as respostas dinâmicas (deslocamentos e acelerações) da seção estrutural mais crítica, conforme resultados apresentados na Tabela 48, mediante o emprego das funções de carregamento dinâmico ("força-dura": Faisca [28], SCI [57] e AISC [3]) e o modelo biodinâmico desenvolvido neste estudo.

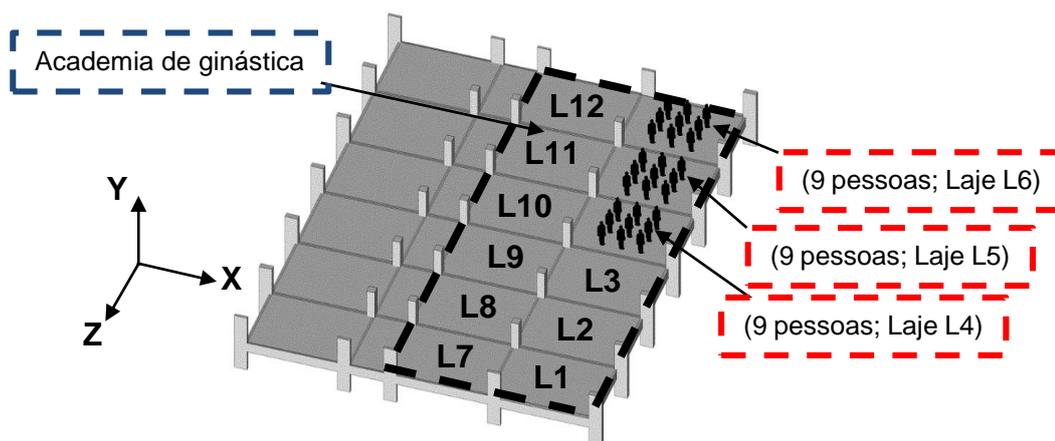


Figura 190 - Vista isométrica MC-XIV (27 Pessoas)

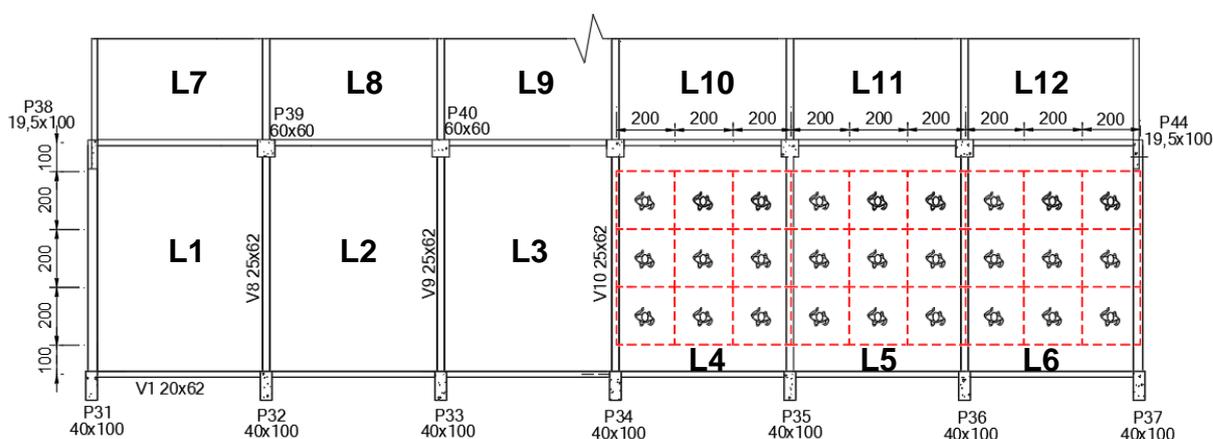
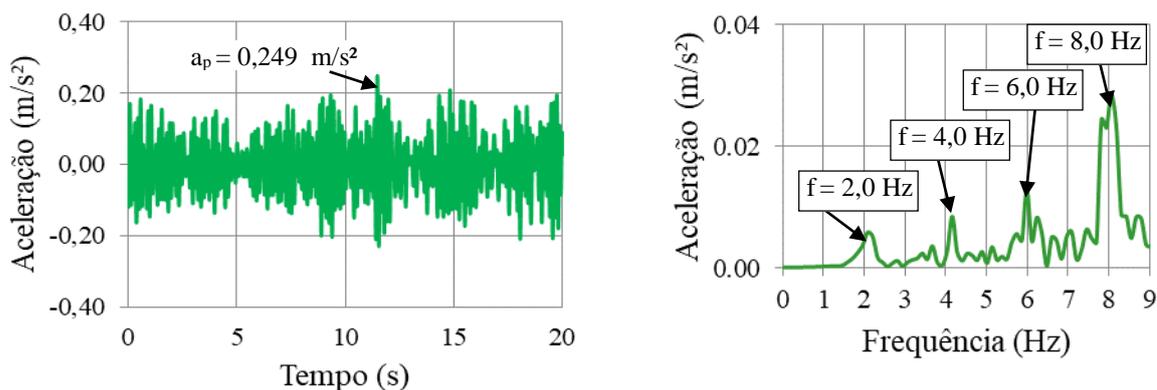
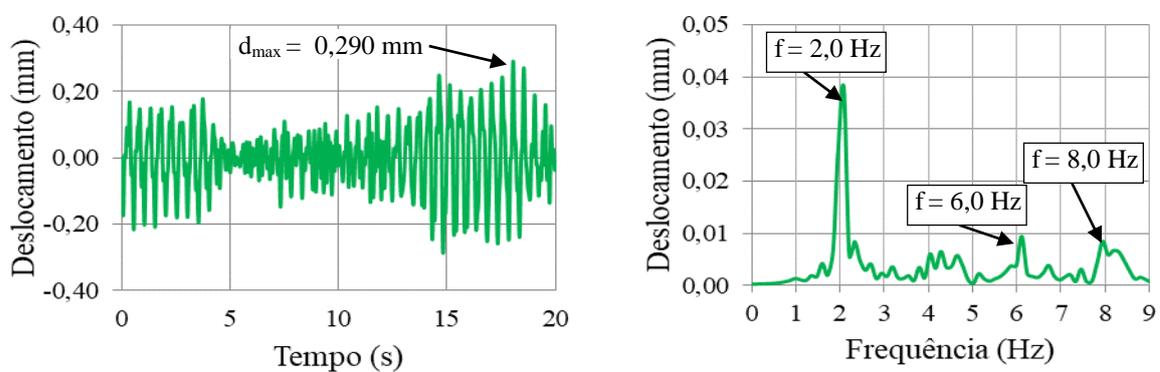


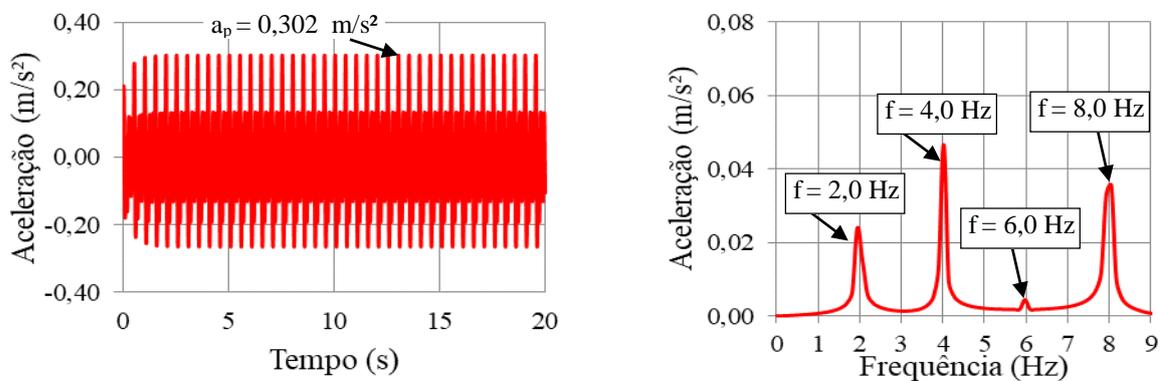
Figura 191 - Vista em planta MC-XIV (27 pessoas)



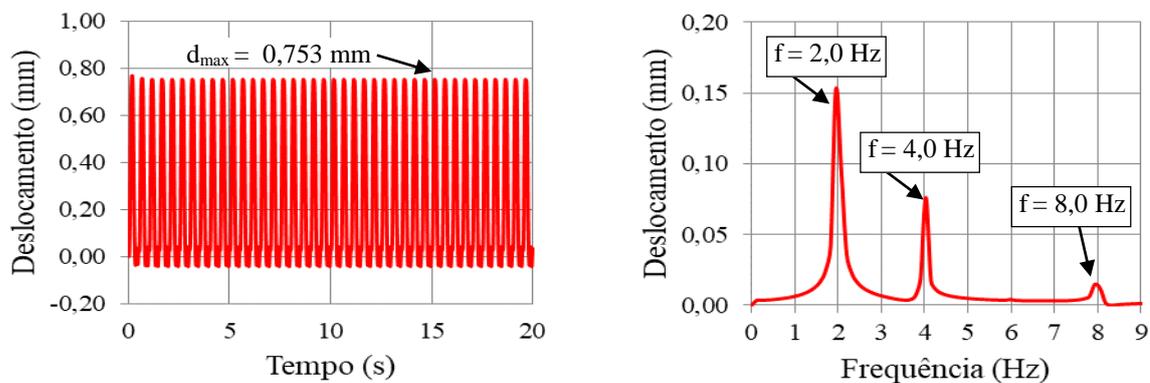
**Figura 192 - Aceleração na seção central da Laje L5 (MC-XIV; Biodinâmico)**



**Figura 193 - Deslocamento na seção central da Laje L5 (MC-XIV; Biodinâmico)**



**Figura 194 - Aceleração na seção central da Laje L4 (MC-XIV; Faisca)**



**Figura 195 - Deslocamento na seção central da Laje L4 (MC-XIV; Faisca)**

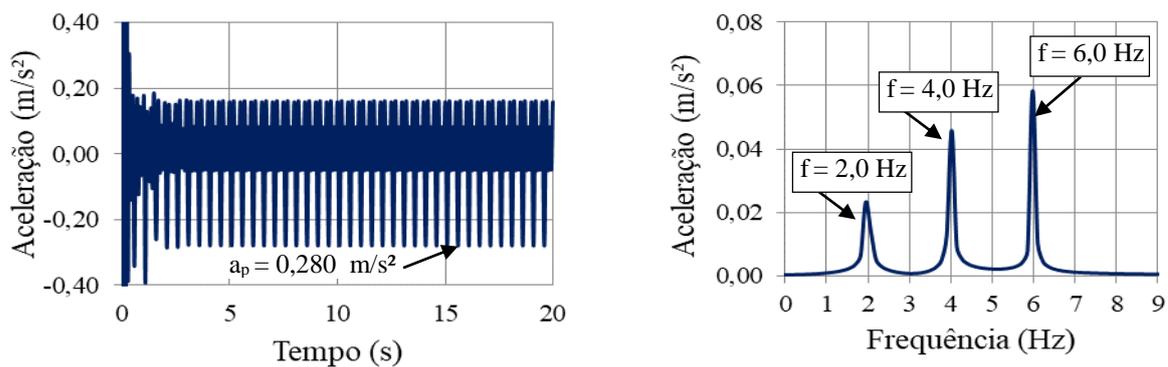


Figura 196 - Aceleração na seção central da Laje L4 (MC-XIV; SCI)

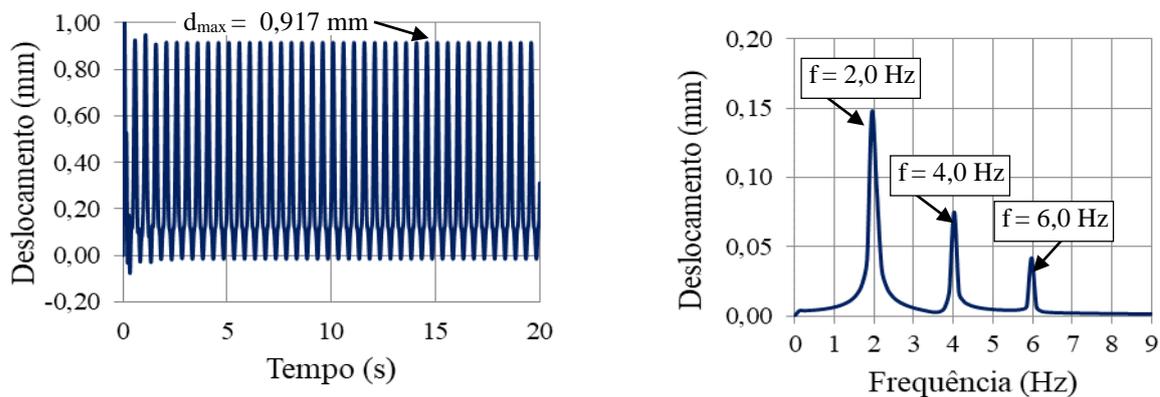


Figura 197 - Deslocamento na seção central da Laje L4 (MC-XIV; SCI)

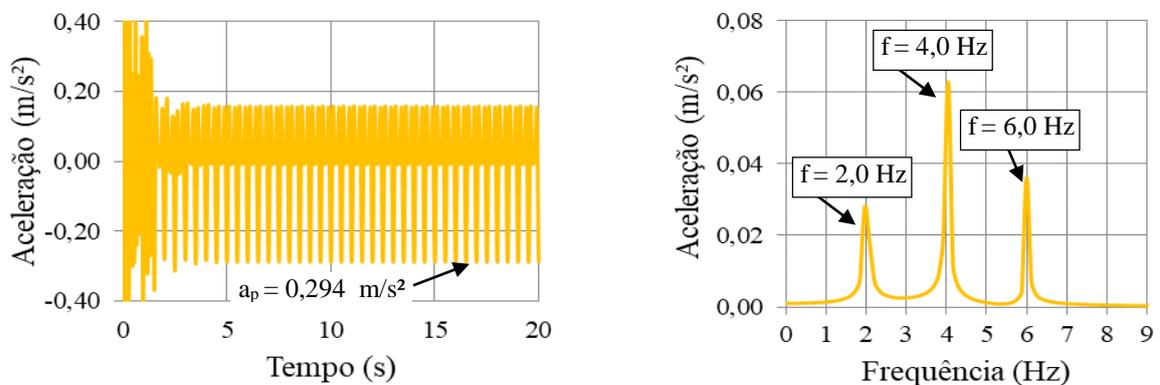


Figura 198 - Aceleração na seção central da Laje L4 (MC-XIV; AISC)

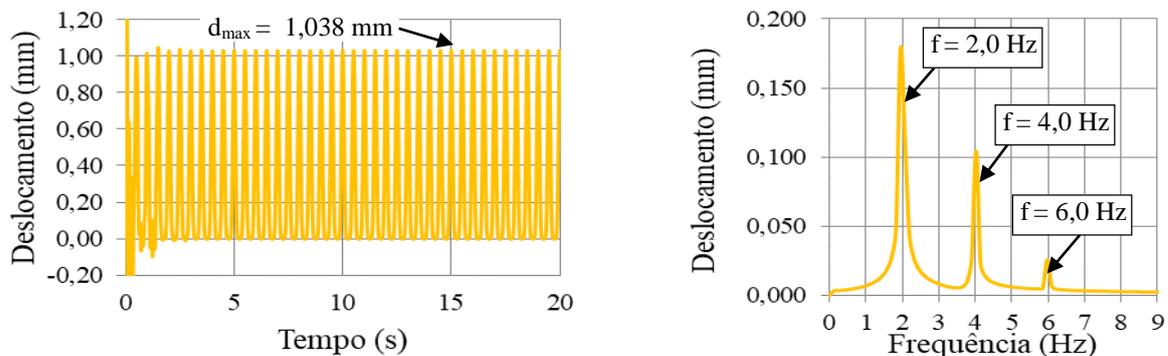


Figura 199 - Deslocamento na seção central da Laje L4 (MC-XIV; AISC)

**Tabela 48 - Resposta estrutural dinâmica do piso investigado: MC-XIV**

LAJE	Biodinâmico			Faisca [28]			SCI [57]			AISC [3]		
	$a_p$	$a_{w,rms}$	VDV									
	m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>1,75</sup>	m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>1,75</sup>	m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>1,75</sup>	m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>1,75</sup>
L1	0,031	0,011	0,031	0,015	0,008	0,023	0,003	0,011	0,032	0,015	0,008	0,023
L2	0,043	0,018	0,054	0,048	0,024	0,072	0,005	0,020	0,059	0,048	0,024	0,072
L3	0,095	0,029	0,086	0,087	0,043	0,127	0,032	0,033	0,096	0,087	0,043	0,127
<b>L4</b>	<b>0,194</b>	<b>0,059</b>	<b>0,175</b>	<b>0,302</b>	<b>0,134</b>	<b>0,396</b>	<b>0,280</b>	<b>0,138</b>	<b>0,409</b>	<b>0,302</b>	<b>0,134</b>	<b>0,396</b>
<b>L5</b>	<b>0,249</b>	<b>0,078</b>	<b>0,231</b>	<b>0,236</b>	<b>0,114</b>	<b>0,336</b>	<b>0,231</b>	<b>0,128</b>	<b>0,378</b>	<b>0,236</b>	<b>0,114</b>	<b>0,336</b>
<b>L6</b>	<b>0,201</b>	<b>0,062</b>	<b>0,182</b>	<b>0,263</b>	<b>0,120</b>	<b>0,356</b>	<b>0,272</b>	<b>0,139</b>	<b>0,412</b>	<b>0,263</b>	<b>0,120</b>	<b>0,356</b>
L7	0,036	0,015	0,045	0,015	0,008	0,023	0,004	0,010	0,029	0,015	0,008	0,023
L8	0,023	0,010	0,030	0,029	0,014	0,042	0,003	0,018	0,054	0,029	0,014	0,042
L9	0,067	0,023	0,069	0,051	0,026	0,077	0,003	0,026	0,076	0,051	0,026	0,077
L10	0,082	0,027	0,080	0,081	0,041	0,120	0,003	0,026	0,076	0,081	0,041	0,120
L11	0,068	0,025	0,075	0,075	0,039	0,116	0,032	0,044	0,129	0,075	0,039	0,116
L12	0,099	0,036	0,106	0,049	0,023	0,067	0,031	0,060	0,177	0,049	0,023	0,067

Segundo os resultados presentes na Tabela 48, associados ao [MC-XIV: 27 pessoas; sobre as lajes L4, L5 e L6], evidenciam-se que os efeitos dinâmicos máximos referente a esse caso de carregamento ocorrem sobre as lajes L4, L5 e L6, ou seja, onde o carregamento dinâmico é imposto. No que diz respeito aos valores referentes à resposta dinâmica registrados sobre a laje L4, constata-se que a modelagem de sistemas biodinâmicos apresentou magnitudes inferiores, resultando em: [ $a_p = 0,194$  m/s<sup>2</sup>,  $a_{w,rms} = 0,059$  m/s<sup>2</sup> e  $VDV = 0,175$  m/s<sup>1,75</sup>], enquanto os demais modelos de carregamento dinâmico "força-dura" tendem a produzir valores mais elevados. Tais diferenças podem ser justificadas pelo fato de a modelagem de sistemas biodinâmicos considerar em sua formulação matemática variáveis que podem impactar diretamente sobre os efeitos da interação dinâmica pessoa-estrutura.

Por fim, no que se refere ao conforto humano, é importante destacar que as seções estruturais investigadas (L1 até L12), associadas à situação de carregamento [MC-XIV: 27 pessoas; sobre as lajes L4, L5 e L6], verifica-se que os critérios de projeto preconizados por [3], [60], [161] são integralmente atendidos com base na aplicação das metodologias de análise do carregamento dinâmico ("força-dura": Faisca [28], SCI [57] e AISC [3]) e sistemas biodinâmicos.

### 10.3.6 Modelo de carregamento XV (MC-XV)

Dando seguimento ao trabalho, o modelo de carregamento XV [MC-XV: 36 pessoas] refere-se ao caso de carregamento decorrente da excitação por um grupo de 36 pessoas praticando atividades humanas rítmicas sobre o piso investigado, sendo estas distribuídas as lajes L1 até L4 (ver Figuras 200 e 201). Assim sendo, os resultados referentes as respostas dinâmicas [aceleração de pico ( $a_p$ ), aceleração RMS ( $a_{w,rms}$ ) e valores de dose de vibração (VDV)] referentes à cada laje estudada no âmbito deste trabalho de pesquisa são apresentados na Tabela 49. Além disso, com referências as respostas dinâmicas (deslocamentos e acelerações) associada à seção estrutural mais crítica mediante emprego dos modelos ("força-dura": Faisca [28], SCI [57] e AISC [3]), e os modelos biodinâmicos, estes gráficos podem ser encontrados no no Apêndice H.

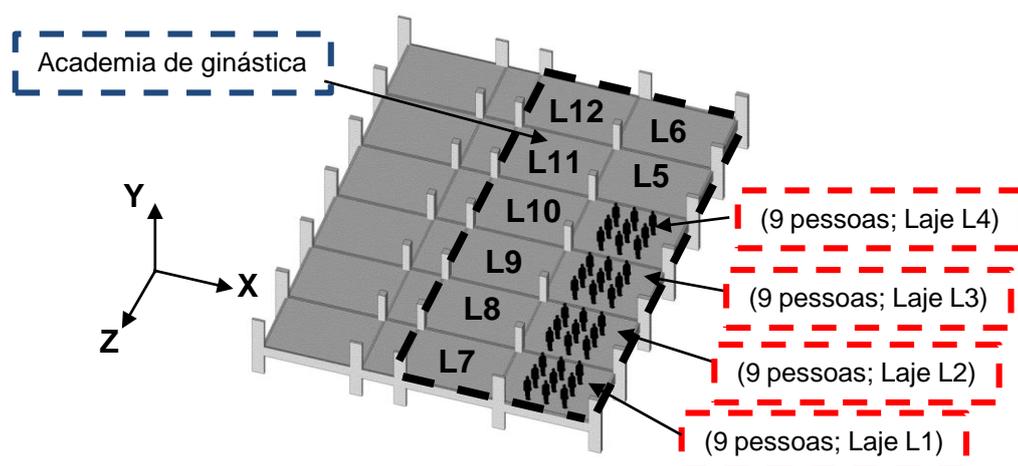


Figura 200 - Vista isométrica MC-XV (36 Pessoas)

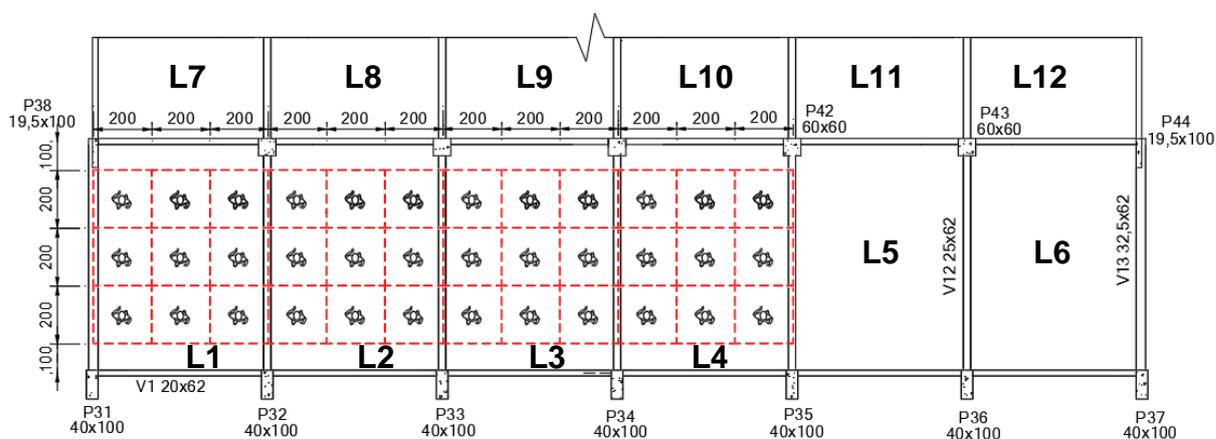


Figura 201 - Vista em planta MC-XV (36 pessoas)

**Tabela 49 - Resposta estrutural dinâmica do piso investigado: MC-XV**

LAJE	Biodinâmico			Faisca [28]			SCI [57]			AISC [3]		
	$a_p$	$a_{w,rms}$	VDV									
	m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>1,75</sup>	m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>1,75</sup>	m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>1,75</sup>	m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>1,75</sup>
L1	<b>0,144</b>	<b>0,046</b>	<b>0,136</b>	<b>0,266</b>	<b>0,121</b>	<b>0,358</b>	<b>0,254</b>	<b>0,133</b>	<b>0,392</b>	<b>0,291</b>	<b>0,254</b>	<b>0,751</b>
L2	<b>0,230</b>	<b>0,067</b>	<b>0,198</b>	<b>0,250</b>	<b>0,115</b>	<b>0,342</b>	<b>0,221</b>	<b>0,122</b>	<b>0,362</b>	<b>0,245</b>	<b>0,248</b>	<b>0,734</b>
L3	<b>0,302</b>	<b>0,079</b>	<b>0,232</b>	<b>0,267</b>	<b>0,123</b>	<b>0,365</b>	<b>0,229</b>	<b>0,126</b>	<b>0,373</b>	<b>0,266</b>	<b>0,254</b>	<b>0,751</b>
L4	<b>0,165</b>	<b>0,064</b>	<b>0,188</b>	<b>0,306</b>	<b>0,134</b>	<b>0,397</b>	<b>0,262</b>	<b>0,132</b>	<b>0,392</b>	<b>0,294</b>	<b>0,242</b>	<b>0,716</b>
L5	0,098	0,038	0,112	0,086	0,041	0,121	0,030	0,031	0,092	0,037	0,081	0,241
L6	0,061	0,022	0,064	0,041	0,021	0,062	0,007	0,021	0,061	0,017	0,059	0,175
L7	0,098	0,031	0,093	0,056	0,025	0,075	0,022	0,024	0,072	0,022	0,065	0,193
L8	0,071	0,023	0,068	0,075	0,040	0,120	0,031	0,062	0,184	0,036	0,174	0,514
L9	0,128	0,034	0,099	0,090	0,048	0,141	0,030	0,060	0,177	0,030	0,166	0,491
L10	0,081	0,028	0,082	0,087	0,043	0,128	0,030	0,060	0,177	0,031	0,098	0,291
L11	0,036	0,014	0,041	0,049	0,025	0,073	0,027	0,037	0,108	0,013	0,071	0,209
L12	0,061	0,021	0,063	0,022	0,011	0,033	0,004	0,025	0,074	0,004	0,045	0,133

De acordo com a Tabela 49, é possível constatar que os efeitos dinâmicos mais intensos relacionados ao [MC-XV: 36 pessoas; sobre as lajes L1 até L4] ocorrem nas lajes onde aplica-se o carregamento. Assim sendo, ao comparar os resultados fornecidos através dos modelos ("força-dura": Faisca [28], SCI [57] e AISC [3]), percebe-se que as respostas do modelo Faisca [28] tendem a se aproximar mais da modelagem de sistemas biodinâmicos, conforme resultado apresentado na tabela referente ao pico de aceleração [Laje L3:  $a_p = 0,302$  m/s<sup>2</sup>;  $a_{w,rms} = 0,079$  m/s<sup>2</sup>; VDV = 0,232 m/s<sup>1,75</sup> (sistemas biodinâmicos)] e [laje L4:  $a_p = 0,306$  m/s<sup>2</sup>;  $a_{w,rms} = 0,134$  m/s<sup>2</sup>; VDV = 0,397 m/s<sup>1,75</sup> (Faisca)]. No entanto, destaca-se que esses valores máximos de aceleração, são observados em lajes distintas. Cabe ressaltar que esses resultados podem ser justificados devido à coerência do fenômeno de ressonância, que pode ter impacto significativo sobre as respostas dinâmicas.

No entanto, ao comparar os resultados referentes aos valores médios de aceleração ( $a_{w,rms}$ ), nota-se claramente que os modelos "força-dura" indicam resultados mais elevados em comparação com os obtidos via emprego do modelo biodinâmico. Além disso, ressalta-se que o modelo proposto por AISC [3] ultrapassa os limites admissíveis de VDV em todas as lajes onde o carregamento é aplicado, conforme limites de conforto humano admissíveis [ $< 0,5$  [161] e  $< 0,66$  [60)].



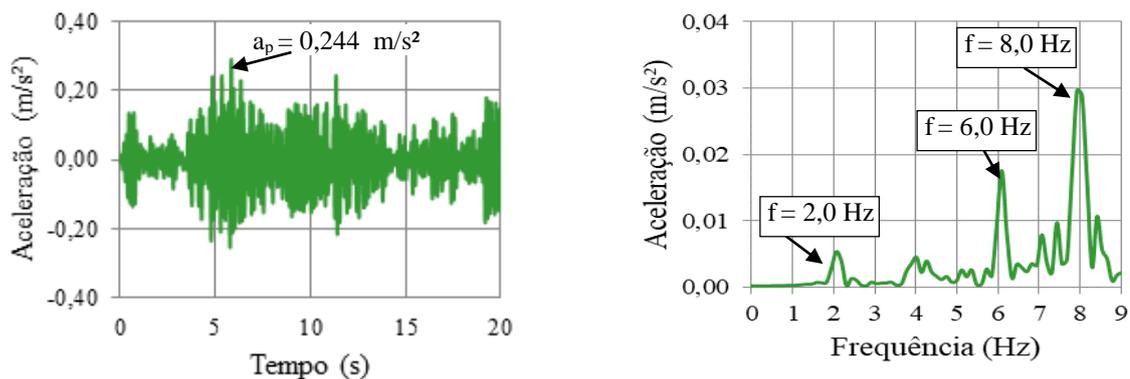


Figura 204 - Aceleração na seção central da Laje L4 (MC-XVI; Biodinâmico)

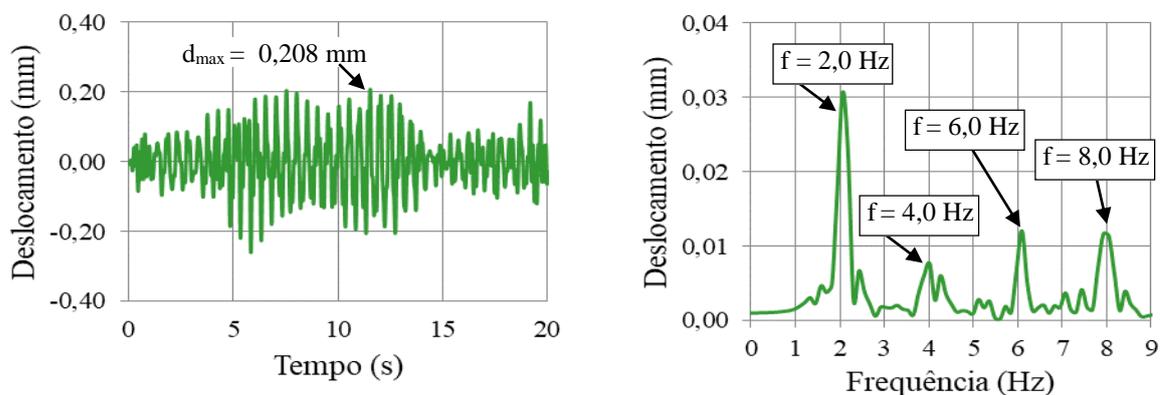


Figura 205 - Deslocamento na seção central da Laje L4 (MC-XVI; Biodinâmico)

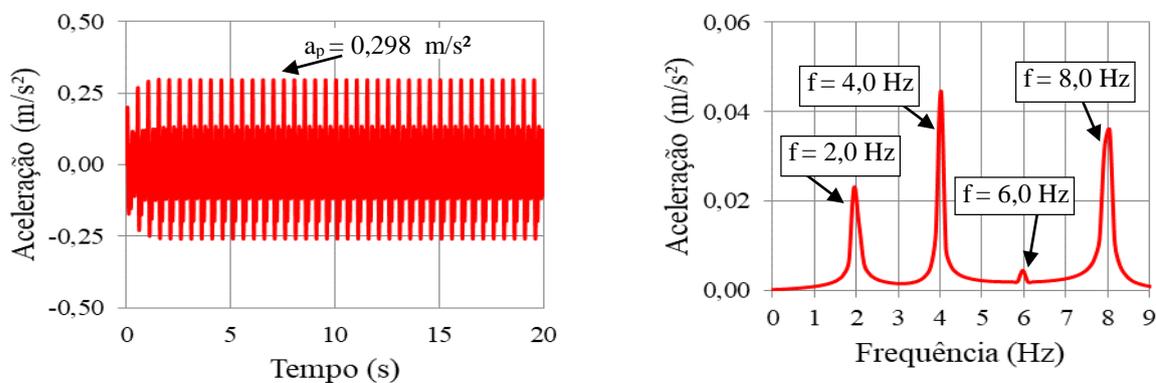


Figura 206 - Aceleração na seção central da Laje L2 (MC-XVI; Faisca)

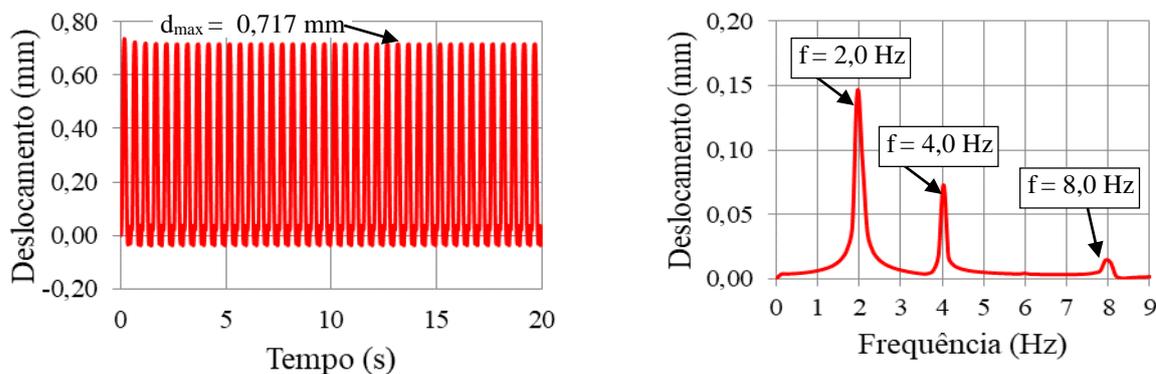


Figura 207 - Deslocamento na seção central da Laje L2 (MC-XVI; Faisca)

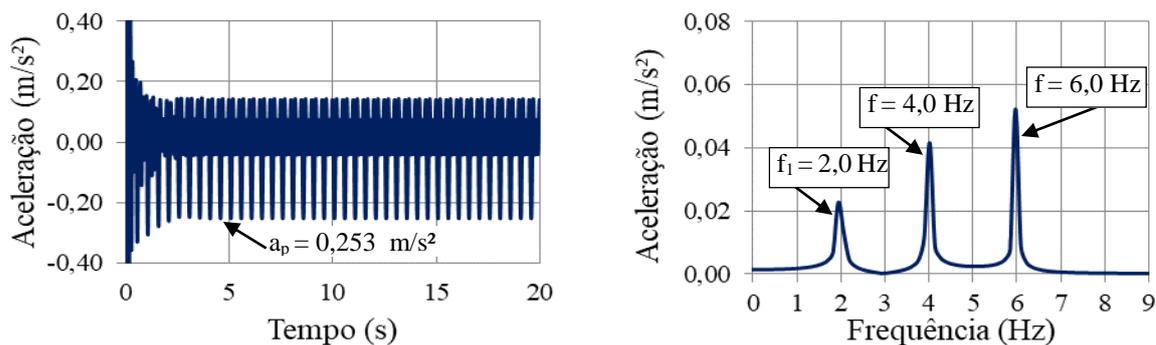


Figura 208 - Aceleração na seção central da Laje L2 (MC-XVI; SCI)

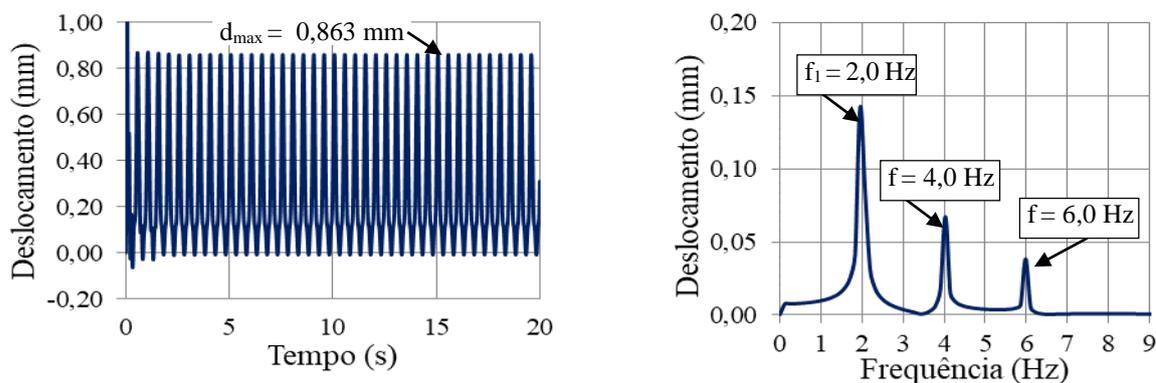


Figura 209 - Deslocamento na seção central da Laje L2 (MC-XVI; SCI)

