Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Modelo Numérico-Experimental para a Simulação das Ações Dinâmicas Induzidas pela Caminhada Humana em Estruturas de Passarelas

Otávio Augusto Peter de Souza

Porto Alegre
2026

OTÁVIO AUGUSTO PETER DE SOUZA

MODELO NUMÉRICO-EXPERIMENTAL PARA A SIMULAÇÃO DAS AÇÕES DINÂMICAS INDUZIDAS PELA CAMINHADA HUMANA EM ESTRUTURAS DE PASSARELAS

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia.

Porto Alegre

2026

OTÁVIO AUGUSTO PETER DE SOUZA

MODELO NUMÉRICO-EXPERIMENTAL PARA A SIMULAÇÃO DAS AÇÕES DINÂMICAS INDUZIDAS PELA CAMINHADA HUMANA EM ESTRUTURAS DE PASSARELAS

Esta tese de doutorado foi julgada adequada para a obtenção do título de DOUTOR EM ENGENHARIA, Área de Concentração ESTRUTURAS, e aprovada em sua forma final pela professora orientadora e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 03 de março de 2026

Profa. Letícia Fleck Fadel Miguel (UFRGS)
Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Orientadora

Prof. Nilo Cesar Consoli
Ph.D. pela Concordia University, Canadá
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. Mauro de Vasconcellos Real (UFRGS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Jesús Daniel Villalba Morales (PUJ)
Dr. pela Universidade de São Paulo

Prof. Jorge Manuel Vieira Borges Lourenço Rodrigues (UFPEL)
Dr. pela Universidade do Porto

CIP - Catalogação na Publicação

de Souza, Otávio Augusto Peter
Modelo Numérico-Experimental para a Simulação das Ações Dinâmicas Induzidas pela Caminhada Humana em Estruturas de Passarelas / Otávio Augusto Peter de Souza. -- 2026.
241 f.
Orientador: Letícia Fleck Fadel Miguel.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, BR-RS, 2026.

1. Passarelas. 2. Caminhada Humana. 3. Modelo Numérico-Experimental. 4. Circle-Inspired Optimization Algorithm. 5. Redes Neurais Artificiais. I. Miguel, Letícia Fleck Fadel, orient. II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Dedico este trabalho à memória de meu avô, Arno Peter.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus e à Espiritualidade, que me guiaram durante esta e tantas outras jornadas de minha vida.

À minha família – minha mãe Marlene, meu pai Romildo, minha irmã Mônica, meu cunhado Márcio, minhas tias Leni e Renata, e meu companheiro Elias – meu agradecimento pelo apoio incondicional, fundamentais para que eu chegasse até aqui.

Aos meus amigos Lamartine Junior, Leonardo Souza, Mateus Ramos e Patrick Dudeck por, apesar da distância, sempre mostrarem-se disponíveis, tanto nos momentos alegres como nos desafiadores.

Aos colegas do PPGEC, Daniel Matos e Juan Ospina, pelo auxílio como voluntários nos experimentos, e à colega Daniele Monteiro, pela valiosa ajuda com redes neurais artificiais.

Aos alunos do semestre 2025/1 da disciplina de Vibrações, do curso de Engenharia Mecânica, que participaram como voluntários nos experimentos deste trabalho.

À UFRGS e ao PPGEC, pela oportunidade de cursar um programa de pós-graduação de excelência, bem como pela infraestrutura e pelo apoio oferecidos.

Aos professores da banca examinadora – Jesús Morales, Jorge Rodrigues e Mauro Real – pela disponibilidade em participar e contribuir com a minha pesquisa.

À Professora Dra. Letícia Miguel, minha orientadora, o meu imenso agradecimento pelos conhecimentos compartilhados, pela paciência, dedicação e amizade ao longo de todo o doutorado.

À CAPES e ao CNPq pela concessão da bolsa de estudos, fundamental para a dedicação integral às atividades acadêmicas.

Com pensamento, todos os problemas podem ser resolvidos.

Agatha Christie

RESUMO

SOUZA, O. A. P. **Modelo numérico-experimental para a simulação das ações dinâmicas induzidas pela caminhada humana em estruturas de passarelas.** 2026. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio grande do Sul, Porto Alegre.

A caminhada humana é a ação dinâmica mais relevante na análise estrutural de passarelas, especialmente porque a frequência natural da maioria dessas estruturas apresenta valores próximos à frequência da caminhada humana ou a um de seus múltiplos harmônicos ou sub-harmônicos. Com o objetivo de prever o comportamento estrutural, diversos modelos de carga capazes de representar a caminhada foram desenvolvidos nas últimas décadas. No entanto, esses modelos frequentemente produzem respostas estruturais divergentes entre si ou apresentam resultados conservadores. Este trabalho propõe um modelo numérico-experimental de carga vertical da caminhada humana, capaz de simular suas características aleatórias, em especial as variações interpedestre, permitindo prever de forma mais precisa e abrangente a resposta estrutural de passarelas submetidas à ação humana. O modelo foi calibrado a partir de dados experimentais reais, obtidos por meio de centenas de medições de aceleração da caminhada, e emprega ferramentas modernas e consolidadas, como o algoritmo metaheurístico *Circle-Inspired Optimization Algorithm* (CIOA) e redes neurais artificiais, permitindo prever carregamentos verticais da caminhada para diferentes massas de pedestres e frequências de passo, dentro de um amplo intervalo. O modelo proposto foi aplicado a diferentes passarelas, simulando diversas condições de tráfego. As respostas estruturais obtidas a partir das cargas previstas pelo modelo mostraram boa concordância com aquelas calculadas por meio da aplicação de registros experimentais da força real da caminhada e, na maioria dos casos, superaram os resultados de modelos de carga consagrados na literatura. Essa superioridade mostrou-se ainda mais evidente em situações de múltiplos pedestres caminhando com frequências e velocidades aleatórias – situação mais representativa do tráfego real e ainda pouco explorada por modelos existentes. O bom desempenho do modelo está associado à sua formulação, que considera também os sub-harmônicos da caminhada humana, e à sua aplicação, que incorpora a individualidade de cada carregamento, permitindo representar adequadamente as variações interpedestre, frequentemente negligenciadas por modelos tradicionais.

Palavras-chave: *Passarelas; Caminhada Humana; Modelo Numérico-Experimental; Circle-Inspired Optimization Algorithm; Redes Neurais Artificiais.*

ABSTRACT

SOUZA, O. A. P. **Numerical-experimental model for the simulation of dynamic actions induced by human walking on footbridge structures.** 2026. Thesis (PhD in Civil Engineering) – Postgraduate Program in Civil Engineering, Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Human walking is the most relevant dynamic action in the structural analysis of footbridges, particularly because the natural frequency of most of these structures is close to the walking frequency or to one of its harmonic or sub-harmonic multiples. In recent decades, several load models capable of representing human walking have been developed to predict structural behavior. However, these models often produce divergent structural responses or yield conservative results. This work proposes a numerical-experimental model for the vertical load induced by human walking, capable of simulating its random characteristics, particularly inter-pedestrian variability, thereby enabling a more accurate and comprehensive prediction of the structural response of footbridges subjected to human-induced loads. The model was calibrated using real experimental data obtained from hundreds of walking acceleration measurements and employs modern and well-established tools, such as the metaheuristic Circle-Inspired Optimization Algorithm (CIOA) and artificial neural networks. This approach allows the prediction of vertical walking loads for different pedestrian masses and step frequencies over a wide range. The proposed model was applied to different footbridges, simulating various traffic conditions. The structural responses obtained from the loads predicted by the model showed good agreement with those calculated using experimental records of actual walking forces and, in most cases, outperformed the results of well-established load models reported in the literature. This superiority was even more evident in scenarios involving multiple pedestrians walking at random frequencies and speeds – a condition more representative of real traffic and still insufficiently addressed by existing models. The good performance of the model is associated with its formulation, which also accounts for sub-harmonics of human walking, and with its application strategy, which incorporates the individuality of each load, allowing an adequate representation of inter-pedestrian variability that is often neglected by traditional models.

Keywords: *Footbridges; Human walking; Numerical-Experimental Model; Circle-Inspired Optimization Algorithm; Artificial Neural Networks.*

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 3.1: Sistema de um grau de liberdade..... 41

Figura 3.2: Sistema de três graus de liberdade..... 42

Figura 3.3: Carregamentos verticais típicos de passos de um pedestre de 250 libras caminhando sobre uma superfície rígida..... 43

Figura 3.4: Padrão típico de forças verticais para: (a) a corrida, (b) a caminhada..... 44

Figura 3.5: Distribuição do ritmo dos pedestres..... 44

Figura 3.6: Função de tempo do carregamento dinâmico vertical com os deslocamentos de vibração horizontal resultantes para um pedestre caminhando a uma frequência de 2 Hz..... 45

Figura 3.7: Relação entre as características da passarela e o comportamento induzido por cargas dinâmicas. (a) Frequência fundamental para diferentes comprimentos de vão, (b) Resposta da passarela para diferentes valores de amortecimento, (c) Resposta da passarela em relação à frequência fundamental, (d) Resposta da passarela em relação à rigidez..... 46

Figura 3.8: Elemento de treliça plana no sistema local de coordenadas..... 48

Figura 3.9: Determinação do fator Ψ, levando em consideração o primeiro harmônico para: (a) vibrações verticais e longitudinais, (b) vibrações laterais..... 52

Figura 3.10: Determinação do fator Ψ, levando em consideração o segundo harmônico para: (a) vibrações verticais, (b) vibrações laterais..... 53

Figura 3.11: Determinação do fator de amplificação dinâmica..... 55

Figura 3.12: Relação entre a frequência natural e o fator k considerando: (a) vibrações verticais, (b) vibrações horizontais..... 56

Figura 4.1: Fluxograma das etapas metodológicas da pesquisa..... 59

Figura 4.2: Registro das acelerações do centro de massa do corpo de um pedestre..... 61

Figura 4.3: Alterando o raio e atualizando o centro do círculo no algoritmo CIOA..... 65

Figura 4.4: Esquema de um neurônio artificial..... 68

Figura 4.5: Arquitetura de uma rede neural artificial..... 69

Figura 4.6: Modelos estruturais realistas treliçados do tipo Warren..... 70

Figura 4.7: Modelos estruturais realistas treliçados do tipo Pratt..... 71

Figura 4.8: Modelos estruturais com frequência reduzida treliçados do tipo Warren..... 73

Figura 4.9: Modelos estruturais com frequência reduzida treliçados do tipo Pratt..... 74

Figura 5.1: Problema proposto para a validação do Método de Newmark..... 81

Figura 5.2: Deslocamentos ao longo do tempo para a validação do Método de Newmark: (a) primeiro GDL, (b) segundo GDL, (c) terceiro GDL, (d) quarto GDL. 84

Figura 6.1: Exemplo de registro utilizando o aplicativo *Phyphox*..... 86

Figura 6.2: Mapeamento dos registros experimentais..... 87

Figura 6.3: Registros de cinco pedestres diferentes caminhando em frequências distintas..... 88

Figura 6.4: Comparação entre registros experimentais e aproximações por meio do CIOA para cinco pedestres diferentes..... 92

Figura 6.5: Convergência para o ajuste do registro do pedestre 1 caminhando a 1,60 Hz..... 93

Figura 6.6: Convergência para o ajuste do registro do pedestre 4 caminhando a 1,90 Hz..... 94

Figura 6.7: Convergência para o ajuste do registro do pedestre 8 caminhando a 1,99 Hz..... 94

Figura 6.8: Convergência para o ajuste do registro do pedestre 12 caminhando a 2,05 Hz..... 95

Figura 6.9: Convergência para o ajuste do registro do pedestre 15 caminhando a 2,30 Hz..... 95

Figura 6.10: Relação entre f e $\Delta G_{Hi}/G$..... 97

Figura 6.11: Relação entre f e $\Delta G_{Si}/G$..... 98

Figura 6.12: Relação entre f e φ_{Hi}..... 99

Figura 6.13: Relação entre f e φ_{Si}..... 100

Figura 6.14: Matriz de correlação entre parâmetros da caminhada ajustados pelo CIOA..... 101

Figura 6.15: Regressão e desempenho da 1ª etapa de treinamento (Saída ΔG_{H1})..... 106

Figura 6.16: Regressão e desempenho da 2ª etapa de treinamento (Saída ΔG_{H2})..... 106

Figura 6.17: Regressão e desempenho da 3ª etapa de treinamento (Saída ΔG_{H3})..... 107

Figura 6.18: Regressão e desempenho da 4ª etapa de treinamento (Saída ΔG_{H4})..... 107

Figura 6.19: Regressão e desempenho da 5ª etapa de treinamento (Saída ΔG_{H5})..... 107

Figura 6.20: Regressão e desempenho da 6ª etapa de treinamento (Saída ΔG_{S1})..... 108

Figura 6.21: Regressão e desempenho da 7ª etapa de treinamento (Saída ΔG_{S2})..... 108

Figura 6.22: Regressão e desempenho da 8ª etapa de treinamento (Saída ΔG_{S3})..... 109

Figura 6.23: Regressão e desempenho da 9ª etapa de treinamento (Saída ΔG_{S4})..... 109

Figura 6.24: Regressão e desempenho da 10ª etapa de treinamento (Saída ΔG_{S5})..... 109

Figura 6.25: Regressão e desempenho da 11ª etapa de treinamento (Saída φ_{H2})..... 110

Figura 6.26: Regressão e desempenho da 12ª etapa de treinamento (Saída φ_{H3})..... 111

Figura 6.27: Regressão e desempenho da 13ª etapa de treinamento (Saída φ_{H4})..... 111

Figura 6.28: Regressão e desempenho da 14ª etapa de treinamento (Saída φ_{H5})..... 111

Figura 6.29: Regressão e desempenho da 15ª etapa de treinamento (Saída φ_{S1})..... 112

Figura 6.30: Regressão e desempenho da 16ª etapa de treinamento (Saída φ_{S2})..... 113

Figura 6.31: Regressão e desempenho da 17ª etapa de treinamento (Saída φ_{S3})..... 113

Figura 6.32: Regressão e desempenho da 18ª etapa de treinamento (Saída φ_{S4})..... 113

Figura 6.33: Regressão e desempenho da 19ª etapa de treinamento (Saída φ_{S5})..... 114

Figura 6.34: Linha de tendência relacionando frequência e velocidade da caminhada... 116

Figura 6.35: Esquema para aplicação da carga móvel..... 117

Figura 7.1: Comparação entre as previsões do modelo de carga desenvolvido neste trabalho, o registro experimental e modelos já existentes..... 120

Figura 7.2: Abrangência do modelo de carga para respostas da estrutura ME_{W1}..... 125

Figura 7.3: Abrangência do modelo de carga para respostas da estrutura ME_{W2}..... 126

Figura 7.4: Abrangência do modelo de carga para respostas da estrutura ME_{P1}..... 127

Figura 7.5: Abrangência do modelo de carga para respostas da estrutura ME_{P2}..... 128

Figura 7.6: Abrangência do modelo de carga para respostas da estrutura ME_{W3}..... 129

Figura 7.7: Abrangência do modelo de carga para respostas da estrutura ME_{W4}..... 130

Figura 7.8: Abrangência do modelo de carga para respostas da estrutura ME_{P3}..... 131

Figura 7.9: Parâmetros previstos para modelar carregamentos de 12 pedestres em frequências próximas a 2 Hz..... 144

Figura 7.10: Acelerações no nó central do ME_{W1} para 12 pedestres caminhando em frequências próximas a 2 Hz..... 145

Figura 7.11: Acelerações no nó central do ME_{W2} para 12 pedestres caminhando em frequências próximas a 2 Hz..... 146

Figura 7.12: Acelerações no nó central do ME_{WP1} para 12 pedestres caminhando em frequências próximas a 2 Hz..... 147

Figura 7.13: Acelerações no nó central do ME_{P2} para 12 pedestres caminhando em frequências próximas a 2 Hz..... 148

Figura 7.14: Acelerações no nó central do ME_{W3} para 12 pedestres caminhando em frequências próximas a 2 Hz..... 150

Figura 7.15: Acelerações no nó central do ME_{W4} para 12 pedestres caminhando em frequências próximas a 2 Hz..... 152

Figura 7.16: Acelerações no nó central do ME_{WP3} para 12 pedestres caminhando em frequências próximas a 2 Hz..... 153

Figura 7.17: Parâmetros previstos para modelar carregamentos de 12 pedestres em frequências diversas..... 155

Figura 7.18: Acelerações no nó central do ME_{W1} para 12 pedestres caminhando em frequências diversas..... 156

Figura 7.19: Acelerações no nó central do ME_{W2} para 12 pedestres caminhando em frequências diversas..... 157

Figura 7.20: Acelerações no nó central do ME_{P1} para 12 pedestres caminhando em frequências diversas..... 158

Figura 7.21: Acelerações no nó central do ME_{P2} para 12 pedestres caminhando em frequências diversas..... 159

Figura 7.22: Acelerações no nó central do ME_{W3} para 12 pedestres caminhando em frequências diversas..... 160

Figura 7.23: Acelerações no nó central do ME_{W4} para 12 pedestres caminhando em frequências diversas..... 161

Figura 7.24: Acelerações no nó central do ME_{P3} para 12 pedestres caminhando em frequências diversas..... 162

Figura A.1: Registros e ajustes do pedestre 1 ($m = 54\ kg$)..... 174

Figura A.2: Registros e ajustes do pedestre 2 ($m = 58\ kg$)..... 176

Figura A.3: Registros e ajustes do pedestre 3 ($m = 60\ kg$)..... 178

Figura A.4: Registros e ajustes do pedestre 4 ($m = 65\ kg$)..... 180

Figura A.5: Registros e ajustes do pedestre 5 ($m = 66\ kg$)..... 182

Figura A.6: Registros e ajustes do pedestre 6 ($m = 69\ kg$)..... 184

Figura A.7: Registros e ajustes do pedestre 7 ($m = 73\ kg$)..... 186

Figura A.8: Registros e ajustes do pedestre 8 ($m = 75\ kg$)..... 188

Figura A.9: Registros e ajustes do pedestre 9 ($m = 76\ kg$)..... 190

Figura A.10: Registros e ajustes do pedestre 10 ($m = 78\ kg$)..... 192

Figura A.11: Registros e ajustes do pedestre 11 ($m = 87\ kg$)..... 194

Figura A.12: Registros e ajustes do pedestre 12 ($m = 90\ kg$)..... 196

Figura A.13: Registros e ajustes do pedestre 13 ($m = 92\ kg$)..... 198

Figura A.14: Registros e ajustes do pedestre 14 ($m = 104\ kg$)..... 200

Figura A.15: Registros e ajustes do pedestre 15 ($m = 105\ kg$)..... 202

Figura A.16: Registros e ajustes do pedestre 16 ($m = 112\ kg$)..... 204

Figura B.1: Relação entre f e $\Delta G_{H1}/G$ individualizada para cada pedestre..... 223

Figura B.2: Relação entre f e $\Delta G_{H2}/G$ individualizada para cada pedestre..... 224

Figura B.3: Relação entre f e $\Delta G_{H3}/G$ individualizada para cada pedestre..... 225

Figura B.4: Relação entre f e $\Delta G_{H4}/G$ individualizada para cada pedestre..... 226

Figura B.5: Relação entre f e $\Delta G_{H5}/G$ individualizada para cada pedestre..... 227

Figura B.6: Relação entre f e $\Delta G_{S1}/G$ individualizada para cada pedestre..... 228

Figura B.7: Relação entre f e $\Delta G_{S2}/G$ individualizada para cada pedestre..... 229

Figura B.8: Relação entre f e $\Delta G_{S3}/G$ individualizada para cada pedestre..... 230

Figura B.9: Relação entre f e $\Delta G_{S4}/G$ individualizada para cada pedestre..... 231

Figura B.10: Relação entre f e $\Delta G_{S5}/G$ individualizada para cada pedestre..... 232

Figura B.11: Relação entre f e φ_{H2} individualizada para cada pedestre..... 233

Figura B.12: Relação entre f e φ_{H3} individualizada para cada pedestre..... 234

Figura B.13: Relação entre f e φ_{H4} individualizada para cada pedestre..... 235

Figura B.14: Relação entre f e φ_{H5} individualizada para cada pedestre..... 236

Figura B.15: Relação entre f e φ_{S1} individualizada para cada pedestre..... 237

Figura B.16: Relação entre f e φ_{S2} individualizada para cada pedestre..... 238

Figura B.17: Relação entre f e φ_{S3} individualizada para cada pedestre..... 239

Figura B.18: Relação entre f e φ_{S4} individualizada para cada pedestre..... 240

Figura B.19: Relação entre f e φ_{S5} individualizada para cada pedestre..... 241

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1: Características físicas dos pedestres voluntários para a criação do modelo. 62

Tabela 4.2: Características gerais dos modelos estruturais realistas..... 70

Tabela 4.3: Áreas de seção transversal das estruturas realistas..... 72

Tabela 4.4: Dados de amortecimento das estruturas realistas treliçadas associados aos dois primeiros modos de vibração..... 72

Tabela 4.5: Características gerais dos modelos estruturais com frequência reduzida..... 73

Tabela 4.6: Áreas de seção transversal das estruturas com frequência reduzida..... 74

Tabela 4.7: Dados de amortecimento das estruturas com frequência reduzida associados aos dois primeiros modos de vibração..... 74

Tabela 5.1: Frequências naturais (Hz) obtidas para o ME_{W1}..... 78

Tabela 5.2: Frequências naturais (Hz) obtidas para o ME_{W2}..... 78

Tabela 5.3: Frequências naturais (Hz) obtidas para o ME_{P1}..... 79

Tabela 5.4: Frequências naturais (Hz) obtidas para o ME_{P2}..... 79

Tabela 5.5: Frequências naturais (Hz) obtidas para os modelos estruturais de passarelas com frequência natural reduzida..... 80

Tabela 5.6: Dados do problema para validação do Método de Newmark..... 81

Tabela 5.7: Deslocamentos do sistema de 4GDL para validação do Método de Newmark..... 83

Tabela 6.1: Parâmetros ótimos para o ajuste de registros experimentais..... 96

Tabela 6.2: Esquema das etapas das Redes Neurais Artificiais..... 103

Tabela 6.3: Parâmetros de treinamento..... 104

Tabela 6.4: Arquitetura das etapas das Redes Neurais Artificiais..... 105

Tabela 7.1: Análise do erro (MSE) para as previsões..... 121

Tabela 7.2: Comparação de desempenho referente ao erro (MSE) entre modelos..... 121

Tabela 7.3: Frequências, Harmônicos e Sub-harmônicos estimulantes para cada modelo estrutural..... 123

Tabela 7.4: Características físicas dos pedestres para registros de longa duração..... 134

Tabela 7.5: Aceleração máxima para o nó central do ME_{W1}..... 136

Tabela 7.6: Aceleração máxima para o nó central do ME_{W2}..... 137

Tabela 7.7: Aceleração máxima para o nó central do ME_{P1}..... 138

Tabela 7.8: Aceleração máxima para o nó central do ME_{P2}..... 139

Tabela 7.9: Aceleração máxima para o nó central do ME_{W3}..... 140

Tabela 7.10: Aceleração máxima para o nó central do ME_{W4}..... 141

Tabela 7.11: Aceleração máxima para o nó central do ME_{P3}..... 141

Tabela 7.12: Características para a ação de múltiplos pedestres caminhando em frequências próximas a 2 Hz..... 143

Tabela 7.13: Características para a ação de múltiplos pedestres caminhando em frequências diversas..... 154

Tabela A.1: Parâmetros ajustados pelo CIOA para o pedestre 1 ($m = 54\ kg$, $G = 529{,}74\ N$)..... 206

Tabela A.2: Parâmetros ajustados pelo CIOA para o pedestre 2 ($m = 58\ kg$, $G = 568{,}98\ N$)..... 207

Tabela A.3: Parâmetros ajustados pelo CIOA para o pedestre 3 ($m = 60\ kg$, $G = 588{,}60\ N$)..... 208

Tabela A.4: Parâmetros ajustados pelo CIOA para o pedestre 4 ($m = 65\ kg$, $G = 637{,}65\ N$)..... 209

Tabela A.5: Parâmetros ajustados pelo CIOA para o pedestre 5 ($m = 66\ kg$, $G = 647{,}46\ N$)..... 210

Tabela A.6: Parâmetros ajustados pelo CIOA para o pedestre 6 ($m = 69\ kg$, $G = 676{,}89\ N$)..... 211

Tabela A.7: Parâmetros ajustados pelo CIOA para o pedestre 7 ($m = 73\ kg$, $G = 716{,}13\ N$)..... 212

Tabela A.8: Parâmetros ajustados pelo CIOA para o pedestre 8 ($m = 75\ kg$, $G = 735{,}75\ N$)..... 213

Tabela A.9: Parâmetros ajustados pelo CIOA para o pedestre 9 ($m = 76\ kg$, $G = 745{,}56\ N$)..... 214

Tabela A.10: Parâmetros ajustados pelo CIOA para o pedestre 10 ($m = 78\ kg$, $G = 765{,}18\ N$)..... 215

Tabela A.11: Parâmetros ajustados pelo CIOA para o pedestre 11 ($m = 87\ kg, G = 853{,}47\ N$)..... 216

Tabela A.12: Parâmetros ajustados pelo CIOA para o pedestre 12 ($m = 90\ kg, G = 882{,}90\ N$)..... 217

Tabela A.13: Parâmetros ajustados pelo CIOA para o pedestre 13 ($m = 92\ kg, G = 902{,}52\ N$)..... 218

Tabela A.14: Parâmetros ajustados pelo CIOA para o pedestre 14 ($m = 104\ kg, G = 1020{,}24\ N$)..... 219

Tabela A.15: Parâmetros ajustados pelo CIOA para o pedestre 15 ($m = 105\ kg, G = 1030{,}05\ N$)..... 220

Tabela A.16: Parâmetros ajustados pelo CIOA para o pedestre 16 ($m = 112\ kg, G = 1098{,}72\ N$)..... 221

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AFGC	*Association Française de Génie Civil*
AISC	*American Institute of Steel Construction*
CEB	*Comitê Euro-Internacional du Betón*
CIOA	*Circle-Inspired Optimization Algorithm*
DLF	*Dynamic Loading Factor*
GDL	Grau de Liberdade
HiVoSS	*Human-induced Vibration of Steel Structures*
ISO	*International Organization for Standardization*
ME_{P1}	Modelo Estrutural do tipo Pratt 1
ME_{P2}	Modelo Estrutural do tipo Pratt 2
ME_{P3}	Modelo Estrutural do tipo Pratt 3
ME_{W1}	Modelo Estrutural do tipo Warren 1
ME_{W2}	Modelo Estrutural do tipo Warren 2
ME_{W3}	Modelo Estrutural do tipo Warren 3
ME_{W4}	Modelo Estrutural do tipo Warren 4
NBR	Norma Brasileira
RNA	Rede Neural Artificial
SÉTRA	*Service d'Études techniques des routes et autoroutes*

LISTA DE SÍMBOLOS

I – LETRAS ROMANAS MAIÚSCULAS

A	Área da seção transversal de um elemento
$\boldsymbol{C}$	Matriz de amortecimento de um sistema
$\boldsymbol{D}$	Matriz dinâmica
E	Módulo de elasticidade de um material
$F(t)$	Força dinâmica de um sistema
$\vec{F}(t)$	Vetor de forças dinâmicas de um sistema
$F_1(t)$	Carregamento individual de pedestre no modelo SÉTRA
$F_{bach,H}(t)$	Carregamento horizontal no modelo de Bachmann e Ammann
$F_{bach,V}(t)$	Carregamento vertical no modelo de Bachmann e Ammann
$F_{ISO}(t)$	Carregamento no modelo da ISO 10137
$F_P(t)$	Força de um pedestre aproximada por funções harmônicas
$F_{Ped}(t)$	Força de um pedestre medida experimentalmente
$F_{sét,E}(t)$	Carregamento no modelo SÉTRA para multidões esparsas
$F_{sét,D}(t)$	Carregamento no modelo SÉTRA para multidões densas
G	Peso de um pedestre
$\boldsymbol{K}$	Matriz de rigidez de um sistema
L	Comprimento de um elemento
L_b	Limite inferior de uma variável de projeto
L_{b1i}	Novo limite inferior de uma variável de projeto
$\boldsymbol{M}$	Matriz de massa de um sistema
N_{ag}	Número de agentes de pesquisa do *Circle-Inspired Optimization Algorithm*
$O_{1,2}$	Centro do círculo durante o movimento de um agente do ponto 1 ao ponto 2 no *Circle-Inspired Optimization Algorithm*
$O_{2,3}$	Centro do círculo durante o movimento de um agente do ponto 2 ao ponto 3 no *Circle-Inspired Optimization Algorithm*
$\boldsymbol{R}$	Matriz de rotação para elementos de barra
S_i	Entradas de um neurônio
S_j	Saída de um neurônio
T_0	Tempo para um pedestre percorrer a passarela
U_b	Limite superior de uma variável de projeto
U_{b1i}	Novo limite superior de uma variável de projeto
X_i	Coordenada horizontal inicial de um elemento de barra

X_j	Coordenada horizontal final de um elemento de barra
Y_i	Coordenada vertical inicial de um elemento de barra
Y_j	Coordenada vertical final de um elemento de barra

II – LETRAS ROMANAS MINÚSCULAS

a	Constante da formulação de Rayleigh
a_0	Coeficiente do Método de Newmark
a_1	Coeficiente do Método de Newmark
a_2	Coeficiente do Método de Newmark
a_3	Coeficiente do Método de Newmark
a_4	Coeficiente do Método de Newmark
a_5	Coeficiente do Método de Newmark
$a_{hor,1}$	Amplitude de aceleração horizontal para um único pedestre
$a_{hor,N}$	Amplitude de aceleração horizontal para N pedestres
a_{max}	Aceleração máxima no meio do vão
a_{ped}	Aceleração de um pedestre medida experimentalmente
$a_{vert,1}$	Amplitude de aceleração vertical para um único pedestre
$a_{vert,N}$	Amplitude de aceleração vertical para N pedestres
b	Constante da formulação de Rayleigh
c	Amortecimento de um elemento
c_r	Constante do *Circle-Inspired Optimization Algorithm*
c_x	Termo da matriz de rotação para elementos de barra
c_y	Termo da matriz de rotação para elementos de barra
d	Densidade de pedestres
f	Função de ativação de uma rede neural
f_1	Frequência natural associada ao primeiro modo de vibração
f_2	Frequência natural associada ao segundo modo de vibração
f_e	Frequência crítica de estimulação da estrutura
f_n	Frequência natural da estrutura
f_s	Frequência do passo da caminhada
g	Aceleração da gravidade
k	Rigidez de um elemento
k_{hor}	Fator redutor de acelerações horizontais do modelo do Eurocódigo 5

k_i	Número da iteração corrente
k_{vert}	Fator redutor de acelerações verticais do modelo do Eurocódigo 5
m	Massa de um elemento
m_b	Fator de majoração no modelo de Bachmann e Ammann
m_{ped}	Massa de um pedestre
n_h	Número de harmônicos
n_P	Número de pedestres
$\vec{r}$	Vetor de raios do *Circle-Inspired Optimization Algorithm*
$r_{1,2}$	Raio que rege o movimento de um agente do ponto 1 ao ponto 2 no *Circle-Inspired Optimization Algorithm*
$r_{2,3}$	Raio que rege o movimento de um agente do ponto 2 ao ponto 3 no *Circle-Inspired Optimization Algorithm*
r_j	j-ésimo elemento do vetor de raios do *Circle-Inspired Optimization Algorithm*
$\vec{r}_{new}$	Novo vetor de raios após redução do limite de variáveis no *Circle-Inspired Optimization Algorithm*
r_{up}	Coeficiente de atualização do *Circle-Inspired Optimization Algorithm*
$rand_1$	Variável aleatória entre 0 e 1 do *Circle-Inspired Optimization Algorithm*
$rand_2$	Variável aleatória entre 0 e 1 do *Circle-Inspired Optimization Algorithm*
$rand_3$	Variável aleatória entre 0 e 1 do *Circle-Inspired Optimization Algorithm*
$rand_4$	Variável aleatória entre 0 e 1 do *Circle-Inspired Optimization Algorithm*
t	Tempo
v_{ap}	Velocidade de aplicação da carga modelada
$x(t)$	Deslocamento de um elemento
$\vec{x}(t)$	Vetor de deslocamentos de um sistema
$\dot{x}(t)$	Velocidade de um elemento
$\vec{\dot{x}}(t)$	Vetor de velocidades de um sistema
$\ddot{x}(t)$	Aceleração de um elemento
$\vec{\ddot{x}}(t)$	Vetor de acelerações de um sistema
x_{2i}	Variável de dimensão par do *Circle-Inspired Optimization Algorithm*
x_{2i-1}	Variável de dimensão ímpar do *Circle-Inspired Optimization Algorithm*
x_{ibest}	Variável na dimensão i da melhor solução produzida no *Circle-Inspired Optimization Algorithm*
x_{ped}	Posição do pedestre em um elemento, medida a partir do nó esquerdo

III – LETRAS GREGAS

α	Parâmetro do Método de Newmark
β	Parâmetro do Método de Newmark
α_n	Fator de amortecimento dinâmico para o n-ésimo harmônico
α_R	Coeficiente de amplificação dinâmica
ΔG_{Hi}	Amplitude associada ao i-ésimo harmônico da caminhada
ΔG_{Vi}	Amplitude associada ao i-ésimo sub-harmônico da caminhada
θ	Ângulo que rege os agentes do *Circle-Inspired Optimization Algorithm*
θ_j	Termo de polarização da rede neural artificial
λ	Taxa de fluxo média de pedestres
ξ	Fator de amortecimento associado a um modo de vibração
ρ	Massa específica de um elemento
ϕ	Coeficiente de amplificação dinâmica
φ	Ângulo de fase
φ_{Hi}	Ângulo de fase associado ao i-ésimo harmônico da caminhada
φ_{Vi}	Ângulo de fase associado ao i-ésimo sub-harmônico da caminhada
Ψ	Fator redutor de cargas
ω	Frequência natural associada a um modo de vibração
ω_{ij}	Pesos da rede neural artificial