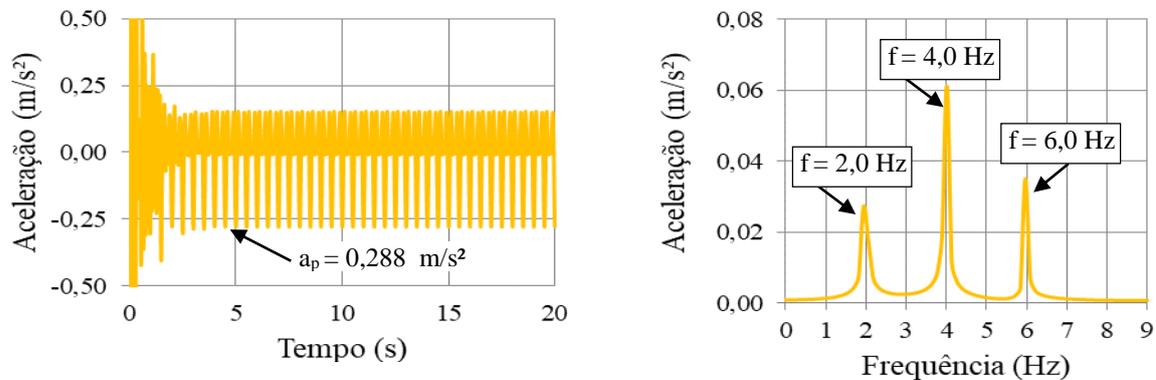


Figura 210 - Aceleração na seção central da Laje L2 (MC-XVI; AISC)

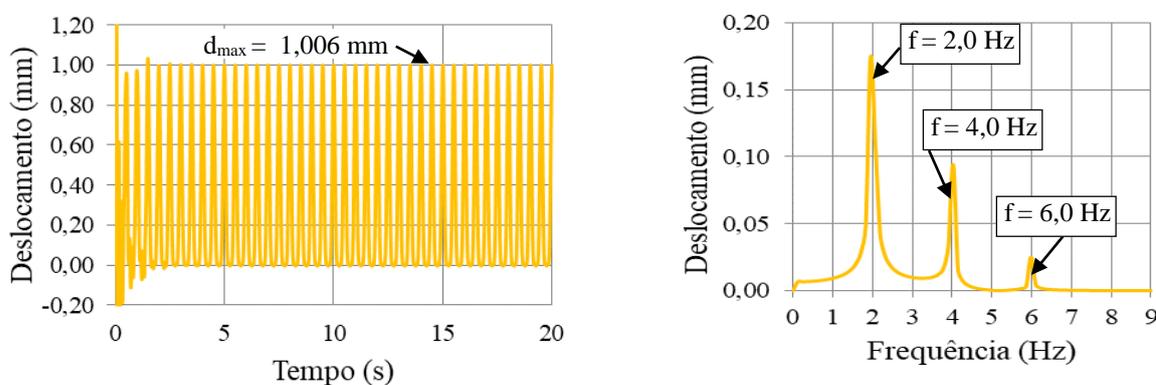


Figura 211 - Deslocamento na seção central da Laje L2 (MC-XVI; AISC)

**Tabela 50 - Resposta estrutural dinâmica do piso investigado: MC-XVI**

LAJE	Biodinâmico			Faisca [28]			SCI [57]			AISC [3]		
	$a_p$	$a_{w,rms}$	VDV									
	m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>1,75</sup>	m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>1,75</sup>	m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>1,75</sup>	m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>1,75</sup>
L1	0,097	0,028	0,084	0,079	0,035	0,105	0,029	0,036	0,105	0,035	0,096	0,285
L2	<b>0,168</b>	<b>0,056</b>	<b>0,165</b>	<b>0,298</b>	<b>0,131</b>	<b>0,387</b>	<b>0,253</b>	<b>0,127</b>	<b>0,376</b>	<b>0,288</b>	<b>0,229</b>	<b>0,678</b>
L3	<b>0,208</b>	<b>0,063</b>	<b>0,188</b>	<b>0,265</b>	<b>0,123</b>	<b>0,363</b>	<b>0,230</b>	<b>0,128</b>	<b>0,378</b>	<b>0,261</b>	<b>0,260</b>	<b>0,769</b>
L4	<b>0,244</b>	<b>0,077</b>	<b>0,229</b>	<b>0,265</b>	<b>0,123</b>	<b>0,363</b>	<b>0,230</b>	<b>0,128</b>	<b>0,378</b>	<b>0,261</b>	<b>0,260</b>	<b>0,769</b>
L5	<b>0,208</b>	<b>0,071</b>	<b>0,211</b>	<b>0,293</b>	<b>0,128</b>	<b>0,380</b>	<b>0,249</b>	<b>0,125</b>	<b>0,369</b>	<b>0,283</b>	<b>0,224</b>	<b>0,665</b>
L6	0,083	0,033	0,097	0,079	0,035	0,105	0,029	0,036	0,105	0,035	0,096	0,285
L7	0,057	0,020	0,059	0,042	0,022	0,065	0,003	0,019	0,058	0,009	0,056	0,166
L8	0,055	0,019	0,055	0,084	0,041	0,121	0,026	0,041	0,120	0,031	0,111	0,329
L9	0,101	0,031	0,091	0,089	0,048	0,143	0,030	0,056	0,166	0,033	0,155	0,460
L10	0,126	0,034	0,100	0,089	0,048	0,143	0,030	0,056	0,166	0,033	0,155	0,460
L11	0,062	0,023	0,069	0,083	0,040	0,119	0,030	0,056	0,166	0,032	0,110	0,326
L12	0,096	0,030	0,089	0,042	0,022	0,065	0,028	0,040	0,120	0,009	0,056	0,166

Conforme os dados da Tabela 50, associados ao [MC-XVI: 36 pessoas; sobre as lajes L2 até L5], fica evidente que o método matemático desenvolvido neste trabalho de pesquisa (sistemas biodinâmicos) fornece respostas dinâmicas inferiores às obtidas mediante o emprego dos modelos de "força-dura". Os resultados revelam, portanto, uma diferença significativa entre essas abordagens, especialmente nos valores de aceleração de pico, referentes à análise comparativa entre o modelo de carregamento dinâmico AISC [3], [laje L2:  $a_p = 0,288$  m/s<sup>2</sup>;  $a_{w,rms} = 0,229$  m/s<sup>2</sup>; VDV = 0,679 m/s<sup>1,75</sup> (AISC)] e a modelagem de sistemas biodinâmicos [laje L2:  $a_p = 0,168$  m/s<sup>2</sup>;  $a_{w,rms} = 0,056$  m/s<sup>2</sup>; VDV = 0,165 m/s<sup>1,75</sup> (modelo biodinâmico)].

No entanto, é importante destacar que o modelo proposto por AISC [3] ultrapassa os limites aceitáveis de conforto humano, em todas as lajes onde o carregamento é aplicado, de acordo com as referências associadas aos valores de VDV (< 0,5 [161] e < 0,66 [60]), enquanto a modelagem de sistemas biodinâmicos e as demais funções de carregamento dinâmico (Faisca [28] e SCI [57]) atende a todas as premissas de projeto.

#### 10.3.8 Modelo de carregamento XVII (MC-XVII)

Na sequência, apresenta-se o modelo de carregamento XVII [MC-XVII: 45 pessoas], este refere-se ao caso de carregamento decorrente da excitação por um

grupo de 45 pessoas praticando atividades humanas rítmicas sobre o piso investigado, sendo estas distribuídas as lajes L1 até L5, conforme ilustrado nas Figuras 212 e 213. Assim sendo, os resultados referentes as respostas dinâmicas correspondentes as variáveis de conforto humano em referências aos modelos ("força-dura": Faisca [28], SCI [57] e AISC [3]) e aos sistemas biodinâmicos, tais resultados são expressos nas Tabelas 51 e 52, enquanto os casos mais críticos das respostas gráficas (deslocamentos e acelerações) são ilustrados no Apêndice H.

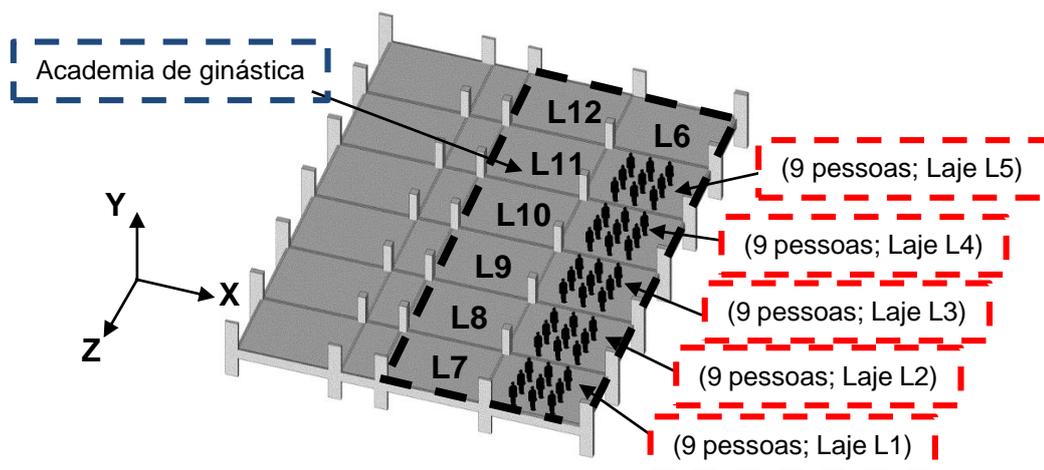


Figura 212 - Vista isométrica MC-XVII (45 Pessoas)

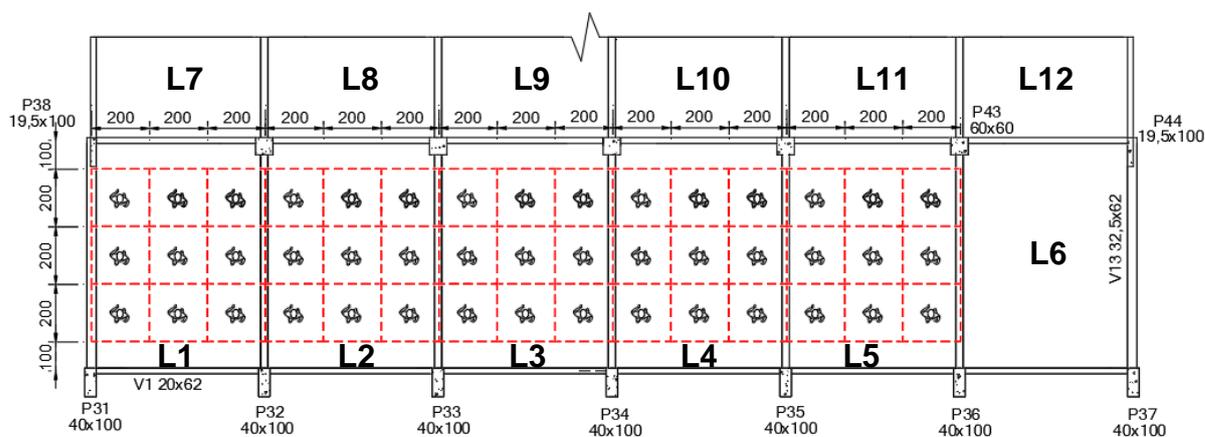


Figura 213 - Vista em planta MC-XVII (45 pessoas)

Tabela 51 - Resposta estrutural dinâmica do piso investigado: MC-XVII

LAJE	Biodinâmico			Faisca [28]			SCI [57]			AISC [3]		
	$a_p$	$a_{w,rms}$	VDV									
	m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>1,75</sup>	m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>1,75</sup>	m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>1,75</sup>	m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>1,75</sup>
L1	0,192	0,056	0,165	0,258	0,117	0,347	0,241	0,129	0,381	0,291	0,254	0,751
L2	0,216	0,062	0,183	0,255	0,116	0,344	0,208	0,118	0,349	0,250	0,243	0,720
L3	0,217	0,063	0,187	0,281	0,126	0,374	0,221	0,123	0,363	0,266	0,249	0,737
L4	0,250	0,084	0,248	0,267	0,123	0,364	0,218	0,124	0,367	0,263	0,260	0,769
L5	0,212	0,078	0,231	0,285	0,125	0,371	0,236	0,120	0,356	0,284	0,224	0,664

**Tabela 52 - Resposta estrutural dinâmica do piso investigado: MC-XVII**

LAJE	Biodinâmico			Faisca [28]			SCI [57]			AISC [3]		
	$a_p$	$a_{w,rms}$	VDV									
	m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>1,75</sup>	m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>1,75</sup>	m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>1,75</sup>	m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>1,75</sup>
L6	0,095	0,035	0,103	0,075	0,034	0,100	0,027	0,037	0,108	0,031	0,099	0,293
L7	0,082	0,026	0,077	0,049	0,022	0,065	0,020	0,023	0,068	0,022	0,061	0,181
L8	0,068	0,021	0,062	0,085	0,043	0,129	0,028	0,057	0,170	0,034	0,158	0,468
L9	0,109	0,031	0,093	0,090	0,051	0,152	0,031	0,067	0,198	0,035	0,185	0,547
L10	0,110	0,036	0,105	0,096	0,051	0,151	0,031	0,067	0,198	0,033	0,147	0,434
L11	0,067	0,026	0,078	0,078	0,039	0,117	0,025	0,053	0,158	0,034	0,101	0,298
L12	0,090	0,034	0,100	0,041	0,021	0,062	0,027	0,037	0,111	0,007	0,056	0,167

Ao realizar a análise dos dados apresentados nas Tabelas 51 e 52, referentes ao caso de carregamento associado ao [MC-XVII: 45 pessoas; sobre as lajes L1 até L5], observar-se que os valores das respostas dinâmicas obtidos por meio da modelagem de sistemas biodinâmicos são inferiores aos alcançados mediante emprego das demais funções matemáticas “força-dura”, em especial aos resultados referentes parâmetros  $a_{w,rms}$  e VDV. Neste contexto, destaca-se que o modelo proposto por AISC [3] excede os limites aceitáveis de VDV em todas as lajes sujeitas ao carregamento dinâmico, de acordo com as referências [ $< 0,5$  [161] e  $< 0,66$  [60]], ao passo que os demais modelos investigados (Faisca [28], SCI [57] e sistemas biodinâmicos) satisfazem aos critérios de conforto humano.

### 10.3.9 Modelo de carregamento XVIII (MC-XVIII)

Na presente seção, é apresentado o modelo de carregamento XVIII [MC-XVIII: 45 pessoas], este diz respeito à situação de carregamento dinâmico (atividades humanas rítmicas) induzido por um grupo de 45 pessoas, sendo 9 pessoas posicionadas sobre cada uma das lajes L2, L3, L4, L5 e L6, conforme ilustrado nas Figuras 214 e 215. Posteriormente, a Tabela 53 fornece os resultados das respostas dinâmicas observadas sobre o piso mediante emprego do "força-dura" e sistemas biodinâmicos, objetivando uma análise acerca do conforto humano. Por fim, os gráficos que ilustram os resultados de deslocamentos e acelerações referente à seção com respostas dinâmicas mais elevadas, encontram-se disponíveis no Apêndice H.

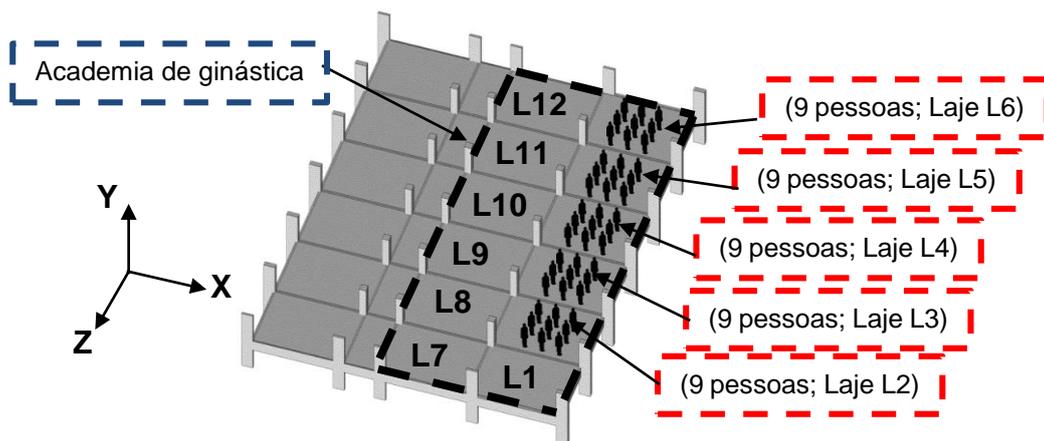


Figura 214 - Vista isométrica MC-XVIII (45 Pessoas)

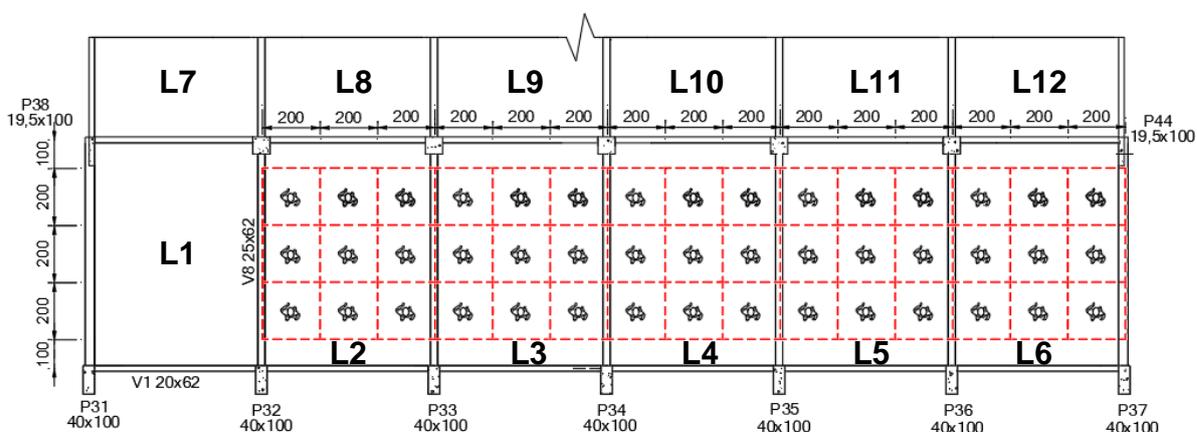


Figura 215 - Vista em planta MC-XVIII (45 pessoas)

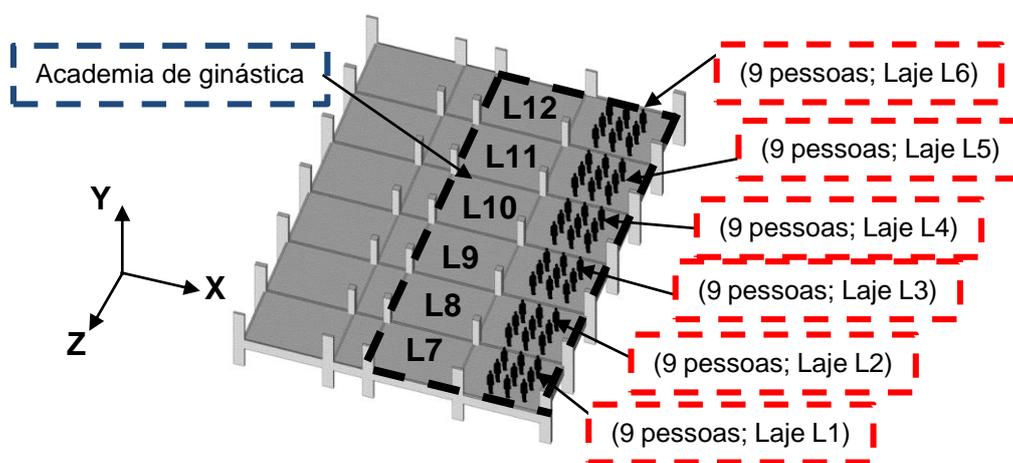
Tabela 53 - Resposta estrutural dinâmica do piso investigado: MC-XVIII

LAJE	Biodinâmico			Faisca [28]			SCI [57]			AISC [3]		
	$a_p$	$a_{w,rms}$	VDV									
	m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>1,75</sup>	m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>1,75</sup>	m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>1,75</sup>	m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>1,75</sup>
L1	0,103	0,031	0,092	0,075	0,034	0,100	0,027	0,037	0,108	0,031	0,099	0,293
L2	<b>0,219</b>	<b>0,068</b>	<b>0,203</b>	<b>0,290</b>	<b>0,127</b>	<b>0,377</b>	<b>0,241</b>	<b>0,123</b>	<b>0,363</b>	<b>0,289</b>	<b>0,229</b>	<b>0,677</b>
L3	<b>0,209</b>	<b>0,060</b>	<b>0,176</b>	<b>0,267</b>	<b>0,123</b>	<b>0,364</b>	<b>0,218</b>	<b>0,124</b>	<b>0,367</b>	<b>0,263</b>	<b>0,260</b>	<b>0,769</b>
L4	<b>0,215</b>	<b>0,067</b>	<b>0,198</b>	<b>0,281</b>	<b>0,126</b>	<b>0,374</b>	<b>0,221</b>	<b>0,123</b>	<b>0,363</b>	<b>0,266</b>	<b>0,249</b>	<b>0,737</b>
L5	<b>0,272</b>	<b>0,091</b>	<b>0,269</b>	<b>0,254</b>	<b>0,116</b>	<b>0,344</b>	<b>0,209</b>	<b>0,118</b>	<b>0,349</b>	<b>0,251</b>	<b>0,243</b>	<b>0,721</b>
L6	<b>0,183</b>	<b>0,067</b>	<b>0,199</b>	<b>0,258</b>	<b>0,117</b>	<b>0,347</b>	<b>0,241</b>	<b>0,129</b>	<b>0,381</b>	<b>0,291</b>	<b>0,254</b>	<b>0,751</b>
L7	0,062	0,022	0,065	0,041	0,021	0,062	0,003	0,020	0,059	0,007	0,056	0,167
L8	0,060	0,021	0,063	0,079	0,040	0,119	0,026	0,038	0,111	0,033	0,102	0,301
L9	0,103	0,032	0,094	0,096	0,051	0,151	0,025	0,053	0,158	0,033	0,147	0,434
L10	0,108	0,033	0,098	0,090	0,051	0,152	0,025	0,053	0,158	0,035	0,185	0,547
L11	0,085	0,032	0,094	0,083	0,043	0,126	0,031	0,067	0,198	0,034	0,156	0,461
L12	0,099	0,038	0,112	0,049	0,022	0,065	0,028	0,056	0,167	0,022	0,061	0,181

Com base nos resultados apresentados na Tabela 53, referente ao caso de carregamento associado ao [MC-XVII: 45 pessoas; sobre as lajes L2 até L6], observa-se, de maneira semelhante ao caso anterior (MC-XVII), que os valores das respostas dinâmicas obtidos por meio da modelagem de sistemas biodinâmicos são inferiores aos fornecidos pelos demais modelos tradicionais de carregamento dinâmico “força-dura”, especialmente referente aos parâmetros  $a_{w,rms}$  e VDV. Cabe ressaltar que dentre os modelos analisados, o proposto por AISC [3] demonstra ser o mais crítico em relação aos valores de VDV, alcançando magnitudes máximas da ordem de  $0,769 \text{ m/s}^{1,75}$  [VDV =  $0,769 \text{ m/s}^{1,75}$ ; laje L2], indicando, assim, a não conformidade com os critérios de conforto humano [ $< 0,5$  [161] e  $< 0,66$  [60]].

#### 10.3.10 Modelo de carregamento XIX (MC-XIX)

Por fim, o modelo de carregamento XIX [MC-XIX: 54 pessoas], corresponde a situação de carregamento dinâmico (atividades humanas rítmicas) induzido por um grupo de 54 pessoas, sendo dispostas sobre o piso 9 pessoas em cada laje: L1 até L6), conforme ilustrado nas Figuras 216 e 217. Adicionalmente, a Tabela 54 apresenta os resultados das respostas dinâmicas observadas no piso analisado, com base na aplicação das funções de carregamento dinâmico (“força-dura”: Faisca [28], SCI [57] e AISC [3]) e modelos biodinâmicos. Neste seguimento, os gráficos que representam os deslocamentos e acelerações no domínio do tempo e da frequência, referente a seção estrutural com maior amplitude, estão disponíveis no Apêndice H.



**Figura 216 - Vista isométrica MC-XIX (54 Pessoas)**

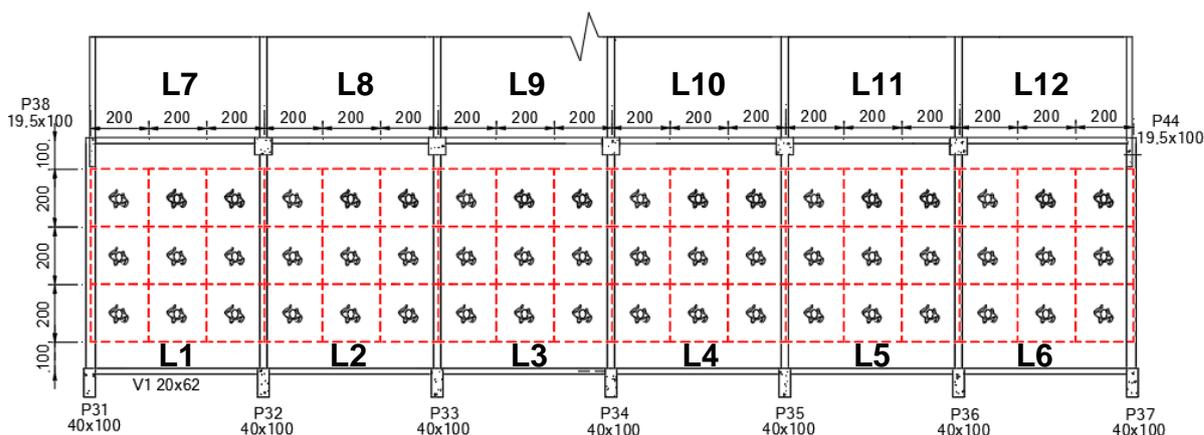


Figura 217 - Vista em planta MC-XIX (54 pessoas)

Tabela 54 - Resposta estrutural dinâmica do piso investigado: MC-XIX

LAJE	Biodinâmico			Faisca [28]			SCI [57]			AISC [3]		
	$a_p$	$a_{w,rms}$	VDV									
	m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>1,75</sup>	m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>1,75</sup>	m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>1,75</sup>	m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>1,75</sup>
L1	0,123	0,040	0,119	0,260	0,117	0,347	0,231	0,125	0,371	0,288	0,253	0,748
L2	0,182	0,063	0,186	0,250	0,115	0,339	0,200	0,116	0,342	0,250	0,244	0,722
L3	0,204	0,068	0,202	0,284	0,127	0,376	0,212	0,120	0,354	0,267	0,248	0,735
L4	0,215	0,072	0,213	0,284	0,127	0,376	0,212	0,120	0,354	0,267	0,248	0,735
L5	0,241	0,082	0,242	0,250	0,114	0,338	0,201	0,116	0,343	0,251	0,244	0,723
L6	0,165	0,055	0,163	0,260	0,117	0,347	0,231	0,125	0,371	0,288	0,253	0,748
L7	0,077	0,031	0,090	0,051	0,023	0,068	0,019	0,023	0,069	0,026	0,063	0,185
L8	0,051	0,022	0,066	0,081	0,043	0,127	0,029	0,056	0,165	0,040	0,153	0,453
L9	0,111	0,031	0,093	0,097	0,053	0,157	0,027	0,064	0,190	0,033	0,176	0,521
L10	0,101	0,031	0,093	0,097	0,053	0,157	0,027	0,064	0,190	0,033	0,176	0,521
L11	0,077	0,029	0,087	0,079	0,042	0,125	0,027	0,064	0,190	0,039	0,151	0,447
L12	0,120	0,038	0,112	0,051	0,023	0,068	0,029	0,055	0,163	0,026	0,063	0,185

Ao examinar os resultados apresentados na Tabela 54, associados ao [MC-XIX: 54 pessoas; sobre as lajes L1 até L6], constata-se uma redução nos valores das respostas dinâmicas do piso com base no emprego de sistemas biodinâmicos, em comparação com os obtidos anteriormente, como, por exemplo, no caso [MC-XI: 18 pessoas]. Ao comparar os resultados da laje L5 associados à aplicação de modelos biodinâmicos, nota-se pequenas diferenças essas respostas dinâmicas [MC-XI (18 pessoas);  $a_p = 0,261$  m/s<sup>2</sup>;  $a_{w,rms} = 0,084$  m/s<sup>2</sup>; VDV = 0,248 m/s<sup>1,75</sup> (sistemas biodinâmicos)] e [MC-XIX (54 pessoas);  $a_p = 0,241$  m/s<sup>2</sup>;  $a_{w,rms} = 0,082$  m/s<sup>2</sup>; VDV = 0,242 m/s<sup>1,75</sup> (sistemas biodinâmicos)]. Neste sentido, tais resultados corroboram a

hipótese de que, ao aumentar o número de pessoas sobre a laje de concreto, as características dinâmicas das pessoas influenciam sobre a interação dinâmica pessoa-estrutura. Deste modo, o modelo biodinâmico consegue descrever esses efeitos de maneira mais realistas em função dos parâmetros considerados na formulação matemática do método de análise. Por fim, no que diz respeito ao conforto humano, verifica-se que o modelo proposto por AISC [3], não atende a tais critérios, pois os valores de VDV são superiores aos estabelecidos pelas normas e critérios de projeto [(VDV:  $< 0,5$  [161] e  $< 0,66$  [60])].

#### 10.4 Considerações finais

Com base nos resultados obtidos referentes às respostas dinâmicas do piso no contexto da análise de vibração forçada, observa-se que os modelos de carga dinâmica propostos por Faisca [28] e o modelo desenvolvido neste estudo (sistemas biodinâmicos), satisfazem integralmente os critérios de conforto humano nas situações de carregamento investigadas neste trabalho de pesquisa. Destaca-se que os sistemas biodinâmicos fornecem respostas menos conservadoras, sob o ponto de vista quantitativo, em consonância com as respostas experimentais.

Por outro lado, ao examinar o caso mais crítico de carregamento dinâmico com base no emprego dos modelos matemáticos de "força-dura" propostos pelo SCI [57] e AISC [3], percebe-se que os limites toleráveis de conforto humano são violados, especialmente nos resultados de Valores em Dose de Vibração (VDV). Neste sentido, com base nas situações de carregamentos dinâmicos investigados ao longo de todo o estudo, destaca-se que, basicamente os critérios de conforto humano são atendidos quando da utilização dos sistemas biodinâmicos e do modelo matemático proposto por Faisca [28], representando as ações dinâmicas humanas rítmicas. No entanto, é importante ressaltar que os modelos matemáticos propostos via AISC [3] e SCI [57] violam os critérios de conforto humano e se demonstraram mais conservadores.

## 11 CONCLUSÕES

### 11.1 Introdução

Este trabalho de pesquisa teve como objetivo a avaliação do comportamento estrutural dinâmico do piso de concreto armado, que corresponde a uma estrutura real existente, com dimensões de 16 m x 36 m e área total de 576 m<sup>2</sup>. O modelo estrutural investigado, no âmbito desta pesquisa, está localizado no 8º pavimento do Bloco F do Pavilhão Reitor João Lyra Filho, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ).

No escopo deste estudo, desenvolveu-se um modelo biodinâmico composto por massa, amortecimento e rigidez, constituído por um grau de liberdade (SGL1), objetivando a avaliação do efeito da interação dinâmica pessoa-estrutura, além de representar as ações humanas rítmicas sobre os pisos de edifícios.

Para tal, as variáveis do modelo biodinâmico proposto, foram determinadas através da realização de uma extensa bateria de testes experimentais em laboratório, com o intuito de determinar as características dinâmicas das pessoas, como massa, amortecimento e rigidez. Desta forma, a formulação dos modelos biodinâmicos foi realizada inicialmente por meio da resolução da equação de equilíbrio dinâmico clássica, e, posteriormente, através da resolução de um problema de otimização.

No que diz respeito aos testes experimentais desenvolvidos com a intenção de determinar os parâmetros do modelo biodinâmico proposto neste estudo, foram realizados testes com 100 indivíduos distintos. Durante estes testes, saltos rítmicos são realizados sobre uma plataforma rígida de MDF projetada para este fim, visando determinar as características dinâmicas de cada pessoa (massa, amortecimento e rigidez). Ressalta-se que nesta bateria de testes experimentais foi monitorada a aceleração de cada participante, bem como as forças dinâmicas aplicadas sobre a referida plataforma.

Com base nos resultados determinados experimentalmente (força e aceleração), os demais parâmetros dos sistemas biodinâmicos são calculados. Neste sentido, as funções de tempo de velocidade e deslocamento são obtidas por meio da integração do sinal de tempo da aceleração obtida experimentalmente. Além disso, os demais parâmetros do modelo desenvolvido foram determinados com base na

equação de equilíbrio dinâmico do sistema, via resolução de um problema de otimização mediante o emprego do método Algoritmos Genéticos (AG).

Posteriormente, com o objetivo de calibrar o modelo biodinâmico proposto, foi realizada uma análise comparativa entre a resposta dinâmica experimental da plataforma e a obtida por meio da modelagem de sistemas biodinâmicos, utilizando a correlação de Pearson. Adicionalmente, é importante destacar que a validação do modelo proposto é confirmada também por meio de uma série de testes experimentais realizados sobre o piso real de concreto armado investigado [MC-I: 1 pessoa (ver Figuras 131 e 132) até MC-IX: 9 pessoas (ver Figuras 152 e 153)].

No que diz respeito ao desenvolvimento do modelo numérico proposto nesta tese de doutorado, realizou-se a modelagem numérica do piso de concreto armado com base no uso do programa ANSYS [130] via Método dos Elementos Finitos (MEF). Assim sendo, com o objetivo de representar as vigas e pilares, utiliza-se o elemento BEAM44 [130], enquanto para as lajes, emprega-se o elemento SHELL63 [130]. Adicionalmente, opta-se pelo uso do elemento COMBIN40 [130] com a finalidade de descrever do modelo biodinâmico desenvolvido neste trabalho de pesquisa.

Neste sentido, foram inicialmente realizadas análises modais experimentais, utilizando estratégias distintas, objetivando a avaliação do comportamento global dinâmico do piso do edifício investigado, com o propósito de calibrar o modelo de elementos finitos desenvolvido. Em seguida, avaliou-se os parâmetros modais do piso, como massa modal, rigidez modal, amortecimento modal e frequências naturais, por meio do emprego da modelagem numérica. Dessa forma, foram investigadas numericamente as propriedades do piso sob diferentes contextos de análise, considerando o piso vazio, ou seja, sem a presença de pessoas, e tendo como referência o piso ocupado por diferentes grupos de indivíduos. Assim sendo, com o objetivo de representar o efeito da interação dinâmica pessoa-estrutura sobre o piso em estudo, utilizou-se modelagem dos sistemas biodinâmicos. Com base nos resultados da análise, foram avaliadas as influências que os indivíduos exercem sobre os parâmetros modais da estrutura.

No âmbito da análise de vibração forçada, é importante destacar que as análises concentraram-se na investigação da resposta estrutural dinâmica sobre a laje de concreto armado do piso investigado quando submetido a uma frequência de excitação de 2 Hz ( $f = 2$  Hz) decorrente das atividades humanas rítmicas (atividades

aeróbicas). Nessa perspectiva, realizou-se uma extensa campanha de testes experimentais sobre a estrutura real, com o objetivo de investigar a interação estrutural dinâmica do piso em diferentes cenários de carregamento. Com base nos resultados, foram empreendidas avaliações comparativas entre o modelo proposto no âmbito desta tese (modelos biodinâmicos), e as funções matemáticas tradicionais de carregamento dinâmico (“força-dura”: Faisca [28], SCI [57] e AISC [3]).