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 26

1.1 JUSTIFICATIVA 27

1.2 OBJETIVOS 28

1.2.1 Objetivo Principal 28

1.2.2 Objetivos Específicos 28

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO 29

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 31

2.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS DA CAMINHADA HUMANA 31

2.2 MODELAGEM DA CAMINHADA COMO UMA AÇÃO DINÂMICA 34

2.2.1 Modelos de Força 35

2.2.2 Modelos de Resposta 36

2.2.3 Aplicação de Modelos de Força 37

2.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE O ESTADO DA ARTE 39

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 41

3.1 CONCEITOS BÁSICOS DE TEORIA DE VIBRAÇÕES 41

3.2 FUNDAMENTOS A RESPEITO DA CAMINHADA HUMANA 42

3.3 CONCEITOS DE MODELAGEM ESTRUTURAL 47

3.3.1 Estruturas constituídas por elementos de treliça plana 47

3.3.2 Montagem da matriz de amortecimento 49

3.4 MODELOS DE CARGA DA CAMINHADA HUMANA 49

3.4.1 Modelo proposto por Bachmann e Ammann (1987) 50

3.4.2 Modelo indicado pela diretriz SÉTRA/AFGC (2006) 51

3.4.6 Modelo indicado pela diretriz ISO 10137 (2007) 53

3.5 MODELOS DE RESPOSTA DA CAMINHADA HUMANA 54

3.5.1 Modelo simplificado proposto por Rainer, Pernica e Allen (1988) 54

3.5.2 Modelo simplificado do Anexo II Eurocódigo 5 (2004) 55

4 METODOLOGIA PROPOSTA 58

4.1 ORGANIZAÇÃO GERAL DA METODOLOGIA 58

4.2 AQUISIÇÃO DE REGISTROS DE ACELERAÇÃO DA CAMINHADA HUMANA 60

4.3 ALGORITMOS METAHEURÍSTICOS DE OTIMIZAÇÃO 62
4.3.1 Circle-Inspired Optimization Algorithm (CIOA) 63
4.4 REDES NEURAIS ARTIFICIAIS 66
4.4.1 Características de RNAs 67
4.5 ESTRUTURAS ANALISADAS 69
4.5.1 Modelos Estruturais de Passarelas Realistas 69
4.5.2 Modelos Estruturais de Passarelas com Frequência Natural Reduzida 73
4.6 MÉTODO DE NEWMARK 75
5 VALIDAÇÃO DAS ROTINAS COMPUTACIONAIS DESENVOLVIDAS 77
5.1 IMPLEMENTAÇÃO E VALIDAÇÃO DOS MODELOS ESTRUTURAIS ANALISADOS 77
5.1.1 Implementação e Validação dos Modelos Estruturais de Passarelas Realistas 77
5.1.2 Implementação e validação dos Modelos Estruturais de Passarelas com Frequência Natural Reduzida 79
5.2 IMPLEMENTAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MÉTODO DE NEWMARK 80
6. MODELO NUMÉRICO-EXPERIMENTAL PARA A SIMULAÇÃO DAS AÇÕES DINÂMICAS DA CAMINHADA HUMANA 85
6.1 REGISTROS EXPERIMENTAIS 85
6.2 APROXIMAÇÃO DOS REGISTROS POR FUNÇÕES HARMÔNICAS POR MEIO DO AJUSTE DE PARÂMETROS VIA CIOA 89
6.3 IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO POR MEIO DE REDES NEURAIS ARTIFICIAIS 102
6.3.1 Treinamento das Etapas 1 a 5 – Amplitudes associadas a Harmônicos 105
6.3.2 Treinamento das Etapas 6 a 10 – Amplitudes associadas a Sub-Harmônicos 108
6.3.3 Treinamento das Etapas 11 a 14 – Ângulos de Fase associados a Harmônicos 110
6.3.4 Treinamento das Etapas 15 a 19 – Ângulos de Fase associados a Sub-Harmônicos 112
6.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE A APLICAÇÃO DO MODELO 114
7 RESULTADOS E DISCUSSÃO 118
7.1 COMPARAÇÕES ENTRE REGISTROS 119
7.2 ABRANGÊNCIA DO MODELO PROPOSTO PARA SITUAÇÕES DE PEDESTRE ÚNICO 122
7.2.1 Abrangência em Modelos Estruturais Realistas 123
7.2.2 Abrangência em Modelos Estruturais com Frequência Reduzida 128
7.3 RESULTADOS PARA PEDESTRE ÚNICO EM RESSONÂNCIA COM A ESTRUTURA 133
7.3.1 Resposta das estruturas realistas para um único pedestre 135

7.3.2 Resposta das estruturas com frequência reduzida para um único pedestre 139
7.4 RESULTADOS PARA MÚLTIPLOS PEDESTRES EM FREQUÊNCIAS PRÓXIMAS A 2 HZ 142
7.4.1 Resposta das estruturas realistas para múltiplos pedestres caminhando em frequências próximas a 2 Hz 144
7.4.2 Resposta das estruturas com frequência reduzida para múltiplos pedestres caminhando em frequências próximas a 2 Hz 149
7.5 RESULTADOS PARA MÚLTIPLOS PEDESTRES EM FREQUÊNCIAS DIVERSAS 154
7.5.1 Resposta das estruturas realistas para múltiplos pedestres caminhando em frequências diversas 155
7.5.2 Resposta das estruturas com frequência reduzida para múltiplos pedestres caminhando em frequências diversas 159
8. CONCLUSÕES 163
8.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 165
REFERÊNCIAS 166
APÊNDICE A: REGISTROS DA CAMINHADA HUMANA E AJUSTES POR MEIO DO *CIRCLE-INSPIRED OPTIMIZATION ALGORITHM* (CIOA) 173
APÊNDICE B: RELAÇÃO DETALHADA ENTRE OS PARÂMETROS AJUSTADOS PELO CIOA E A FREQUÊNCIA DE CAMINHADA 222

1 INTRODUÇÃO

As vibrações induzidas pela caminhada humana em estruturas de passarelas exigem constante atenção por parte de engenheiros e pesquisadores, tendo em vista questões como o conforto e a segurança dos pedestres. Este fato tornou-se mais notável nos últimos anos, uma vez que projetos arquitetônicos ousados contribuem para o aumento da suscetibilidade dessas estruturas a problemas de vibração. De acordo com Shahabpoor et al. (2017), isso ocorre porque o design moderno e arrojado das novas passarelas, caracterizado por vãos de elevado comprimento e seções transversais reduzidas, tem tornado tais estruturas muito sensíveis às cargas dinâmicas induzidas pelas atividades dos pedestres.

Outro aspecto importante diz respeito ao avanço das técnicas construtivas e à inovação no uso de materiais que, somado a fatores econômicos, têm contribuído para que as estruturas modernas sejam projetadas de forma a se tornarem cada vez mais leves e esbeltas, tendência que leva a uma inevitável diminuição da rigidez estrutural das passarelas, fazendo com que suas frequências naturais estejam próximas às faixas típicas de excitação induzidas pela caminhada humana (MA et al., 2018).

É comum aceitar-se que a vibração em passarelas, produzida por cargas induzidas pela caminhada ou corrida humana, seja um problema essencialmente de estado limite de serviço. Isto ocorre devido ao fato de os seres humanos serem extremamente sensíveis à percepção de vibrações, ainda que nos mais baixos níveis. Assim, a alta sensibilidade humana faz com que os problemas relacionados ao desconforto sejam percebidos muito antes que os níveis de vibração sejam suficientes para causar danos estruturais significativos (ŽIVANOVIĆ et al., 2005). Todavia, existem antigos casos de excepcionais acidentes graves causados por vibrações induzidas pela caminhada humana. Um exemplo é o relato do colapso total de uma ponte em Broughton no ano de 1831. A ponte entrou em colapso quando grandes vibrações foram ocasionadas por um grupo de soldados que marchava em sincronia sobre a estrutura (TILLY et al., 1984).

Com o objetivo de estimar a resposta de estruturas de passarelas às ações dinâmicas da caminhada humana, diversos modelos numéricos de simulação foram desenvolvidos nas últimas décadas. Um dos estudos pioneiros, amplamente utilizado até os dias atuais, é o modelo

proposto por Bachmann e Ammann (1987). Outros modelos encontram-se consolidados em importantes guias técnicos, como, por exemplo, a diretriz francesa SÉTRA/AFGC (2006) e a ISO 10137 (2007). No cenário brasileiro, a NBR 7188 (ABNT 2013) trata desse assunto, todavia sua abordagem é bastante simplificada quando comparada a códigos internacionais.

Živanović et al. (2010) apontaram que as respostas estruturais obtidas por meio de diferentes modelos de carga para a simulação da caminhada humana tendem a apresentar divergências potencialmente significativas, de modo que, estudos aprofundados sobre tais modelos, bem como o aprimoramento dos mesmos e o desenvolvimento de novas metodologias, são necessários para garantir a estimativa da resposta de passarelas com maior exatidão, eficácia e segurança.

1.1 JUSTIFICATIVA

Nas últimas décadas, situações de passarelas com problemas de serviço devido a vibrações induzidas por humanos têm ocorrido com certa frequência. Podem ser citados casos clássicos disponíveis na literatura, como o da Millennium Bridge, em Londres, fechada dois dias após sua inauguração devido a vibrações laterais induzidas por pedestres que causaram movimentos de 70 mm no vão central (DALLARD et al., 2001). Outro caso relevante é o da ponte pedonal Pedro e Inês, construída em Coimbra, que, ainda durante seu projeto, já foi considerada a necessidade de instalação de atenuadores de vibração, cujas características teriam que ser bem ajustadas às características dinâmicas da estrutura, sendo assim, alvo de diversos estudos antes de ser aberta ao público (CAETANO et al., 2010).

A maioria dos modelos de carga consagrados na literatura, capazes de simular a caminhada humana como ação dinâmica, assume simplificações que podem afetar a exatidão dos cálculos, gerando resultados distintos entre si e, geralmente, muito conservadores quando comparados com a resposta real da estrutura. Nos últimos anos, modelos mais realistas têm sido considerados, nos quais diversos parâmetros devem ser tratados considerando as aleatoriedades presentes na caminhada humana. Todavia, em tais modelos podem ser apontadas limitações que, muitas vezes, envolvem a aplicabilidade não-abrangente e a dificuldade em considerar todos os parâmetros aleatórios relevantes associados à caminhada humana.

Tendo em vista a relevância dessa área de pesquisa, o número moderado de modelos efetivamente realistas desenvolvidos e a abrangência limitada de grande parte desses modelos,

o presente trabalho dedica-se à elaboração de um modelo numérico-experimental para a simulação da caminhada humana como carga dinâmica vertical atuante em estruturas de passarelas. O modelo proposto procura levar em conta as aleatoriedades interpedestre presentes nesse tipo de ação dinâmica. Além disso, deseja-se que o modelo apresente fácil implementação e vasta aplicabilidade, facilitando assim a sua utilização para diferentes condições de tráfego de pedestres em diferentes estruturas.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Principal

O presente trabalho tem como principal objetivo a elaboração de um modelo numérico-experimental capaz de **simular a caminhada humana como uma ação dinâmica vertical aplicável em estruturas de passarelas.** O modelo proposto deve ser abrangente, de modo que seja capaz de gerar respostas estruturais próximas àquelas observadas experimentalmente, quando aplicado em diferentes tipos de estruturas. Distintas possibilidades de tráfego de pedestres devem ser consideradas e contempladas pelo modelo, tais como:

I. A variabilidade do número de pessoas que podem caminhar simultaneamente em uma passarela;

II. As distinções físicas entre os pedestres, como, por exemplo, diferenças de peso;

III. A possibilidade de que diferentes pedestres apresentem diferentes características de caminhada, como velocidade, frequência e/ou comprimento de passo (variações interpedestre);

IV. As diferentes distribuições possíveis de um mesmo grupo de pedestres ao longo do comprimento da passarela, incluindo a ordem de entrada na estrutura e o espaçamento entre os pedestres.

1.2.2 Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo principal deste trabalho, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

a) Realizar medições experimentais das acelerações associadas à caminhada de diferentes pedestres reais e, posteriormente, convertê-las em forças dinâmicas;

b) Implementar e aplicar o algoritmo metaheurístico *Circle-Inspired Optimization Algorithm* (CIOA), com a finalidade de transformar os registros reais em funções de carregamento, cujos parâmetros e coeficientes ideais serão determinados pelo CIOA.

c) Desenvolver uma arquitetura específica de redes neurais artificiais, de modo que, uma vez alimentadas por um banco de dados composto pelos parâmetros e coeficientes ótimos gerados pelo CIOA e, posteriormente treinadas, essas redes sejam capazes de prever parâmetros e coeficientes adequados para a simulação da caminhada de um pedestre de qualquer massa andando a qualquer frequência.

d) Implementar e validar códigos de modelagem estrutural e análise dinâmica de estruturas de passarelas;

e) Implementar modelos de simulação da caminhada humana já existentes e consagrados na literatura, propostos por outros autores ou por normas técnicas;

f) Aplicar o modelo de carga desenvolvido neste trabalho às estruturas modeladas, avaliando a resposta estrutural obtida a partir da aplicação do modelo proposto e comparando-a com a resposta estrutural calculada por meio da aplicação de registros experimentais da caminhada real, bem como com a resposta calculada por modelos já existentes, considerando diferentes situações de tráfego previstas nos itens I a IV da seção 1.2.1.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho é dividido em oito capítulos principais, conforme apresentado a seguir:

No **primeiro capítulo** faz-se a introdução do tema da pesquisa, apresentando-se também a justificativa e os objetivos do presente trabalho.

O **segundo capítulo** dedica-se à revisão bibliográfica geral, contendo os principais trabalhos realizados na linha de pesquisa referente às ações humanas induzidas em estruturas de passarelas.

Em seguida, o **terceiro capítulo** contém a fundamentação teórica, no qual são apresentadas informações básicas sobre teoria de vibrações e dinâmica estrutural; fundamentos que envolvem a caminhada humana; conceitos de modelagem estrutural e formulações de modelos renomados para a simulação da caminhada humana.

O **quarto capítulo** consiste na apresentação da metodologia proposta para este trabalho, onde são detalhados a forma de aquisição dos registros experimentais, o algoritmo metaheurístico e as redes neurais utilizadas para tratar de tais registros, as estruturas analisadas neste trabalho e o método de integração numérica empregado para a solução da equação do movimento.

No **quinto capítulo** ocorre a validação (verificação) dos programas que foram implementados de acordo com a metodologia proposta.

No **sexto capítulo** ocorre a formulação propriamente dita do modelo de carga desenvolvido no presente trabalho, destacando a sua formulação e construção, por meio de algoritmos metaheurísticos e redes neurais, bem como aspectos relevantes de sua aplicação.

No **sétimo capítulo** são apresentados os resultados do trabalho, no qual o modelo proposto é comparado com registros experimentais bem como com outros modelos de carga consagrados na literatura. Para isso, são realizadas comparações exclusivamente do modelo em si, bem como de respostas estruturais geradas a partir de sua aplicação em estruturas de passarelas.

No **oitavo capítulo** são apresentadas as conclusões do trabalho, bem como sugestões para futuras pesquisas relacionadas a este estudo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS DA CAMINHADA HUMANA

Galbraith e Barton (1970) conduziram estudos pioneiros com o objetivo de descrever a passada humana durante atividades como caminhada e corrida. Nos testes realizados, foram avaliados parâmetros como o peso do pedestre, o tipo de calçado utilizado, a superfície de caminhada e a velocidade de locomoção. Os autores observaram que o histórico de carga no tempo, para um único passo em velocidade normal, apresenta um formato de sela, com uma subida a um pico inicial, seguida de uma queda na carga, nova subida até um pico final e, por fim, um decaimento. A conclusão dos autores foi que a forma do histórico era muito similar para diferentes pessoas, enquanto sua amplitude estava diretamente relacionada ao peso do pedestre e à velocidade da caminhada. O tipo de calçado, bem como o tipo de superfície onde ocorre a caminhada, tiveram influência menor.

Matsumoto et al. (1972), por meio de estudos experimentais envolvendo 505 pedestres selecionados aleatoriamente, foram capazes de estimar a frequência média dos passos da caminhada humana. Os resultados obtidos mostraram que a frequência do ritmo geralmente varia entre 1,5 e 2,5 passos/s, com uma média próxima a 2 passos/s (ou 2 Hz). Posteriormente, Tilly et al. (1984) salientaram, em seu estudo, que, ao considerar uma amostra específica de pedestres, apenas cerca de 1% apresenta taxas de ritmo com valores superiores a 2,5 Hz, corroborando o estudo de Matsumoto et al. (1972). Esses valores de frequência da caminhada humana tornaram-se referência para estudos posteriores.

Estudos realizados por Bachmann (1984, 1992) e por Allen (1990) apontaram que os movimentos típicos do corpo humano durante a caminhada geram o surgimento de forças dinâmicas quase periódicas atuantes nas estruturas. Os harmônicos superiores, obtidos por meio de uma decomposição de Fourier da função de força, também podem influenciar no comportamento dinâmico de estruturas de passarelas.

Rainer e Pernica (1986) salientaram que as componentes de baixa frequência são responsáveis pela maioria dos problemas de vibrações em estruturas induzidas pela caminhada humana. Essas componentes geralmente estão contidas nos primeiros três ou quatro harmônicos das forças dinâmicas totais. Por meio de análises experimentais, os autores quantificaram fatores de carga dinâmica para os quatro primeiros harmônicos da caminhada. Esses fatores são

definidos como a razão entre a amplitude da força dinâmica do harmônico em análise e o peso do pedestre.