Neste contexto, os resultados obtidos via monitoração dinâmica experimental do piso são confrontados com as respostas obtidas através da modelagem numérica, por meio da análise transiente realizada via emprego do *software* ANSYS [130]. Além disso, foram avaliadas as respostas dinâmicas dos modelos de carregamento biodinâmico e “força-dura” por meio de um estudo paramétrico, com o objetivo de analisar os critérios de conforto humano com base nos seguintes parâmetros: aceleração de pico ( $a_p$ ), aceleração RMS ( $a_{w,RMS}$ ) e valores de dose de vibração (VDV).

Por fim, este estudo realizou uma análise comparativa, qualitativa e quantitativa entre a resposta estrutural dinâmica do piso em estudo proveniente do emprego de modelos tradicionais de carregamento dinâmico humano rítmico (Faisca [28], SCI [57] e AISC [3]), e a estratégia de modelagem biodinâmica desenvolvida neste trabalho, objetivando investigar o comportamento dinâmico do piso sob diferentes metodologias de análise. Neste seguimento, também avaliou-se os critérios de conforto humano do sistema estrutural do piso de concreto armado investigado no âmbito deste trabalho de pesquisa com base nos critérios de projeto e normas técnicas vigentes.

## 11.2 Conclusões avançadas

### 11.2.1 Modelo biodinâmico proposto

Os modelos biodinâmicos foram desenvolvidos por meio de uma ampla bateria de testes experimentais conduzidos em laboratório com a finalidade de determinar as características dinâmicas dos indivíduos (como massa, rigidez e amortecimento). Deste modo, para a formulação do modelo matemático é resolvida a equação de

equilíbrio dinâmico clássica; e, em seguida, é realizada a resolução de um problema de otimização.

Cabe ressaltar que a calibração do modelo proposto foi conduzida inicialmente em um ambiente laboratorial, comparando os resultados experimentais oriundos da plataforma de carga dinâmica (plataforma MDF) com os dados obtidos por meio da modelagem em elementos finitos. No entanto, a fim de garantir a confiabilidade do modelo matemático desenvolvido, foram realizadas comparações adicionais com base nos dados experimentais obtidos sobre o piso de concreto armado investigado neste estudo, conforme apresentados em detalhes na seção seguinte.

Diante do exposto, é importante destacar que, com o objetivo de avaliar modelagem de sistemas biodinâmicos, foram investigadas as repostas fornecidas com base no emprego de estratégias de análise distintas, relacionados à força experimental ( $F_{Exp}$ ) e à força otimizada ( $F_{Otm}$ ). A força experimental corresponde à medida da força dinâmica mensurada durante os testes experimentais sobre a plataforma MDF, via uso de células de carga, enquanto que a força otimizada foi obtida através de modelagem numérica em elementos finitos mediante o processo de otimização.

Assim sendo, em relação à calibração do modelo biodinâmico proposto com referência à resposta dinâmica observada sobre a plataforma, foram realizadas análises comparativas entre a resposta dinâmica experimental da plataforma e os resultados obtidos via modelagem numérica. Neste sentido, é importante destacar que essa comparação foi realizada levando em consideração os resultados de aceleração observados na seção central da plataforma em estudo, com base na aplicação do mesmo estado de carregamento dinâmico.

Ao avaliar os resultados de forma qualitativa referente à análise dos espectros de resposta dinâmica da plataforma tanto na abordagem numérica quanto experimental, observa-se uma boa concordância entre os gráficos de aceleração tanto no domínio do tempo quanto da frequência. No aspecto quantitativo, com base no emprego do coeficiente de correlação de Pearson (CCP), é possível constatar uma correlação satisfatória entre as variáveis analisadas, como a força dinâmica experimental ( $F_{Exp}$ ), a força otimizada ( $F_{Otm}$ ) e a resposta experimental da plataforma, evidenciando assim uma boa concordância entre essas variáveis analisadas (CCP > 0,7).

### 11.2.2 Análise modal do piso investigado

No que se refere à análise modal numérica, foram conduzidas análises considerando o piso tanto vazio quanto ocupado por distintos agrupamentos de pessoas, com o objetivo de avaliar se a presença de pessoas pode influenciar sobre a modificação dos parâmetros modais do piso em estudo. Para tanto, foram utilizados os modelos biodinâmicos propostos nesta tese com o intuito de representar os indivíduos sobre as lajes de concreto armado. Neste sentido, foram investigadas as propriedades modais do piso, como frequências naturais, massa modal, rigidez modal e amortecimento modal, quando o piso se encontra ocupado por diferentes grupos de pessoas, incluindo 9, 18, 27, 36, 45, 54, 72, 108, 216 e 432 pessoas.

No exemplo referente ao caso mais crítico de carregamento analisado, que corresponde à ocupação do piso por um grupo de 432 pessoas, foram avaliados os parâmetros modais associados às frequências naturais e ao amortecimento da estrutura, associados ao primeiro modo de vibração do piso (modo fundamental de vibração). Observa-se uma redução de 0,38% sobre o valor da frequência fundamental, modificando a mesma de 7,89 Hz ( $f_{01} = 7,89$  Hz; piso vazio) para 7,86 Hz ( $f_{01} = 7,86$  Hz; piso ocupado: 432 pessoas). Além disso, verifica-se um acréscimo na taxa de amortecimento estrutural, com valores de 1,21% ( $\xi = 1,21$  %; piso vazio) e 2,04 ( $\xi = 2,04$ %; piso ocupado: 432 pessoas), evidenciando assim a influência dos indivíduos sobre esses parâmetros modais do piso investigado.

Por outro lado, com base nos resultados apresentados percebe-se que o impacto do número de pessoas sobre as modificações dos parâmetros modais do piso não é tão relevante sob o ponto de vista da análise dinâmica. Além disso, é importante ressaltar que a situação de carregamento sobre a laje de concreto com um grupo muito elevado de pessoas, por exemplo, superior a 50 indivíduos, não corresponde com a realidade de uma aula de ginástica aeróbica, uma vez que as dimensões do piso não seriam adequadas para o desenvolvimento destas atividades. Portanto, para que ocorra uma modificação significativa nos parâmetros modais do piso em estudo, seria necessário um número de pessoas sobre a edificação muito acima de sua capacidade real.

No tocante à análise modal experimental do piso de concreto armado, esta foi conduzida utilizando diferentes metodologias. O Teste Experimental I consiste na determinação do amortecimento experimental, enquanto o Teste Experimental II refere-se ao teste desenvolvido com base no emprego de um martelo de impacto sobre o piso, e o Teste Experimental III diz respeito ao experimento realizado com o uso do shaker. Por meio desses testes, foram obtidas as propriedades do piso, tais como o amortecimento modal experimental e as frequências naturais experimentais. Através do método do decremento logarítmico aplicado ao primeiro teste, obtém-se um valor médio de amortecimento estrutural da ordem de 2,77% ( $\xi = 2,77\%$ ). Esse resultado se aproxima do obtido pelos autores Cao et al. [144], que alcançaram experimentalmente uma taxa média equivalente a 2,3% ( $\xi = 2,3\%$ ) referente a um piso de concreto armado similar. Além disso, é importante observar que o guia de projeto AISC recomenda valores de taxa de amortecimento estrutural entre 2% e 5% para pisos. Neste contexto, uma série de normas técnicas e guias de projeto, como Chen et al. [145], Brownjohn [146], Mario e Leigh [147], Agarwal e Shrikhande [148] e Chopra [134], sugerem uma taxa de amortecimento de 5% para estruturas de concreto armado. Portanto, o valor de amortecimento do piso determinado neste estudo é relativamente baixo em comparação com as recomendações para estruturas de concreto armado, indicando assim que o sistema estrutural investigado pode não ser capaz de absorver e dissipar eficientemente a energia associada à excitação dinâmica.

No tocante às frequências naturais obtidas por meio dos testes experimentais realizados sobre o piso investigado, cumpre mencionar que o Teste Experimental II apresentou o valor da ordem de 7,80 Hz ( $f_{Exp} = 7,80$  Hz), ao passo que o Teste Experimental III obteve o resultado equivalente a 8,05 Hz ( $f_{Exp} = 8,05$  Hz). Neste sentido, com base nos resultados dos testes experimentais foram efetuadas as calibrações necessárias sobre o modelo em elementos finitos desenvolvido neste estudo, visando avaliação da resposta estrutural dinâmica do piso.

### 11.2.3 Calibração do modelo em elementos finitos do piso

Com o objetivo de validar o modelo em elementos finitos desenvolvido no âmbito desta pesquisa, são realizadas análises comparativas entre as frequências

naturais do piso em relação aos resultados obtidos via monitoração experimental dinâmica e através do emprego da modelagem numérica. Neste sentido, com o intuito de calibrar as respostas dinâmicas foi adicionado ao modelo em elementos finitos um incremento de massa correspondente ao revestimento aplicado sobre o piso de concreto armado investigado. Esse acréscimo resulta em um aumento de 5% na massa total do piso, equivalente a 12.707,03 kg ( $m_{rev.} = 12.707,03$  kg), modificando assim a massa total do piso para 296.346,2 kg ( $m_t = 296.346,2$  kg). Diante do exposto, é importante ressaltar que todas as análises subsequentes realizadas via modelagem numérica são desenvolvidas após esse processo de calibração do modelo, levando em consideração todas as condições verificadas sobre o piso *in loco*. Dessa forma, é possível estabelecer uma validação confiável, bastante satisfatório, do modelo numérico em elementos finitos em relação aos resultados experimentais.

#### 11.2.4 Vibração forçada: validação dos modelos biodinâmicos

Com o objetivo de validar o modelo biodinâmico proposto nesta tese de doutorado, foram realizadas comparações entre a resposta dinâmica obtida experimentalmente sobre o piso, denominada comumente de “*Experimental*”, e os resultados determinados via simulações numéricas. Inicialmente, o modelo biodinâmico foi calibrado comparando-se a resposta dinâmica da plataforma, conforme descrito anteriormente. No entanto, para uma validação mais confiável das análises realizadas, torna-se necessário uma avaliação comparativa entre os resultados fornecidos via monitoração dinâmica experimental sobre a estrutura com aqueles obtidos através da modelagem numérica, com base no uso de sistemas biodinâmicos, relacionados à força experimental ( $F_{Exp}$ ) e à força otimizada ( $F_{Optm}$ ), onde a força experimental refere-se à força medida durante os testes experimentais via uso de células de carga acopladas a plataforma de carga dinâmica (plataforma MDF), enquanto que a força otimizada é obtida através da modelagem numérica via processo de otimização [Algoritmo Genético (AG)].

Diante do exposto, no âmbito deste estudo foram analisados oito casos de carregamento dinâmico [MC-I: 1 pessoa (ver Figura 131) até MC-VIII: 9 pessoas (ver Figura 152)], nos quais a resposta estrutural dinâmica do piso foi investigada tanto experimentalmente quanto via modelagem numérica. Deste modo, os resultados

foram avaliados de forma qualitativa, por meio da análise dos gráficos de aceleração no domínio do tempo e da frequência, e de forma quantitativa, mediante emprego de variáveis estatísticas.

Com base nos resultados obtidos ao longo das análises observa-se uma correlação satisfatória entre os parâmetros avaliados em todos os casos de carregamento dinâmico investigados neste estudo. Por exemplo, ao comparar os valores de pico da aceleração obtidos mediante emprego do modelo de carregamento [MC-I: 1 pessoa (ver Figura 131)] referentes à laje L3, nota-se uma convergência entre os valores máximos de aceleração tanto na modelagem numérica quanto na monitoração experimental, resultando em ( $F_{Exp}$ :  $a_p = 0,06 \text{ m/s}^2$ ), ( $F_{Otm}$ :  $a_p = 0,06 \text{ m/s}^2$ ) e (Experimental:  $a_p = 0,06 \text{ m/s}^2$ ). Ressalta-se que a convergência dos resultados numéricos e experimentais referentes ao emprego dos modelos de carregamento com um único participante torna-se mais simples de ser controlada, uma vez que os testes são executados apenas por uma pessoa.

Por outro lado, ao analisar os demais modelos de carregamento [MC-III: 2 pessoas (ver Figura 137) até MC-VIII: 9 pessoas (ver Figura 152)], referentes aos testes experimentais realizados com mais participantes sobre o piso investigado, verifica-se que o controle durante os testes se torna mais complexo, pois envolve variáveis subjetivas que são mais difíceis de serem controladas e implementadas na modelagem numérica de maneira adequada. No entanto, vale ressaltar que em todos os casos de carregamento investigados, a confiabilidade dos resultados foi confirmada através do coeficiente de correlação de Pearson ( $CCP > 0,7$ ), indicando uma forte correlação entre as variáveis analisadas. Isso implica que os resultados da modelagem numérica e dos testes experimentais apresentaram uma relação consistente e satisfatória [127-129].

De acordo com os resultados obtidos, observou-se um aumento sobre a resposta estrutural dinâmica do piso à medida que o número de participantes sobre a laje de concreto é ampliado, o que está de acordo com o esperado. Por exemplo, ao comparar os casos de carregamento com [MC-I: 1 pessoa (ver Figura 131) e MC-VII: 9 pessoas (ver Figura 150)], observa-se sobre a laje L3 um incremento dos valores de aceleração de pico, resultando nos seguintes valores: MC-I [ $F_{Exp}$ :  $a_p = 0,06 \text{ m/s}^2$ ;  $F_{Otm}$ :  $a_p = 0,06 \text{ m/s}^2$ ; Experimental:  $0,06 \text{ m/s}^2$ ] e MC-VII [ $F_{Exp}$ :  $a_p = 0,12 \text{ m/s}^2$ ;  $F_{Otm}$ :  $a_p = 0,16$

m/s<sup>2</sup>; Experimental: 0,10 m/s<sup>2</sup>]. Ao comparar estes resultados, observa-se um acréscimo nos valores da ordem de 100%, 167% e 67%, respectivamente.

Ademais, ao analisar os efeitos da transferência de energia associados aos espectros de resposta no domínio da frequência, constata-se que o emprego dos sistemas biodinâmicos atuou de maneira a mobilizar outros modos de vibração, uma vez que o piso apresenta frequências naturais próximas à excitação do sistema estrutural. Neste sentido, ao avaliar tais resultados, percebe-se claramente a mobilização dos modos de vibração próximos à faixa de ressonância da estrutura.

Com base nos resultados apresentados referentes às situações de carregamento investigadas, verifica-se que a modelagem biodinâmica é considerada uma alternativa viável e satisfatória para a representação da ação dinâmica humana rítmica sobre os pisos de edifícios. Deste modo, este trabalho de pesquisa contribui para uma avaliação mais realista acerca do efeito da interação dinâmica pessoa-estrutura e para a posterior análise do conforto humano de maneira menos conservadora.

#### 11.2.5 Análise comparativa: Experimental x Sistemas Biodinâmicos x Força-dura

No âmbito das análises de vibração forçada, realizou-se uma avaliação comparativa entre os resultados obtidos via monitoração dinâmica experimental do piso e aqueles fornecidos via emprego da modelagem em elementos finitos. Neste contexto, a resposta dinâmica referente à seção central da laje L3 é investigada, a qual corresponde ao ponto de amplitude modal máxima do sistema relacionada ao terceiro modo de vibração do piso. Para tal, considera-se um grupo de 18 pessoas saltando sobre a laje de concreto com frequência de 2 Hz ( $f = 2$  Hz) [MC-IX: 18 pessoas (ver Figura 155)]. Neste sentido, foi determinada a resposta experimental referente a este caso de carregamento, e também foi realizada a simulação numérica das ações dinâmicas das 18 pessoas, via utilização dos modelos tradicionais de carregamento dinâmico (“força-dura”) e, também, com base na estratégia de modelagem biodinâmica.

Assim sendo, os resultados de aceleração de pico obtidos nesta análise (18 pessoas) indicam que o uso de modelos biodinâmicos (análise numérica) resultou em valores da ordem de 0,17 m/s<sup>2</sup> [ $a_p = 0,17$  m/s<sup>2</sup>], enquanto os resultados experimentais

apresentaram um valor equivalente a  $0,14 \text{ m/s}^2$  [ $a_p = 0,14 \text{ m/s}^2$ ]. Isso representa uma diferença satisfatória de cerca de 20% entre essas duas abordagens. Por outro lado, com base no emprego dos modelos tradicionais de carregamento dinâmico (“força-dura”: Faisca [28], SCI [57] e AISC [3]), é importante destacar que essas abordagens tendem a fornecer resultados mais conservadores, especialmente SCI [57] e AISC [3], com valores correspondentes a  $0,304 \text{ m/s}^2$  e  $0,293 \text{ m/s}^2$ , respectivamente, muitos superiores a resposta experimental. No entanto, ao comparar esses resultados com a resposta experimental, observa-se que o modelo proposto por Faisca [28] se aproxima mais dos resultados obtidos via modelagem experimental, com uma aceleração de pico da ordem de  $0,284 \text{ m/s}^2$ , apresentando uma maior coerência com os resultados obtidos via emprego de modelos biodinâmicos.

Portanto, os resultados da pesquisa indicam que os modelos tradicionais de carregamento dinâmico (“força-dura”) tendem a apresentar respostas dinâmicas muito mais conservadoras, enquanto que a modelagem com base no uso de sistemas biodinâmicos fornece valores de resposta dinâmica mais próxima dos observados com base na resposta experimental medida durante a análise do piso. Assim sendo, a metodologia de análise proposta neste trabalho de pesquisa pode ser considerada uma alternativa mais realista para a caracterização das ações dinâmicas humanas rítmicas sobre pisos de edifícios, pois além do modelo biodinâmico considerar as características dinâmicas dos indivíduos (massa, amortecimento e rigidez), as ações dinâmicas dos inúmeros participantes não se encontram em fase, ou seja, não são aplicadas ao mesmo tempo, e com a mesma frequência de excitação em ressonância com a estrutura, sobre as lajes de concreto do piso, o que seguramente tende a atenuar a resposta estrutural dinâmica das edificações.

#### 11.2.6 Recomendações de projeto: critérios de conforto humano

Em uma análise preliminar dos resultados obtidos na análise modal, constata-se que a frequência fundamental do piso ( $f_{01} = 7,89 \text{ Hz}$ ) encontra-se abaixo dos limites mínimos preconizados pelas normas técnicas NBR 8800 [82] (8 Hz) e NBR 6118 [83] (9,6 Hz), as quais estabelecem parâmetros de projeto para pavimentos sujeitos a atividades rítmicas. Ressalta-se que estes valores mínimos têm sido negligenciados, o que pode acarretar em vibrações excessivas sobre os pisos de edifícios. Tal

constatação reforça a importância de uma estrita consideração aos referidos parâmetros normativos, a fim de evitar problemas de vibrações excessivas e assegurar o conforto humano dos usuários de pisos de edifícios.

Em continuidade, com base nos resultados referentes as respostas dinâmicas do piso no contexto da análise de vibração forçada, observa-se que os modelos de carga dinâmica propostos por Faisca [28] e o modelo desenvolvido neste estudo (sistemas biodinâmicos) satisfazem integralmente os critérios de conforto humano nas situações de carregamento investigadas neste trabalho de pesquisa, destacando que os sistemas biodinâmicos fornecem respostas menos conservadoras, sob o ponto de vista quantitativo, em consonância com as respostas experimentais. Deste modo, cabe destacar que foram observados os valores máximos nos seguintes casos de carregamento investigados: MC-XII [Laje L5:  $a_p = 0,316 \text{ m/s}^2$ ;  $a_{w,rms} = 0,146 \text{ m/s}^2$ ;  $VDV = 0,432 \text{ m/s}^{1,75}$  (Faisca [28])] e MC-XV [Laje L3:  $a_p = 0,302 \text{ m/s}^2$ ;  $a_{w,rms} = 0,079 \text{ m/s}^2$ ;  $VDV = 0,232 \text{ m/s}^{1,75}$  (sistemas biodinâmicos)].

Por outro lado, cabe ressaltar que os modelos matemáticos de “força-dura” propostos pelo SCI [57] e AISC [3] ultrapassam os limites toleráveis estabelecidos pelos critérios de projeto, especialmente nos Valores em Dose de Vibração (VDV). Assim, cabe ressaltar que os valores máximos pertinentes aos casos mais críticos estudados ao longo da pesquisa foram observados em: MC-XI [Laje L6:  $a_p = 0,300 \text{ m/s}^2$ ;  $a_{w,rms} = 0,239 \text{ m/s}^2$ ;  $VDV = 0,277 \text{ m/s}^{1,75}$  (SCI [57])] e MC-XII [Laje L2:  $a_p = 0,326 \text{ m/s}^2$ ;  $a_{w,rms} = 0,250 \text{ m/s}^2$ ;  $VDV = 0,740 \text{ m/s}^{1,75}$  (AISC [3])]. Desta forma, os limites máximos toleráveis definidos nas referências [(VDV =  $0,707 \text{ m/s}^{1,75} < 0,5$  [161] e  $< 0,66$  [60])] não são atendidos.

De acordo com os resultados apresentados ao longo desta tese de doutorado, destaca-se que a resposta dinâmica do piso investigado fornecida com base no emprego dos modelos de carregamento dinâmico (AISC [3] e SCI [57]) tende a serem mais conservadores em comparação aos resultados fornecidos com base no emprego do modelo matemático proposto por Faisca [28]; e, em especial, da estratégia desenvolvida no âmbito desta pesquisa com base na utilização de sistemas biodinâmicos.

Essas diferenças podem ser justificadas pelo fato do modelo proposto por Faisca [28] apresentar em sua formulação matemática de carregamento dinâmico parâmetros relacionados ao coeficiente de defasagem entre as pessoas, o que resulta

em uma caracterização do carregamento de maneira satisfatória. De acordo com este contexto, o modelo biodinâmico tende a descrever a resposta estrutural dinâmica dos pisos de edifícios de maneira mais realista, pois incorporam em sua formulação as variáveis relacionadas às características dinâmicas das pessoas (massa, amortecimento e rigidez). Além disso, como mencionado anteriormente, quando do uso dos modelos biodinâmicos, as ações dinâmicas das pessoas não se encontram em fase, ou seja, não são aplicadas ao mesmo tempo, e com a mesma frequência de excitação em ressonância com as lajes de concreto do piso, atenuando os valores da resposta dinâmica.

Com base nos resultados obtidos, é importante destacar que os modelos biodinâmicos conseguem representar de forma idealizada os saltos dos indivíduos sobre os pisos de edifícios. Deste modo, os resultados da pesquisa indicam que esta estratégia de modelagem consegue descrever as particularidades de cada indivíduo, resultando assim em atenuações sobre a resposta estrutural dinâmica dos pisos de edificações.

Diante do exposto, e com base nas situações de carregamentos dinâmicos investigados ao longo de todo o estudo, destaca-se que, basicamente, os critérios de conforto humano são atendidos quando da utilização dos sistemas biodinâmicos e do modelo matemático proposto por Faisca [28], representando as ações dinâmicas humanas rítmicas. Por outro lado, é importante ressaltar que os modelos matemáticos propostos via AISC [3] e SCI [57] violam os critérios de conforto humano e se demonstraram mais conservadores.

### 11.3 Sugestão para trabalhos futuros

Em continuidade ao desenvolvimento dos estudos relacionados aos sistemas biodinâmicos propostos no âmbito deste estudo, sugerem-se as seguintes abordagens para as pesquisas futuras:

a) Investigar novas configurações de carregamento dinâmico por meio do desenvolvimento de modelos biodinâmicos mais complexos, ou seja, com mais graus

de liberdade, a fim de realizar um estudo abrangente e refinado dos efeitos da interação dinâmica pessoa-estrutura.

b) Avaliar experimentalmente os parâmetros modais do piso, levando em consideração a influência dos indivíduos sobre a estrutura real, objetivando confrontar os resultados obtidos via modelagem numérica apresentados nesta tese. Além disso, investigar de forma mais abrangente o comportamento estrutural dinâmico do piso submetido a outras possibilidades de carregamento dinâmica e diferentes frequências de excitação.

c) Avaliar a influência da interação dinâmica entre o indivíduo e a estrutura em diferentes sistemas estruturais, tanto rígidos quanto flexíveis. Essa análise qualitativa e quantitativa proporcionaria uma compreensão mais aprofundada do impacto desse efeito sobre a resposta dinâmica do sistema estrutural e nas considerações relacionadas ao conforto humano.

d) Explorar a aplicação de outros métodos de otimização empregados na determinação das características dos indivíduos referentes à modelagem biodinâmica, a fim de compará-los com os resultados obtidos na metodologia empregada nesta tese, como o algoritmo genético (AG). Essa abordagem permitirá uma análise mais ampla e comparativa dos diferentes métodos de análise em relação aos parâmetros associados aos modelos biodinâmicos.

## REFERÊNCIAS

- [1] FERREIRA, Bárbara Elisa ; CARVALHO, Hermes ; SILVA, JOSÉ GUILHERME SANTOS DA ; CALDAS, Rodrigo Barreto ; AGUIAR, Jefferson Viana . Experimental evaluation of induced human walking vibrations on steel-concrete composite floors. REVISTA IBRACON DE ESTRUTURAS E MATERIAIS, v. 14, p. 1-16, 2021.
- [2] WANG, Pengcheng; CHEN, Jun. Floor modal mass identification using human-induced dynamic excitation. Measurement, v. 217, 2023.
- [3] MURRAY, T. M.; ALLEN, D. E.; UNGAR, E. E.; DAVIS, D. B. Steel design guide series 11: Vibrations of steel-framed structural systems due to human activity, 2nd Edition. 1st Printing. Chicago, USA: American Institute of Steel Construction (AISC), 2016.
- [4] JOURNAL DESIGNING BUILDINGS. Best gym architecture in the world. Disponível em: [https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/Best\\_gym\\_architecture\\_in\\_the\\_world](https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/Best_gym_architecture_in_the_world). Acesso em: 2 jun. 2023.
- [5] ARCHDAILY. Dashte Noor's Gym Building. Narges Nassiri Toosi. Disponível em: <https://www.archdaily.com/537420/dashte-noor-s-gym-building-narges-nassiri-toosi>. Acesso em: 2 jun. 2023.
- [6] JORNAL VIRTUAL. “Alô Bahia”. Disponível em: <https://aloalobahia.com/notas/marcio-davi-finaliza-projeto-de-box-de-crossfit>. Acesso em: 2 jun. 2023.
- [7] JORNAL VIRTUAL. “Academia de Bombeiros”. Disponível em: <https://www.academiadebomberosonline.com/preparacion-fisica/>. Acesso em: 22 Dez. 2019
- [8] CEB. Vibration Problems in Structures. Practical Guidelines. Bulletin D'Information N°209. Comité Européen du Béton, Zurich, 1991.
- [9] BACHMANN, H. et al. Vibration problems in structures: practical guidelines. Basel (Switzerland): Birkhäuser, 1995.
- [10] SEGUNDINHO, P. G. A.; DIAS, A. A.; CORREIA, M. R.; Carregamentos dinâmicos induzidos pelos movimentos de pedestres em estruturas. Seminário: Ciências Exatas e Tecnológicas, v. 38, n. 2, p. 3-16, Londrina, Pr, 2017.

- [11] THORNTON, C. H., CUOCO, D.A., VELIVASAKIS E.E. Taming Structural Vibrations. Civil Engineering, 1990, pp. 57-59 Webster, A. C., Vaicaitis, R. Applications Tuned Mass Dampers to Control Vibrations of Composite Floor Systems, Engineering Journal/ American Institute of Steel Construction, 1992, pp. 116-124.
- [12] CARMONA, J.E.C. 2016. Proposta de um amortecedor para atenuação de vibrações em pisos de concreto: análise numérica e experimental. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UNB, Universidade de Brasília, UNB, Brasília, DF, 2016.
- [13] WEBSTER, Anthony C.; VAICAITIS, Rimas. Application of Tuned Mass Dampers To Control Vibrations of Composite Floor Systems. Engineering Journal, American Institute of Steel Construction, v. 29, p. 116-124, 1992.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] ZHANG, S.; XU, L.; QIN, J. Vibration of lightweight steel floor systems with occupants Modelling, formulation and dynamic properties. Engineering Structures, v. 147, p. 652–665, 2017.
- [17] ERLINA, R.; PRIYOSULISTYO; SAPUTRA, A. Vibration Serviceability of Grha Sabha Pramana Auditorium under Human Induced Excitation. Procedia Engineering, v.171, p. 1157–1164, 2017.
- [18] JORNAL VIRTUAL. “G1”. Disponível em: <https://g1.globo.com/sp/sao-paulo/noticia/2019/02/23/ruido-causado-em-palestra-motivacional-assustou-mais-quevibracao-em-predio-diz-tecnico-do-ipt.ghtml>. Acesso em: 22 Dez. 2019
- [19] JORNAL VIRTUAL. “Folha de São Paulo”. Disponível em: <https://www1.folha.uol.com.br/cotidiano/2019/03/academia-de-crossfitameaca-casas-no-baixoag-usta-dizem-moradores.shtml>. Acesso em: 22 Dez. 2019

- [20] HANAGAN, L. M. Walking-Induced Floor Vibration Case Studies. *Journal of Architectural Engineering*, v. 11, n. 1, mar, 2005.
- [21] Liu, F.; Battini, J.-M.; Pacoste, C.; Granberg, A. Experimental and Numerical Dynamic Analyses of Hollow Core Concrete Floors. *Structures*, v. 12, p. 286-297, nov. 2017.
- [22] Patuelli, C.; Polla, A.; Cestino, E.; Frulla, G. Experimental and Numerical Dynamic Behavior of Bending-Torsion Coupled Box-Beam. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, 2022
- [23] Aras, F.; Tufan, T. Experimental and numerical dynamic identification in an RC tower. *Revista de la Construcción*, vol. 21, no. 3, dic. 2022.
- [24] Banas, A. Experimental and Numerical Study on Dynamics of Two Footbridges with Different Shapes of Girders. *Appl. Sci.*, v. 10, n. 13, p. 4505, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app10134505>. Acesso em: 29 jun. 2020.
- [25] HE, W.; HE, K.; CUI, H.; WANG, G. Using a rhythmic human shaker to identify modal properties of a stationary human body on a footbridge. *Journal of Sound and Vibration*, v. 540, p. 117309, 2022.
- [26] Francavilla, A. B.; Latour, M.; Rizzano, G. Experimental and Numerical Analyses of Steel-concrete Composite Floors. *The Open Civil Engineering Journal*, v. 14, p. 163-178, 2020. DOI: 10.2174/1874149502014010163.
- [27] RACIC, V.; PAVIC, A.; BROWNJOHN, J. M. W. Modern facilities for experimental measurement of dynamic loads induced by humans: A literature review. *Shock and Vibration*, v. 20, n. 1, p. 53–67, 2013.
- [28] 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.
- [29] PARKHOUSE, J. G.; EWINS, D. J. Crowd-induced rhythmic loading. *Proceedings of the ICE - Structures and Buildings*, v. 159, p. 247–259, 2006
- [30] 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.
- [31] 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.

- [32] 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.
- [33] RACIC, V.; PAVIC, A.; BROWNJOHN, J. M. Mathematical modelling of near-periodic jumping force signals. T. Proulx (ed.), *Dynamics of Civil Structures, Volume 4, Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series 13*, DOI 10.1007/978-1-4419-9831-6\_23. The Society for Experimental Mechanics, 2011.
- [34] VEGA, D.; MAGLUTA, C.; ROITMAN N. Análise de cargas humanas e a sua interação com a estrutura. XXXVI Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering, pp. 1-16, Rio de Janeiro, Brasil, 2015.
- [35] 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.
- [36] FALATI, S. The contribution of non-structural components to the overall dynamic behaviour of concrete floor slabs. University of Oxford. Oxford, 1999.
- [37] ZIVANOVIC S.; DIAZ I.M.; PAVIC A. Influence of walking and standing crowds on structural dynamic performance. 27th I Modal Anal Conf 2009, 2009.
- [38] 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.
- [39] SALYARDS, K. A. E HUA, Y. Assessment of dynamic properties of a crowd model for human–structure interaction modeling. *Engineering Structures*, v. 89, p. 103–110, 2015.
- [40] MCDONALD, M. G. and ŽIVANOVIĆ, S. Measuring Ground Reaction Force and Quantifying Variability in Jumping and Bobbing Actions. *Journal of Structural Engineering*, p. 4016161, 2016.
- [41] ZHOU, D. et al. Comparison of two models for human-structure interaction. *Applied Mathematical Modelling*, v. 40, n. 5–6, p. 3738–3748, 2016.
- [42] ZHOU, X. e Li, J. Dynamic Performance Characteristics of Pre-Stressed Cable RC Truss Floor System under Human-Induced Loads. *International Journal of Structural Stability and Dynamics* Vol. 17, 2017.

- [43] 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.
- [44] CAMPISTA, F.F; SILVA, J.G.S. Vibration analysis of steel–concrete composite floors when subjected to rhythmic human activities. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*. 2018.
- [45] GASPAR, C.M. 2018. Avaliação do Efeito da Interação Humana Sobre Pisos de Edificações Submetidos a Atividades Humanas Rítmicas. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, PGECIV, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ, Rio de Janeiro, 2018.
- [46] CAMPISTA, D.F. 2019b. Estudo do comportamento estrutural dinâmico e avaliação de conforto humano das arquibancadas do Estádio Nacional de Brasília com base no emprego de sistemas biodinâmicos. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, PGECIV, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ, Rio de Janeiro, 2019b.
- [47] CAMPISTA, F.F., GASPAR, C.M.R., SANTOS DA SILVA, J.G. Modelagem das ações humanas rítmicas e estudo do conforto humano sobre edifícios mistos (aço-concreto). XXXVI Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering (CILAMCE), pp. 1-16, Rio de Janeiro/RJ, Brasil, 2015.
- [48] CAMPISTA, F.F. e Da 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 (CILAMCE ), pp. 1-16, Florianopolis/SC, Brasil, 2017.
- [49] CAMPISTA, D.F. e Da SILVA, J. G. S., Assessment of the Dynamic Structural Response of Soccer Stadiums Grandstands Based on the Use of Biodynamic Models. XL Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering (CILAMCE), pp. 1-13, Natal/Rn, Brazil, 2019.
- [50] CAMPISTA, F. F.; SILVA, José Guilherme Santos da. Vibration analysis of steel-concrete composite floors when subjected to rhythmic human activities. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, v. 8, p. 737-754, 2018.

- [51] GREBOWSKI, K., MAGDALENA, R., WILDE K.; Non-Destructive Testing of a Sport Tribune under Synchronized Crowd-Induced Excitation Using Vibration Analysis. *Jornal materials*. Polônia, 2019.
- [52] FERREIRA, B. E. Análise Numérico-Experimental de Vibrações Induzidas pelo Caminhar Humano sobre Pisos Mistos (Aço-Concreto). Dissertação de mestrado em Engenharia Civil – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, PROPEEs, Universidade Federal de Minas Gerais, UFMG, Minas Gerais, 2020.
- [53] BACHMANN, H.; AMMANN, W. J. *Vibrations in Structures Induced by Man and Machines*. Zürich (Switzerland): IABSE—AIPC—IVBH, 1987.
- [54] ELLIS, B. R. and JI, T. Human-structure interaction in vertical vibrations. *Structure and Buildings* 122, pag 1–9, 1997.
- [55] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 10137: Bases for design of structures - Serviceability of buildings and walkways against vibrations, Switzerland, 2007.
- [56] SIM, J. et al. Statistical model of crowd jumping loads. *ASCE Journal of Structural Engineering*, v. 134, n. 12, p. 1852–1861, 2008.
- [57] SMITH, A.L., HICKS, S.J. e DEVINE, P. J. *Design of Floors for Vibration: A New Approach (Revised Edition)*. The Steel Construction Institute (SCI) Publication P354, Ascot, 2009.
- [58] MARTÍNEZ, J. F. et al. Jumping load models applied on a gymnasium floor. *Engineering Structures*, v. 125, p. 26–38, 2016.
- [59] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6120: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações, 2019.
- [60] ELLIS, B. R.; JI, T. Loads generated by jumping crowds: Numerical modelling. *Structural Engineer*, v. 82, n. 17, p. 35–40, 2004.
- [61] MORELAND, R. The weight of a crowd. *Engineering*, v. 79, p. 551, 1905.
- [62] TILDEN, C. J. Kinetic effects of crowds. *Proceedings ASCE* 39 (3). Conference. 1913.
- [63] TUAN, C.-Y.; SAUL, W. E. Loads due to spectator movements. *ASCE Journal of Structural Engineering*, v. 111, n. 2, p. 418–434, 1985.