Bachmann et al. (1995) propuseram, com base em observações e análises experimentais de diversas passarelas ao redor do mundo, uma relação para estimar a correspondência entre o tamanho do vão de uma passarela e sua frequência fundamental de vibração. Os resultados obtidos foram comparados com a faixa de valores típicos da frequência natural da caminhada humana. Observou-se que a frequência fundamental das passarelas pode coincidir com a frequência natural da caminhada, especialmente em estruturas com vãos superiores a 25 metros.

Pimentel et al. (2001) avaliaram códigos e diretrizes que tratam da capacidade de serviço de passarelas sujeitas a forças verticais induzidas pela caminhada humana, salientando o potencial conservadorismo de diferentes códigos internacionais e a divergência no estabelecimento de limites de vibração aceitáveis. Esse conservadorismo decorre do fato de que muitos códigos utilizam modelos de carga conservadores para estimar a ação mediante a qual a estrutura estará sujeita.

Reynolds e Pavic (2003a, 2003b) avaliaram as propriedades e a resposta dinâmica de passarelas. Os autores analisaram três estruturas distintas, entre elas, uma faixa de piso similar a uma passarela de tamanho reduzido, construída especialmente para fins experimentais em um laboratório da Universidade de Sheffield. Os autores salientam as dificuldades em analisar dados de vibração devido à variabilidade natural da caminhada e de outras ações humanas.

Brownjohn et al. (2004) utilizaram uma esteira instrumentada para avaliar o ritmo de marcha da caminhada contendo imperfeições aleatórias. Os resultados foram comparados com simulações perfeitamente periódicas. Os autores observaram que o harmônico fundamental da caminhada apresenta valores semelhantes em ambas as análises, entretanto, ao considerar harmônicos superiores, as simulações periódicas superestimaram a resposta, corroborando o estudo de Pimentel et al. (2001) quanto ao conservadorismo de códigos internacionais.

Živanović et al. (2005) realizaram uma revisão da literatura sobre a capacidade de serviço de passarelas sujeitas a vibrações induzidas por pedestres. Os autores ressaltam que a maioria dos modelos de força parte do pressuposto da periodicidade perfeita da caminhada humana, o que não se verifica na prática, e destacam a dificuldade que modelos de simulação apresentam ao considerar grupos de pedestres sincronizados, uma vez que o grau de sincronização depende de

fatores como o número de pedestres, a densidade de ocupação da estrutura e a velocidade individual.

Araújo Jr et al. (2009) realizaram um estudo experimental sobre a sincronização de pedestres em passarelas, considerando densidades que variam de 0,3 até 0,9 pedestres/m². A metodologia foi validada por meio de testes em que os pedestres eram orientados a caminhar de forma sincronizada. Os resultados obtidos para os pedestres andando livremente num protótipo de passarela de 11,63 metros de comprimento não evidenciaram a tendência de surgimento de sincronização, mesmo nas densidades mais elevadas. Posteriormente, Pimentel et al. (2011) analisaram situações com densidades de até 1,8 pedestres/m². Os novos resultados não apontaram indícios para o surgimento de sincronização, porém, os autores salientam que, conforme a densidade aumenta, os pedestres tendem a produzir maiores movimentos laterais do corpo, o que aumentaria as forças laterais induzidas na estrutura.

Díaz e Reynolds (2009), Shahabpoor e Pavic (2012), Shahabpoor et al. (2017) e Vijayan et al. (2019) voltaram a analisar a estrutura de passarela em tamanho reduzido da Universidade de Sheffield, estudada por Reynolds e Pavic (2003a, 2003b). Esses trabalhos constataram que o aumento no número de pedestres sobre a passarela pode acarretar um acréscimo do amortecimento, da aceleração de pico e do nível de vibrações da estrutura, afetando de forma significativa os modos de vibração mais elevados. Todavia, os modos de vibração elevados geralmente serão estimulados somente por harmônicos superiores da caminhada, que assumem menor relevância na carga total.

Toso et al. (2012) construíram uma plataforma de força, capaz de medir simultaneamente a aceleração e a força de reação do solo, com a finalidade de analisar a caminhada humana na direção vertical. Em seguida, um modelo biodinâmico de pedestre foi ajustado com base em testes experimentais envolvendo dez pedestres. Em trabalhos posteriores, Toso et al. (2016) expandiram as análises para 35 pedestres, estabelecendo correlações entre os parâmetros do modelo, a frequência da estimulação e a massa corporal dos indivíduos. Visando validar os modelos, estes foram testados em um protótipo de passarela de vão único. Posteriormente, Toso e Gomes (2016) fizeram uso de redes neurais artificiais para calibrar a plataforma de força, reduzindo as incertezas em relação à calibração tradicional.

Debona (2016) e Debona e Silva (2019, 2020) investigaram a resposta de uma passarela real localizada no Campus da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ). A estrutura foi

avaliada de forma experimental e numérica. As análises experimentais consideraram diferentes números de pedestres caminhando sobre a estrutura, com variadas frequências de passos. A análise numérica foi efetivada por meio de um modelo estrutural de elementos finitos, modelado em software comercial, calibrado a partir de resultados experimentais e fazendo-se uso de modelos biodinâmicos de pedestres. Por fim, as acelerações máximas obtidas na estrutura foram avaliadas mediante recomendações de normativas técnicas internacionais, verificando-se o atendimento aos limites de conforto prescritos.

Ma et al. (2018) conduziram um estudo sobre a percepção de pedestres acerca das vibrações verticais e laterais induzidas por humanos em passarelas. Para isso, 22 voluntários caminharam sobre uma mesa vibratória sujeita a diferentes amplitudes e frequências de vibração. Os autores observaram que um aumento na amplitude de aceleração piora a percepção das vibrações quando a frequência de vibração permanece constante, enquanto um aumento da frequência melhora a percepção das vibrações quando a amplitude de aceleração permanece constante.

Silva e Silva (2018) realizaram a análise experimental de uma passarela mista, de aço e concreto, localizada na cidade do Rio de Janeiro. O estudo envolveu análises com um único pedestre caminhando em diferentes frequências pré-estabelecidas e com um grupo de oito pedestres caminhando de forma aleatória. Posteriormente, um modelo numérico de elementos finitos foi desenvolvido e usado para calibrar os resultados obtidos por meio da análise experimental. Os picos de resposta da estrutura foram comparados com recomendações de diretrizes internacionais, verificando o atendimento aos limites de conforto.

2.2 MODELAGEM DA CAMINHADA COMO UMA AÇÃO DINÂMICA

Esta seção está organizada em três subseções: “Modelos de Força”, onde são mencionados os principais trabalhos referentes à modelagem da ação da caminhada humana; “Modelos de Resposta”, na qual são apresentados trabalhos sobre a elaboração de modelos que visam estipular a resposta de uma estrutura excitada por meio da caminhada humana; e, por fim, “Aplicação de Modelos”, onde são listados alguns dos principais trabalhos que utilizam modelos consolidados, seja de força ou de resposta, para a análise e controle de vibração em estruturas.

2.2.1 Modelos de Força

Bachmann e Ammann (1987) propuseram um dos mais consagrados modelos de carga para simular os efeitos induzidos pela caminhada humana em estruturas de passarelas. O modelo assume a simplificação de que a carga resultante de um único pedestre é calculada considerando-se o peso médio de um ser humano, a frequência média de passos e os três primeiros harmônicos da caminhada corrigidos por fatores de carga com valores fixos e proporcionais ao peso do pedestre. O método proposto permite, ainda, realizar uma estimativa para múltiplos pedestres por meio de um coeficiente de majoração. Entretanto, o modelo assume simplificações que tornam a sua precisão limitada para casos reais de grupos de pedestres, de modo que a resposta produzida geralmente tende a ser conservadora, funcionando como uma envoltória que simula o caso mais crítico, correspondente a todos os pedestres caminhando de forma sincronizada em frequência de ressonância com a estrutura.

Em 1991, o Comitê Euro-Internacional du Betón (CEB), apresentou um modelo de carga similar, por meio de uma função periódica expressa por uma série de Fourier, mantendo as limitações que o modelo de Bachmann e Ammann (1987) para o caso de múltiplos pedestres sobre a estrutura.

Murray et al. (1997) elaboraram um modelo de carga dinâmica contido no *Floor Vibrations due to Human Activity*, uma diretriz técnica americana do *American Institute of Steel Construction* (AISC). O modelo também utiliza a série de Fourier, com distinção na atualização dos valores para os coeficientes dinâmicos ou fatores de carga, quando comparado aos métodos anteriores.

A diretriz francesa SÉTRA/AFGC (2006) apresenta um modelo de simulação para as ações dinâmicas da caminhada, em que cada harmônico é analisado separadamente. Nesse modelo, a carga dinâmica é aplicada simultaneamente em toda a estrutura, a uma taxa por unidade de área. O modelo é aplicável somente a estruturas que possuam frequência fundamental coincidente com uma faixa específica de valores. Entre suas limitações, destaca-se a abordagem não-realista ao não considerar a mudança de posição da carga ao longo do tempo.

A diretriz ISO 10137 (2007) propõe um modelo similar ao de Bachmann e Ammann (1987), onde a carga também é modelada por meio de uma função periódica expressa por uma série de Fourier, levando-se em consideração os cinco primeiros harmônicos. Os fatores de amplificação dinâmica – ou fatores de carga – associados a cada harmônico são distintos daqueles apresentados por Bachmann e Ammann (1987), mas, ainda assim, possuem valores fixados ou

estabelecidos por fórmulas simples. O modelo mantém simplificações e limitações para múltiplos pedestres.

Ramos-Moreno et al. (2021) desenvolveram um modelo de carga estocástico capaz de descrever cargas dinâmicas horizontais, levando em consideração variabilidades individuais de cada pedestre e contemplando parâmetros referentes ao comportamento coletivo (interação pedestre-pedestre). Todavia, os próprios autores salientam que o modelo proposto é altamente complexo e sua aplicabilidade em diferentes tipos de estruturas ainda precisa ser validada.

2.2.2 Modelos de Resposta

Nesta subseção, são abordados alguns importantes modelos de resposta desenvolvidos nas últimas décadas, com o objetivo de estimar a resposta de estruturas sem necessariamente calcular a carga dinâmica de forma explícita.

Rainer et al. (1988) desenvolveram um procedimento prático de cálculo para estimar a resposta máxima, em termos de aceleração vertical, de uma passarela sujeita à ação humana. O procedimento de cálculo é baseado no carregamento dinâmico devido a uma única pessoa e leva em consideração parâmetros de análise estática, como por exemplo, o deslocamento no vão devido à amplitude da força dinâmica considerada, cujo valor é corrigido por meio de coeficientes específicos. O modelo de cálculo desenvolvido pelos autores é aplicável apenas a passarelas constituídas por vãos simples.

O Anexo 2 do Eurocódigo 5 (2004) apresenta uma metodologia simplificada de cálculo para estimar a resposta máxima, no meio do vão, de passarelas de madeira. O modelo assume a simplificação de que a estrutura é uma viga simplesmente apoiada. Um fator de correção é inserido para que seja possível estimar a resposta mediante tráfego de multidão, a partir do cálculo inicial da resposta para um único pedestre. De forma similar a outros modelos, simplificações são assumidas para o caso de múltiplos pedestres.

Živanović (2006) e Živanović et al. (2007a, 2007b) propuseram modelos probabilísticos capazes de levar em consideração as variabilidades intersujeito e intrasujeito na simulação da caminhada humana para um único pedestre. Os modelos levam em consideração parâmetros como a distribuição de probabilidade de frequências de caminhada, comprimento dos passos e amplitude da força de caminhada. A validação ocorreu por meio de estudos de caso envolvendo

inicialmente uma passarela imaginária e posteriormente uma estrutura real. O modelo é aplicável somente a simulações com um único pedestre, situação irrealista e limitada.

Piccardo e Tubino (2009) propuseram três modelos simplificados para avaliar a resposta dinâmica máxima de passarelas considerando um cenário de carregamento realista. Os resultados obtidos por meio destes modelos foram ao encontro de estudos anteriores, apontando que os procedimentos e métodos clássicos de simulação da caminhada são geralmente conservadores, e, portanto, tendem a superestimar a resposta da estrutura. Todavia, os modelos desenvolvidos apresentam limitações, sendo aplicáveis somente em casos de baixa densidade de pedestres e considerando apenas os carregamentos dinâmicos induzidos pela caminhada na direção vertical.

Venuti et al. (2016) propuseram um modelo de resposta que leva em consideração algumas das variabilidades interpedestre e intrapedestre associadas aos pedestres. Entretanto, o modelo apresenta simplificações e é aplicável somente para vibrações na direção vertical.

2.2.3 Aplicação de Modelos de Força

A utilização de modelos de carga da caminhada humana em estruturas de passarelas tem apontado para o conservadorismo e, em alguns casos, limitações dos métodos existentes, principalmente em situações que envolvem a ação de múltiplos pedestres.

Silva et al. (2007) aplicaram quatro modelos de carga em uma passarela real no Rio de Janeiro, que foi modelada numericamente para a análise. Três dos modelos de carga utilizados consideram que a força é aplicada num ponto único da estrutura, configurando uma abordagem não-realista. Um dos modelos trata a carga como sendo móvel, variando a posição de sua aplicação ao longo do comprimento da estrutura, assumindo um caráter mais realista. Todavia, tal modelo considera apenas a ação de um único pedestre. Na pior hipótese analisada – em condição de ressonância – as acelerações observadas atingiram a ordem de 385% do valor da aceleração da gravidade, sendo muito superior aos limites recomendados por códigos e diretrizes internacionais., corroborando estudos anteriores que apontam o conservadorismo da maioria dos modelos de carga existentes.

Živanović et al. (2010) promoveram uma comparação entre procedimentos existentes para modelar o tráfego de pedestres espacialmente irrestrito, avaliando os resultados obtidos mediante análises experimentais efetuadas por meio de estruturas reais. Sete procedimentos

foram analisados e comparados, sendo quatro deles no domínio do tempo e três no domínio da frequência. Como principais conclusões, os autores destacam que a simplificação excessiva de alguns modelos gera respostas que tendem a apresentar valor superestimado, especialmente para grupos de pedestres.

Nimmen et al. (2014) compararam resultados numéricos obtidos por meio das diretrizes normativas internacionais SÉTRA (2006) e HiVoSS (2008) com medições experimentais em oito estruturas de passarelas reais. Entre as conclusões do estudo, pode-se destacar que as avaliações feitas pelos modelos de simulação presentes nas diretrizes são altamente sensíveis a pequenas variações nas frequências naturais da estrutura. Posteriormente, Nimmen et al. (2016) estudaram uma passarela com amortecedores de massa sintonizados, avaliando o desempenho da estrutura de forma experimental antes e depois da instalação do mecanismo de controle de vibrações, verificando a sua eficácia. Em seguida, promoveram uma análise considerando densidades de multidão de até 1,5 pedestres/m², comparando os resultados com as análises simplificadas realizadas por meio dos modelos de carga presentes nos guias SÉTRA (2006) e HiVoSS (2008). Como conclusão, os autores apontaram que os modelos sugeridos por essas normativas podem não ser totalmente apropriados para avaliar o desempenho dinâmico de uma passarela com amortecedores de massa sintonizados, uma vez que a análise considera somente a contribuição do modo ressonante.

Ainda no contexto da normativa internacional HiVoSS (2008), Lai et al. (2017) e Lai e Mulas (2017) analisaram uma passarela suspensa por cabos com características dinâmicas atípicas, como por exemplo, dois pares de modos de vibração pouco espaçados e três modos na faixa de frequências de 1,9 a 2,2 Hz. Os autores observaram boa concordância entre os resultados experimentais e numéricos, porém, apontaram para uma pequena deficiência da metodologia HiVoSS (2008) na consideração do segundo harmônico da caminhada. Em casos de grupos de pedestres, os autores salientaram que a distribuição espacial das pessoas pode afetar a resposta, situação geralmente não contemplada por modelos numéricos simplificados.

Diversas pesquisas aplicaram o modelo clássico de Bachmann e Ammann (1987) na análise dinâmica e no controle de vibrações em passarelas. Mendes (2014) empregou esse modelo, juntamente com o modelo presente no *American Institute of Steel Construction*, AISC, proposto por Murray, Allen e Ungar (1997) e o modelo proposto pelo Comité Euro-Internacional du Béton, CEB (1991) na avaliação de passarelas reais localizadas no Rio de Janeiro e posterior controle de vibrações por meio do uso de atenuadores dinâmicos sintonizados.

Pesquisas realizadas por Miguel et al. (2015), Silva e Miguel (2019), Silva (2020) e Miguel e Souza (2023) utilizaram o modelo de Bachmann e Ammann (1987) em estudos de otimização estrutural e controle de vibrações. Em todos os casos, houve diminuição da resposta das estruturas otimizadas em comparação à resposta original, atingindo patamares de redução que foram de 36% até mais de 90% do deslocamento, da velocidade e da aceleração máximos das estruturas analisadas, evidenciando o sucesso obtido no controle de vibrações. Todavia, em algumas estruturas não-otimizadas, o modelo de Bachmann e Ammann (1987) apontou acelerações máximas que compreendiam até 94,8% do valor da aceleração da gravidade, muito superior ao limite de conforto de 5%; resultados que reforçam o conservadorismo desse modelo, uma vez que considera todos os pedestres caminhando em frequências sincronizadas. Apesar do modelo estar a favor da segurança, ao representar a hipótese mais desfavorável à estrutura, tal situação na prática é irreal.