- [64] EBRAHIMPOUR, A. et al. Measuring dynamic occupant loads by microcomputer. ASCE Ninth Conference on Electronic Computation. Anais.1986
- [65] 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.
- [66] GASPAR, C. M. R.; Da SILVA, J. G. S. Influence of the human rhythmic activities modelling on the composite floor dynamic response. *Journal of Civil Engineering and Architecture Research*, vol. 2, p. 429-437, 2015.
- [67] SOUSA, F. A., CAMPISTA, F.F., CAMPISTA, D.F, SILVA, J. G. S, Human-induced vibrations of steel-concrete composite floors subjected to human rhythmic loads. XL Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering (CILAMCE), pp. 1-13, Natal/Rn, Brazil, 2019.
- [68] RICHTER, E. A.; SOUSA, F. A.; SILVA, J. G. S. Human Comfort Assessment of Steel-Concrete Composite Floors Subjected to People Dynamic Load. In: *The International Colloquium on Stability and Ductility of Steel Structures (SDSS)*, Lisboa, 2022. Ernst & Sohn (SDSS 2022), 2022. v. 1, p. 1-6.
- [69] SILVA, José Guilherme Santos da; VELLASCO, Pedro Colmar Gonçalves da Silva; ANDRADE, Sebastião Arthur Lopes de; LIMA, Luciano Rodrigues Ornelas de; ALMEIDA, Rogério Rosa de. Vibration Analysis of Long Span Joist Floors Submitted to Human Rhythmic Activities. In: Ebrahimi, F. (Org.). *Advances in Vibration Analysis Research*. 1ed. Rijeka, Croácia: INTECH - Open Access Publisher, 2011. p. 231-244.
- [70] BRANCO, Nathalia de Almeida Castelo; SOUSA, Felipe Almeida de; SILVA, José Guilherme Santos da. Human Comfort Investigation of Steel-Concrete Composite Floors Subjected to Rhythmic Dynamic Actions. *ce/papers*, v. 5, p. 110-119, 2022.
- [71] ALMEIDA, Rogério Rosa de; SILVA, José Guilherme Santos da; VELLASCO, Pedro Colmar Gonçalves da Silva; ANDRADE, Sebastião Arthur Lopes de; LIMA, Luciano Rodrigues Ornelas de. Dynamical Behaviour of Long Span Joist Floors Submitted to Human Rhythmic Activities. In: *Eurosteel 2008 - Fifth European Conference on Steel and Composite Structures*, 2008, Graz. *Proceedings of the Fifth European Conference on Steel and Composite Structures*. Bruxelas: ECCS - European Convention for Constructinal Steelwork, 2008. v. A. p. 735-740.
- [72] ARRILLAGA,J.; WATSON, N. R. *Power System Harmonics*. John Wiley & Sons, 2003.

- [73] E. Caetano, A. Cunha e C. Moutinho, "Vandal loads and induced vibrations on a footbridge". *Journal of Bridge Engineering*, vol. 16(3), pp. 375-382, 2011, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943.5592.0000154](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943.5592.0000154)
- [74] 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.
- [75] 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.
- [76] 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.
- [77] ZHANG, M.; GEORGAKIS, C.T.; QU, W. E CHEN, J. SMD model parameters of pedestrians for vertical human–structure interaction. IMAC, XXXIII A Conference and Exposition on Structural Dynamics, 2015.
- [78] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. BS 6472-1:2008. Guide to evaluation of human exposure to vibration in buildings. Part 1: Vibration sources other than blasting. British Standards Institution, 2008.
- [79] MARGARIDO, G. R. Metodologias para a avaliação dos níveis de vibração em estruturas do ponto de vista do conforto humano. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Especialização em Estruturas). Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto. 2013.
- [80] Griffin, M. J. *Handbook of Human Vibration*. Academic, London, 1990. (eBook Kindle, English Edition)
- [81] JUNIOR, L. A. S., (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFV, Universidade Federal de Viçosa, UFV, Viçosa, MG, 2015.
- [82] 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.

- [83] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- [84] ALLEN, D.E. "Floor Vibrations from Aerobics," *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 17, No. 5, pp. 771–779, 1990.
- [85] FARLEY, C. T., GONZÁLEZ, O. Leg stiffness and stride frequency in human running. *Journal of Biomechanics*, v. 29, n. 2, p. 181–186, 1996.
- [86] YU Z., ZHAO Q., YANG J., XIA Y., MA Y., "Uncoupled spatial biodynamic model for seated humans exposed to vibration-development and validation". *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 85, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2021.103171>.
- [87] DA SILVA, F. T., PIMENTEL, R. L. Biodynamic walking model for vibration serviceability of footbridges in vertical direction. In: *Proceeding of the 8th International Conference on Structural Dynamics (Eurodyn 2011)*, p. 1090-1096, 2011.
- [88] GASPAR, Cássio; CAETANO, Elsa; MOUTINHO, Carlos; SANTOS DA SILVA, J. G. Biodynamic modelling of human rhythmic activities. *PROCEDIA ENGINEERING*, v. 199, p. 2802-2807, 2017.
- [89] ARAMPATZIS, A., BRÜGGEMANN, G.-P., METZLER, V. The Effect of Speed on Leg Stiffness and Joint Kinetics in Human Running. *Journal of Biomechanics*, v. 32, p. 1349–1353, 1999.
- [90] PFEIL, Michèle SCHUBERT ; VARELA, Wendell DINIZ ; DE PAULA AMADOR DA COSTA, Natasha. Experimental calibration of a one degree of freedom biodynamic model to simulate human walking-structure interaction. *Engineering Structures*, v. 262, p. 114330, 2022.
- [91] AGUIAR, Jefferson Viana; FERREIRA, Bárbara Elisa; CARVALHO, Hermes; SILVA, José Guilherme Santos da. Assessment of the Human Comfort of Floors Based on the Use of Biodynamic Models. In: *XLII Ibero-Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering (CILAMCE 2021 - Online)*, 2021. v. 1. p. 1-7.
- [92] DEBONA, Gilvan Lunz; SILVA, José Guilherme Santos da. Human Comfort Analysis of Concrete Pedestrian Footbridges Using Biodynamic Models. In: *ICOEV 2015 - International Conference on Engineering Vibration*, 2015, Liubliana, Eslovênia. *Proceedings of the ICOEV 2015 - International Conference on Engineering Vibration*. Liubliana, Eslovênia: Editora da Universidade de Liubliana, 2015. v. 1. p. 1-10.

- [93] LIANG, Cho-Chung; CHIANG, Chi-Feng. A study on biodynamic models of seated human subjects exposed to vertical vibration. *International Journal of Industrial Ergonomics*, v. 36, n. 10, p. 869-890, outubro de 2006.
- [94] 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.
- [95] CAMPISTA, F.F. 2019. Modelagem de sistemas biodinâmicos para avaliação do comportamento estrutural dinâmico de pisos mistos (aço-concreto) de edifícios submetidos a atividades humanas rítmicas. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, PGECIV, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ, Rio de Janeiro, 2019.
- [96] COERMANN, R. R. The Mechanical Impedance of the Human Body in Sitting and Standing Position at Low Frequencies. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, v. 4, n. 5, p. 227–253, 1962
- [97] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 5982: Vibration and Shock-Mechanical driving point impedance of the human body, 1981
- [98] 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*, v. 22, n. 2, p. 471–479, 1995.
- [99] AL-FOQAHA'A, A. A. Design criterion for wood floor vibrations via finite element and reliability analyses. Tese (Doutorado). Washington State University, Pullman, USA, 1997.
- [100] ZHANG, L., XU, D., MAKHSOUS, M., LIN, F. Stiffness and viscous damping of the human leg. *Proc. of the 24th Ann. Meeting of the Am. Soc. of Biomech*, p. 3–4, 2000.
- [101] BROWNJOHN, J. M. W.; ZHENG, X. Effects of human postures on energy dissipation from vibrating floors. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, June 2001, vol. 4317. DOI: 10.1117/12.429625.
- [102] MATSUMOTO, Y., GRIFFIN, M. J., "Mathematical models for the apparent masses of standing subjects exposed to vertical whole-body vibration. *Journal of Sound and Vibration*, 206 pp. 431-451, 2003

- [103] SACHSE, R.; PAVIC, A.; REYNOLDS, P. Human-Structure Dynamic Interaction in Civil Engineering Dynamics: A Literature Review. *The Shock and Vibration Digest*, January 2003, vol. 35, n° 1. DOI: 10.1177/0583102403035001624.
- [104] SETAREH, M., GAN, S. Study of Human-Structure Dynamic Interactions. In: *Dynamics of Coupled Structures, Volume 4*. Springer, Champ, p.391-399, 2016.
- [105] FERRIS, D. P., LOUIE, M. FARLEY, C. T., "Running in the real world adjusting leg stiffness for diferente surfaces". *Proc. R. Soc. London B* 265, pp. 989-994, 1998
- [106] NIGG, B. M. LIU, W., "The effect of muscle stiffness and damping on simulated impact force peaks during running". *Journal of Biomechanics*, 32, pp. 849-856, 1999
- [107] MIYAMORI, Y., OBATA, T. HAYASHIKAWA, T., SATO, K., "Study on identification of human walking model based on dynamics response characteristics of pedestrian bridges" The Eight East Asia-Pacific conference on structural engineering and construction. In: *Proceedings CR-ROM*, Paper No. 1066, 2001.
- [108] ARCHBOLD, P. Interactive load models for pedestrian footbridges. Tese de Doutorado. University College Dublin. 2004.
- [109] MARTIN, B. J.; KIM, H. Biodynamic Characteristics of Upper Limb Reaching Movements of the Seated Human Under Whole-Body Vibration. *Journal of Applied Biomechanics*, February 2013, vol. 29, n° 1, p. 12-22. DOI: 10.1123/jab.29.1.12.
- [110] CAPRANI, C. C., KEOGH, J., ARCHBOLD, P., FANNING, P., "Charactesistic Vertical Response of a Footbridge Due to Crowd Loading". *Proceedings of the 8th International Conference on Structural Dynamics, EURODDYN 2011*, Leuven, Belgium, 4-6 July 2011
- [111] QIN, J. W.; LAW, S. S.; YANG, Q. S. E YANG, N. Pedestrian bridge dynamic interaction, including human participation. *Journal of Sound and Vibration*, v. 332, n. 4, p. 1107–1124, 2013.
- [112] JIMÉNEZ-ALONSO, J. F., SÁEZ, A. A direct pedestrian-structure interaction model to characterize the human induced vibrations on slender footbridges. *Informes de la Construcción*, v. 66, n. 1, p. 1–9, 2014.
- [113] VAN NIMMEN, K., ŽIVANOVIĆ, S., LOMBAERT, G., DE ROECK, G., VAN DEN BROECK, P. Identification and modelling of vertical human-structure interaction. In: *Dynamics of Civil Structures, Volume 2*. Springer International Publishing, p. 319- 330, 2015

- [114] LOU, J., ZHANG, M., CHEN, J. Identification of Stiffness, Damping and Biological Force of SMD Model for Human Walking. In: Dynamics of Civil Structures, Volume 2. Springer, Cham, p. 331-337, 2015.
- [115] SHAHABPOOR, E, PAVIC, A, RACIC, V. Identification of mass–spring– damper model of walking humans. In: Structures. Elsevier, p. 233-246, 2016.
- [116] GAO, Y. A., YANG, Q. S. and DONG, Y. A Three-Dimensional Pedestrian–Structure Interaction Model for General Applications. International Journal of Structural Stability and Dynamics, v. 18, n. 9, 1850107, 2018.
- [117] TOSO, Marcelo André. Instrumentação e modelos biodinâmicos para simulação de carregamentos em estruturas submetidas a esforços da caminhada humana. Tese de doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2016.
- [118] VIEIRA, Terezinha de Jesus Carvalho de Oliveira. Modelagem do comportamento vibratório de arquibancadas temporárias metálicas devido à presença de espectadores. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal da Paraíba, 2014.
- [119] PEÑA, Andrea Nataly. Avaliação de vibrações em passarelas de pedestres na direção lateral considerando modelos biodinâmicos de pessoas caminhando. Tese de doutorado em Estruturas e Construção Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Brasília, 2018.
- [120] RAO, S. Engineering Optimization: Theory and Practice. [S.l.]: John Wiley Sons, 2009.
- [121] MARZBANRAD J. e AFKAR A., “A biomechanical model as a seated human body for calculation of vertical vibration transmissibility using a genetic algorithm.” *Journal Mech Med Biol*, vol. 13, 2013, <https://doi.org/10.1142/S021951941350053X>
- [122] ABBAS W., ABOUELATTA O.B., EL-AZAB M., ELSAIDY M., MEGAHED A.A, “Optimization of biodynamic seated human models using genetic algorithms”. *Engineering*, vol. 2, n° 9, 2010, <https://doi.org/10.4236/eng.2010.29092>.
- [123] YU, Z.; ZHAO, Q.; YANG, J.; XIA, Y.; MA, Y. Uncoupled spatial biodynamic model for seated humans exposed to vibration-development and validation. International Journal of Industrial Ergonomics, vol. 85, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2021.103171>

- [124] BRANDT, A. Noise and vibration analysis signal analysis: signal analysis and experimental procedures. John Wiley & Sons, 2011.
- [125] MATLAB. Versão R2017a. MathWorks, 2017.
- [126] GUTIÉRREZ, R. G.; RUIZ, M. L. Correlation coefficient. Encyclopedia of Statistics in Behavioral Science, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/0470013192.bsa514>
- [127] MUKAKA, M. M. A guide to appropriate use of correlation coefficient in medical research. Malawi Medical Journal, v. 24, n. 3, p. 69-71, 2012. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3576830/>
- [128] HAFEEZ, S.; MAJEED, A.; MALIK, S. U. Understanding Correlation: Factors Influencing the Correlation Coefficient. Pakistan Journal of Statistics and Operation Research, v. 14, n. 1, p. 103-113, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.18187/pjsor.v14i1.1863>. Acesso em: [data de acesso].
- [129] FIELD, A. P. Discovering statistics using IBM SPSS Statistics. 4th ed. Thousand Oaks, CA: Sage, 2013.
- [130] ANSYS Swanson Analysis Systems, Inc., 2010. P. O. Box 65, Johnson Road, Houston, PA, 15342-0065. Release 11.0, SP1 UP20070830, ANSYS, Inc. is a UL registered ISO 9001:2000 Company. Products ANSYS Academic Research, Using FLEXlm v10.8.0.7 build 26147, Customer 00489194.
- [131] SAIDI, I.; HRITOS, N.; GAD, E. F. and WILSON, J. L. Floor vibrations due to human excitation – damping perspective. Earthquake Engineering in Australia, Canberra, 24-26 de novembro, 2006.
- [132] CRAIG JR., R. R. Structural Dynamics. Hoboken: John Wiley, 1981.
- [133] CLOUGH, R. W.; PENZIEN, J. Dynamics of Structures. 2nd ed. Nova Iorque: McGraw-Hill, 1993.
- [134] CHOPRA, A.K. Dynamics of Structures. 3rd ed. Wiley, London/UK, 2006.
- [135] SALYARDS, K. A. & FIRMAN III, R. J. Human-Structure Interaction: Effects of Crowd Characteristics. *Civil Engineering Topics*, Volume 4. Springer, 2011.
- [136] TAKABATAKE, H. Dynamic Analysis of Rectangular Plates with Stepped Thickness Subjected to Moving Loads Including Additional Mass. Journal of Sound and Vibration, Volume 213, Issue 5, 25 June 1998, Pages 829-842. DOI: 10.1006/jsvi.1998.1555.

- [137] DEBONA, G.L. Monitoramento experimental e modelagem numérica da resposta dinâmica estrutural de passarelas para pedestres. Tese de DSc (em Português). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PGECIV), Universidade Estadual do Rio de Janeiro (UERJ). Rio de Janeiro/RJ, Brasil, 2016.
- [138] Mayes, R., Rixen, D., & Allen, M. (Eds.). (2015). Topics in Experimental Dynamic Substructuring, Volume 2: Proceedings of the 31st iMac, a Conference on Structural Dynamics, 2013.
- [139] PRAZZO, Carlos Eduardo. Análise Modal de uma Estrutura do Tipo Viga Utilizando Materiais Piezelétricos (PVDF) como Sensores. Dissertação de mestrado. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Faculdade de Engenharia, Campus de Ilha Solteira, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2003.
- [140] FARAJIAN, MOSTAFA et al. Experimental Study on the Natural Dynamic Characteristics of Steel-Framed Modular Structures. Building, 2012.
- [141] CHOPRA, A.K. Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering. 4th ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2011.
- [142] ZHANG, Yi; HE, Wei; ZHANG, Jiewen; DONG, Hua. Experimental and Numerical Investigation on Dynamic Properties and Human-Induced Vibrations of an Asymmetric Steel-Plated Stress-Ribbon Footbridge. Advances in Civil Engineering, v. 2021, Article ID 2028378, [Número de páginas], 2021. DOI: 10.1155/2021/2028378.
- [143] MAIA, N. M. M.; SILVA, J. M. M. Theoretical and Experimental Modal Analysis. CRC Press, 2010.
- [144] CAO, L., QI, H. e LI, J. Experimental and numerical studies on the vibration serviceability of fan shaped prestressed concrete floor. International Journal of Distributed Sensor Networks, v. 14, n. 8, p. 1-11, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/1550147718795746>.
- [145] CHEN, W.; LU, Z.; LIN, W. et al. Theoretical and experimental modal analysis of the Guangzhou New TV Tower. Engineering Structures, p. 3628-3646, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.07.028>.
- [146] BROWNJOHN, J.M.W.; RABY, A.; BASSITT, J. et al. Experimental modal analysis of British rock lighthouses. Marine Structures, v. 62, p. 1-22, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2018.07.001>

- [147] MARIO, P.; LEIGH, W. Structural dynamics: theory and computation. 5<sup>a</sup> Ed. CBS Publishers and Distributors, United States of America, 2004.
- [148] AGARWAL, P.; SHRIKANDE, M. Earthquake resistant design of structures. Prentice-Hall of India, New Delhi, 2006.
- [149] NICOLETTI, V.; MARTINI, R.; CARBONARI, S.; GARA, F. Operational Modal Analysis as a Support for the Development of Digital Twin Models of Bridges. *Infrastructures*, v. 8, p. 24, 2023.
- [150] LOURENS, E.; VAN ZYL, L. Modal testing of structures using scanning laser Doppler vibrometry. *Mechanical Systems and Signal Processing*, v. 106, p. 152-165, 2018.
- [151] LIN, C. H.; LIN, S. C.; TSENG, T. L. Experimental modal analysis of structures using non-contact laser Doppler vibrometry. *Measurement*, v. 46, n. 5, p. 1804-1813, 2013.
- [152] DE CLERCK, J.; GUILLAUME, P.; VANLANDUIT, S. State-of-the-art and future challenges in operational modal analysis. *Archives of Computational Methods in Engineering*, v. 18, n. 4, p. 401-419, 2011.
- [153] AVENDAÑO, L. D. V.; ARGÜELLES, F. B. Operational modal analysis of civil engineering structures: a comprehensive review. *Structural Control and Health Monitoring*, v. 24, n. 1, p. e1867, 2017.
- [154] DÖHLER, M.; LAORY, I.; AU, S. K. Modal testing of civil engineering structures with dense sensor arrays. *Engineering Structures*, v. 101, p. 524-533, 2015.
- [155] DESMET, W.; SAS, P. Operational modal analysis of civil engineering structures: an overview. *Mechanical Systems and Signal Processing*, v. 60, p. 21-36, 2015.
- [156] LI, H. N.; XIA, Y.; XIA, Y. Experimental modal analysis of structures using shaker excitation: a review. *Mechanical Systems and Signal Processing*, v. 87, p. 349-371, 2017.
- [157] SUN, Y.; WU, W.; LU, Z. Experimental dynamic substructuring using shaker excitation and output-only modal parameter identification techniques. *Journal of Sound and Vibration*, v. 340, p. 30-47, 2015.
- [158] DÍAZ, E. R.; MAGALHÃES, F. Experimental dynamic substructuring using shaker excitation: a review. *Mechanical Systems and Signal Processing*, v. 90, p. 203-225, 2017.

[159] PELÁEZ-RODRÍGUEZ, César et al. Human-induced force reconstruction using a non-linear electrodynamic shaker applying an iterative neural network algorithm. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences*, vol. 71, n. 3, Article number: e144615, 2023. DOI: 10.24425/bpasts.2023.144615.

[160] LÓPEZ-AENLLE, M.; GONZÁLEZ, A.; LÓPEZ-AENLLE, A.; MONTERO, G. Modal testing of structures with shaker excitation: a review. *Archives of Computational Methods in Engineering*, v. 26, n. 6, p. 1545-1568, 2019.

[161] SETAREH, M. Evaluation and assessment of vibrations owing to human activity. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings*, v. 165, n. 5, p. 219–231, 2012.

**APÊNDICE A - Parâmetros da modelagem de sistemas biodinâmicos de cada pessoa**

Tabela A.1 - Características dos sistemas biodinâmicos das pessoas 1 a 25

Pessoa	m (kg)	k (N/m)	c (Ns/m)
1	81,80	41449,95	708,65
2	66,05	34290,52	558,95
3	102,00	55735,04	714,70
4	63,85	33313,89	531,20
5	88,25	44353,27	848,17
6	80,70	40793,94	743,75
7	78,40	40744,35	676,82
8	74,50	52218,06	605,89
9	63,90	36609,48	561,72
10	91,35	40032,70	956,95
11	66,00	37277,32	586,42
12	47,45	53974,79	935,36
13	73,85	37375,20	635,22
14	74,34	35617,08	531,13
15	152,30	40765,49	684,54
16	93,55	40101,87	763,29
17	73,30	39598,87	672,30
18	42,40	42586,58	871,61
19	61,90	37621,74	553,58
20	58,90	58552,60	1113,25
21	107,15	46710,84	945,92
22	56,65	38459,96	570,45
23	71,00	54766,95	1789,32
24	50,05	42753,64	161,14
25	73,00	39623,69	626,28

Tabela A.2 - Características dos sistemas biodinâmicos das pessoas 26 a 50

Pessoa	m (kg)	k (N/m)	c (Ns/m)
26	62,10	50428,46	570,27
27	78,50	41252,57	733,47
28	69,95	38990,72	597,73
29	75,20	38352,38	674,37
30	94,60	46372,69	922,87
31	72,10	39436,91	617,86
32	76,05	38729,72	685,09
33	63,90	36609,48	561,72
34	72,45	43608,99	300,08
35	54,90	51307,42	1104,01
36	65,00	33458,90	535,58
37	91,75	52963,59	1052,65
38	53,75	35628,74	446,10
39	53,75	51727,44	817,20
40	61,95	35989,34	538,78
41	62,60	49507,92	300,87
42	41,00	41311,69	207,99
43	100,10	40298,08	992,76
44	82,85	52870,60	627,94
45	69,25	59471,14	217,64
46	58,75	37121,50	865,53
47	48,90	58584,20	637,06
48	76,20	42679,10	514,91
49	92,50	49337,78	1383,02
50	73,20	57279,81	602,07

Tabela A.3 - Características dos sistemas biodinâmicos das pessoas 51 a 75

Pessoa	m (kg)	k (N/m)	c (Ns/m)
51	69,20	59511,37	217,54
52	80,10	53178,96	724,62
53	58,30	34437,77	1360,67
54	73,95	39512,26	995,10
55	91,95	45933,09	1385,63
56	51,90	50337,45	1516,31
57	56,75	39826,42	582,66
58	104,50	49581,94	2776,04
59	59,25	37145,49	580,23
60	90,10	40330,10	968,68
61	85,10	40631,91	365,53
62	85,10	37728,35	1397,26
63	84,15	35671,64	264,50
64	63,20	37271,76	770,27
65	65,20	58727,19	578,97
66	45,00	37680,98	364,87
67	73,45	54875,16	597,94
68	94,55	43758,38	1013,08
69	93,90	39220,78	677,97
70	67,10	49184,36	1135,00
71	77,80	37494,61	462,14
72	59,90	31593,17	190,07
73	54,85	36502,14	285,32
74	59,90	38826,77	345,28
75	88,00	39663,02	433,62

Tabela A.4 - Características dos sistemas biodinâmicos das pessoas 76 a 100

Pessoa	m (kg)	k (N/m)	c (Ns/m)
76	66,70	55417,57	683,54
77	56,40	52473,57	1952,53
78	86,90	33884,40	351,66
79	96,55	36410,52	304,70
80	64,50	26008,91	1127,18
81	89,40	52823,80	2753,85
82	66,05	42429,48	935,68
83	64,45	57984,03	1615,07
84	112,95	59499,75	354,84
85	77,20	37468,75	611,11
86	112,95	40087,14	1469,37
87	82,45	32511,70	1286,58
88	87,25	39912,15	381,12
89	104,40	58693,17	435,21
90	92,60	58776,16	1956,24
91	60,70	58717,10	1143,57
92	86,50	53622,19	990,58
93	68,15	59694,03	214,24
94	74,45	58009,68	1013,86
95	80,00	53491,65	1194,73
96	66,45	59467,37	208,77
97	79,30	50668,72	795,04
98	91,25	46571,87	1609,65
99	58,05	59457,57	182,37
100	96,30	51863,21	930,60

**APÊNDICE B** - Coeficiente de Pearson (CCP) entre a força experimental ( $F_{exp}$ ) e a força otimizada ( $F_{otm}$ ) das pessoas 1 até 100

Tabela B.1 - Valores de correlação de Pearson (CCP) entre a força experimental ( $F_{exp}$ ) e a força otimizada ( $F_{otm}$ ) das pessoas 1 a 25

Pessoa	Coeficiente de Pearson (CPP) entre $F_{exp}$ x $F_{otm}$	
	Domínio do tempo	Domínio da frequência
1	0,95	0,99
2	0,97	0,98
3	0,96	0,97
4	0,96	0,97
5	0,98	0,99
6	0,94	0,95
7	0,92	0,98
8	0,97	0,99
9	0,80	0,93
10	0,81	0,91
11	0,91	0,92
12	0,94	0,98
13	0,89	0,94
14	0,92	0,98
15	0,86	0,98
16	0,86	0,96
17	0,97	0,99
18	0,74	0,82
19	0,87	0,98
20	0,94	0,97
21	0,95	0,98
22	0,93	0,98
23	0,88	0,98
24	0,98	0,99
25	0,94	0,96

Tabela B.2 - Valores de correlação de Pearson (CCP) entre a força experimental ( $F_{exp}$ ) e a força otimizada ( $F_{otm}$ ) das pessoas 26 a 50

Pessoa	Coeficiente de Pearson (CPP) entre $F_{exp}$ x $F_{otm}$	
	Domínio do tempo	Domínio da frequência
26	0,94	0,96
27	0,97	0,98
28	0,92	0,99
29	0,70	0,95
30	0,90	0,99
31	0,92	0,98
32	0,94	0,97
33	0,96	0,98
34	0,91	0,94
35	0,87	0,96
36	0,86	0,93
37	0,90	0,97
38	0,96	0,98
39	0,96	0,98
40	0,94	0,97
41	0,94	0,96
42	0,98	0,99
43	0,85	0,98
44	0,94	0,97
45	0,98	0,99
46	0,88	0,96
47	0,97	0,99
48	0,95	0,98
49	0,80	0,95
50	0,96	0,97

Tabela B.3 - Valores de correlação de Pearson (CCP) entre a força experimental ( $F_{exp}$ ) e a força otimizada ( $F_{otm}$ ) das pessoas 51 a 75

Pessoa	Coeficiente de Pearson (CPP) entre $F_{exp}$ x $F_{otm}$	
	Domínio do tempo	Domínio da frequência
51	0,96	0,97
52	0,91	0,94
53	0,80	0,98
54	0,82	0,95
55	0,85	0,97
56	0,87	0,97
57	0,83	0,88
58	0,81	0,99
59	0,93	0,97
60	0,83	0,96
61	0,88	0,94
62	0,77	0,97
63	0,89	0,96
64	0,82	0,92
65	0,95	0,97
66	0,90	0,93
67	0,95	0,97
68	0,83	0,97
69	0,75	0,94
70	0,85	0,93
71	0,95	0,98
72	0,97	0,98
73	0,96	0,97
74	0,97	0,99
75	0,87	0,95

Tabela B.4 - Valores de correlação de Pearson (CCP) entre a força experimental ( $F_{exp}$ ) e a força otimizada ( $F_{otm}$ ) das pessoas 76 a 100

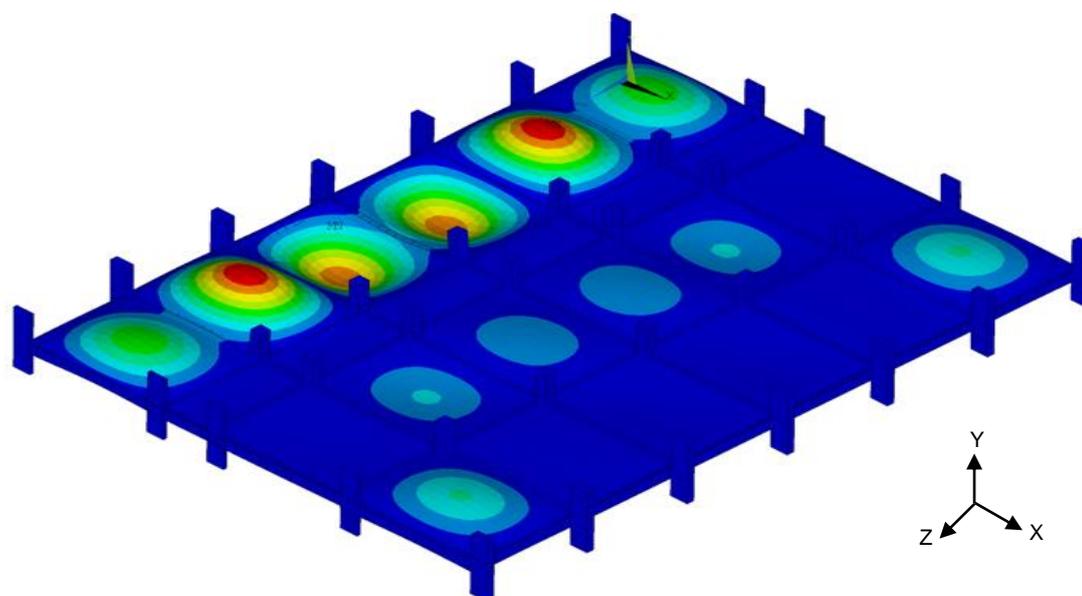
Pessoa	Coeficiente de Pearson (CPP) entre $F_{exp}$ x $F_{otm}$	
	Domínio do tempo	Domínio da frequência
76	0,97	0,99
77	0,85	0,97
78	0,94	0,98
79	0,88	0,98
80	0,69	0,96
81	0,76	0,99
82	0,88	0,96
83	0,90	0,98
84	0,89	0,95
85	0,91	0,96
86	0,71	0,99
87	0,78	0,99
88	0,93	0,98
89	0,92	0,96
90	0,86	0,98
91	0,95	0,99
92	0,90	0,96
93	0,97	0,98
94	0,92	0,97
95	0,88	0,97
96	0,97	0,98
97	0,93	0,98
98	0,83	0,98
99	0,98	0,99
100	0,94	0,98

### APÊNDICE C - Propriedades geométricas do piso de concreto armado

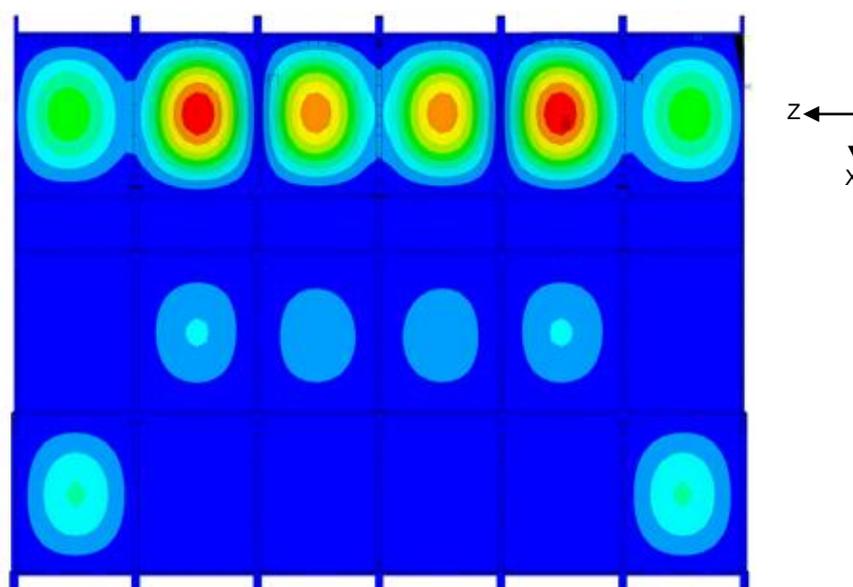
Tabela C.1 - Dimensões dos elementos estruturais: vigas e pilares

Vigas	Seção (cm x cm)	Pilares	Seção (cm x cm)
V1	20 x 62	P31, P32, P33, P34, P35, P36, P37, P60, P61, P62, P63 e P64	40 x 100
V2	20 x 62		
V3	20 x 62		
V4	20 x 62		
V5	20 x 62		
V6	19,5 x 62	P38, P44, P45, P51, P52, P58, P59 e P65	19,5 x 100
V7	32,5 x 62		
V8	25 x 62		
V9	25 x 62		
V10	25 x 62	P39, P40, P41, P42, P43, P46, P47, P48, P49, P50, P53, P54, P55, P56 e P57	60 x 60
V11	25 x 62		
V12	25 x 62		
V13	32,5 x 62		
V14	19,5 x 62		

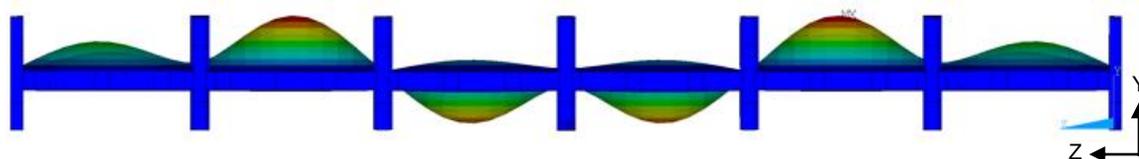
## APÊNDICE D - Modos de vibração do piso do 11º até 18º



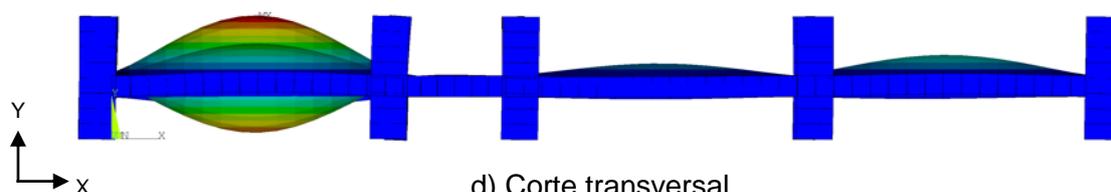
a) Vista isométrica



b) Vista planta

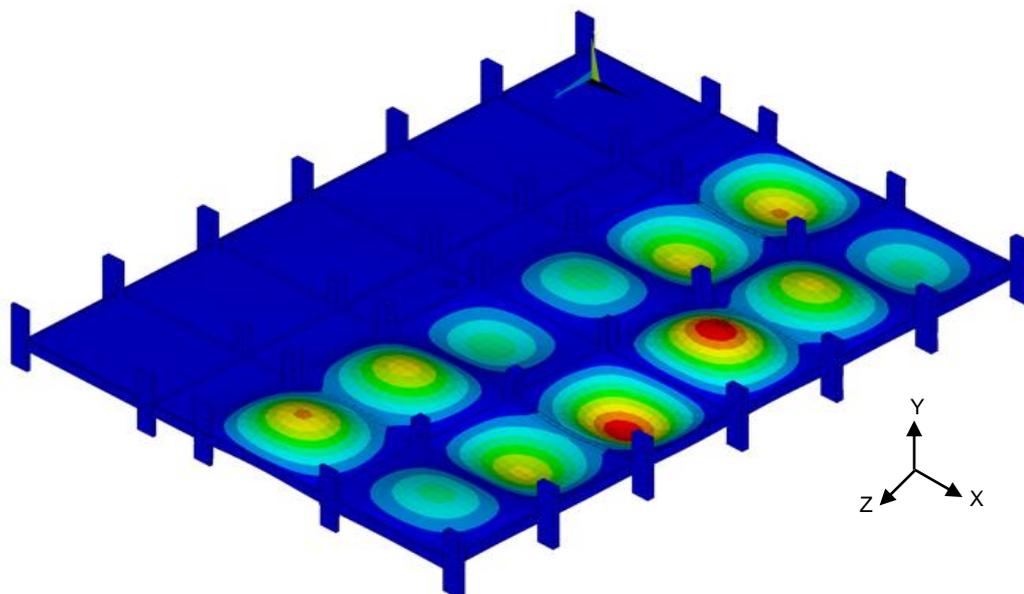


c) Corte longitudinal

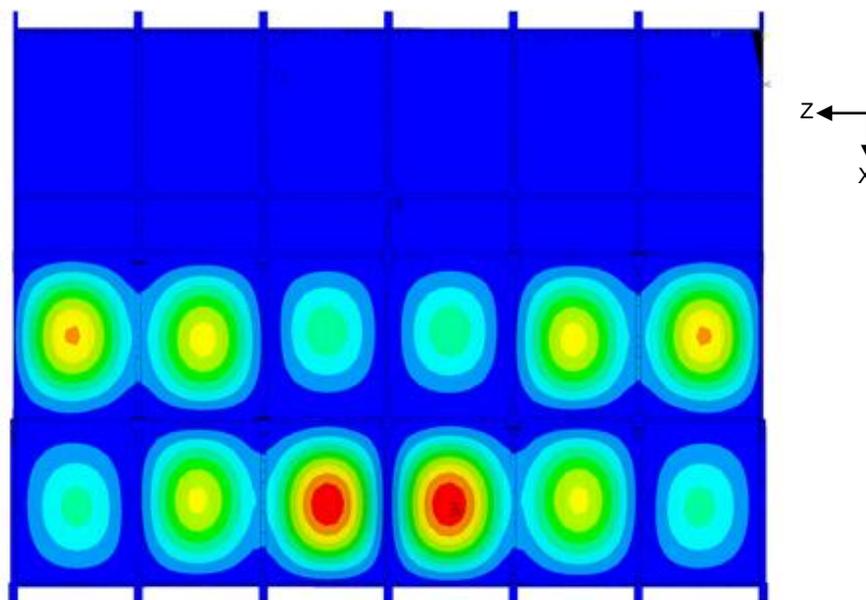


d) Corte transversal

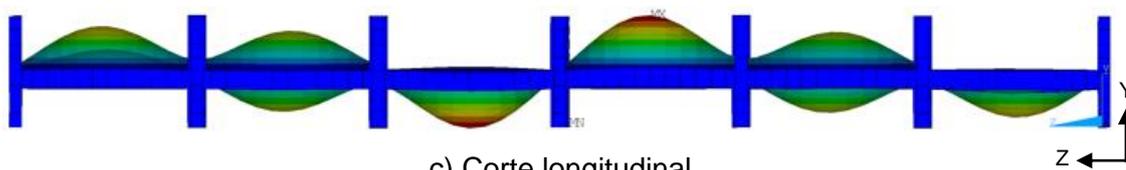
Figura D-1 - 11º modo de vibração ( $f_{11} = 8,70$  Hz)



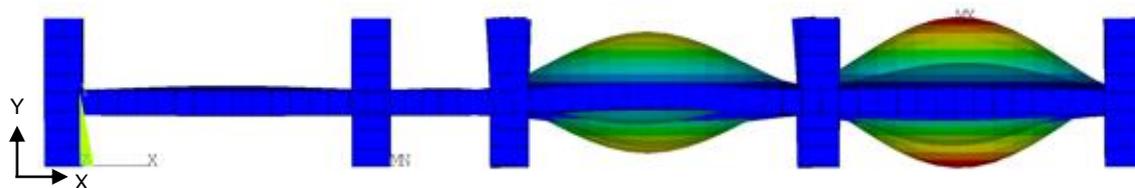
a) Vista isométrica



b) Vista planta

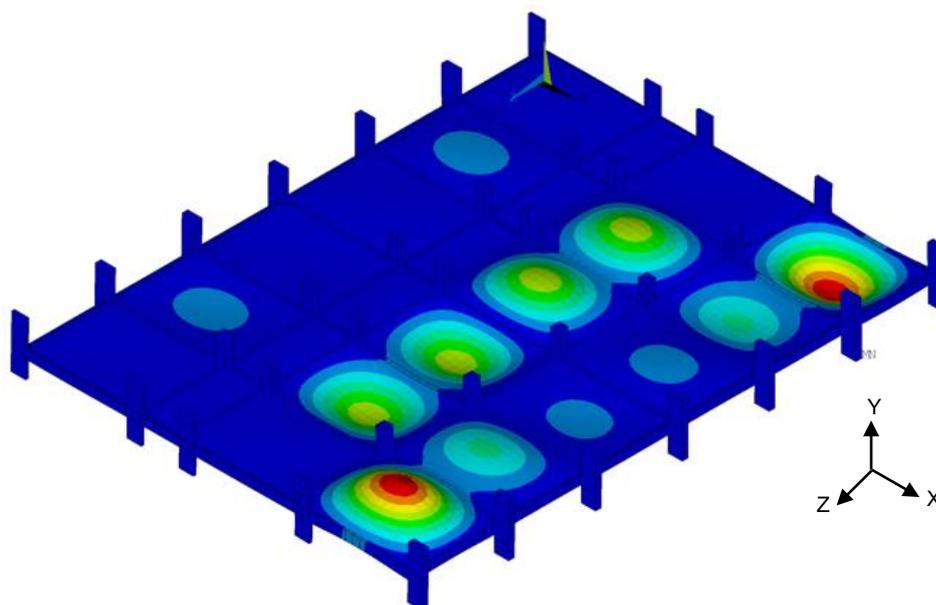


c) Corte longitudinal

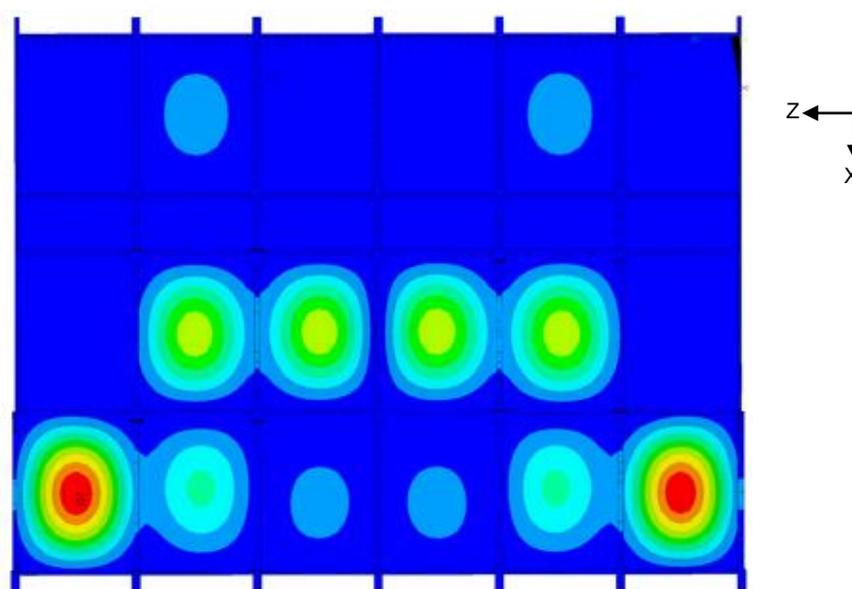


d) Corte transversal

**Figura D-2 - 12° modo de vibração ( $f_{12} = 8,70$  Hz)**



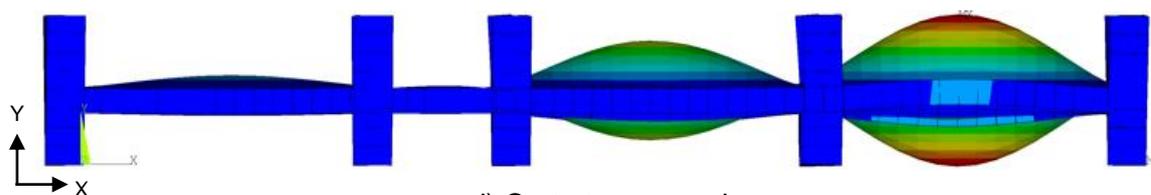
a) Vista isométrica



b) Vista planta

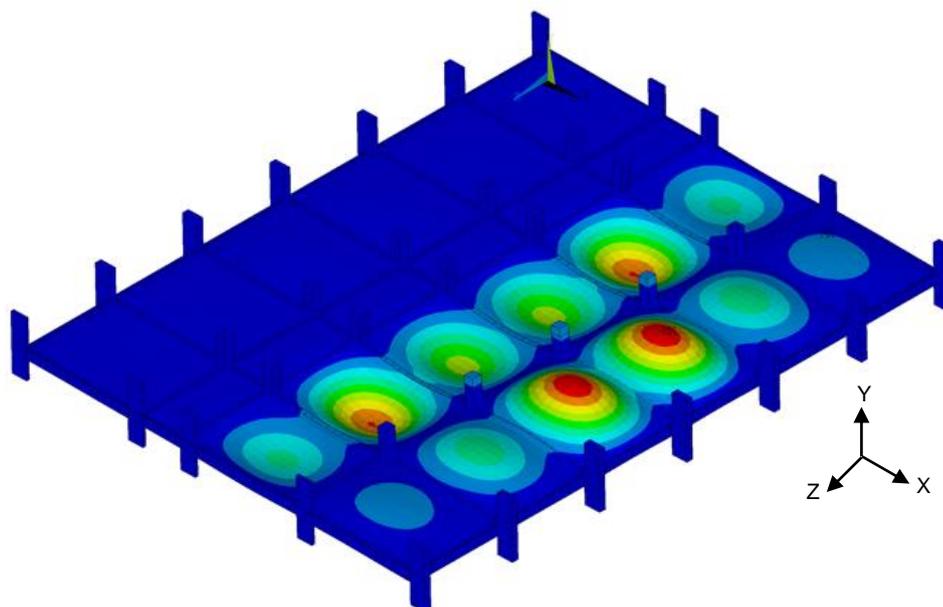


c) Corte longitudinal

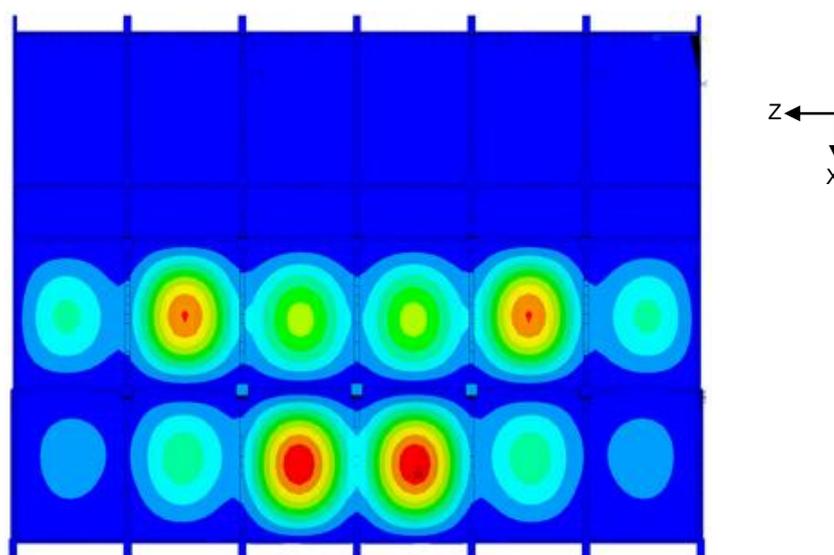


d) Corte transversal

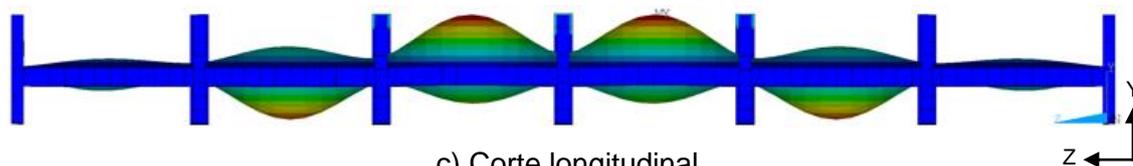
**Figura D-3 - 13° modo de vibração ( $f_{13} = 8,88$  Hz)**



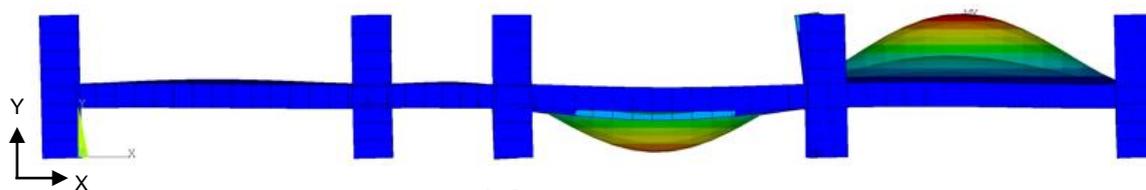
a) Vista isométrica



b) Vista planta

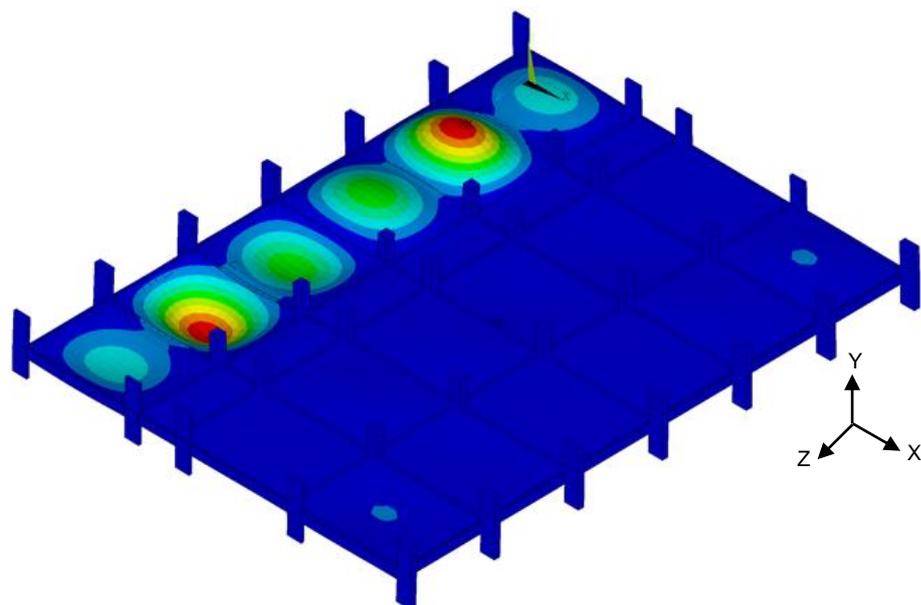


c) Corte longitudinal

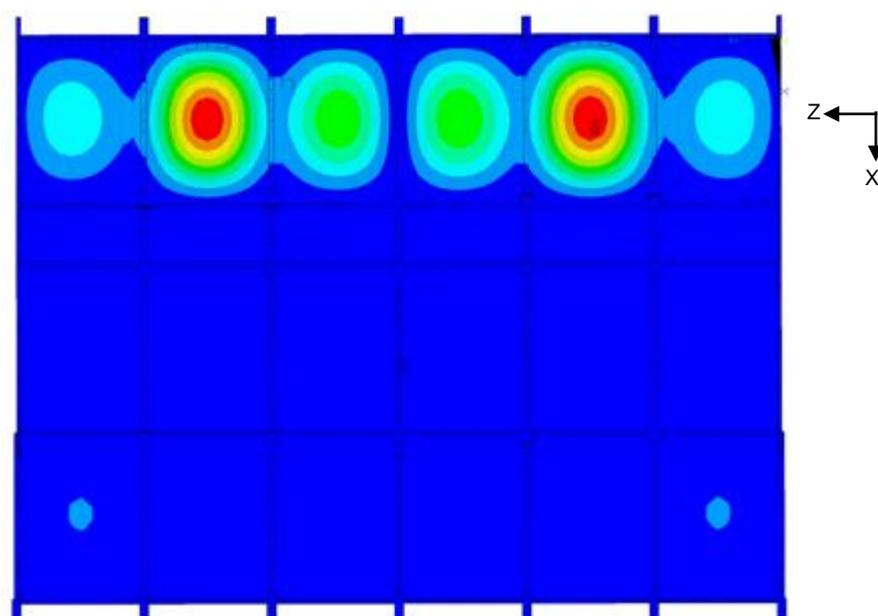


d) Corte transversal

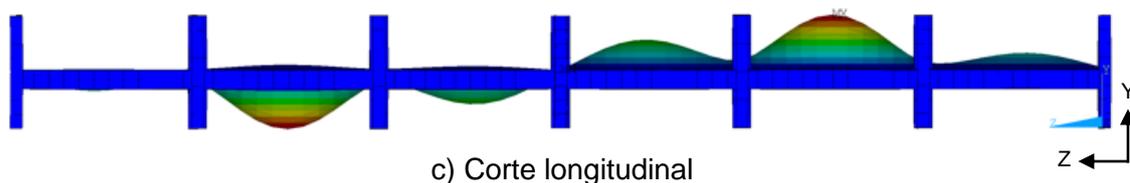
**Figura D-4 - 14° modo de vibração ( $f_{14} = 8,95$  Hz)**



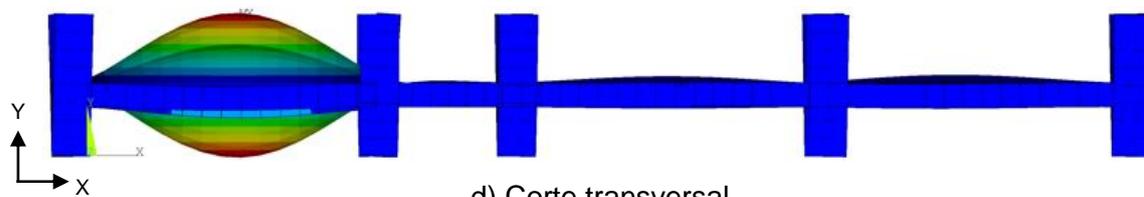
a) Vista isométrica



b) Vista planta

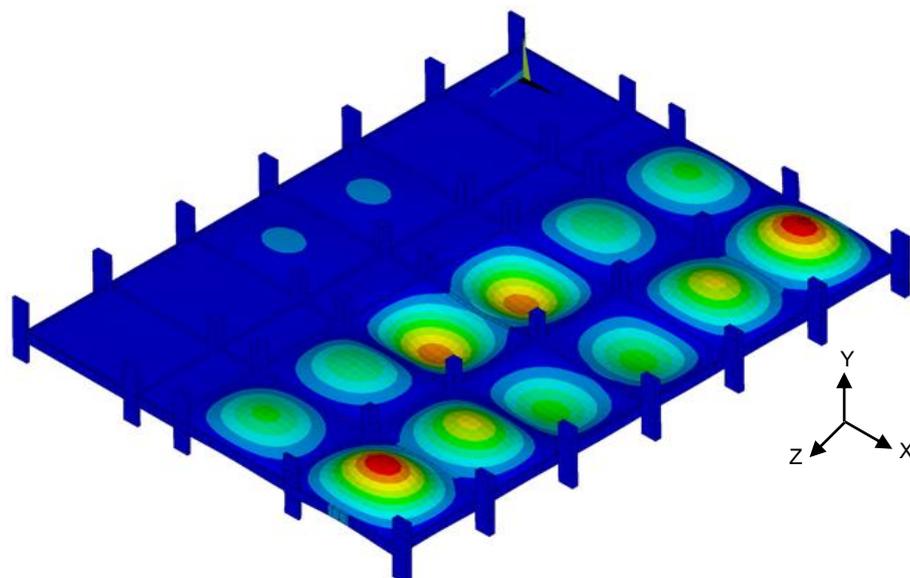


c) Corte longitudinal

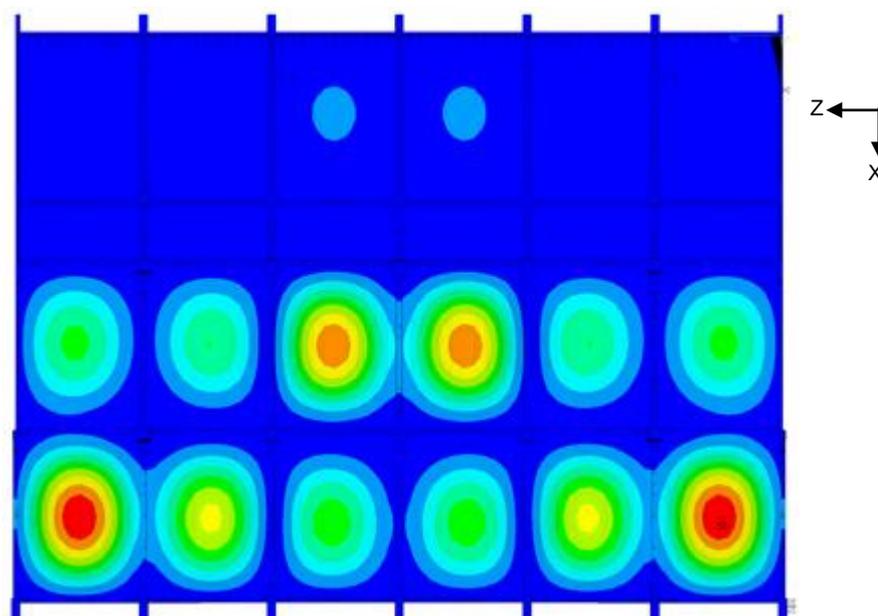


d) Corte transversal

Figura D-5 - 15° modo de vibração ( $f_{15} = 9,04$  Hz)



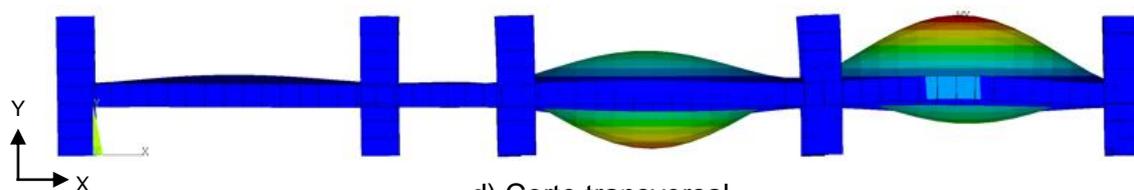
a) Vista isométrica



b) Vista planta

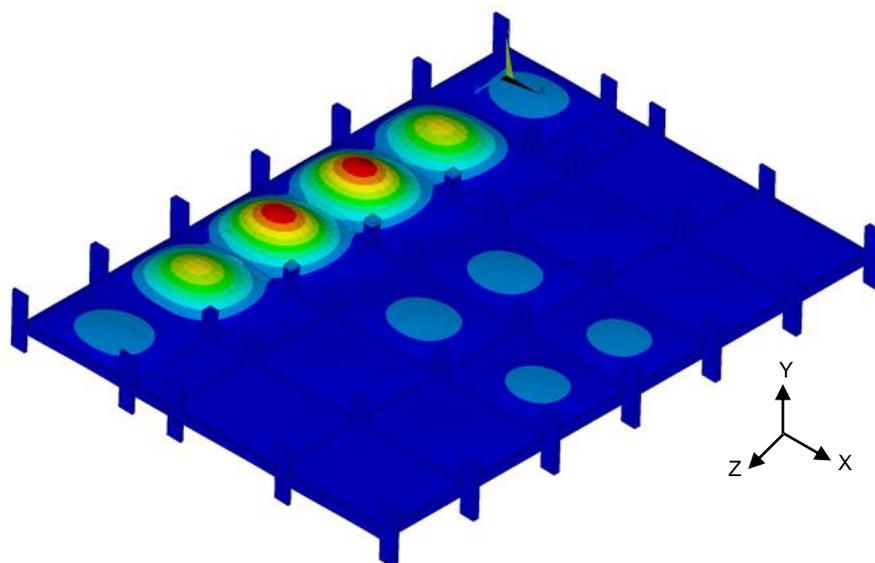


c) Corte longitudinal

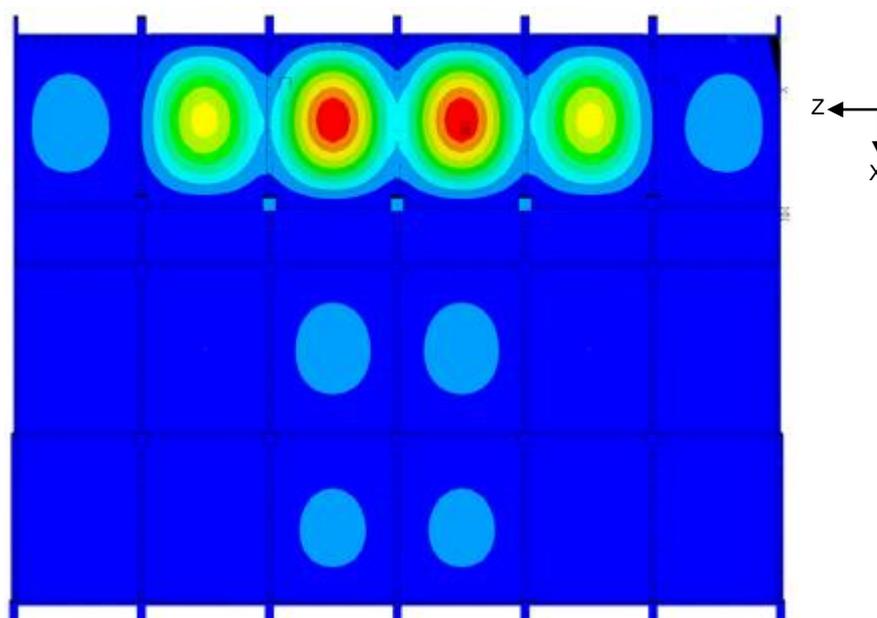


d) Corte transversal

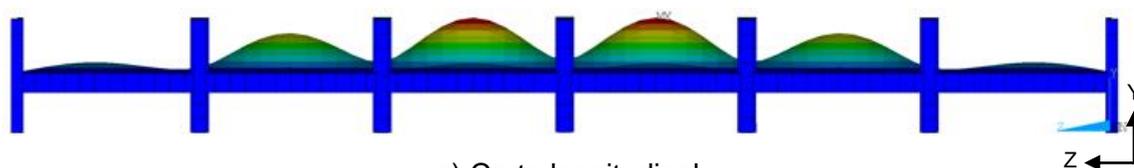
**Figura D-6 - 16° modo de vibração ( $f_{16} = 9,15$  Hz)**



a) Vista isométrica



b) Vista planta

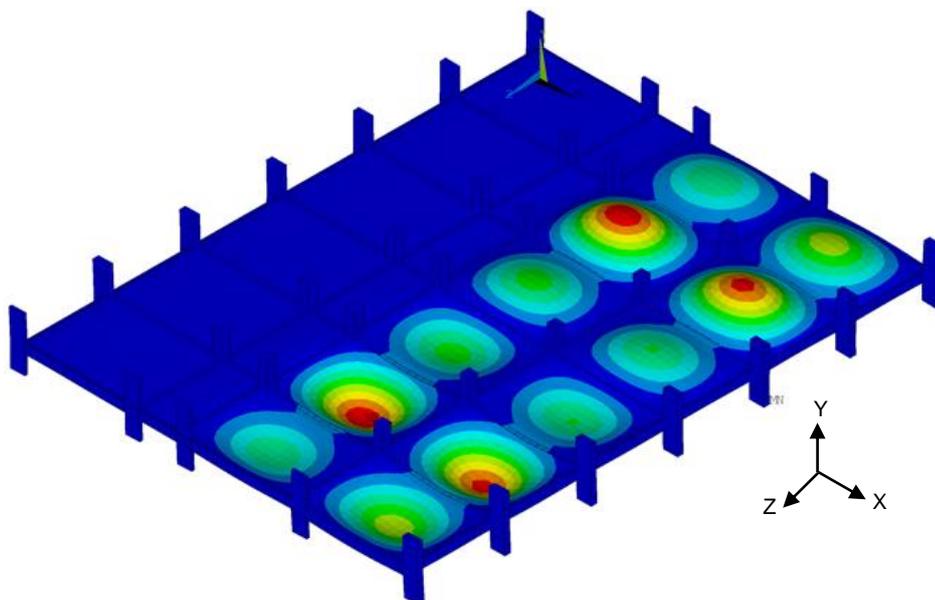


c) Corte longitudinal

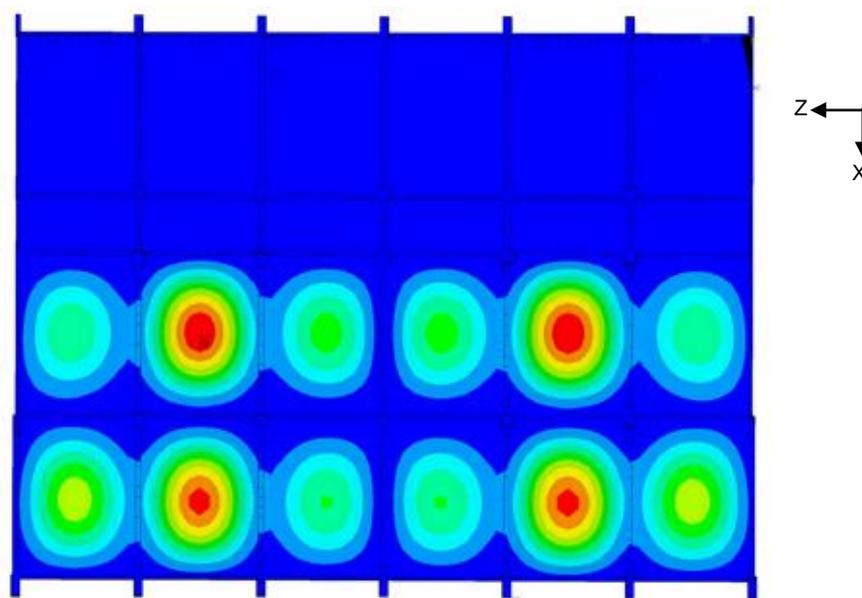


d) Corte transversal

**Figura D-7 - 17° modo de vibração ( $f_{17} = 9,38$  Hz)**



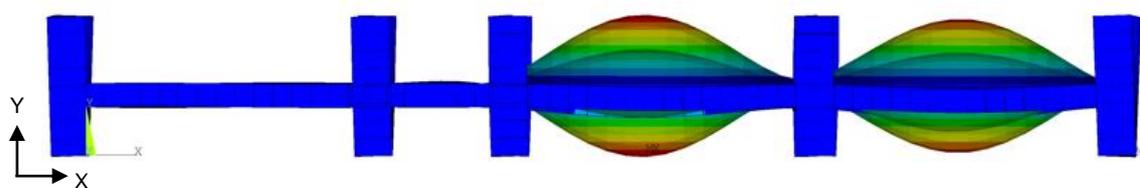
a) Vista isométrica



b) Vista planta



c) Corte longitudinal



d) Corte transversal

Figura D-8 - 18° modo de vibração ( $f_{18} = 9,45$  Hz)