Ainda na linha de aplicação de modelos de carga, Saramago et al. (2018) compararam a resposta estrutural de uma passarela obtida por meio do modelo de Bachmann e Ammann (1987) com a resposta gerada pelo modelo indicado pela diretriz SÉTRA/AFGC (2006), avaliando que em ambos os casos, há um aumento significativo da resposta quando a estrutura é estimulada pelo segundo harmônico da caminhada. Esses estudos ressaltam a relevância de se considerar harmônicos superiores – e não apenas o primeiro – e reforçam o conservadorismo dos modelos determinísticos tradicionais.

Doz et al. (2018), compararam resultados experimentais e numéricos, por meio de diferentes modelos de carga, para a resposta de estruturas de passarelas, mostrando que modelos simplificados podem gerar aproximações adequadas, com ressalvas, para vibrações na direção vertical, mas podem ser insuficientes nas demais direções.

2.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE O ESTADO DA ARTE

Conforme pode ser observado ao longo deste capítulo, os problemas de vibrações induzidas pela caminhada humana em passarelas são foco de décadas de estudos, especialmente no desenvolvimento e na aplicação de modelos de carga ou de resposta capazes de simular as ações oriundas da caminhada como uma força dinâmica aplicada nas estruturas.

Observa-se que os modelos de carga clássicos da literatura, como o de Bachmann e Ammann (1987) e o modelo apresentado pela diretriz francesa SÉTRA/AFGC (2006), por exemplo, são

amplamente utilizados na maioria dos trabalhos relevantes desta área de estudo até aos dias de hoje. Entretanto, muitos autores e pesquisas salientam limitações e até mesmo algumas distorções que tais modelos podem causar nos resultados obtidos, gerando resultados que, na maioria das vezes, podem ser muito conservadores.

Modelos mais realistas, desenvolvidos especialmente nas últimas duas décadas, surgem como uma alternativa de estimar a resposta estrutural de passarelas por meio de uma abordagem geralmente probabilística, considerando a aleatoriedade de diversas variáveis envolvidas no processo. Todavia, conforme foi visto no presente capítulo, a maioria desses modelos apresenta limitações que podem impedir a sua aplicabilidade em diversas situações. Esse fato pode ser um dos motivos para que, mesmo em trabalhos recentes, muitos pesquisadores ainda optem em utilizar modelos determinísticos tradicionais para calcular a resposta de passarelas sujeitas a vibrações causadas pela caminhada humana, uma vez que a maioria dos modelos determinísticos mais conhecidos, apesar do conservadorismo, têm ampla abrangência e fácil aplicação.

Todas as limitações citadas no parágrafo anterior, seja referente à densidade de pedestres, à aplicabilidade em diferentes direções de vibração ou em diferentes tipos de estruturas, devem ser superadas por meio do desenvolvimento de novas abordagens, com modelos realistas que sejam efetivamente baseados em observações experimentais, que levem em conta as aleatoriedades da caminhada humana, que sejam realmente abrangentes e que, possuam fácil aplicabilidade em estruturas de passarelas. Neste contexto, enquadra-se o modelo criado na presente tese.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O presente capítulo apresenta conceitos teóricos básicos e imprescindíveis para a realização deste trabalho. O capítulo divide-se em cinco seções: A primeira, seção 3.1, aborda brevemente os conceitos elementares da teoria de vibrações; a segunda, seção 3.2, apresenta os principais fundamentos para a consideração da caminhada humana como uma ação dinâmica; a terceira, seção 3.3, trata de conceitos de modelagem estrutural; a quarta, seção 3.4, apresenta a formulação de alguns modelos de carga para a caminhada humana consagrados na literatura, sendo que, os mais conhecidos e com melhores aplicabilidades, são efetivamente utilizados neste trabalho; a quinta, seção 3.5, indica a formulação de modelos simplificados de resposta estrutural de passarelas.

3.1 CONCEITOS BÁSICOS DE TEORIA DE VIBRAÇÕES

Considera-se, inicialmente, um sistema mecânico de um grau de liberdade, conforme ilustrado na Figura 3.1, composto por uma massa m, que representa a inércia do sistema, uma mola k, associada às propriedades elásticas, e um amortecedor c, responsável pela dissipação de energia.

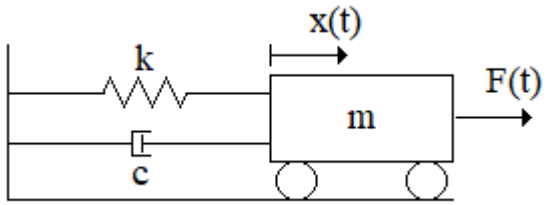


Figura 3.1 – Sistema de um grau de liberdade (Adaptado de LIMA; SANTOS, 2008)

Sempre que uma força dinâmica $F(t)$ é aplicada ao sistema, a equação diferencial que rege o movimento é dada por meio da Equação 3.1 (LIMA E SANTOS, 2008)

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t) \tag{3.1}$$

onde $\ddot{x}$ representa a aceleração do sistema, $\dot{x}$ a velocidade e x o deslocamento.

Estruturas reais, como edifícios, pontes e passarelas, podem ser modeladas como sistemas de múltiplos graus de liberdade. Como exemplo a Figura 3.2 ilustra um sistema composto por três graus de liberdade.

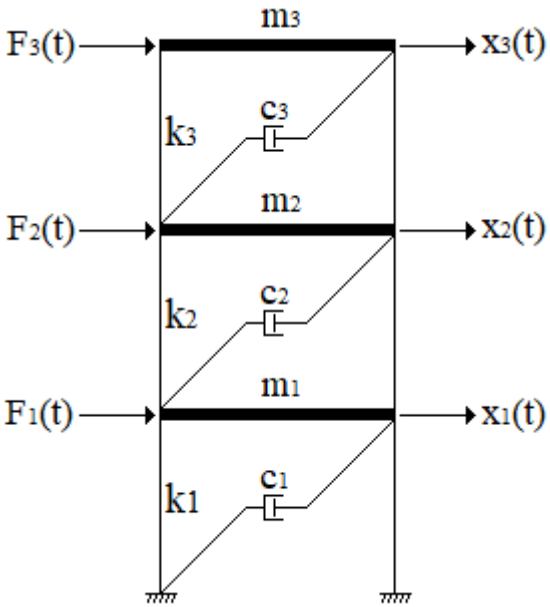


Figura 3.2 – Sistema de três graus de liberdade (Adaptado de LIMA; SANTOS, 2008)

Nesse caso, a Equação 3.1 assume a forma matricial apresentada na Equação 3.2.

$$\mathbf{M}\ddot{\vec{x}} + \mathbf{C}\dot{\vec{x}} + \mathbf{K}\vec{x} = \vec{F}(t) \tag{3.2}$$

Dessa forma, a massa m, o amortecimento c e a rigidez k passam a ser representados, respectivamente, pelas matrizes de massa **M**, de amortecimento **C** e de rigidez **K**. As acelerações, deslocamentos e velocidades bem como a força aplicada, passam a ser representados pelos vetores $\ddot{\vec{x}}$, $\dot{\vec{x}}$, $\vec{x}$ e $\vec{F}(t)$, respectivamente.

A solução da Equação 3.2 permite calcular a resposta dinâmica do sistema em qualquer instante de tempo.

3.2 FUNDAMENTOS A RESPEITO DA CAMINHADA HUMANA

É amplamente reconhecido que a caminhada humana corresponde a uma ação dinâmica, que pode ser considerada aproximadamente harmônica, com componentes em todas as direções: vertical, horizontal-longitudinal e horizontal-lateral. Por apresentar a maior magnitude, a componente vertical tem sido o principal foco de pesquisas que se iniciaram há muitas décadas e consiste, também, em objeto de estudo deste trabalho.

Com a finalidade de modelar a caminhada humana como uma carga dinâmica, dois parâmetros assumem grande relevância: o comportamento do carregamento ao longo do tempo e a sua frequência. Detalhamentos sobre estes parâmetros são apresentados a seguir.

A Figura 3.3 ilustra um dos resultados obtidos por Galbraith e Barton (1970), no qual foram registrados os carregamentos verticais gerados por um pedestre de 250 libras caminhando sobre uma superfície rígida. Pode-se observar que, na caminhada lenta, a carga vertical aumenta suavemente até um valor próximo ao peso do pedestre, em seguida flutua em torno desse valor e diminui gradualmente. Com o aumento da velocidade da caminhada, o tempo de carregamento torna-se mais curto e a carga atinge um pico superior ao peso do pedestre; posteriormente a carga diminui na metade da etapa, eleva-se novamente e, finalmente, decai. Para a corrida ocorre apenas um único pico, caracterizado pela rápida ascensão e decadência do carregamento.

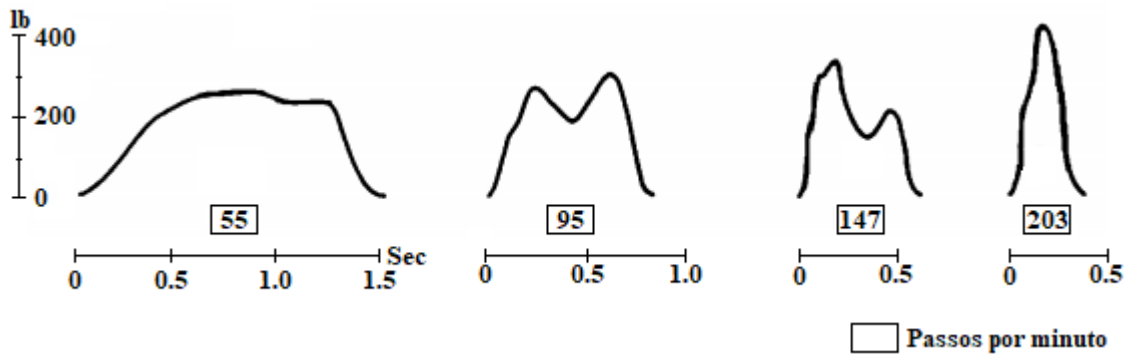


Figura 3.3 – Carregamentos verticais típicos de passos de um pedestre de 250 libras caminhando sobre uma superfície rígida (Adaptado de GALBRAITH; BARTON, 1970)

O comportamento dos carregamentos para sucessivos passos é apresentado na Figura 3.4, onde observa-se que, no caso específico da corrida, o registro de passos pode ser considerado como uma série de pulsos separados, com a carga caindo para zero entre os pulsos, uma vez que, durante a corrida, existem breves instantes em que nenhum dos pés do pedestre está em contato com o chão [Fig. 3.4 (a)]. Para pedestres em caminhada, os registros individuais de cada passo se sobrepõem em determinados momentos, pois, durante parte da passada, tanto o pé direito quanto o esquerdo permanecem simultaneamente em contato com o chão [Fig. 3.4 (b)].

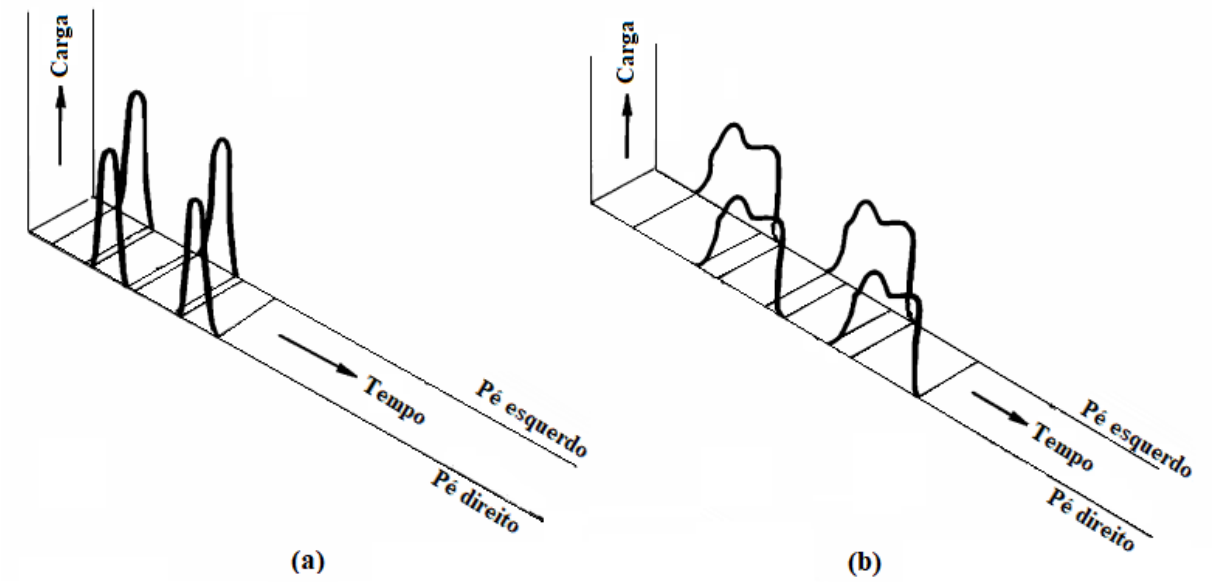


Figura 3.4 – Padrão típico de forças verticais para: (a) corrida (b) caminhada (Adaptado de GALBRAITH; BARTON, 1970)

Na Figura 3.5 são apresentados os resultados obtidos por Matsumoto et al. (1972), em um dos estudos pioneiros voltados à determinação da frequência média da caminhada humana. Observa-se que as taxas de ritmo geralmente variam entre 1,5 e 2,5 passos por segundo, com valor médio próximo a 2 passos por segundo, isto é, 2 Hz. Esse valor de frequência de passos é adotado como referência em alguns dos modelos mais conhecidos de simulação da caminhada humana, conforme será discutido detalhadamente nas Seções 3.4 e 3.5 do presente trabalho.

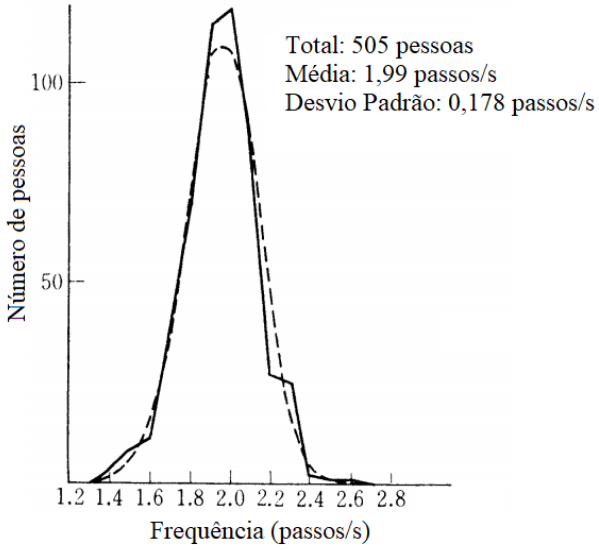


Figura 3.5 – Distribuição do ritmo dos pedestres (Adaptado de MATSUMOTO et al., 1972)

É importante ressaltar que os gráficos apresentados nas Figuras 3.3 e 3.4 ilustram apenas a carga dinâmica vertical para a caminhada e a corrida. Na Figura 3.6, apresenta-se uma comparação experimental entre a carga vertical de um pedestre caminhando a uma frequência de 2 Hz e os deslocamentos horizontais lateral e longitudinal, na qual verifica-se que a oscilação lateral do centro de gravidade do pedestre ocorre com metade da taxa de estimulação, ou seja, 1,0 Hz, enquanto o deslocamento longitudinal é dominado pela taxa de estimulação completa, assim como ocorre na direção vertical.

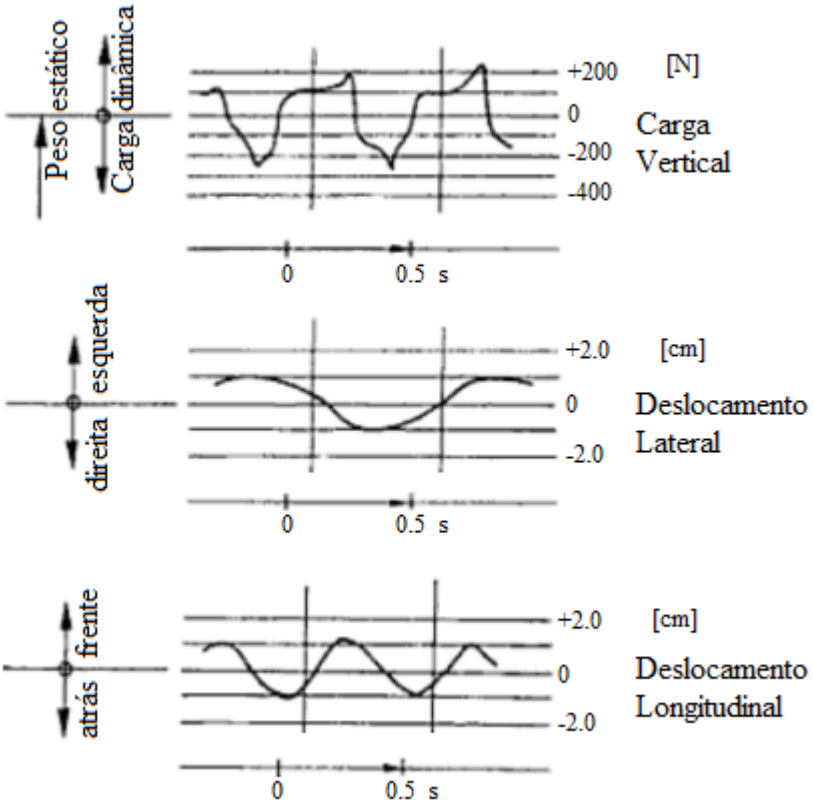


Figura 3.6 - Função de tempo do carregamento dinâmico vertical com os deslocamentos de vibração horizontal resultantes para um pedestre caminhando a uma frequência de 2 Hz (Adaptado de SCHULZE, 1980 apud BACHMANN; AMMANN, 1987)

Dessa forma, estruturas que apresentam frequência natural fundamental próxima de 2 Hz tendem a ser consideradas mais vulneráveis ao surgimento de vibrações verticais excessivas. Entretanto, estudos promovidos por Tilly et al. (1984) demonstram que passarelas com frequência fundamental próxima a 4 Hz também podem apresentar comportamentos preocupantes. Esse fenômeno pode ser observado na Figura 3.7, que apresenta resultados de estudos que comparam as propriedades das passarelas com os efeitos dinâmicos induzidos pela caminhada. Destaca-se que muitas das estruturas com as maiores respostas observadas [Figura

3.7 (c)] apresentam frequência fundamental próxima a 4 Hz, valor que, em princípio, estaria fora da faixa crítica. Esse comportamento decorre da excitação associada ao segundo harmônico da caminhada, cujo valor crítico para vibrações verticais corresponde ao dobro da taxa de passos. Assim, para uma caminhada típica, com frequência natural de 2 Hz, o valor crítico para estimulações verticais por meio do segundo harmônico será de 4 Hz (BACHMANN, 1992). Desse modo, estruturas com frequência natural fundamental próxima ou superior a 4 Hz podem ser estimuladas verticalmente e, portanto, não devem ter o seu comportamento dinâmico desprezado mediante a ação de pedestres.