## APÊNDICE E - Análise modal experimental: shaker

### E.1 - Shaker sobre a Laje L1

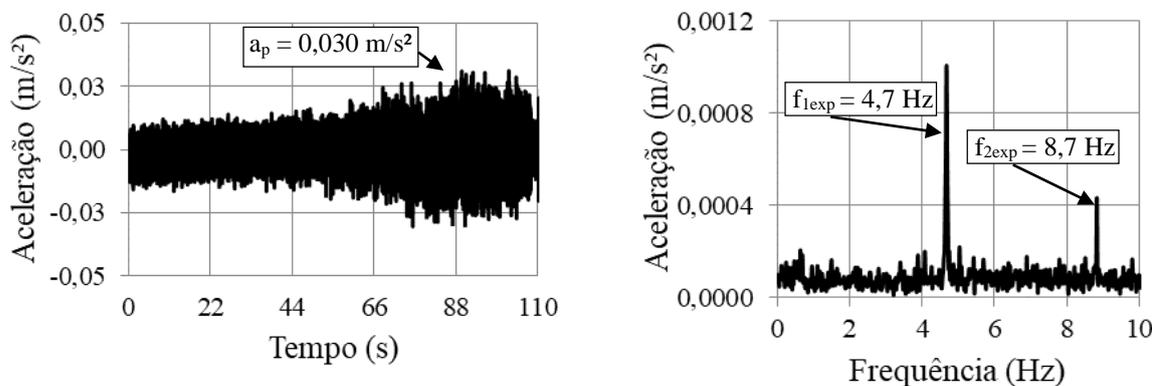


Figura E-1 - Resposta estrutural dinâmica da laje L1

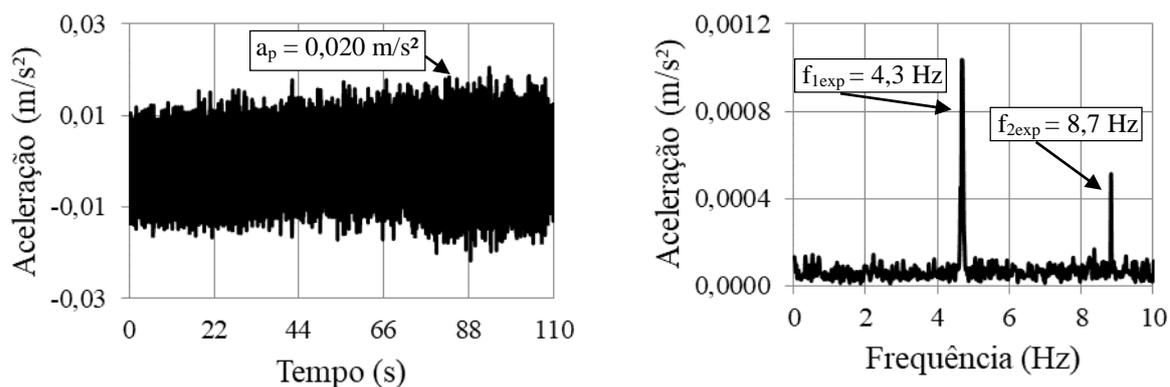


Figura E-2 - Resposta estrutural dinâmica da laje L2

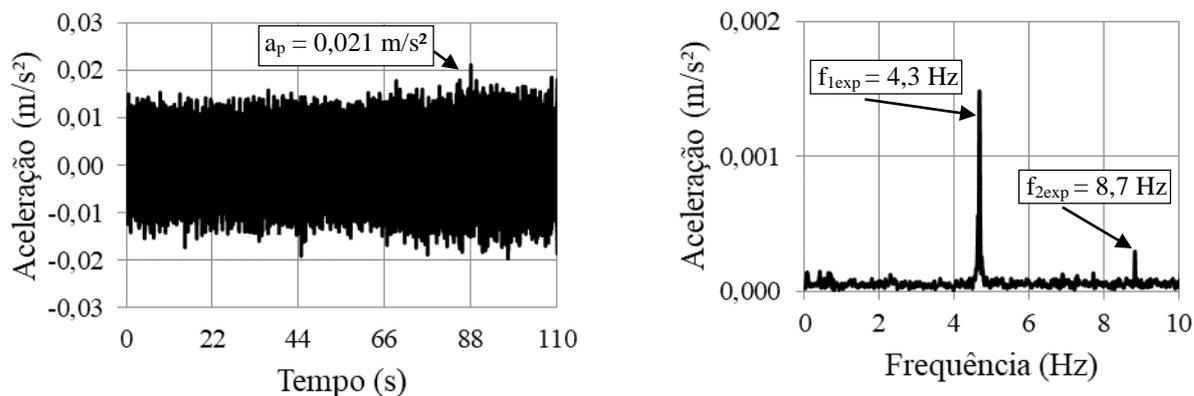


Figura E-3 - Resposta estrutural dinâmica da laje L3

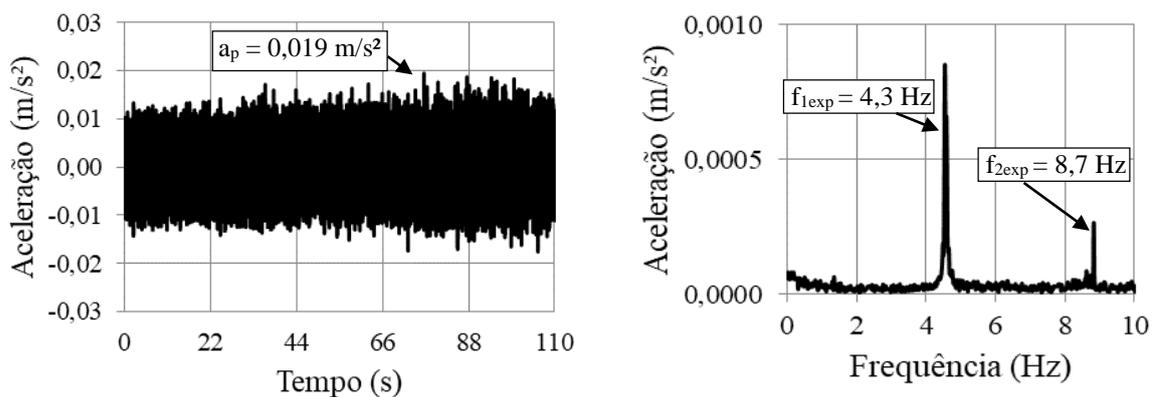


Figura E-4 - Resposta estrutural dinâmica da laje L4

## E.2 - Shaker sobre a Laje L2

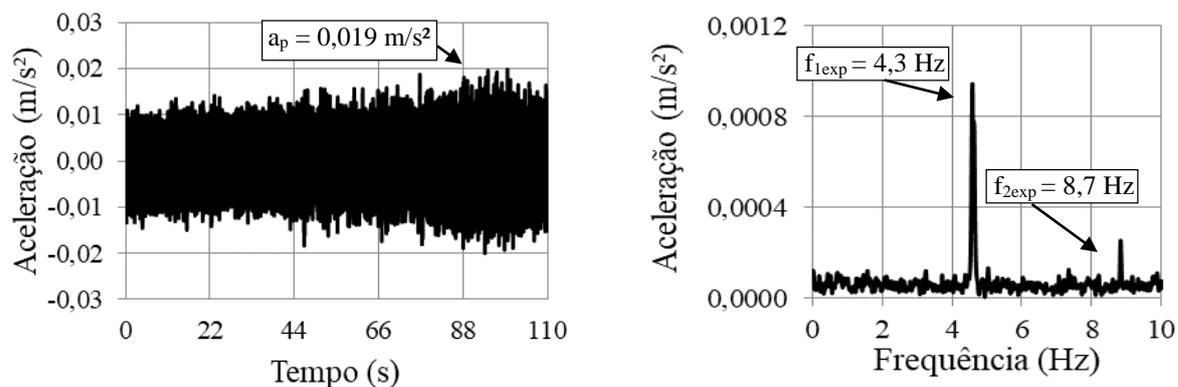


Figura E-5 - Resposta estrutural dinâmica da laje L1

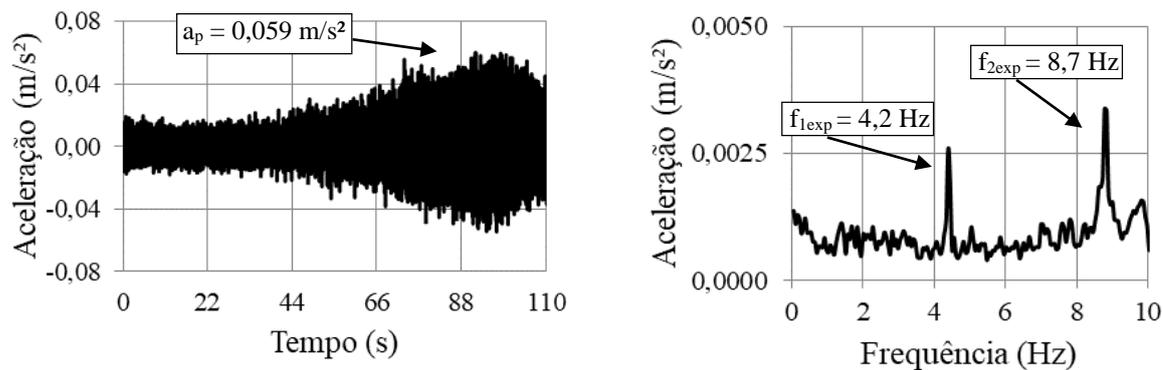
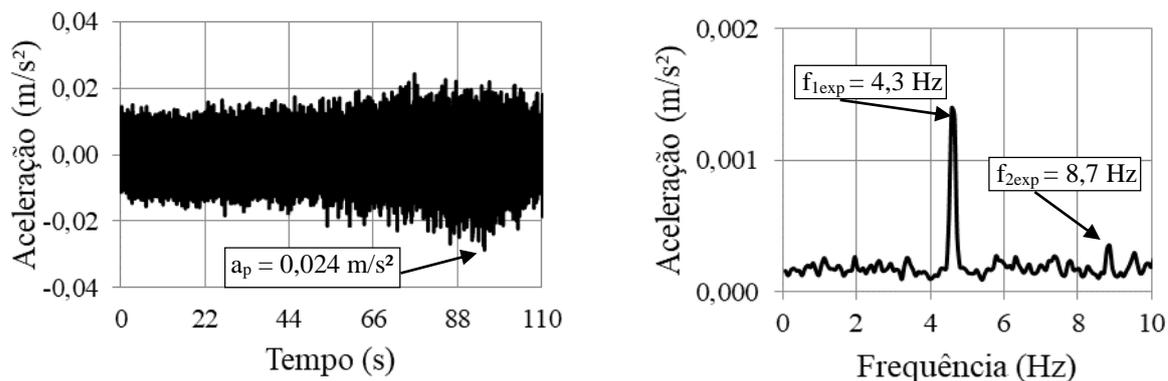
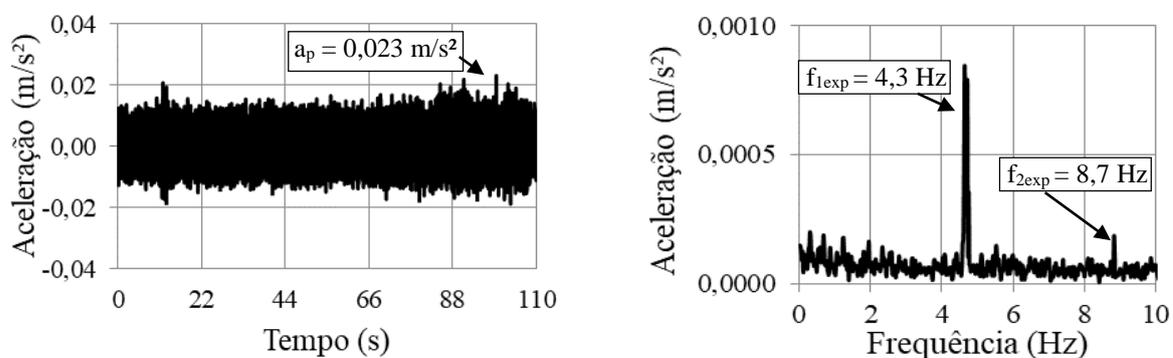


Figura E-6 - Resposta estrutural dinâmica da laje L2

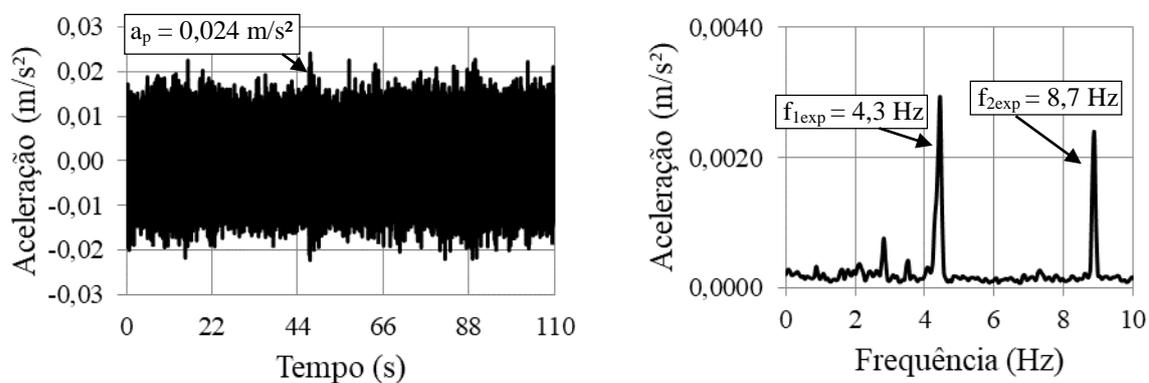


**Figura E-7 - Resposta estrutural dinâmica da laje L3**

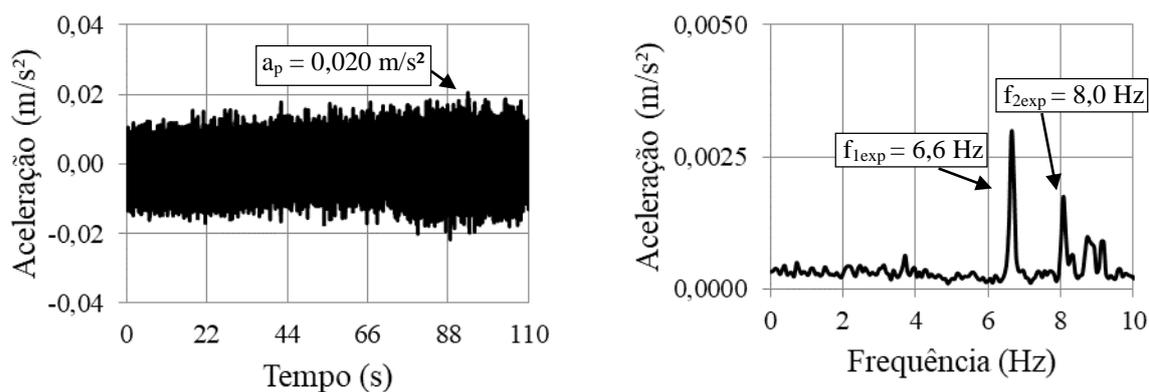


**Figura E-8 - Resposta estrutural dinâmica da laje L4**

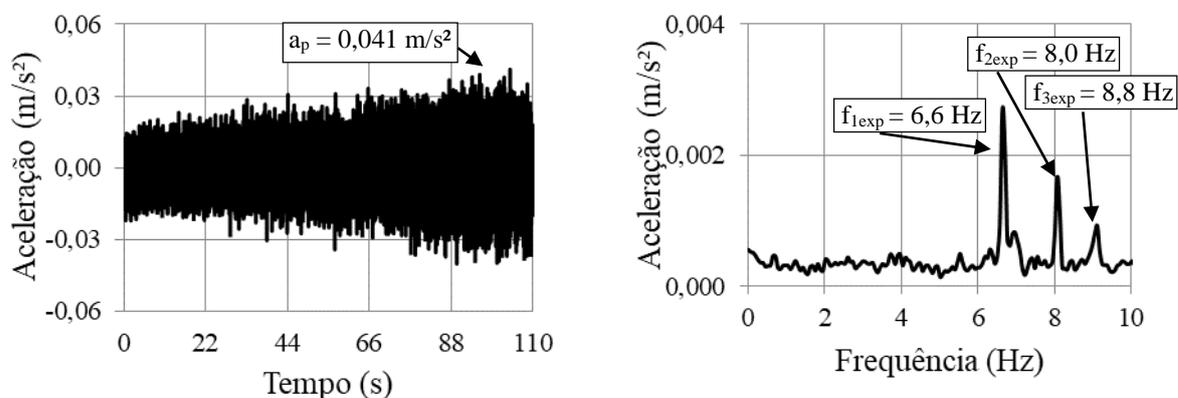
### E.3 - Shaker sobre a Laje L4



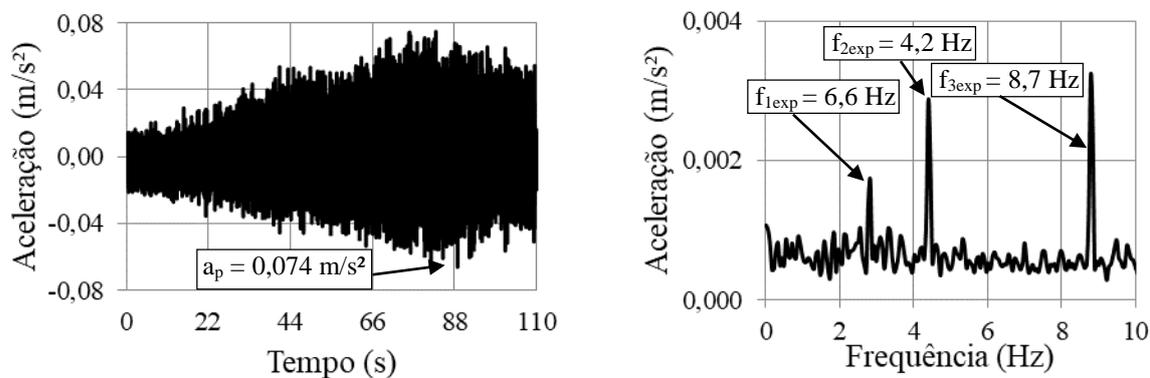
**Figura E-9 - Resposta estrutural dinâmica da laje L1**



**Figura E-10 - Resposta estrutural dinâmica da laje L2**



**Figura E-11 - Resposta estrutural dinâmica da laje L3**



**Figura E-12 - Resposta estrutural dinâmica da laje L4**

## APÊNDICE F - Resposta dinâmica experimental x biodinâmico [95]

### F.1 - Resultados do (MC-I) com base no modelo biodinâmico [95] ( $f = 2,2$ Hz)

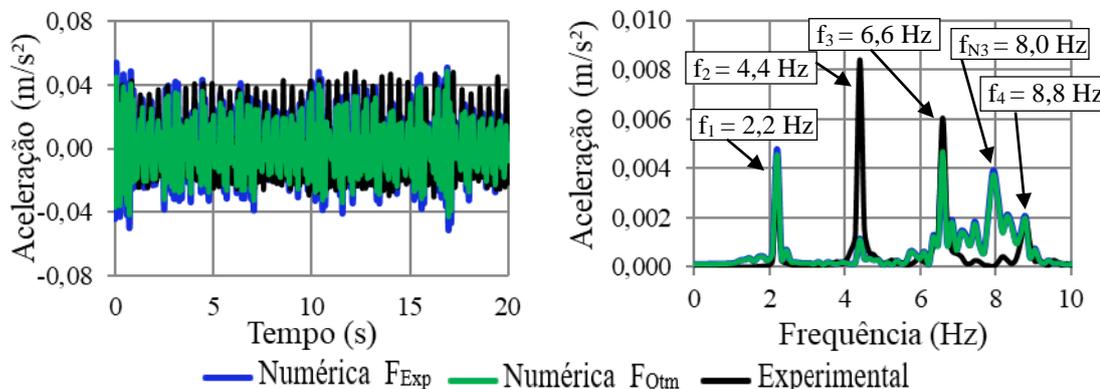


Figura F-1 - Resposta estrutural dinâmica: MC-I (1 pessoa; Laje L3)

Tabela F.1 - Correlação estatística entre a resposta dinâmica numérica e experimental: MC-I (1 pessoa;  $f = 2.2$  Hz; Laje L3)

MC-I	$a_p$ ( $m/s^2$ )	$\mu$ ( $m/s^2$ )	$\mu_q$ ( $m/s^2$ )	$\sigma^2$ ( $\times 10^{-4}$ ) ( $m/s^2$ ) <sup>2</sup>	$\sigma$ ( $\times 10^{-2}$ ) ( $m/s^2$ )	CCP
$F_{Exp}$	0,052	0,014	0,018	1,01	1,01	0,83
$F_{Otm}$	0,049	0,012	0,015	7,11	0,84	0,83
Experimental	0,049	0,012	0,017	1,26	1,11	1,00

### F.2 - Resultados do (MC-II) com base no modelo biodinâmico [95] ( $f = 2,2$ Hz)

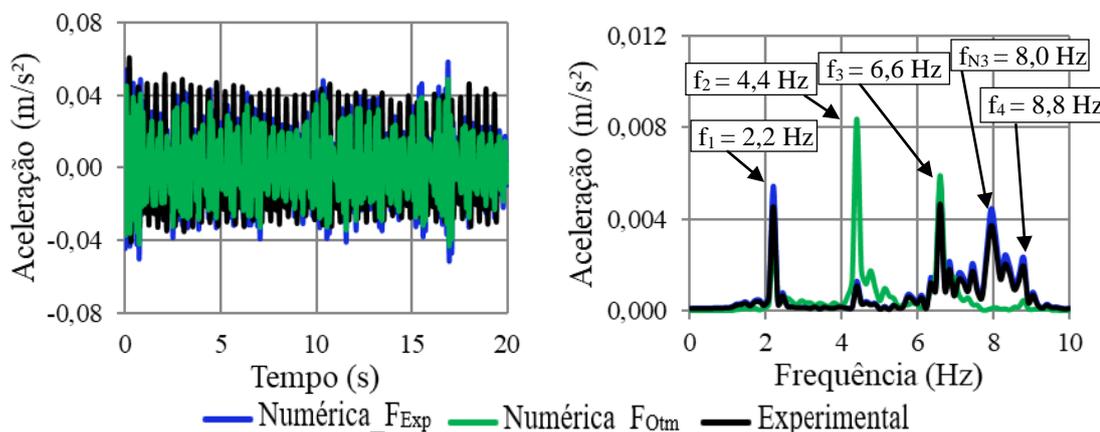


Figura F-2 - Resposta estrutural dinâmica: MC-II (1 pessoa; Laje L4)

Tabela F.2 - Correlação estatística entre a resposta dinâmica numérica e experimental: MC-II (1 pessoa;  $f = 2.2$  Hz; Laje L4)

MC-II	$a_p$ ( $m/s^2$ )	$\mu$ ( $m/s^2$ )	$\mu_q$ ( $m/s^2$ )	$\sigma^2$ ( $\times 10^{-4}$ ) ( $m/s^2$ ) <sup>2</sup>	$\sigma$ ( $\times 10^{-2}$ ) ( $m/s^2$ )	CCP
$F_{Exp}$	0,058	0,014	0,018	1,02	1,01	0,92
$F_{Otm}$	0,049	0,012	0,015	0,71	0,84	0,91
Experimental	0,052	0,013	0,018	1,53	1,24	1,00

### F.3 - Resultados do (MC-III) com base no modelo biodinâmico [95] ( $f = 2,2$ Hz)

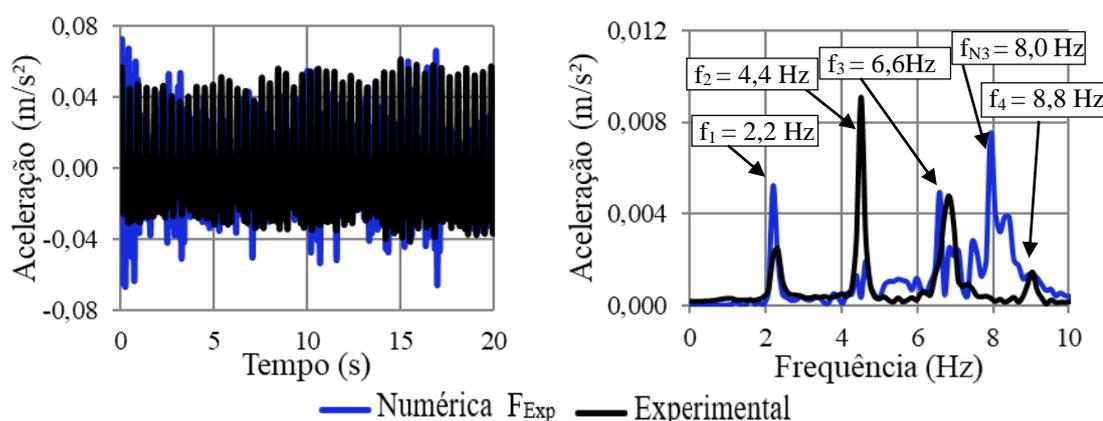


Figura F-3 - Resposta estrutural dinâmica: MC-III (2 pessoas; Laje L3)

Tabela F.3 - Correlação estatística entre a resposta dinâmica numérica e experimental: MC-III (2 pessoas;  $f = 2.2$  Hz; Laje L3)

MC-III	$a_p$ ( $m/s^2$ )	$\mu$ ( $m/s^2$ )	$\mu_q$ ( $m/s^2$ )	$\sigma^2$ ( $\times 10^{-4}$ ) ( $m/s^2$ ) <sup>2</sup>	$\sigma$ ( $\times 10^{-2}$ ) ( $m/s^2$ )	CCP
$F_{Exp}$	0,066	0,016	0,022	1,42	1,19	0,97
Experimental	0,061	0,015	0,022	2,11	1,45	1,00

#### F.4 - Resultados do (MC-IV) com base no modelo biodinâmico [95] ( $f = 2,2$ Hz)

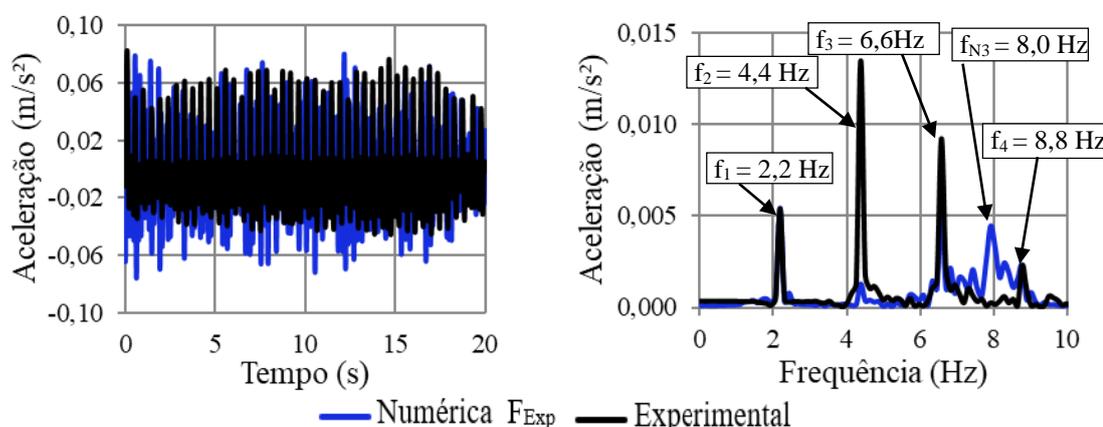
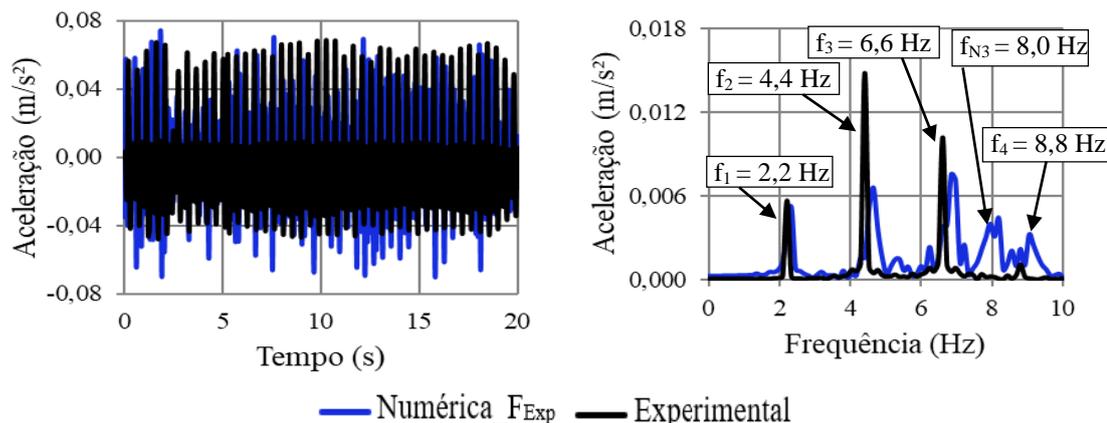


Figura F-4 - Resposta estrutural dinâmica: MC-IV (3 pessoas; Laje L3)

Tabela F.4 - Correlação estatística entre a resposta dinâmica numérica e experimental: MC-IV (3 pessoas;  $f = 2.2$  Hz; Laje L3)

MC-IV	$a_p$ ( $m/s^2$ )	$\mu$ ( $m/s^2$ )	$\mu_q$ ( $m/s^2$ )	$\sigma^2$ ( $\times 10^{-4}$ ) ( $m/s^2$ ) <sup>2</sup>	$\sigma$ ( $\times 10^{-2}$ ) ( $m/s^2$ )	CCP
$F_{Exp}$	0,083	0,022	0,029	2,60	1,61	0,76
Experimental	0,077	0,018	0,025	2,63	1,71	1,00

#### F.5 - Resultados do (MC-V) com base no modelo biodinâmico [95] ( $f = 2,2$ Hz)

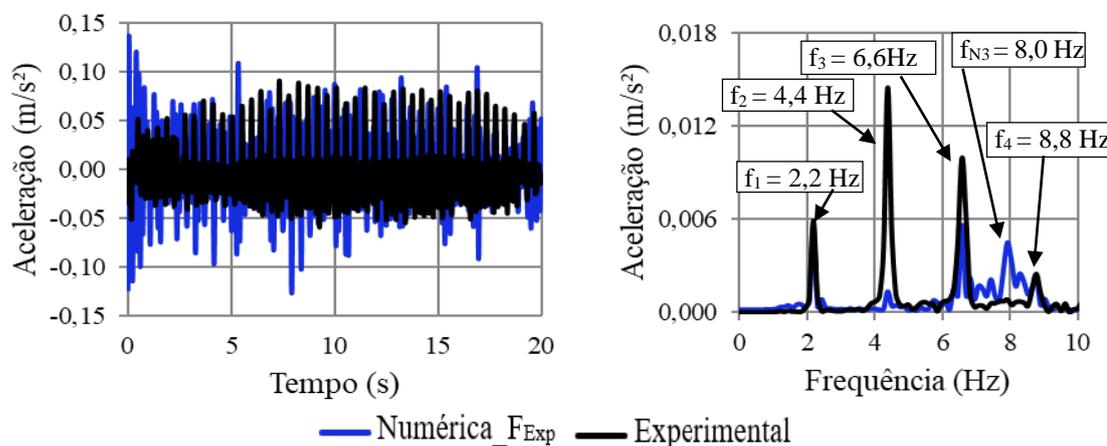


**Figura F-5 - Resposta estrutural dinâmica: MC-V (3 pessoas; Laje L4)**

**Tabela F.5 - Correlação estatística entre a resposta dinâmica numérica e experimental: MC-V (3 pessoas;  $f = 2,2$  Hz; Laje L4)**

MC-V	$a_p$ ( $m/s^2$ )	$\mu$ ( $m/s^2$ )	$\mu_q$ ( $m/s^2$ )	$\sigma^2$ ( $\times 10^{-4}$ ) ( $m/s^2$ ) <sup>2</sup>	$\sigma$ ( $\times 10^{-2}$ ) ( $m/s^2$ )	CCP
$F_{Exp}$	0,074	0,021	0,027	2,34	1,53	0,83
Experimental	0,069	0,020	0,027	3,21	1,79	1,00

**F.6 - Resultados do (MC-VI) com base no modelo biodinâmico [95] ( $f = 2,2$  Hz)**



**Figura F-6 - Resposta estrutural dinâmica: MC-VI (6 pessoas; Laje L3)**

**Tabela F.6 - Correlação estatística entre a resposta dinâmica numérica e experimental: MC-VI (6 pessoas;  $f = 2.2$  Hz; Laje L3; ver Figura 45)**

MC-VI	$a_p$ ( $m/s^2$ )	$\mu$ ( $m/s^2$ )	$\mu_q$ ( $m/s^2$ )	$\sigma^2$ ( $\times 10^{-4}$ ) ( $m/s^2$ ) <sup>2</sup>	$\sigma$ ( $\times 10^{-2}$ ) ( $m/s^2$ )	CCP
$F_{Exp}$	0,127	0,028	0,038	4,38	0,021	0,97
Experimental	0,091	0,020	0,029	3,86	0,019	1,00

### F.7 - Resultados do (MC-VII) com base no modelo biodinâmico [95] ( $f = 2,2$ Hz)

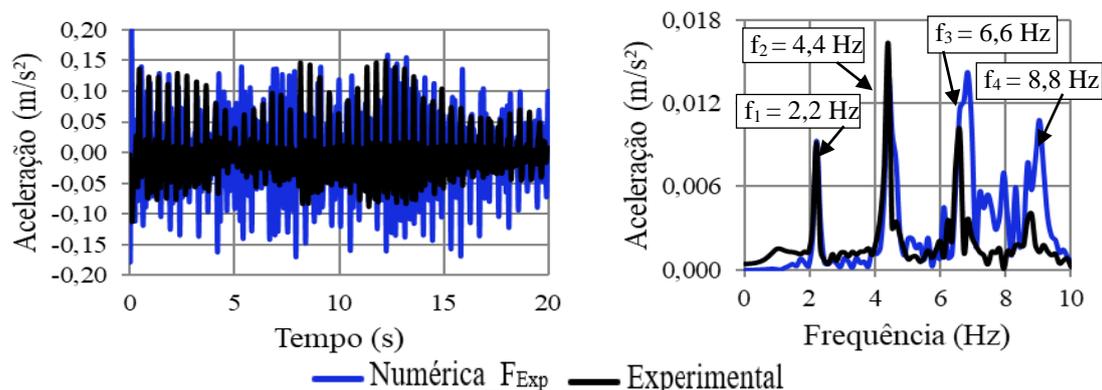


Figura F-7 - Resposta estrutural dinâmica: MC-VII (9 pessoas; Laje L3)

Tabela F.7 - Correlação estatística entre a resposta dinâmica numérica e experimental: MC-VII (9 pessoas;  $f = 2.2$  Hz; Laje L3)

MC-VII	$a_p$ ( $m/s^2$ )	$\mu$ ( $m/s^2$ )	$\mu_q$ ( $m/s^2$ )	$\sigma^2$ ( $\times 10^{-4}$ ) ( $m/s^2$ ) <sup>2</sup>	$\sigma$ ( $\times 10^{-2}$ ) ( $m/s^2$ )	CCP
$F_{Exp}$	0,171	0,048	0,064	0,13	3,61	0,70
Experimental	0,150	0,028	0,042	8,18	2,86	1,00

### F.8 - Resultados do (MC-VIII) com base no modelo biodinâmico [95] ( $f = 2,2$ Hz)

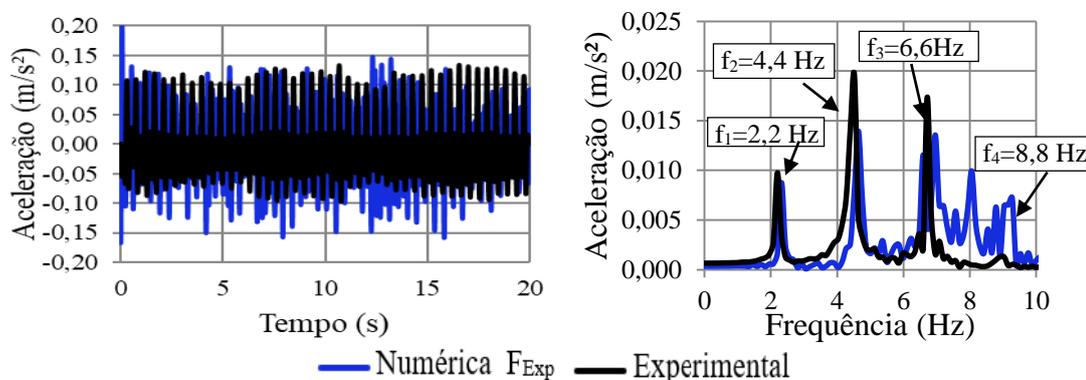


Figura F-8 - Resposta estrutural dinâmica: MC-VIII (9 pessoas; Laje L4)

Tabela F.8 - Correlação estatística entre a resposta dinâmica numérica e experimental: MC-VIII (9 pessoas;  $f = 2.2$  Hz; Laje L4)

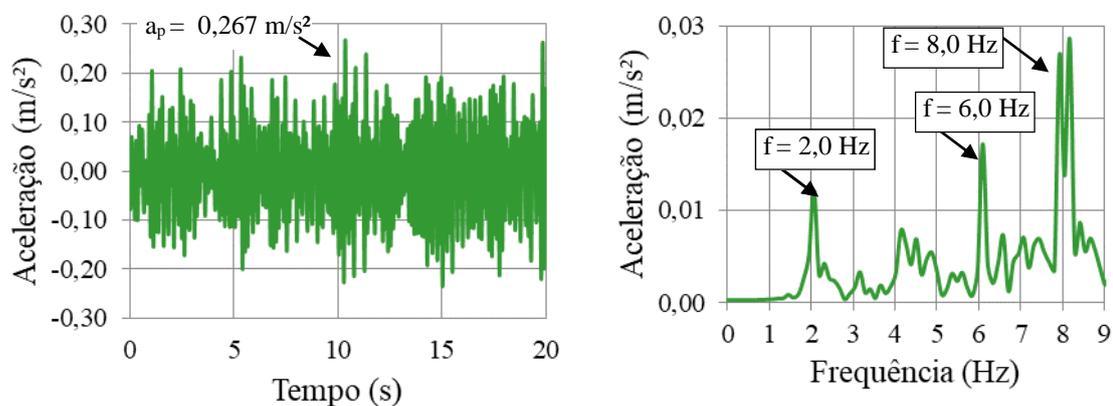
MC-VIII	$a_p$ ( $m/s^2$ )	$\mu$ ( $m/s^2$ )	$\mu_q$ ( $m/s^2$ )	$\sigma^2$ ( $\times 10^{-4}$ ) ( $m/s^2$ ) <sup>2</sup>	$\sigma$ ( $\times 10^{-2}$ ) ( $m/s^2$ )	CCP
$F_{Exp}$	0,160	0,045	0,054	11,2	3,33	0,78
Experimental	0,134	0,037	0,052	11,7	3,42	1,00

**APÊNDICE G** - Parâmetros utilizados na modelagem de sistemas biodinâmicos referente aos casos carregamento investigados MC-X até MC-XIX

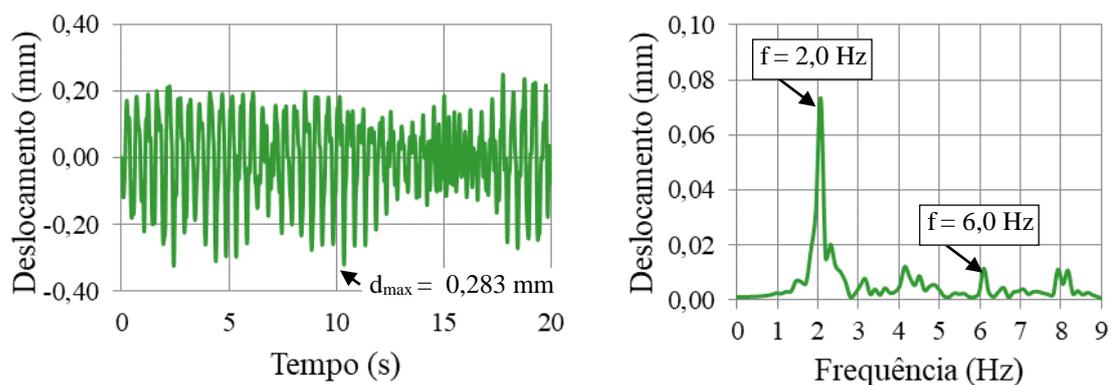
Casos	Número de pessoas	Propriedades dos modelos biodinâmicos (ver Apêndice A)
X até XII	18	1 até 18
XIII e XIV	27	1 até 27
XV e XVI	36	1 até 36
XVII e XVIII	45	1 até 45
XIX	54	1 até 54

## APÊNDICE H - Respostas estruturais dinâmicas: seções críticas

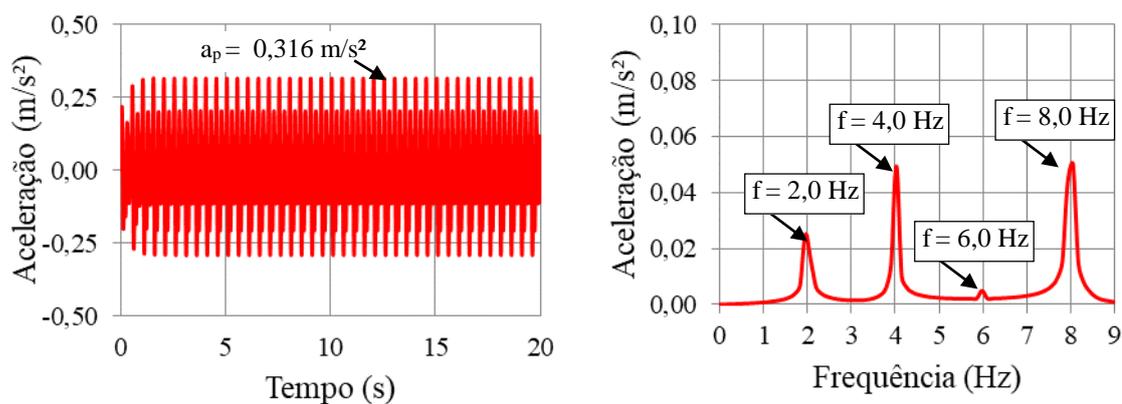
### H.1 - Resultados da resposta estrutural dinâmica do piso (MC-XII)



**Figura H-1 – Aceleração: modelos biodinâmicos (MC-XII - Laje L2)**



**Figura H-2 – Deslocamento: modelos biodinâmicos (MC-XII - Laje L2)**



**Figura H-3 – Aceleração: modelo proposto por Faisca (MC-XII - Laje L2)**

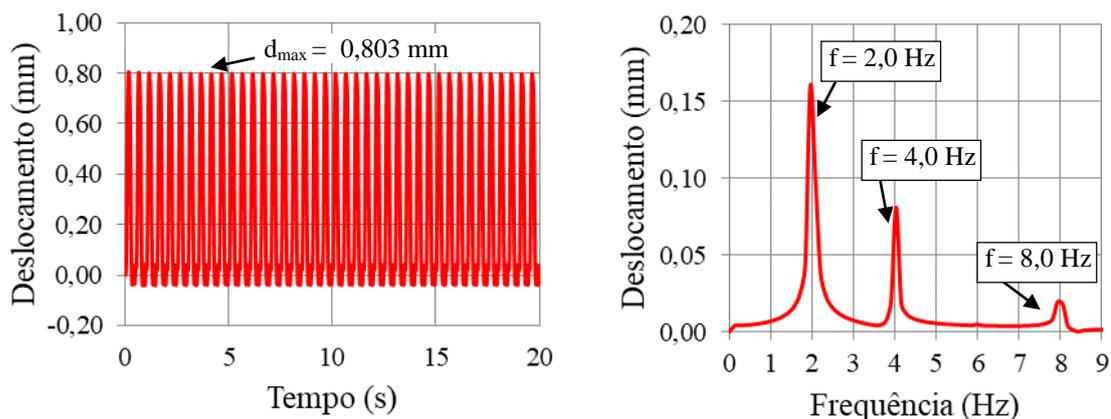


Figura H-4 - Deslocamento: modelo proposto por Faisca (MC-XII - Laje L2)

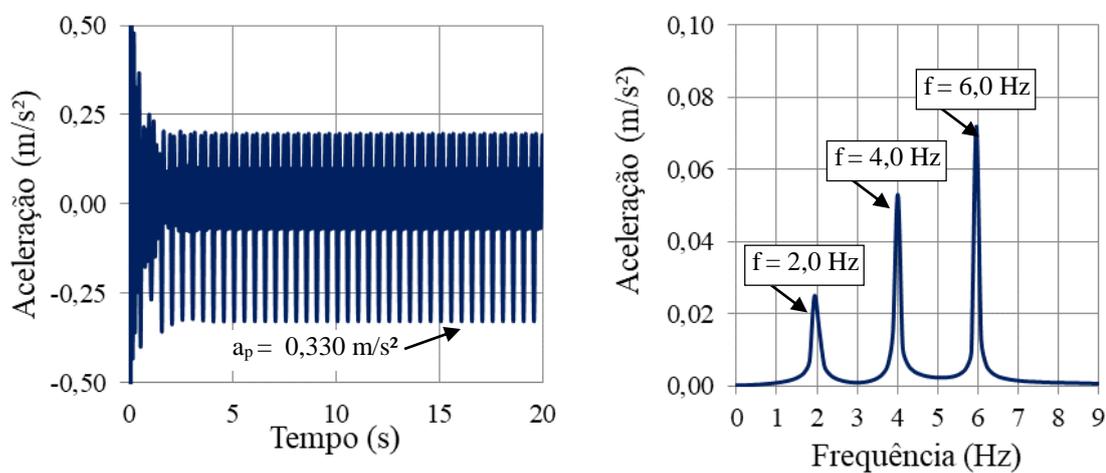


Figura H-5 – Aceleração: modelo proposto por SCI (MC-XII - Laje L2)

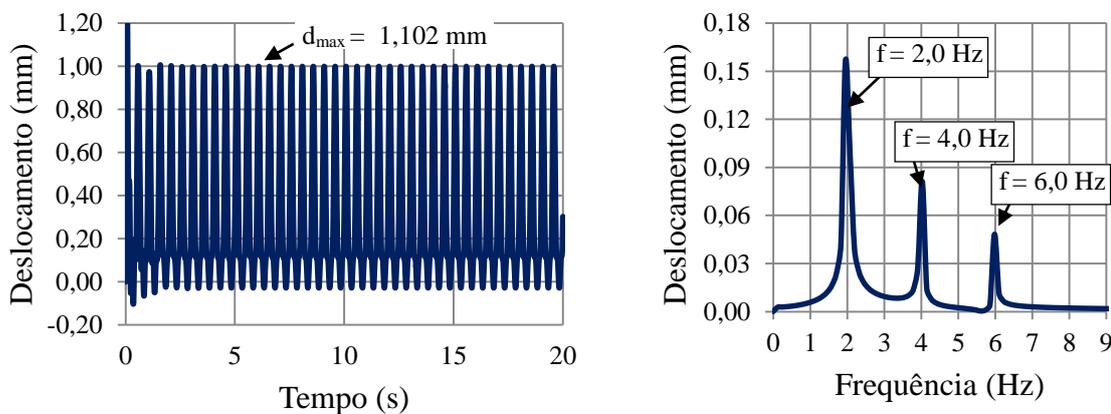
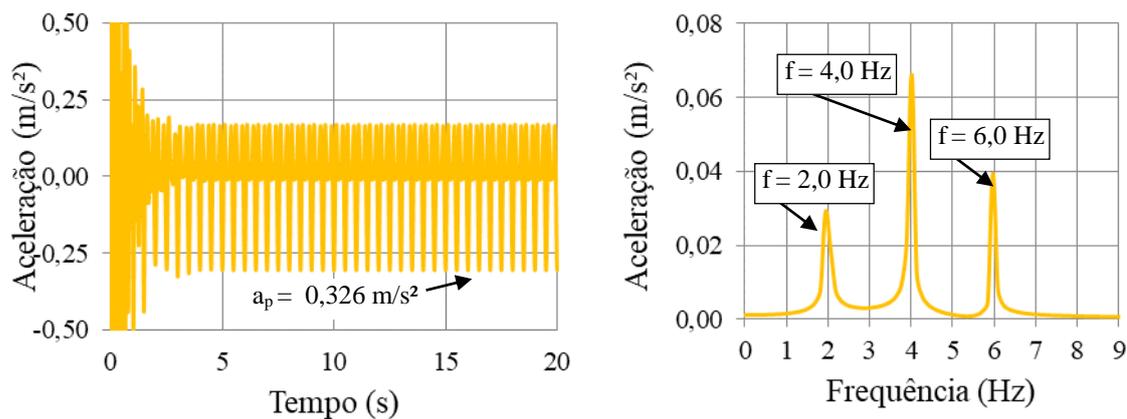
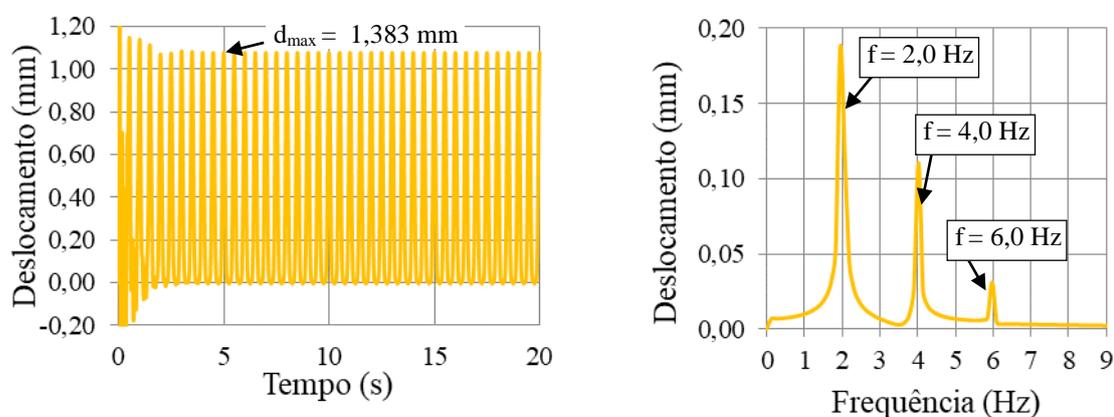


Figura H-6 – Deslocamento: modelo proposto por SCI (MC-XII - Laje L2)

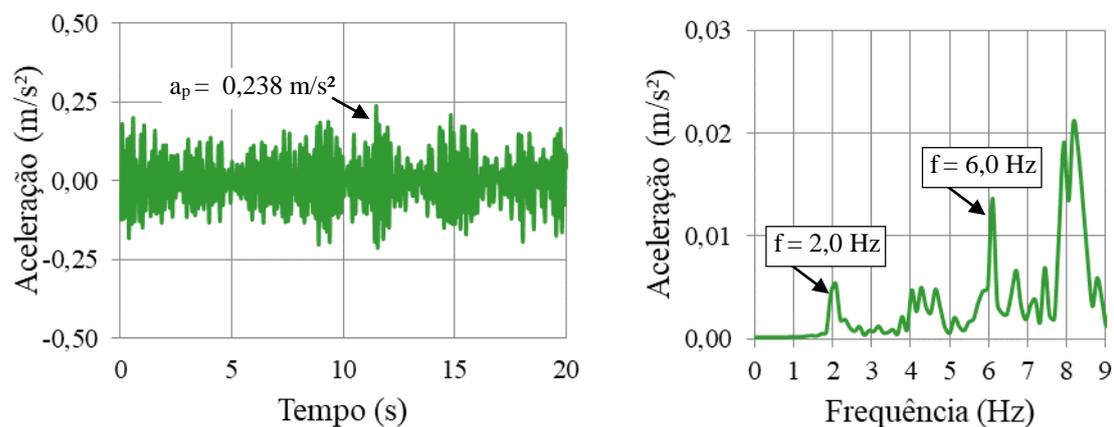


**Figura H-7 – Aceleração: modelo proposto por AISC (MC-XII - Laje L2)**

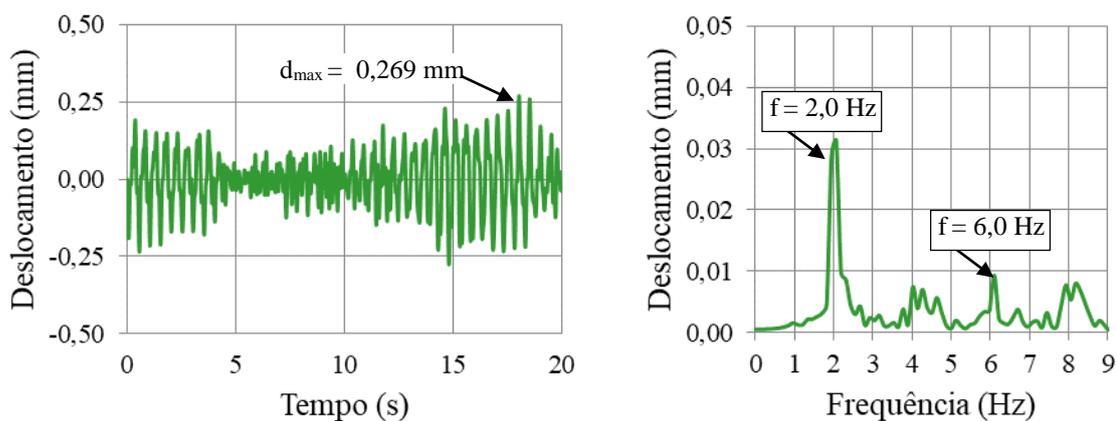


**Figura H-8 - Deslocamento: modelo proposto por AISC (MC-XII - Laje L2)**

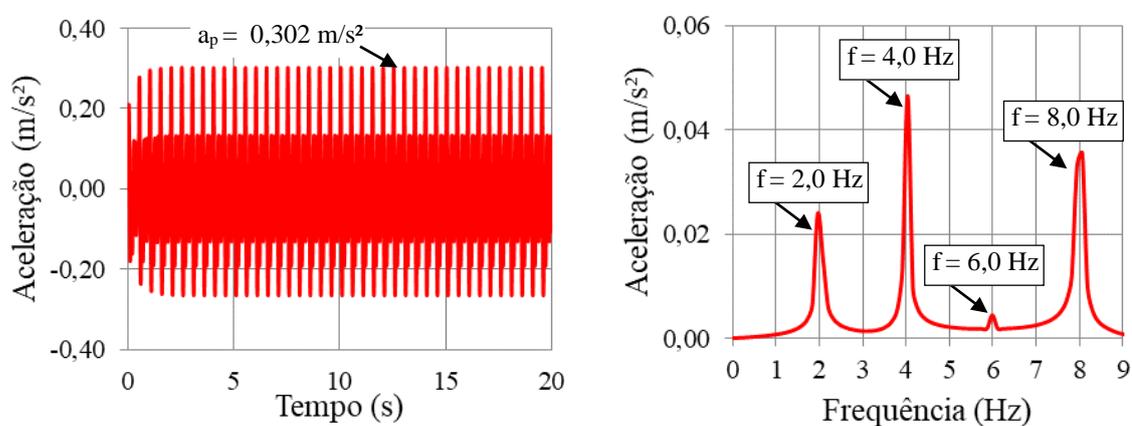
## H.2 - Resultados da resposta estrutural dinâmica do piso (MC-XIII)



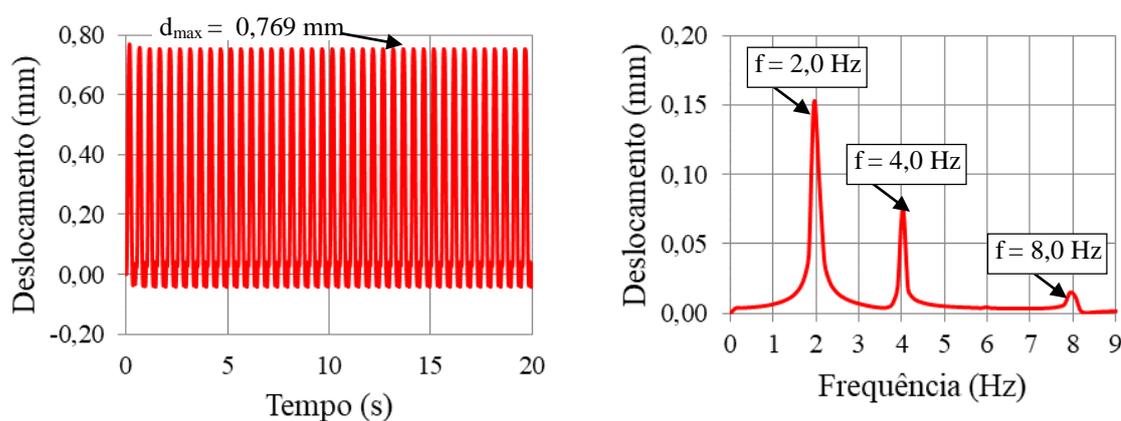
**Figura H-9 - Aceleração: modelos biodinâmicos (MC-XIII - Laje L2)**



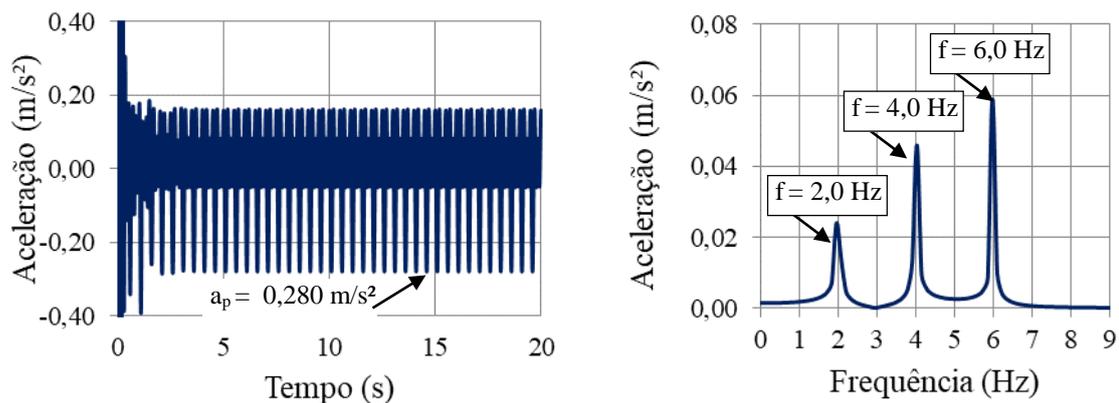
**Figura H-10 - Deslocamento: modelos biodinâmicos (MC-XIII - Laje L2)**



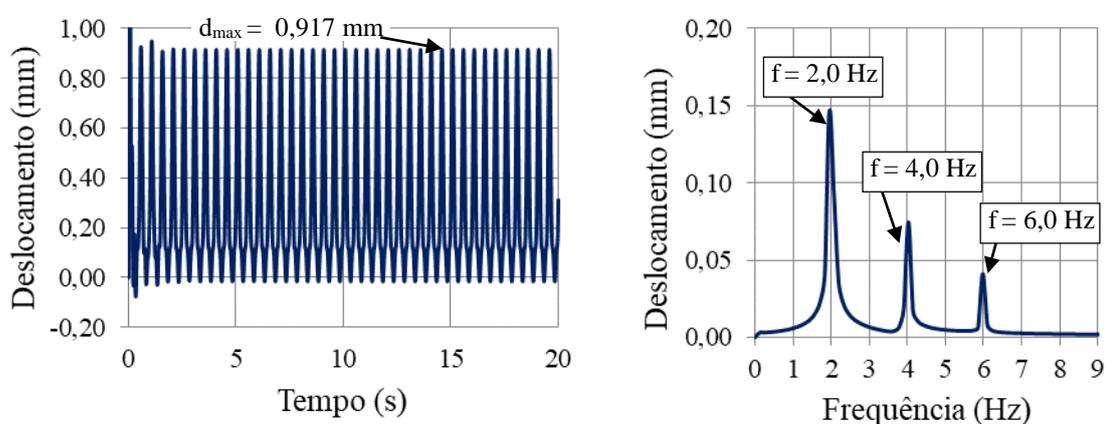
**Figura H-11 – Aceleração: modelo proposto por Faisca (MC-XIII - Laje L3)**



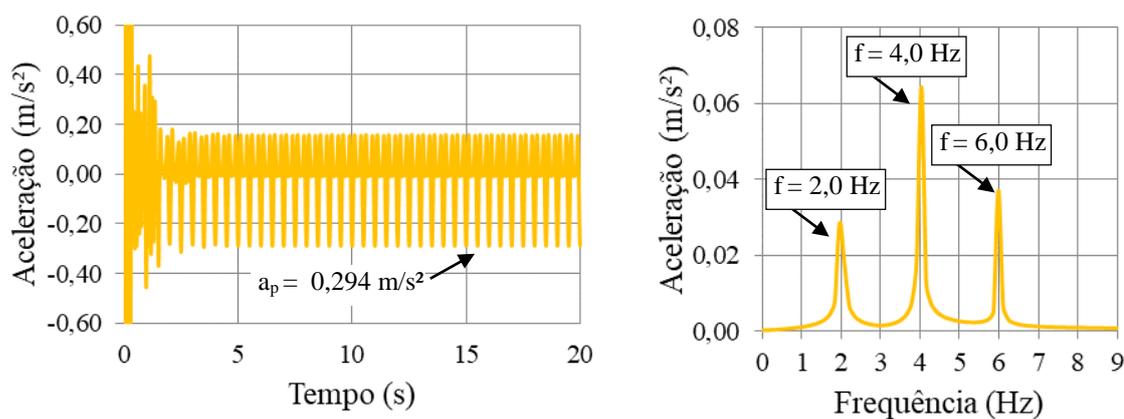
**Figura H-12 – Deslocamento: modelo proposto por Faisca (MC-XIII - Laje L3)**



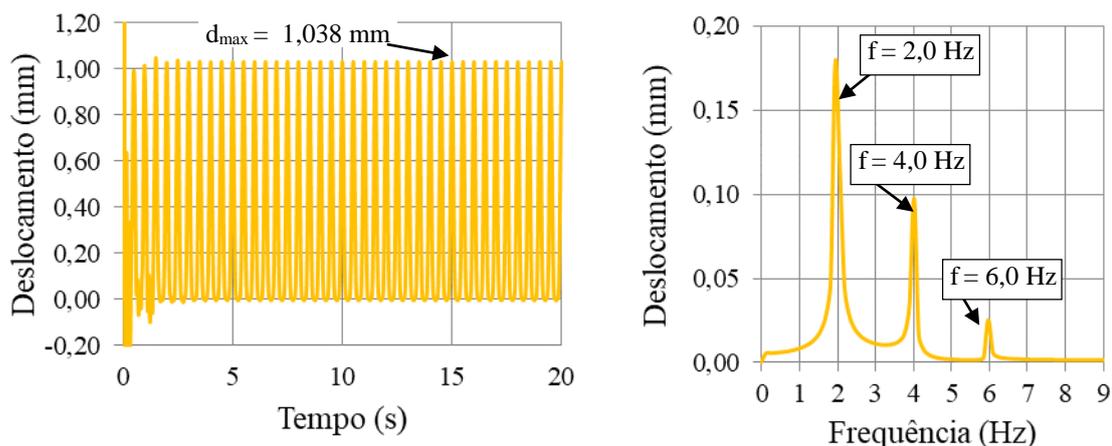
**Figura H-13 – Aceleração: modelo proposto por SCI (MC-XIII - Laje L3)**



**Figura H-14 – Deslocamento: modelo proposto por SCI (MC-XIII - Laje L3)**

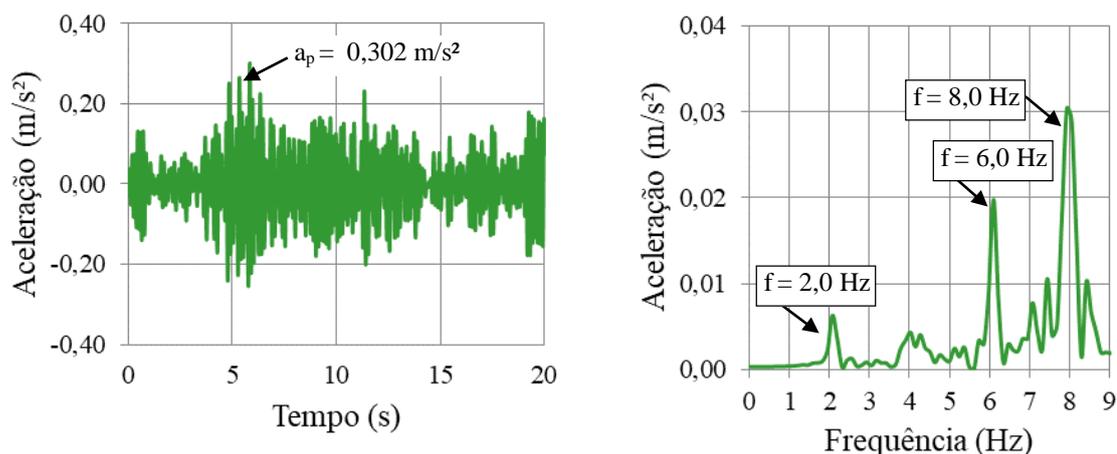


**Figura H-15 – Aceleração: modelo proposto por AISC (MC-XIII - Laje L3)**

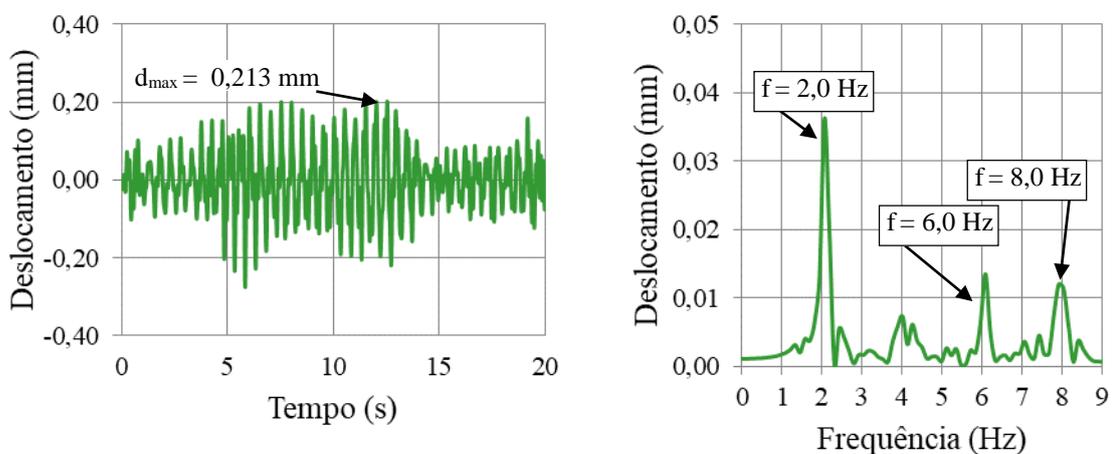


**Figura H-16 – Deslocamento: modelo proposto por AISC (MC-XIII - Laje L3)**

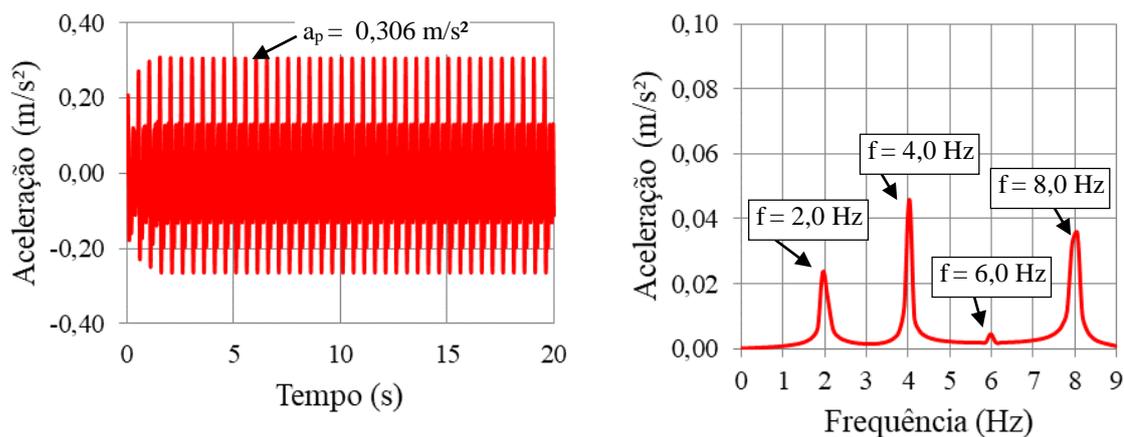
### H.3 - Resultados da resposta estrutural dinâmica do piso (MC-XV)



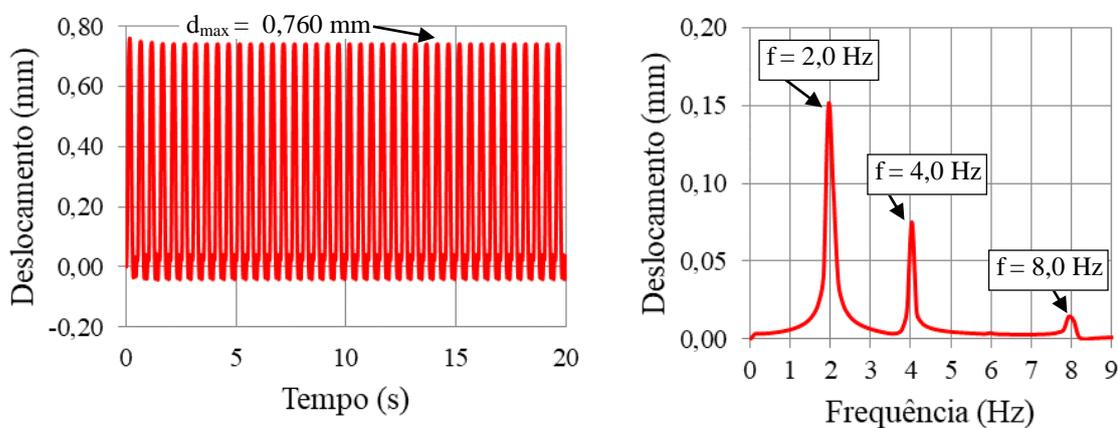
**Figura H-17 – Aceleração: modelos biodinâmicos (MC-XV - Laje L3)**



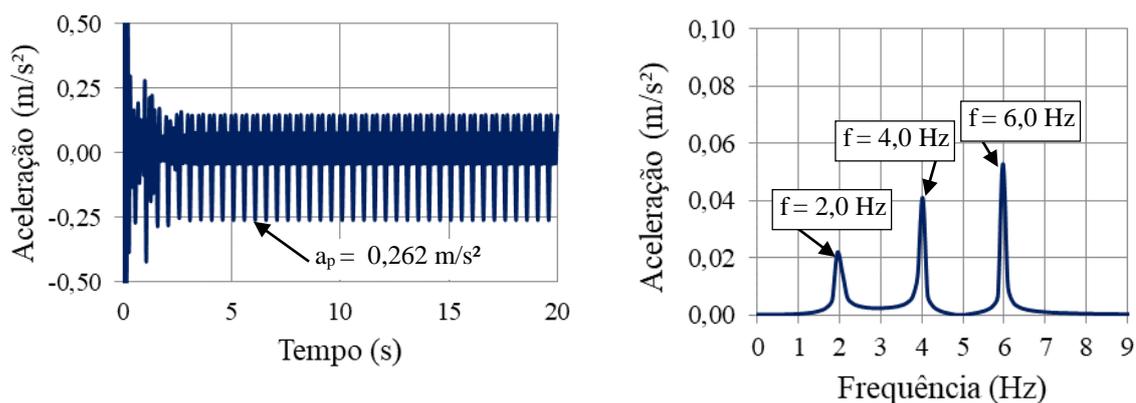
**Figura H-18 – Deslocamento: modelos biodinâmicos (MC-XV - Laje L3)**



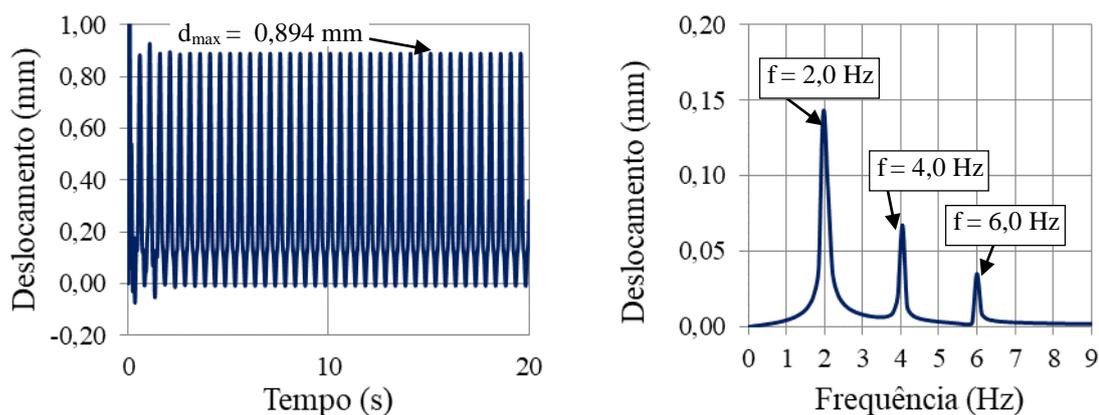
**Figura H-19 – Aceleração: modelo proposto por Faisca (MC-XV – Laje L4)**



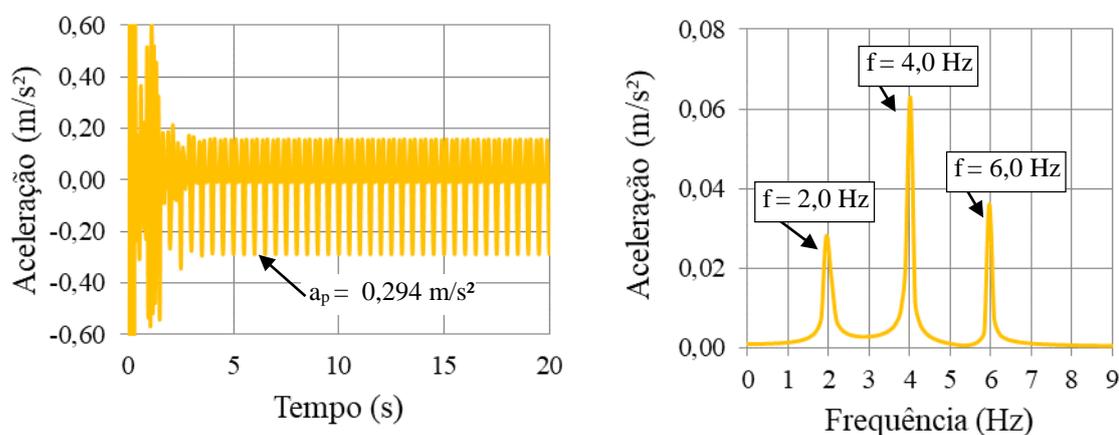
**Figura H-20 – Deslocamento: modelo proposto por Faisca (MC-XV – Laje L4)**



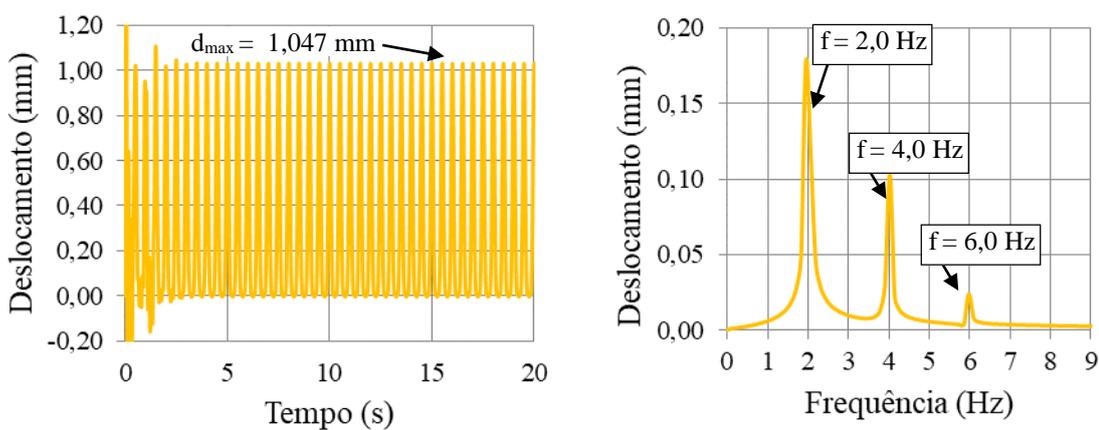
**Figura H-21 – Aceleração: modelo proposto por SCI (MC-XV – Laje L4)**



**Figura H-22 – Deslocamento: modelo proposto por SCI (MC-XV – Laje L4)**



**Figura H-23 – Aceleração: modelo proposto por AISC (MC-XV – Laje L4)**



**Figura H-24 – Deslocamento: modelo proposto por AISC (MC-XV – Laje L4)**

#### H.4 - Resultados da resposta estrutural dinâmica do piso (MC-XVII)

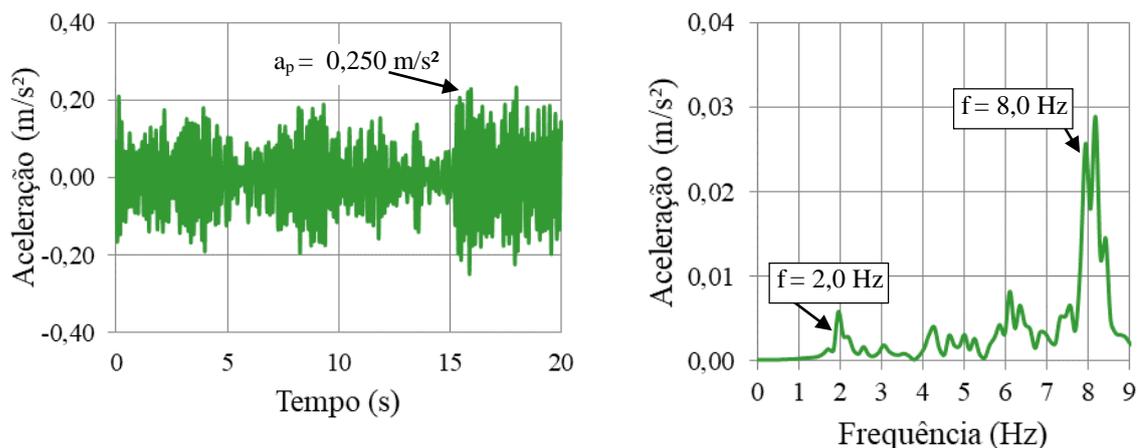


Figura H-25 – Aceleração: modelo biodinâmico (MC-XVII – Laje L4)