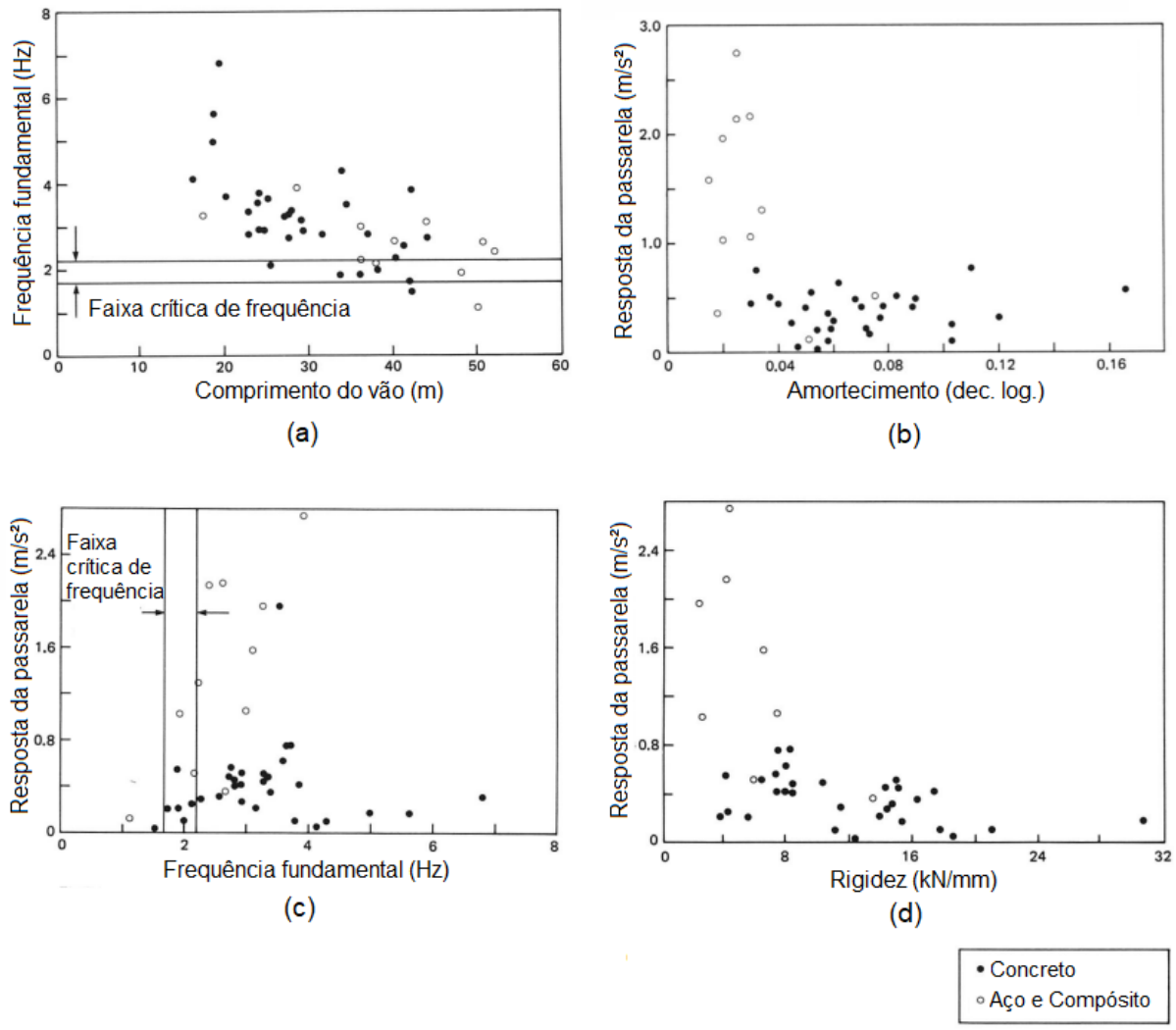


Figura 3.7 – Relação entre as características da passarela e o comportamento induzido por cargas dinâmicas. (a) Frequência fundamental para diferentes comprimentos de vão, (b) Resposta da passarela para diferentes valores de amortecimento, (c) Resposta da passarela em relação à frequência fundamental, (d) Resposta da passarela em relação à rigidez (Adaptado de TILLY et al., 1984)

Além disso, a partir da Figura 3.7, podem ser destacadas as seguintes observações:

- A frequência fundamental da estrutura tende a diminuir com o aumento do comprimento do vão. [Fig. 3.7 (a)];

- Baixos valores de amortecimento contribuem para respostas dinâmicas elevadas, de modo que as estruturas de aço e compósitos tendem a apresentar comportamentos mais críticos [Fig. 3.7 (b)];

- Estruturas com frequências naturais mais baixas tendem a apresentar maiores respostas à vibração, de modo que as estruturas de aço se tornam mais sensíveis uma vez que geralmente possuem frequências entre 2Hz e 3,5Hz [Fig. 3.7 (c)];

- A resposta diminui com o aumento da rigidez estrutural, sendo que, de modo geral, as maiores respostas ocorrem em estruturas com rigidez inferior a 8kN/mm [Fig. 3.7 (d)].

3.3 CONCEITOS DE MODELAGEM ESTRUTURAL

Nesta seção, são apresentados de forma concisa os conceitos fundamentais que devem ser entendidos e aplicados para a modelagem estrutural de passarelas como sistemas de múltiplos graus de liberdade, utilizados efetivamente neste trabalho. Esses conceitos, que envolvem a montagem das matrizes de rigidez e de massa para elementos estruturais, derivam do Método dos Elementos Finitos. Além disso, nesta seção também é abordada a montagem de matriz de amortecimento da estrutura.

3.3.1 Estruturas constituídas por elementos de treliça plana

As estruturas efetivamente consideradas no presente trabalho, são constituídas através de elementos de treliça plana, justificando a apresentação de fundamentos teóricos associados a esse tipo de elemento nesta subseção do trabalho.

De acordo com o Método dos Elementos Finitos, um elemento de treliça plana possui dois graus de liberdade em cada nó de suas extremidades, conforme apresentado na Figura 3.8.

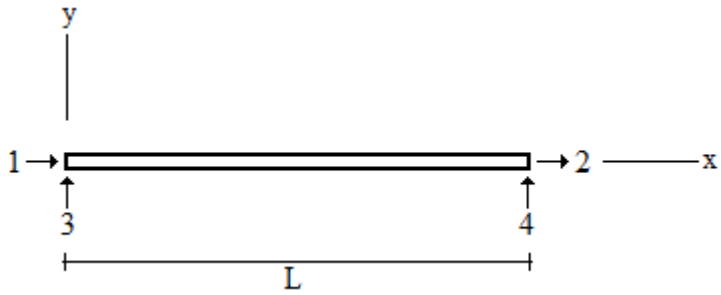


Figura 3.8 – Elemento de treliça plana no sistema local de coordenadas (Adaptado de LIMA; SANTOS, 2008)

A matriz de massa consistente para elementos de treliça plana é dada pela Equação 3.3

$$\mathbf{M}^e = \frac{\rho AL}{6}\begin{bmatrix} 2 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 2 \end{bmatrix} \tag{3.3}$$

Enquanto a matriz de rigidez é apresentada pela Equação 3.4

$$\mathbf{K}^e = \frac{EA}{L}\begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{3.4}$$

onde:

ρ é a massa específica do material;

E é o módulo de elasticidade do material;

A é a área da seção transversal do elemento;

L é o comprimento do elemento.

Para a inserção da matriz local do elemento na matriz global da estrutura, deve-se se utilizar a matriz de rotação, dada pela Equação 3.5.

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} c_x & c_y & 0 & 0 \\ -c_y & c_x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_x & c_y \\ 0 & 0 & -c_y & c_x \end{bmatrix} \tag{3.5}$$

onde:

$$c_x = \frac{X_j - X_i}{L} \tag{3.6}$$

$$c_y = \frac{Y_j - Y_i}{L} \tag{3.7}$$

na qual X_i e Y_i referem-se às coordenadas do nó inicial i do elemento, enquanto X_j e Y_j representam as coordenadas do nó final j do elemento.

3.3.2 Montagem da matriz de amortecimento

Nesta subseção, é discutida uma abordagem para a montagem da matriz de amortecimento das estruturas utilizando a formulação de Rayleigh. De acordo com Lima e Santos (2008), a matriz de amortecimento pode ser construída por meio de uma combinação linear das matrizes de massa e de rigidez, conforme apresentado na Equação 3.8.

$$\mathbf{C} = a\mathbf{M} + b\mathbf{K} \tag{3.8}$$

onde a e b são constantes determinadas a partir de fatores de amortecimento conhecidos para dois modos de vibração distintos e quaisquer. Essas constantes podem ser determinadas pela Equação 3.9, que se desdobrará em um sistema de duas equações com duas incógnitas, desde que se conheçam dois valores de fator de amortecimento ξ_j para dois modos de vibração distintos e os respectivos valores de frequência natural ω_j associados a cada um desses modos.

$$\xi_j = \frac{a}{2\omega_{n_j}} + \frac{b\omega_{n_j}}{2} \tag{3.9}$$

3.4 MODELOS DE CARGA DA CAMINHADA HUMANA

Nesta seção são apresentados os fundamentos e a formulação de diferentes modelos de força que podem ser utilizados para simular as ações dinâmicas da caminhada humana em estruturas de passarelas. Os modelos abordados consistem em publicações consagradas na literatura, bem como em metodologias presentes em normas e diretrizes técnicas de diferentes órgãos. A apresentação segue a ordem cronológica de publicação.

Posteriormente, neste trabalho, foi efetivamente adotado o modelo proposto por Bachmann e Ammann (1987) e a diretriz presente na ISO 10137 (2007), com o objetivo de compará-los ao modelo desenvolvido neste estudo, por serem, entre os modelos abordados, os mais relevantes,

com maior aplicabilidade e abrangência, e, amplamente utilizados em pesquisas dessa área de estudo.

3.4.1 Modelo proposto por Bachmann e Ammann (1987)

Bachmann e Ammann (1987) propuseram um modelo no qual a carga vertical, devida à caminhada, varia com o tempo t de acordo com Equação 3.10

$$F_{bach,V}(t) = G + \Delta G_1 sen(2.\pi.f_s.t) + \Delta G_2 sen(4.\pi.f_s.t - \varphi_2) + \Delta G_3 sen(6.\pi.f_s.t - \varphi_3) \quad (3.10)$$

onde:

G é o peso da pessoa, dado em Newtons (N), geralmente considerado como $G = 800\ N$;

f_s é a frequência do passo, dado em Hertz (Hz), geralmente considerada como $f_s = 2\ Hz$;

ΔG_1, ΔG_2e ΔG_3 são as amplitudes da componente de carga do primeiro, segundo e terceiro harmônicos, respectivamente, também chamados de coeficientes de amplitude ou coeficientes de carga;

φ_2 é o ângulo de fase do segundo harmônico em relação ao primeiro, enquanto φ_3 é o ângulo de fase do terceiro harmônico em relação ao primeiro.

Bachmann e Ammann (1987) indicam valores fixos para os coeficientes de amplitude, sendo $\Delta G_1 = 0{,}4G$ e $\Delta G_2 = \Delta G_3 = 0{,}1G$. Para os ângulos de fase dos harmônicos superiores em relação ao primeiro, os autores sugerem que sejam adotados $\varphi_2 = \varphi_3 = \pi/2$.

Para cargas horizontais, sejam elas laterais ou longitudinais, a Equação 3.10 é adaptada de acordo com as considerações de Bachmann e Ammann (1987), resultando na Equação 3.11, apresentada a seguir:

$$F_{bach,H}(t) = \Delta G_{1/2} sen\left(2.\pi.\frac{f_s}{2}.t\right) + \Delta G_1 sen\left(4.\pi.\frac{f_s}{2}.t - \varphi_2\right) + \Delta G_{3/2} sen\left(6.\pi.\frac{f_s}{2}.t - \varphi_3\right) \quad (3.11)$$

Os coeficientes de amplitude utilizados são $\Delta G_{1/2} = 0{,}039G$, $\Delta G_1 = 0{,}010G$ e $\Delta G_{3/2} = 0{,}043G$ para vibrações horizontais laterais e $\Delta G_{1/2} = 0{,}037G$, $\Delta G_1 = 0{,}2G$ e $\Delta G_{3/2} = 0{,}026G$ pra vibrações horizontais longitudinais.

No entanto, o procedimento descrito considera que apenas um único pedestre está utilizando a passarela. Bachmann e Ammann (1987) ressaltam em seus estudos a extrema dificuldade de se propor uma descrição matemática da excitação dinâmica induzida por mais de um pedestre. Isso ocorre porque, se uma segunda pessoa caminha de maneira diferente em relação ao pedestre considerado inicialmente, as respostas dinâmicas de ambos os pedestres serão sobrepostas, de modo que, em alguns momentos, as amplitudes serão aditivas e, em outros, subtrativas.

Dessa forma, é proposta uma abordagem simplificada para a ação de múltiplos pedestres, por meio de um fator de majoração m_b, obtido a partir de uma distribuição de Poisson para a probabilidade de chegada de pedestres, que deve ser aplicado à amplitude de vibração causada por um único pedestre no centro do vão. Esse fator pode ser calculado por meio da Equação 3.12:

$$m_b = \sqrt{\lambda . T_0} \tag{3.12}$$

na qual

λ é a taxa de fluxo média (pessoas/s) ao longo da largura da passarela;

T_0 é o tempo necessário para um pedestre cruzar a passarela de comprimento L caminhando com uma velocidade v_s.

Assim, o produto $\lambda . T_0$ corresponde ao número de pessoas que caminham simultaneamente na passarela para a taxa média λ fornecida (BACHMANN e AMMANN, 1987).

3.4.2 Modelo indicado pela diretriz SÉTRA/AFGC (2006)

No modelo apresentado pela diretriz francesa SÉTRA/AFGC (2006), a carga dinâmica por unidade de área é dada pela Equação 3.13 para multidões esparsas e densas, e pela Equação 3.14 para multidões muito densas. Tal carga deve ser aplicada simultaneamente em todos os nós da estrutura durante um determinado período até que se atinja um efeito ressonante, não sendo assim tratada como uma carga móvel.

$$F_{sét,E}(t) = 10{,}8 . d . F_1 . cos(2 . \pi . f_n . t) \sqrt{\xi / n_P}\, \Psi \tag{3.13}$$

$$F_{sét,D}(t) = 1{,}85 . d . F_1 . cos(2 . \pi . f_n . t) \sqrt{1 / n_P}\, \Psi \tag{3.14}$$

onde:

d é a densidade de pedestres;

F_1 é a força individual exercida por um único pedestre, cujos valores para cargas verticais são de $280\ N$ para o primeiro harmônico e $70\ N$ para o segundo harmônico; para cargas transversais (laterais) utiliza-se $35\ N$ para o primeiro harmônico e $7\ N$ para o segundo harmônico; já para cargas longitudinais os valores adotados são $140\ N$ para o primeiro harmônico e $35\ N$ para o segundo.

f_n é a frequência natural da estrutura;

n_P é o número de pedestres simultaneamente na passarela;

ξ é a razão de amortecimento para o modo relevante;

Ψ é um fator que reduz a carga em casos de frequências naturais longe da taxa média de estimulação.

O fator Ψ apresenta valores que variam entre zero e um e pode ser obtido por meio das Figuras 3.9 e 3.10. Para determiná-lo, deve-se levar em consideração a frequência natural do modo de vibração relevante da estrutura.

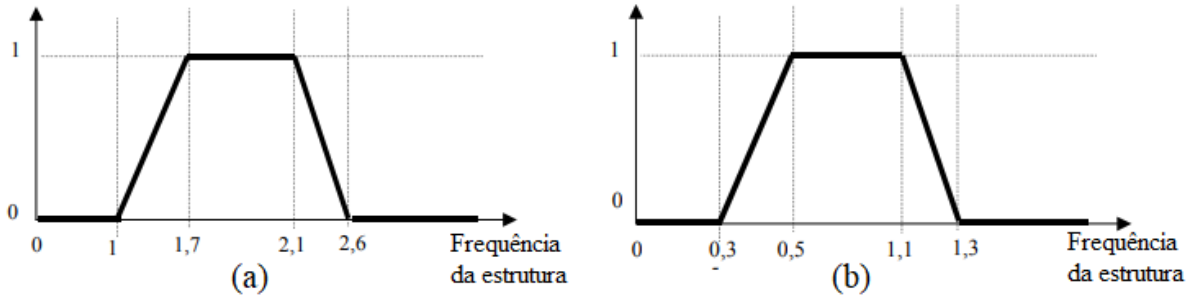


Figura 3.9 – Determinação do fator Ψ, levando em consideração o primeiro harmônico para: (a) vibrações verticais e longitudinais, (b) vibrações laterais (Adaptado de SÉTRA/AFGC, 2006)

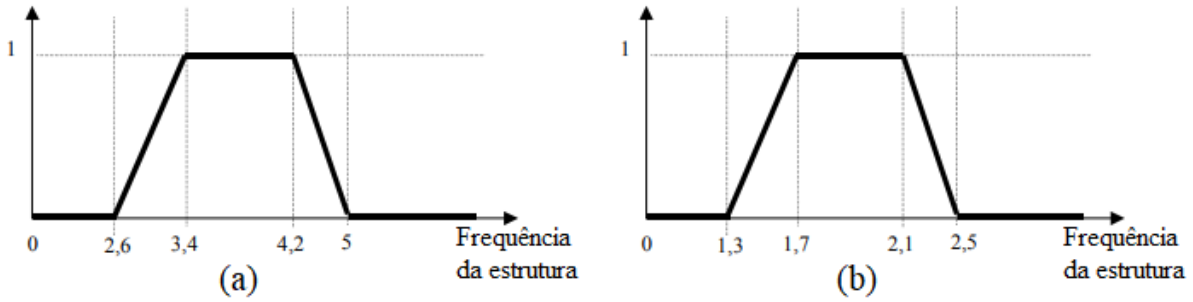


Figura 3.10 – Determinação do fator Ψ, levando em consideração o segundo harmônico para: (a) vibrações verticais, (b) vibrações laterais (Adaptado de SÉTRA/AFGC, 2006)

Dessa forma, estruturas cuja primeira frequência vertical esteja fora da faixa entre 1 e 5 Hz não poderão ter sua resposta calculada por meio deste modelo de carga. Da mesma forma, estruturas com a primeira frequência horizontal fora da faixa de 0,3 a 2,5 Hz também não poderão ser analisadas por este modelo, uma vez que, em todos esses casos, o fator $\Psi = 0$ tornará a força aplicada na passarela nula.

Uma das principais limitações desse modelo é incluir na análise apenas um harmônico de cada vez, ou seja, a excitação multi-harmônica de dois ou mais modos de vibração não é considerada (SÉTRA/AFGC, 2006). Além disso, o modelo torna-se não-realista ao aplicar as cargas simultaneamente em todos os nós da estrutura, sem utilizar o conceito de carga móvel para simular o deslocamento dos pedestres.

3.4.6 Modelo indicado pela diretriz ISO 10137 (2007)

O modelo de carga dinâmica para forças verticais impostas pela caminhada humana, apresentado na ISO 10137 (2007), é descrito na Equação 3.15

$$F_{ISO}(t) = G\left(1 + \sum_{n=1}^{n_h} \alpha_n . sen(2.\pi.n.f_s.t + \varphi_n)\right) \tag{3.15}$$

onde

G é o peso do pedestre;

n_h é o número total de harmônicos considerados;

α_n é o fator de amortecimento dinâmico para o n-ésimo harmônico;

φ_n é o ângulo de fase para o n-ésimo harmônico;

f_s é a frequência de estimulação.

Os fatores de amortecimento dinâmico, ou fatores de carga, para vibrações na direção vertical são calculados da seguinte maneira: $\alpha_1 = 0{,}37(f_s - 1)$, $\alpha_2 = 0{,}1$ e $\alpha_3 = \alpha_4 = \alpha_5 = 0{,}06$. Já para vibrações horizontais, os fatores assumem os valores de $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = 0{,}1$ e, nesses casos, a frequência de estimulação deve ser dividida por dois. Os valores para os ângulos de fase sugeridos são de $\varphi_n = \pi/2$.

Para um grupo de n_p pedestres caminhando simultaneamente sobre a passarela, a carga dinâmica deve ser multiplicada por $\sqrt{n_p}$ de modo a obter-se a carga total efetiva de pedestres.

Observa-se, portanto, que este modelo de carga apresenta formulação similar ao modelo de Bachmann e Ammann (1987), com a distinção de que o modelo da ISO 10137 (2007) considera, para vibrações verticais, os cinco primeiros harmônicos, em vez de somente três, além disso, ocorre uma atualização valores dos fatores de carga (amplitudes associadas aos harmônicos), especialmente no primeiro, que passa a ser regido por uma equação linear associada à frequência de passos em vez de possuir um valor fixo.

3.5 MODELOS DE RESPOSTA DA CAMINHADA HUMANA

Além dos modelos de carga já apresentados na Seção 3.4, diversos modelos simplificados de resposta foram desenvolvidos nas últimas décadas, com o objetivo de estimar de forma prática a resposta estrutural de passarelas sujeitas às ações induzidas pela caminhada humana. Embora sejam metodologias simplificadas, esses procedimentos podem ser úteis em alguns casos. No entanto, é necessário ter cautela ao utilizá-los, uma vez que a maioria deles não realiza uma análise dinâmica propriamente dita da estrutura, fornecendo geralmente somente os picos da resposta estrutural, muitas vezes com estimativas simplistas e limitações em sua aplicação.

3.5.1 Modelo simplificado proposto por Rainer, Pernica e Allen (1988)

Rainer, Pernica e Allen (1988) propuseram um procedimento de cálculo prático que permite determinar a resposta máxima de passarelas simples sujeitas ao caminhar de um único pedestre. A resposta, em termos de aceleração máxima vertical no meio do vão, é dada pela Equação 3.16, apresentada a seguir:

$$a_{max} = (2.\pi.f_n)^2 \frac{\alpha_R G}{k} \Phi \tag{3.16}$$

Na Equação 3.16, o termo $\left(\frac{\alpha_R G}{k}\right)$ representa o deslocamento estático no meio do vão devido à amplitude da força dinâmica do harmônico em consideração, sendo G o peso do pedestre, k a rigidez do vão e α_R um coeficiente de amplificação dinâmica estipulado por Rainer e Pernica (1986). O termo $(2.\pi.f_n)^2$ é um fator que converte o deslocamento em aceleração, onde f_n é a frequência própria da estrutura.

O valor do coeficiente de amplificação dinâmica, α_R, depende qual harmônico da caminhada será considerado na análise. Assim, os valores propostos pelos autores para os primeiros quatro harmônicos são α_1=0,56, α_2=0,28, α_3=0,12 e α_4=0,08. Já o coeficiente Φ, que também é um fator de amplificação dinâmica, semelhante ao α, tem o seu valor obtido por meio do ábaco apresentado na Figura 3.11.

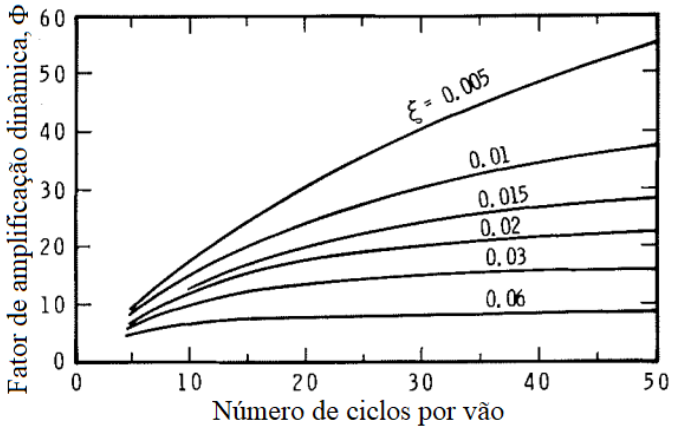


Figura 3.11 – Determinação do fator de amplificação dinâmica (Adaptado de RAINER et al., 1988)

Observa-se que o processo de obtenção do fator Φ leva em consideração o número de ciclos (ou passos) necessários para que um pedestre atravesse o vão da passarela, além da razão de amortecimento ξ para o modo de vibração relevante.

3.5.2 Modelo simplificado do Anexo II Eurocódigo 5 (2004)

O procedimento de cálculo proposto pelo Anexo II do Eurocódigo 5 (2004), específico para estruturas em madeira, assume que a passarela é uma estrutura em forma de viga simplesmente apoiada. A amplitude da resposta de aceleração de estado estacionário para um único pedestre é calculada por meio da Equação 3.17 para vibrações verticais e 3.18 para vibrações horizontais:

$$a_{vert,1} = \begin{cases} \dfrac{200}{M\xi} & para\ f_{vert} \leq 2{,}5\ Hz \\ \dfrac{100}{M\xi} & para\ 2{,}5 \leq f_{vert} \leq 5{,}0\ Hz \end{cases} \tag{3.17}$$

$$a_{hor,1} = \frac{50}{M\xi} \qquad para\ 0{,}5 \leq f_{hor} \leq 5{,}0\ Hz \tag{3.18}$$

onde

M é a massa total do vão da passarela;

ξ é a razão de amortecimento do modo de vibração relevante na estimulação dinâmica

f_{vert} e f_{hor} são, respectivamente, a frequência natural vertical e horizontal da estrutura associada ao modo de vibração em análise.

Para considerar a ação de múltiplos pedestres, deve-se utilizar as Equações 3.19 e 3.20, que calculam a amplitude da resposta de aceleração sob a carga de N pedestres para vibrações verticais e horizontais, respectivamente.

$$a_{vert,N} = 0{,}23 a_{vert,1} N k_{vert} \tag{3.19}$$

$$a_{hor,N} = 0{,}18 a_{hor,1} N k_{hor} \tag{3.20}$$

onde os parâmetros k_{vert} e k_{hor} são fatores que reduzem o número de pessoas sincronizadas na multidão caso a passarela tenha uma frequência natural diferente da frequência típica da caminhada. Os valores destes fatores podem ser obtidos por meio dos ábacos da Figura 3.12.

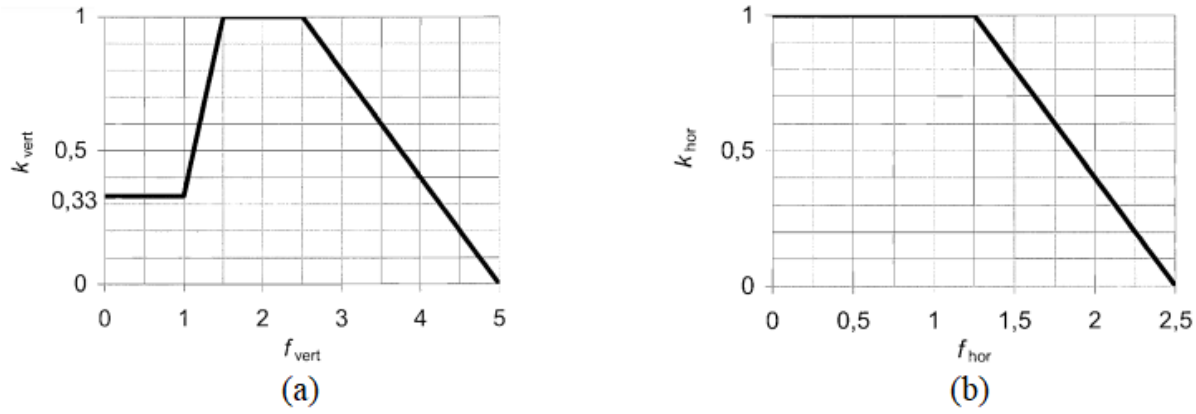


Figura 3.12 – Relação entre a frequência natural e o fator k considerando: (a) vibrações verticais, (b) vibrações horizontais (Adaptado de EUROCÓDIGO 5, 2004)

As limitações deste modelo de cálculo incluem o fato de ele ser aplicável somente a estruturas de madeira, que possuem características semelhantes a vigas. Além disso, o fator de multiplicação para a determinação da resposta sob a carga de vários pedestres é linearmente dependente do número de pedestres, configurando uma simplificação não coerente com a realidade do tráfego de múltiplos pedestres (EUROCÓDIGO 5, 2004).

4 METODOLOGIA PROPOSTA

Neste capítulo, apresenta-se a metodologia proposta para a realização deste trabalho.

4.1 ORGANIZAÇÃO GERAL DA METODOLOGIA

O presente trabalho parte do pressuposto de que, para que um modelo de carga capaz de simular a caminhada humana seja elaborado de forma confiável e bastante precisa, é necessário incorporar o máximo de informações possíveis sobre a forma e o comportamento de carregamentos reais oriundos da caminhada humana. Dessa forma, entende-se que um modelo realista só poderá ser estabelecido se levar em consideração aspectos presentes em registros experimentais da caminhada humana real. Nesse contexto, a Seção 4.2 deste capítulo aborda a metodologia experimental adotada no presente trabalho, relacionada à aquisição de registros de aceleração do corpo humano durante a caminhada de pedestres reais.

Uma vez obtidos registros reais da aceleração do corpo humano durante a caminhada, estes podem ser convertidos em forças, gerando históricos de carregamento ao longo do tempo. Tais carregamentos apresentam variações significativas tanto em amplitude quanto em forma, dependendo do peso do pedestre e da frequência da caminhada. Para aproximar esses carregamentos por meio de funções harmônicas, torna-se necessário determinar os coeficientes e parâmetros que regem tais funções – fisicamente, amplitudes e ângulos de fase associados aos harmônicos e sub-harmônicos da caminhada. Essa busca pode ser realizada por meio de algoritmos metaheurísticos de otimização, os quais permitem encontrar os parâmetros ótimos de uma função harmônica que minimizam o erro entre a função e o carregamento experimental obtido a partir de registros reais. A seção 4.3 deste capítulo apresenta os conceitos fundamentais de algoritmos metaheurísticos, bem como o algoritmo selecionado como ferramenta de otimização para este trabalho.

Após a obtenção dos parâmetros ideais das funções harmônicas que aproximam, com o menor erro possível, os carregamentos associados a cada registro real, esses parâmetros são utilizados para compor um banco de dados de entradas e saídas destinado ao treinamento de uma Rede Neural Artificial (RNA). Uma vez treinada, a rede será capaz de prever parâmetros adequados correspondentes a quaisquer dados de entrada (peso de pedestre e frequência de caminhada). Esses parâmetros, quando inseridos na função harmônica, fornecem uma estimativa de

carregamento correspondente às condições (peso e frequência) desejadas. A Seção 4.4 deste capítulo introduz os conceitos de redes neurais artificiais aplicados ao desenvolvimento do modelo de carga proposto neste trabalho.

Calibrando a função harmônica de carregamento com os parâmetros ideais previstos pela rede neural treinada, para um determinado peso de pedestre e frequência de caminhada, a função de carregamento resultante pode ser aplicada como excitação dinâmica em diferentes tipos de estruturas, com o objetivo de calcular as suas respostas. Essas respostas podem, ainda, ser comparadas com aquelas obtidas a partir da aplicação de carregamentos originais – considerando o mesmo peso de pedestre e a mesma frequência de caminhada – ou com respostas produzidas por outros modelos de carga, geralmente menos precisos. A Seção 4.5 deste capítulo ilustra os modelos estruturais de passarela utilizados ao longo desse trabalho para a validação e aplicação do modelo de caminhada desenvolvido.

Por fim, para o cálculo da resposta dinâmica de cada modelo estrutural analisado, é necessário empregar um método de integração numérica da equação do movimento. Neste trabalho, utiliza-se o Método de Newmark, o qual é apresentado detalhadamente na Seção 4.6 deste capítulo.

O fluxograma contido na Figura 4.1 ilustra de forma resumida as etapas metodológicas do trabalho bem como a relação entre cada uma delas e as ferramentas empregadas para alcançá-las.