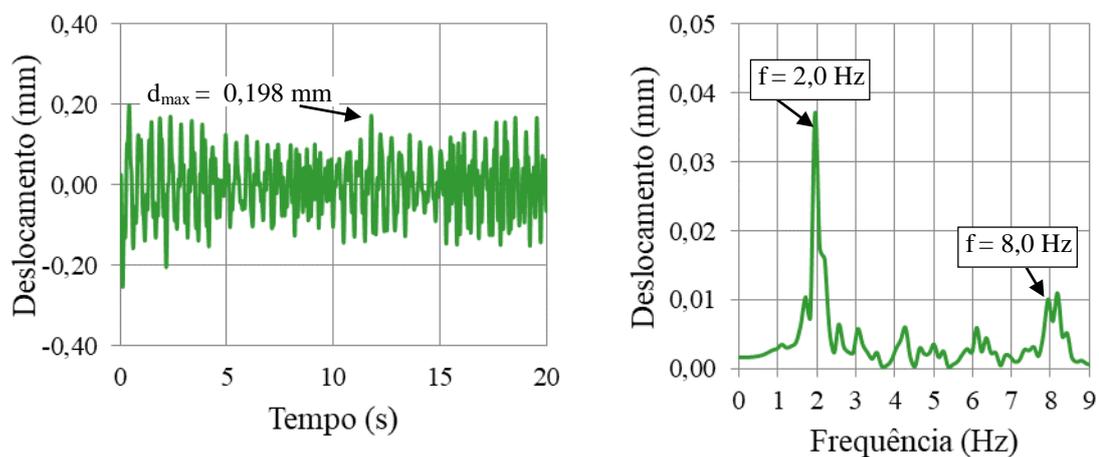


Figura H-26 – Deslocamento: modelo biodinâmico (MC-XVII – Laje L4)

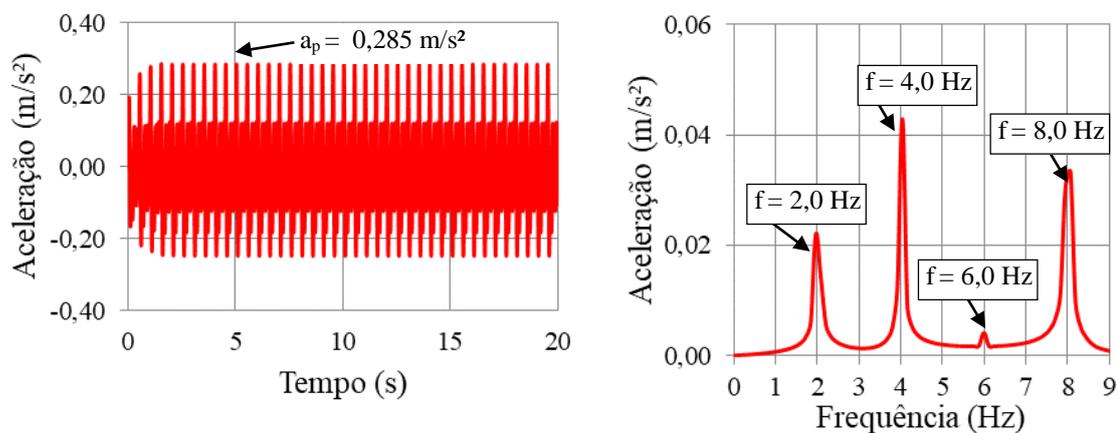
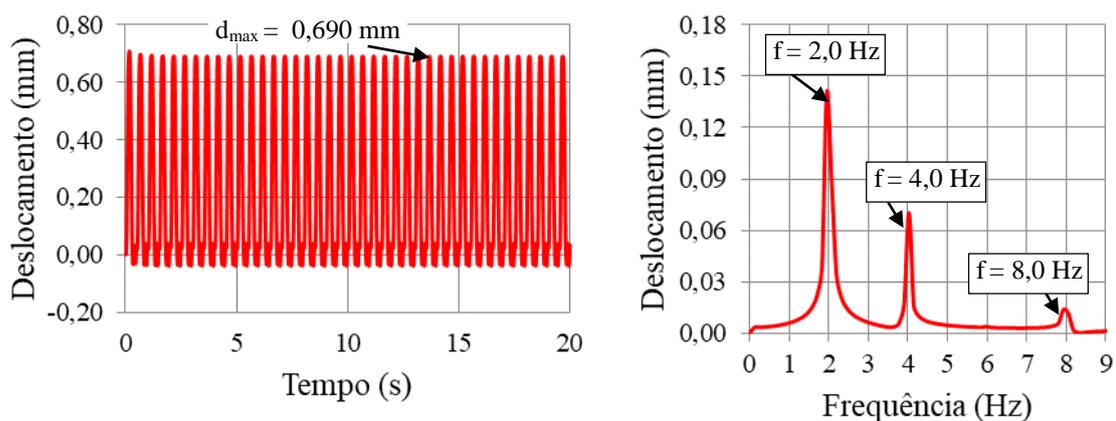
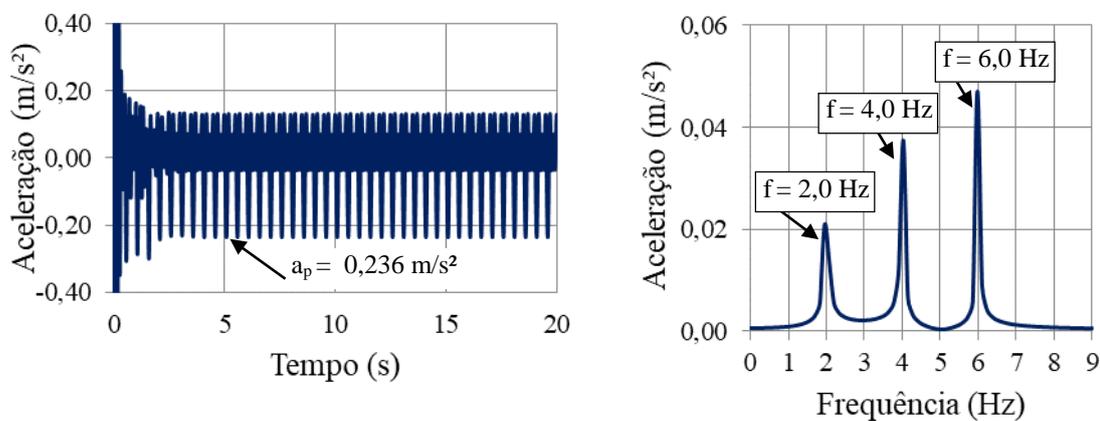


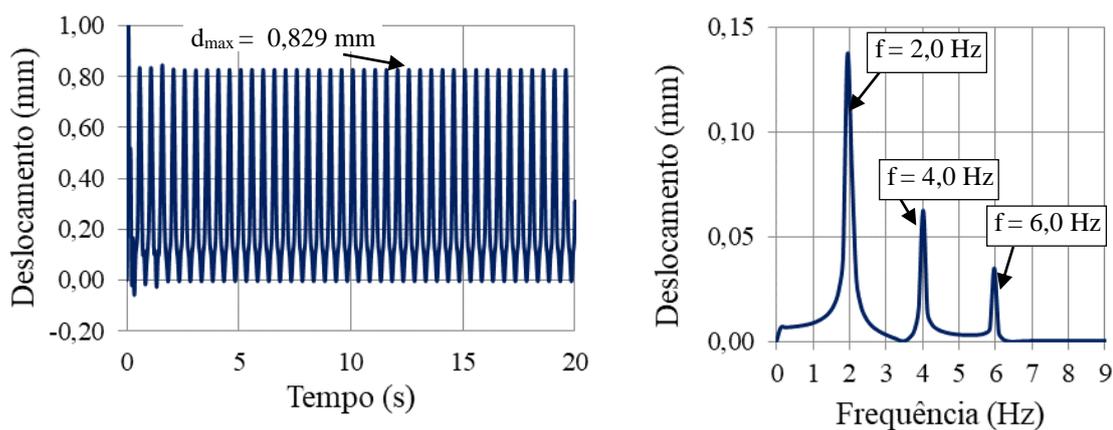
Figura H-27 – Aceleração: modelo proposto por Faísca (MC-XVII – Laje L3)



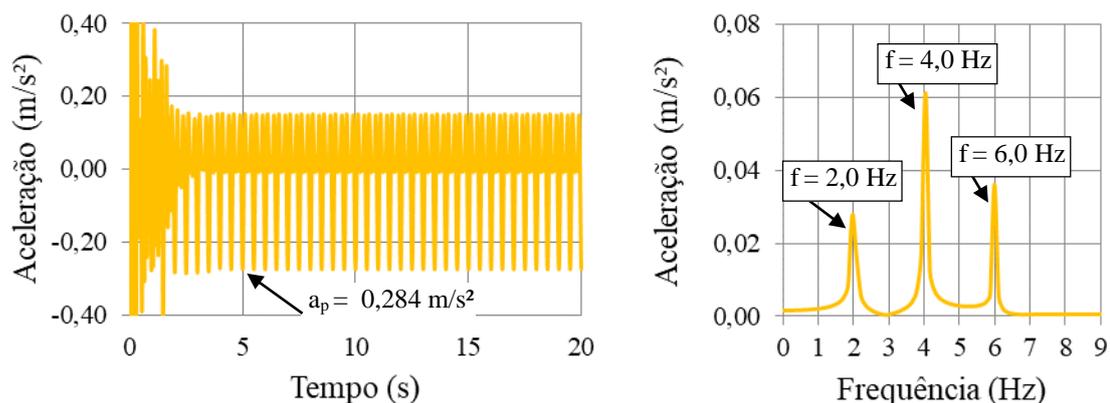
**Figura H-28 – Deslocamento: modelo proposto por Faisca (MC-XVII – Laje L3)**



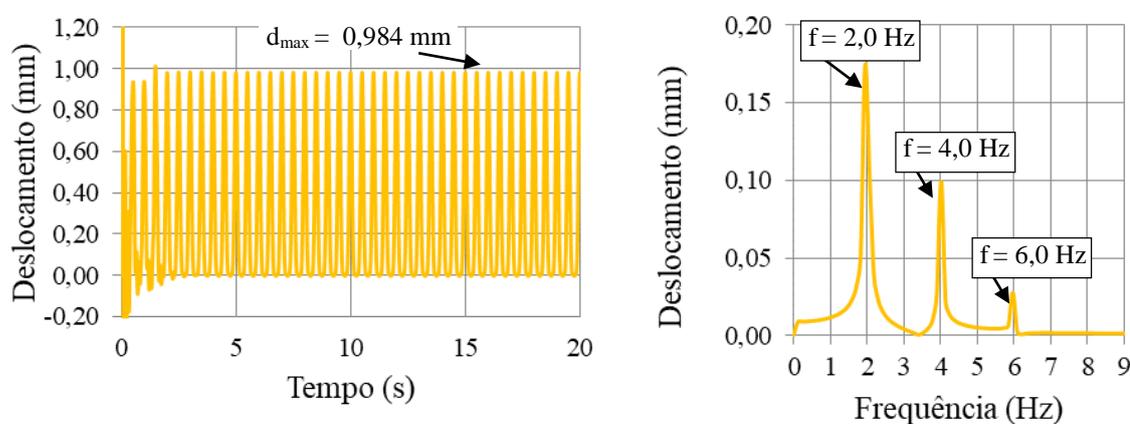
**Figura H-29 – Aceleração: modelo proposto por SCI (MC-XVII – Laje L3)**



**Figura H-30 – Deslocamento: modelo proposto por SCI (MC-XVII – Laje L3)**

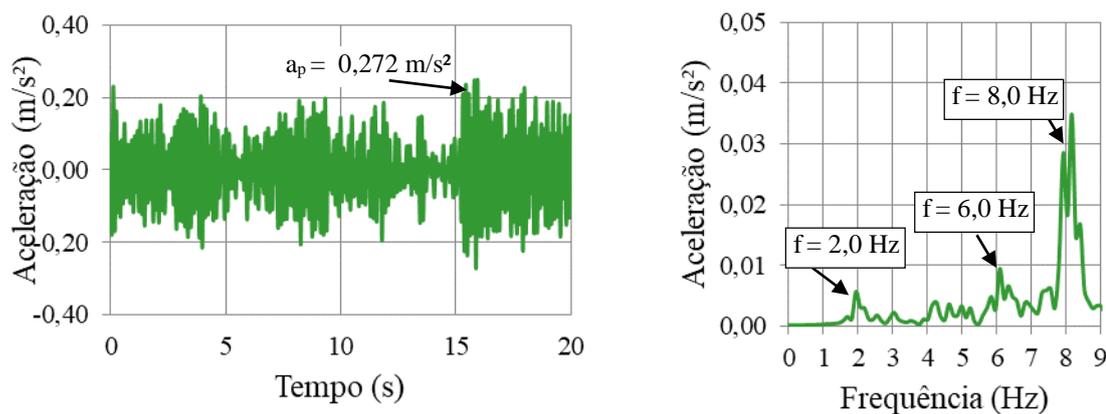


**Figura H-31 – Aceleração: modelo proposto por AISC (MC-XVII – Laje L3)**

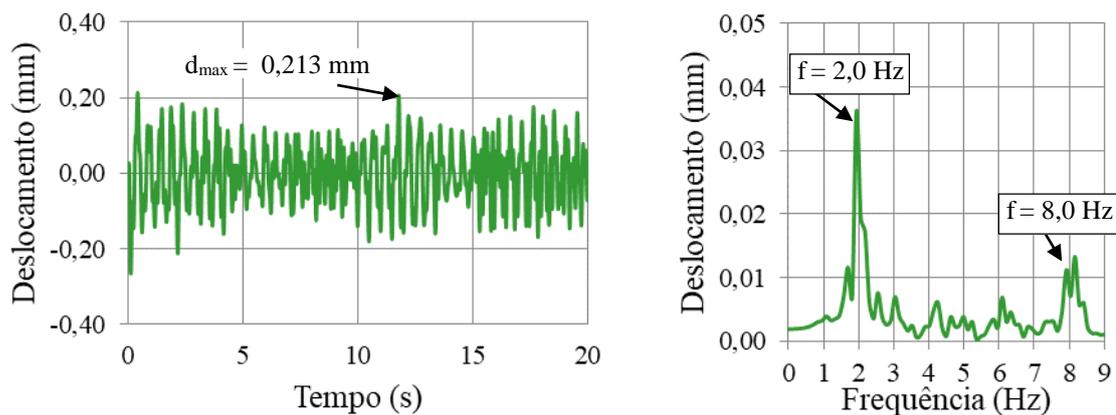


**Figura H-32 – Deslocamento: modelo proposto por AISC (MC-XVII – Laje L3)**

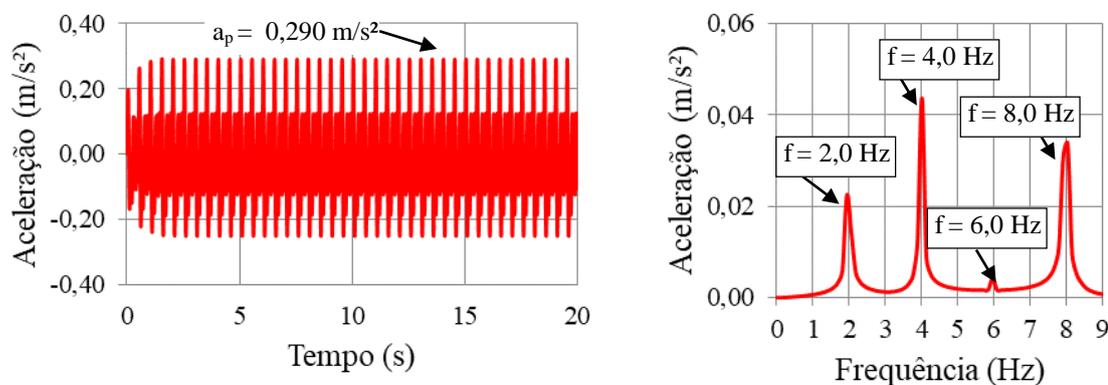
### H.5 - Resultados da resposta estrutural dinâmica do piso (MC-XVIII)



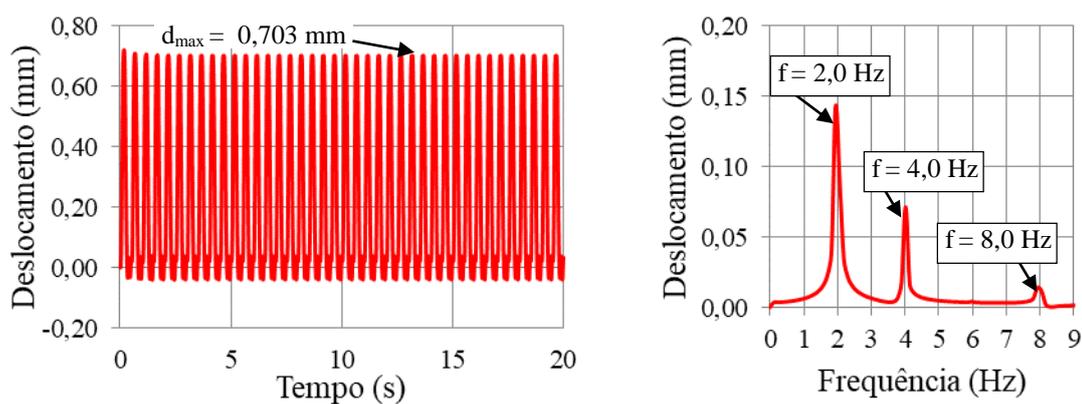
**Figura H-33 – Aceleração: modelo biodinâmico (MC-XVIII – Laje L5)**



**Figura H-34 – Deslocamento: modelo biodinâmico (MC-XVIII – Laje L5)**



**Figura H-35 – Aceleração: modelo proposto por Faisca (MC-XVIII – Laje L4)**



**Figura H-36 - Deslocamento: modelo proposto por Faisca (MC-XVIII – Laje L4)**

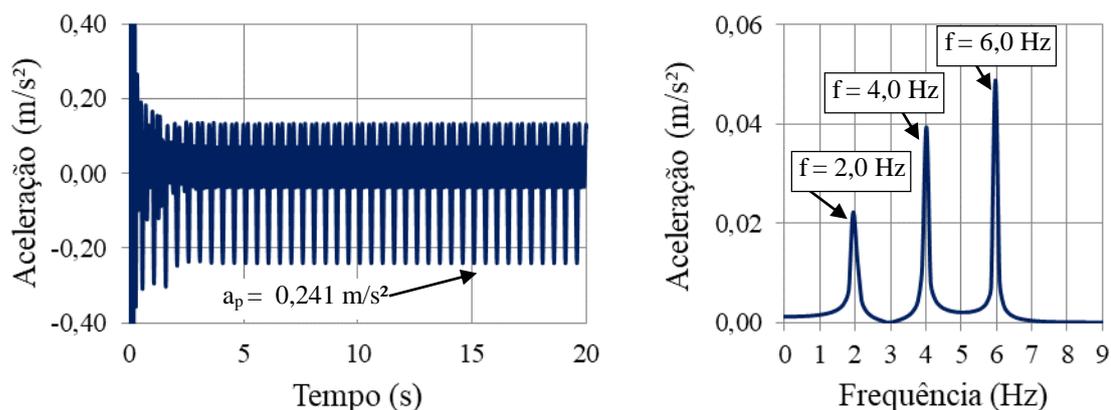


Figura H-37 - Aceleração: modelo proposto por SCI (MC-XVIII – Laje L4)

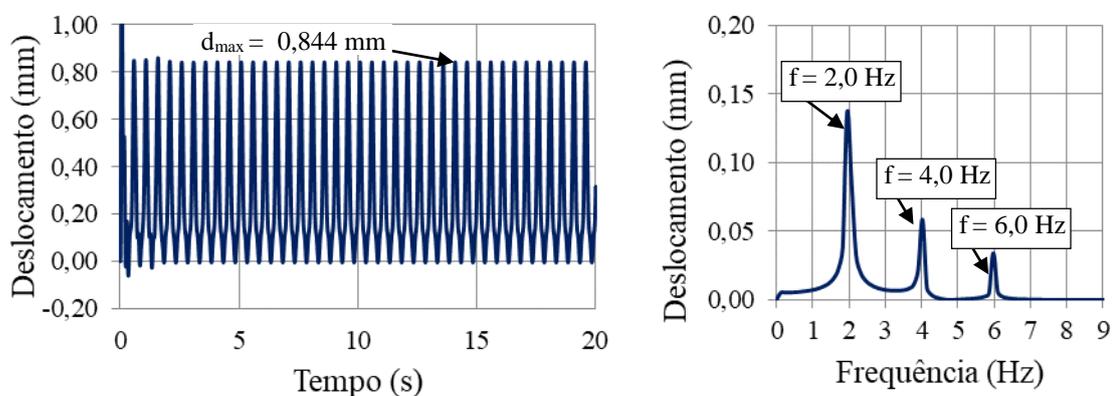


Figura H-38 – Deslocamento: modelo proposto por SCI (MC-XVIII – Laje L4)

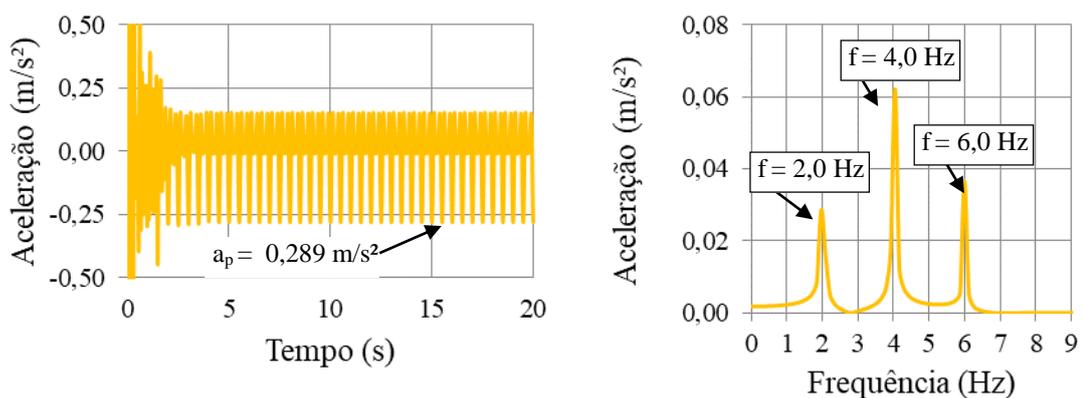


Figura H-39 – Aceleração: modelo proposto por AISC (MC-XVIII – Laje L4)

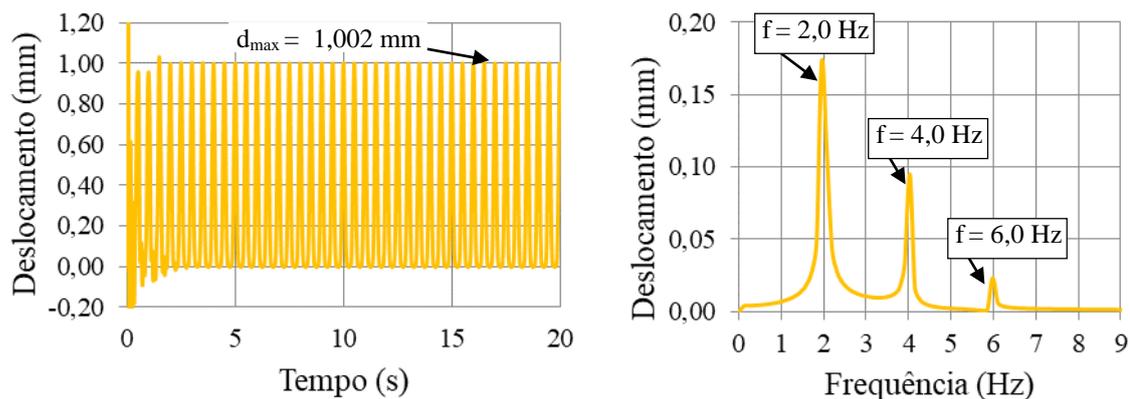


Figura H-40 – Deslocamento: modelo proposto por AISC (MC-XVIII – Laje L4)

### H.6 - Resultados da resposta estrutural dinâmica do piso (MC-XIX)

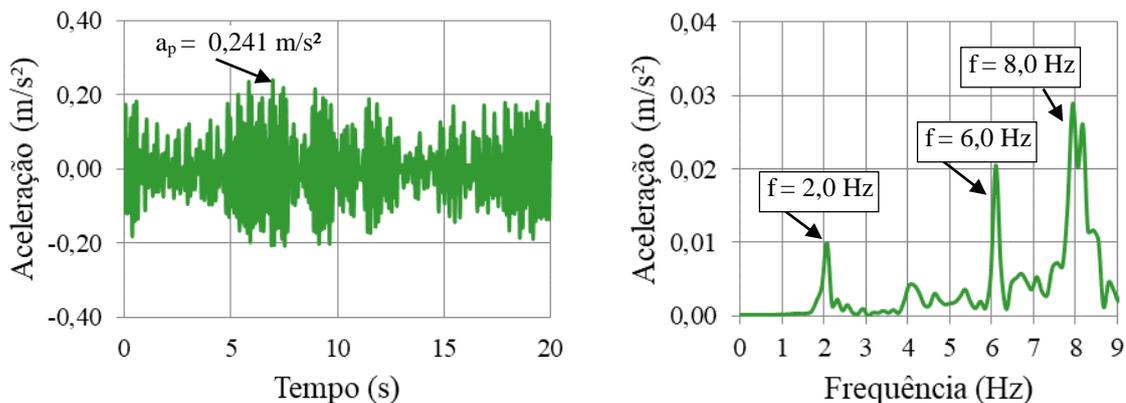


Figura H-41 – Aceleração: modelo biodinâmico (MC-XIX – Laje L5)

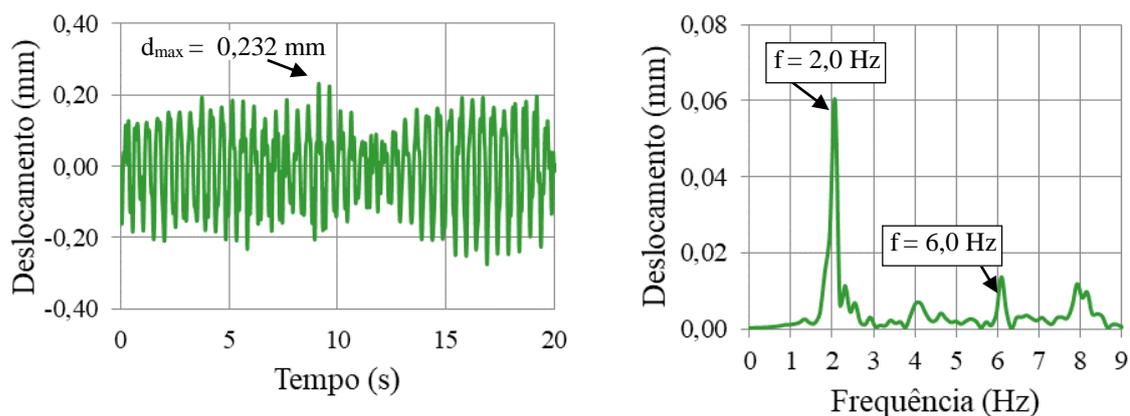


Figura H-42 - Deslocamento: modelo biodinâmico (MC-XIX – Laje L5)

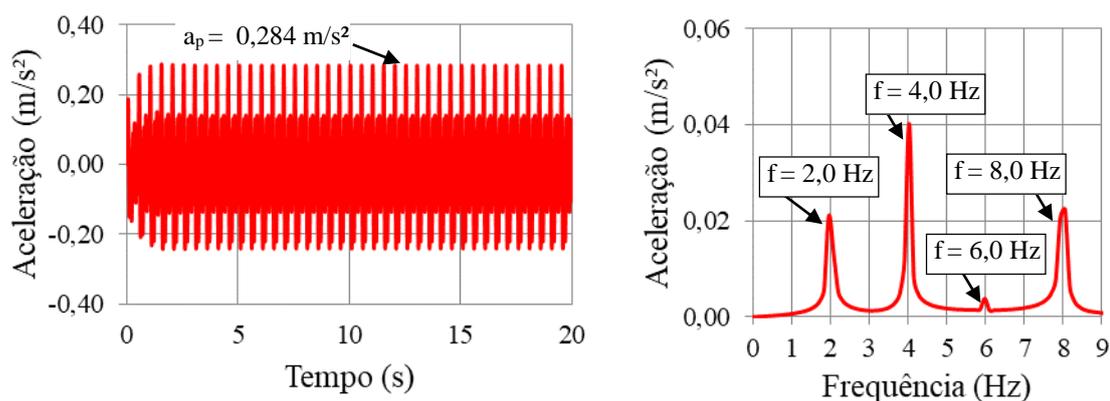


Figura H-44 – Aceleração: modelo proposto por Faisca (MC-XIX – Laje L4)

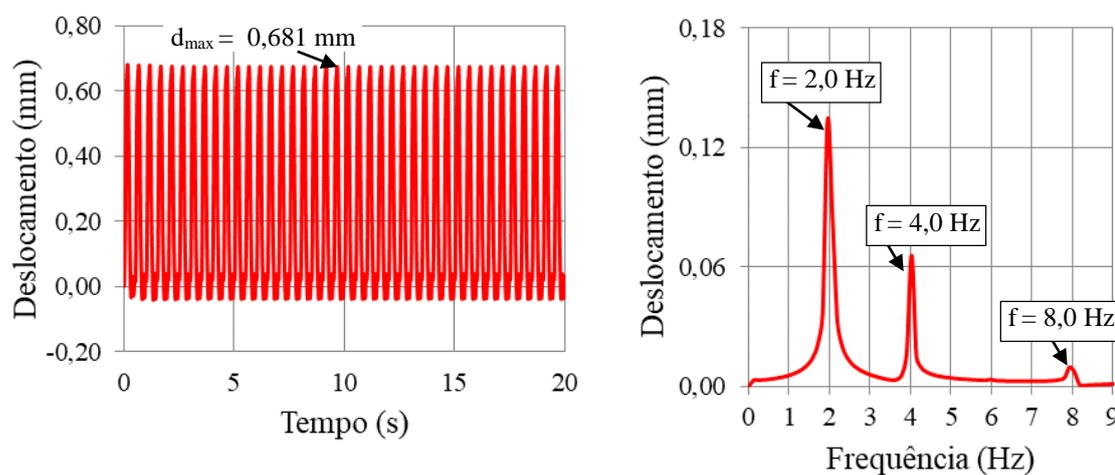


Figura H-43 – Deslocamento: modelo proposto por Faisca (MC-XIX – Laje L4)

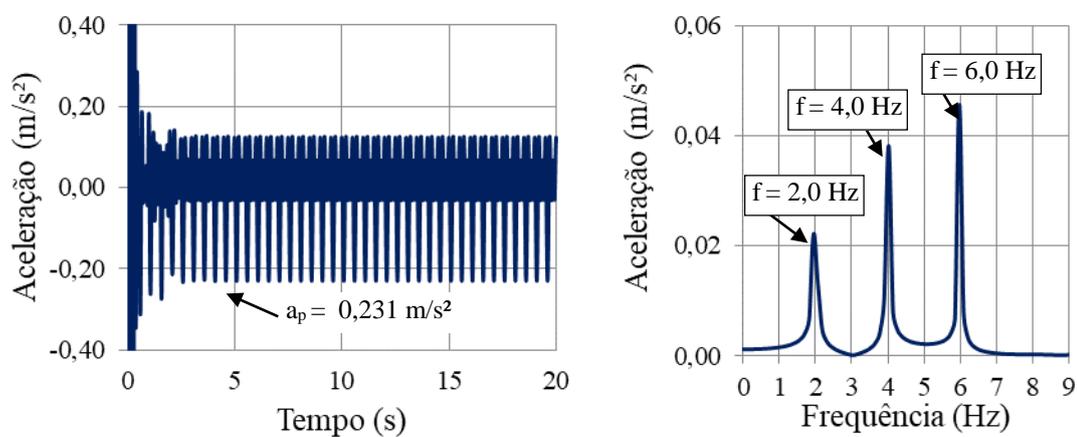
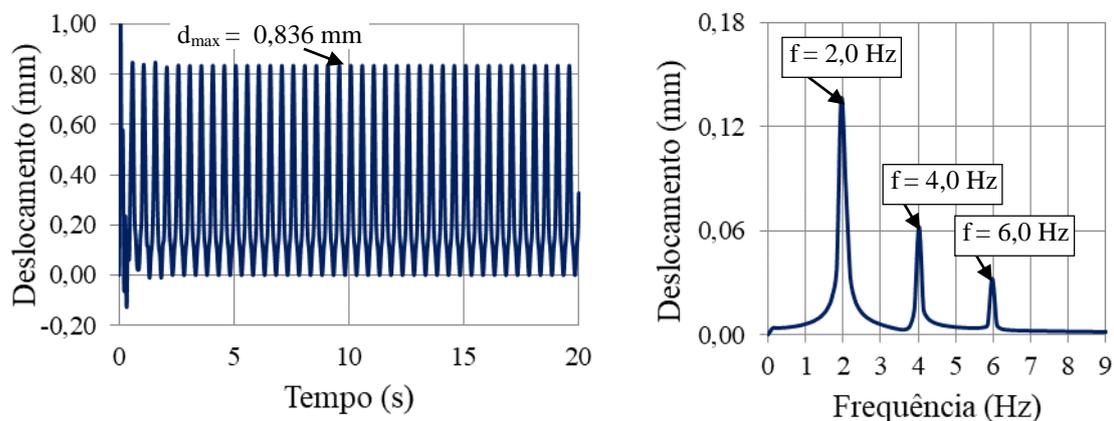
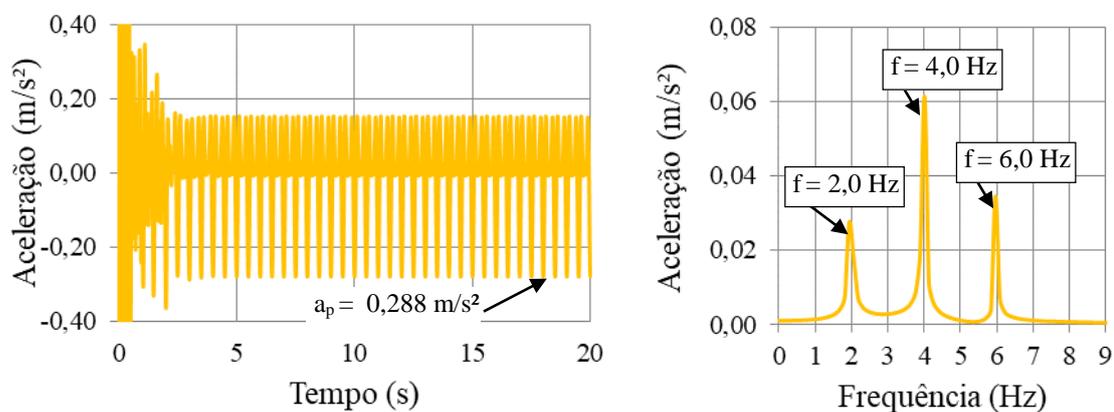


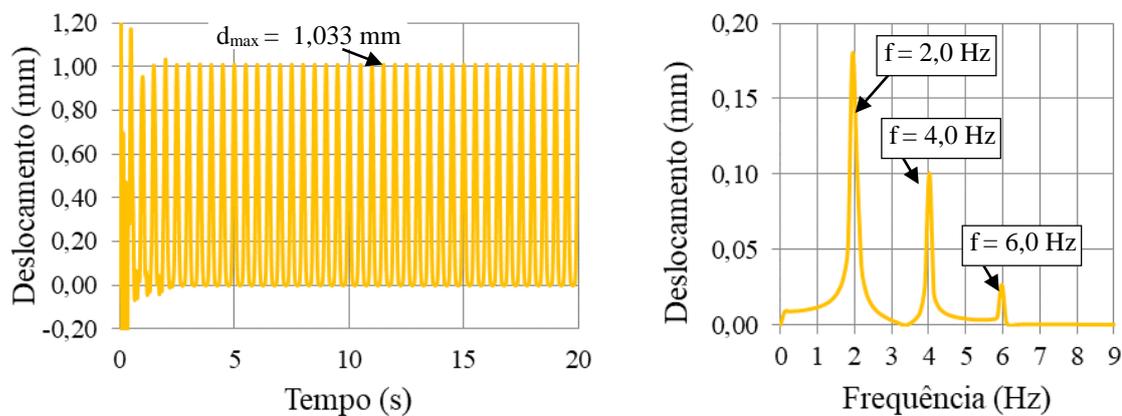
Figura H-44 – Aceleração: modelo proposto por SCI (MC-XIX – Laje L6)



**Figura H-43 – Deslocamento: modelo proposto por SCI (MC-XIX – Laje L6)**



**Figura H-44 – Aceleração: modelo proposto por AISC (MC-XIX – Laje L6)**



**Figura H-43 – Deslocamento: modelo proposto por AISC (MC-XIX – Laje L6)**