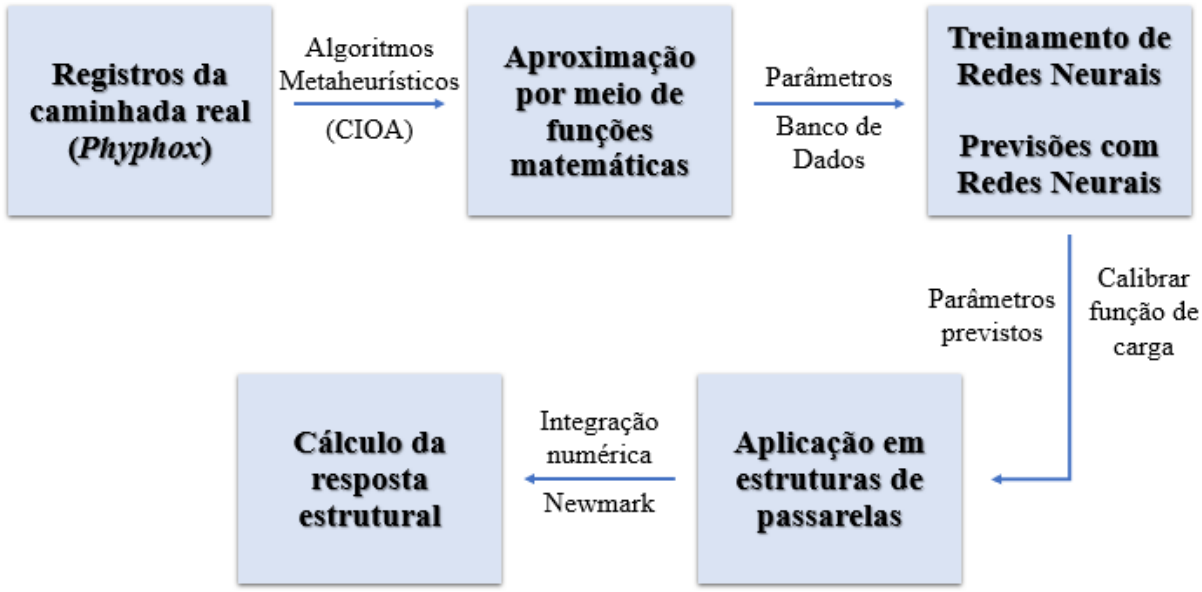


Figura 4.1 – Fluxograma das etapas metodológicas da pesquisa

4.2 AQUISIÇÃO DE REGISTROS DE ACELERAÇÃO DA CAMINHADA HUMANA

Para a elaboração do modelo de carga, foram realizadas medições experimentais das acelerações resultantes da caminhada de 16 pedestres voluntários. Durante cada medição, o pedestre acoplou um aparelho de celular ao corpo, próximo ao seu centro de massa, por meio de um cinto ajustado de maneira muito firme. Utilizando um aplicativo específico, o aparelho registrou as acelerações do centro de massa do corpo nas três direções por meio de seu acelerômetro integrado.

O acelerômetro contido no dispositivo é do tipo MEMS (*Micro-Electro-Mechanical System*) que é potencialmente adequado para esta pesquisa devido ao seu tamanho e peso reduzidos, baixo custo e boa capacidade de medição de acelerações dinâmicas, especialmente aquelas associadas a baixas frequências, como é o caso da caminhada humana. Na literatura, esse tipo de acelerômetro é recorrente pra situações similares, podendo ser citado como exemplo o trabalho de Tian e Chen (2016).

O aplicativo utilizado para a realização das medições é o *Phyphox*, escolhido pela facilidade de utilização e confiabilidade: estudos anteriores demonstram que experimentos realizados com o *Phyphox* apresentam resultados consistentes e precisos. Por exemplo, Anni (2021) verificou precisão entre 95% e 98% na determinação de acelerações utilizando o acelerômetro integrado de um celular por meio do *Phyphox*, enquanto Imtinan e Kuswanto (2023) apresentam uma revisão abrangente da literatura, indicando a utilização do aplicativo em mais de 20 estudos acadêmicos, com resultados consistentes e excelente precisão em diferentes contextos.

No presente trabalho, para a aquisição de dados destinados à construção do modelo proposto, cada voluntário foi estimulado a caminhar em oito diferentes frequências de caminhada, variando de 1,6 a 2,3 Hz, com incrementos de 0,1 Hz. Visando garantir que a caminhada ocorresse na frequência desejada, foi utilizado um metrônomo, programado para emitir batidas correspondentes a cada frequência-alvo. O número de batidas por minuto emitidas pelo metrônomo correspondia exatamente ao número de passos por minuto necessários para atingir a frequência de caminhada predefinida.

Por exemplo, para induzir um pedestre a caminhar a uma frequência de 2 Hz – ou seja, dois passos por segundo – o metrônomo foi configurado para emitir 120 batidas por minuto,

igualmente espaçadas, correspondendo a duas batidas por segundo. O pedestre foi orientado a sincronizar os seus passos, da melhor maneira possível, com as batidas emitidas pelo metrônomo.

Na Figura 4.2, ilustra-se um dos pedestres voluntários durante o registro das acelerações do centro de massa do corpo.



Figura 4.2 – Registro das acelerações do centro de massa do corpo de um pedestre

Ressalta-se que os pedestres envolvidos nas medições utilizavam diferentes tipos de calçados – alguns com um amortecimento maior, outros com um amortecimento menor – bem como o local das medições não foi sempre o mesmo, ainda que a superfície onde os pedestres caminharam tenha sido sempre uma superfície rígida. Muito embora, estudos anteriores tenham concluído que tais parâmetros causem uma influência menor no carregamento da caminhada.

Com o objetivo de garantir que os dados obtidos refletissem as características aleatórias reais do tráfego de pedestres, os participantes do experimento apresentavam diferentes massas corporais e estaturas, fatores que influenciam a força gerada durante a caminhada, bem como sua amplitude e forma. As características físicas de cada pedestre voluntário para a **criação** do modelo, organizadas em ordem crescente de massa, são apresentadas na Tabela 4.1

Tabela 4.1 – Características físicas dos pedestres voluntários para a criação do modelo

Pedestre	Massa (kg)	Altura (m)
Pedestre 1	54	1,65
Pedestre 2	58	1,62
Pedestre 3	60	1,65
Pedestre 4	65	1,81
Pedestre 5	66	1,80
Pedestre 6	69	1,60
Pedestre 7	73	1,79
Pedestre 8	75	1,78
Pedestre 9	76	1,75
Pedestre 10	78	1,73
Pedestre 11	87	1,79
Pedestre 12	90	1,76
Pedestre 13	92	1,89
Pedestre 14	104	1,95
Pedestre 15	105	1,96
Pedestre 16	112	1,84

Os registros de acelerações obtidos para cada pedestre, bem como os procedimentos de análise e tratamento de dados, são apresentados e discutidos de forma muito detalhada no Capítulo 6 deste trabalho, que trata da formulação propriamente dita do Modelo de Carga Vertical da Caminhada Humana.

Posteriormente, para a **validação** e **aplicação** do modelo desenvolvido, alguns registros adicionais tornaram-se necessários. Esses aspectos serão discutidos com mais clareza no capítulo de resultados.

4.3 ALGORITMOS METAHEURÍSTICOS DE OTIMIZAÇÃO

Algoritmos metaheurísticos são ferramentas de otimização poderosas, capazes de solucionar problemas complexos e altamente não lineares, uma vez que combinam estratégias de busca global e de busca local na procura por soluções ótimas (YANG, 2010). Além disso, esses algoritmos vêm sendo cada vez mais empregados em aplicações de engenharia devido a inúmeras vantagens, tais como: formulação simples e fácil implementação; ausência da necessidade de informações do gradiente da função objetivo; capacidade de escapar de ótimos locais; e aplicabilidade em um amplo espectro de problemas (MIRJALILI E LEWIS, 2016).

Além de problemas clássicos de otimização, os algoritmos metaheurísticos também podem ser utilizados para promover aproximações de registros que apresentam determinados graus de aleatoriedade. Nesse contexto, Chiesa e Miguel (2019) e Chiesa (2020) empregaram algoritmos metaheurísticos – entre outras ferramentas e metodologias – para a modelagem dos três componentes de acelerogramas sísmicos. As autoras utilizaram o algoritmo evolucionário *Backtracking Search Optimization Algorithm* (BSA), desenvolvido por Civicioglu (2013), para determinar os parâmetros adequados de amplitude e frequência de um modelo matemático capaz de gerar, de forma simultânea, os três componentes da aceleração sísmica.

No contexto do presente trabalho, o algoritmo metaheurístico *Circle-Inspired Optimization Algorithm* (CIOA), desenvolvido por Souza (2021) e Souza e Miguel (2022), foi selecionado para resolver o problema de otimização proposto. Esse problema consiste em determinar os parâmetros ótimos que minimizam o erro – ou a diferença – entre uma função periódica, composta pela soma de cinco harmônicos e cinco sub-harmônicos, e um carregamento obtido a partir do registro real da caminhada.

A escolha do CIOA como otimizador justifica-se por sua eficiência, comprovada em diversos estudos no âmbito da engenharia de estruturas. Dentre esses, destacam-se os trabalhos de Miguel e Souza (2023) e de Miguel et al., (2025) que utilizaram o CIOA, respectivamente, para controle de vibrações em estruturas de passarelas e de estruturas sujeitas a excitações sísmicas, bem como o trabalho de Monteiro et al. (2024), no qual o algoritmo foi aplicado para a análise e detecção de dano em diferentes estruturas.

4.3.1 Circle-Inspired Optimization Algorithm (CIOA)

Nesta seção, apresenta-se o algoritmo de otimização *Circle-Inspired Optimization Algorithm* (CIOA), algoritmo utilizado como uma das ferramentas para a identificação dos parâmetros ótimos da função harmônica utilizada no Modelo de Carga da Caminhada Humana desenvolvido neste trabalho.

No CIOA, cada agente de pesquisa movimenta-se ao longo de arcos de circunferência com raio r e ângulo θ. Quanto melhor for o valor da função objetivo obtido por um determinado agente, menor será o raio r utilizado em seu movimento na iteração subsequente. A formulação do CIOA é apresentada a seguir.

Considerando-se N_{ag} como o número de agentes de busca, e L_b e U_b como os limites inferior e superior, respectivamente, de cada variável de projeto, é gerado um vetor de raios $\vec{r}$, cujos elementos r_j são calculados de acordo com as Equações 4.1, nas quais c_r é uma constante definida em função do intervalo de busca.

$$r_j = \frac{c_r j^2}{N_{ag}} \qquad \text{e} \qquad c_r = \frac{\sqrt{U_b - L_b}}{N_{ag}} \tag{4.1}$$

Após a etapa de inicialização, a primeira solução gerada pelo CIOA é aleatória. Nas iterações seguintes, as soluções são classificadas de acordo com os seus valores da função objetivo, de modo que o agente de busca que produziu a $j^{ésima}$ melhor solução na iteração k_c terá suas coordenadas atualizadas na iteração $k_c + 1$ por meio das Equações 4.2 e 4.3.

$$x_{2i}(k_c + 1) = x_{2i}(k_c) - rand_1 r_j sen(k_c\theta) + rand_2 r_j sen((k_c + 1)\theta) \tag{4.2}$$

$$x_{2i-1}(k_c + 1) = x_{2i-1}(k_c) - rand_3 r_j cos(k_c\theta) + rand_4 r_j cos((k_c + 1)\theta) \tag{4.3}$$

Nessas equações, os índices 2_i e 2_{i-1} das coordenadas (ou variáveis de projeto) referem-se, respectivamente, às posições pares e ímpares do vetor de variáveis. As variáveis $rand$ correspondem a números aleatórios extraídos de uma distribuição uniforme no intervalo entre zero e um.

Para esquematizar o movimento dos agentes de busca no CIOA, considera-se que, em uma iteração, um agente de busca se move do ponto 1 ao ponto 2, seguindo um arco definido por um ângulo θ e raio $r_{1,2}$, com centro em $O_{1,2}$. Na iteração seguinte, o agente se move do ponto 2 ao ponto 3, mantendo o ângulo θ, porém com raio $r_{2,3}$ e centro em $O_{2,3}$. Esse procedimento é ilustrado na Figura 4.3 para duas situações distintas: Na primeira (Figura 4.3.a), o agente melhora a classificação de sua solução, resultando em um movimento subsequente com raio reduzido ($r_{2,3} < r_{1,2}$); na segunda (Figura 4.3.b), a classificação da solução piora, e o movimento subsequente ocorre com um raio aumentado ($r_{2,3} > r_{1,2}$).

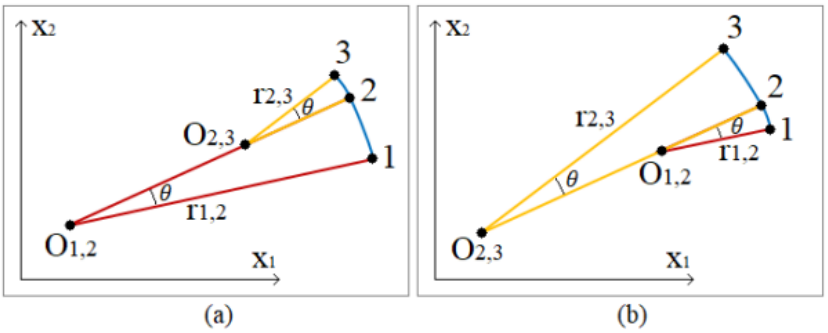


Figura 4.3 – Alterando o raio e atualizando o centro do círculo no algoritmo CIOA (Adaptado de SOUZA, 2021)

Sempre que uma variável x_i de um agente ultrapassar os limites estabelecidos, seu valor é redefinido para a coordenada correspondente do agente com melhor desempenho na iteração atual. Caso o agente com melhor desempenho também exceda os limites, os valores são ajustados para L_b ou U_b, conforme o caso. Além disso, sempre que os agentes completarem um "círculo", ou seja, quando $k_c\theta$ ultrapassar um múltiplo de 360º, o vetor de raios é atualizado de acordo com a relação $\vec{r}_{new} = \vec{r}.r_{up}$, onde $\vec{r}_{new}$ é o novo vetor de raios e r_{up} é um coeficiente de atualização, geralmente definido como $r_{up} = 0{,}99$.

Visando introduzir uma etapa de busca exclusivamente local, define-se um parâmetro denominado $Glob_{It}$, cujo valor deve estar no intervalo $(0, 1]$ e deve ser definido pelo usuário. A busca local é ativada quando a razão entre o número atual de iterações k_c e o número total de iterações ultrapassa o valor de $Glob_{It}$. Nesse momento, todos os agentes são reinicializados a partir das coordenadas que geraram a melhor solução até então. Adicionalmente, os limites das variáveis de projeto são atualizados, conforme as Equações 4.4, de modo que os novos limites inferior (L_{b1i}) e superior (U_{b1i}) de cada variável de projeto x_i tornam-se funções dos limites originais (L_b e U_b) e da variável x_{ibest}, que é a variável de dimensão i que produziu a melhor solução até o momento.

$$L_{b1i} = x_{ibest} - \frac{U_b - L_b}{10000} \quad \text{e} \quad U_{b1i} = x_{ibest} + \frac{U_b - L_b}{10000} \tag{4.4}$$

A partir da ativação da busca local, o algoritmo segue operando com as mesmas equações anteriormente apresentadas (Equações (4.3)), restringindo-se agora ao espaço de busca delimitado por L_{b1i} e U_{b1i}.

Para o adequado funcionamento do CIOA, recomenda-se definir um não-múltiplo de 360º para θ e um valor no intervalo entre 0,75 e 0,95 para o parâmetro $Glob_{It}$.

4.4 REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

Redes Neurais Artificiais (RNAs) são ferramentas de aprendizado de máquina (*Machine Learning)* baseadas na modelagem das relações entre conjuntos de dados de entrada e de saída, com o objetivo de representar o comportamento de sistemas complexos. Devido à sua elevada capacidade de aprendizado a partir de dados e ao bom desempenho em sistemas complexos sujeitos a incertezas, as RNAs constituem uma metodologia poderosa para a resolução de problemas de modelagem não linear e de natureza aleatória. Entre suas aplicações, destaca-se a aproximação de funções não lineares que apresentam certo grau de aleatoriedade por funções harmônicas, tópico relevante ao presente trabalho.

Em trabalhos que abordam a caminhada humana, o uso de Redes Neurais Artificiais tem sido recorrente. Como exemplo, podem ser citados os estudos de Toso e Gomes (2016), que utilizaram RNAs para o ajuste de parâmetros de modelos biodinâmicos de pedestres, e de Martinez-Hernandez et al. (2017), que empregaram um sistema de percepção bayesiano para prever movimentos corporais da perna humana durante a caminhada, com foco em robótica.

Um aspecto que exige atenção especial é a escolha adequada do tipo de rede neural artificial a ser utilizada. Em problemas como o do presente trabalho, nos quais os dados de treinamento apresentam aleatoriedades inerentes à caminhada humana, RNAs que utilizam o algoritmo de retropropagação de Regularização Bayesiana (*Bayesian Regularization* – BR) mostram-se potencialmente adequados.

Essa afirmação é corroborada pelo trabalho de Ticknor (2013), que destaca que redes com regularização bayesiana estão entre as mais indicadas para problemas com ruídos ou aleatoriedades, uma vez que esse tipo de abordagem atribui uma natureza probabilística aos pesos da rede, permitindo a penalização automática de modelos altamente complexos.

Ainda nesse contexto, Aneja et al. (2013), demonstraram a superioridade do algoritmo de retropropagação de Regularização Bayesiana (BR) em comparação aos algoritmos de *Levenberg–Marquardt* (LM) e Gradiente Conjugado Escalonado (*Scaled Conjugate Gradient* – SCG) para conjuntos de dados com ruído e aleatoriedade. Isso ocorre porque o algoritmo BR evita tanto o sobre-ajuste (*overfitting*) quando o sobretreinamento (*overtraining*).

Dessa forma, no presente trabalho, foi utilizado um conjunto de redes neurais artificiais com arquitetura multicamada, do tipo *feedforward*, treinadas por meio do algoritmo de

retropropagação com Regularização Bayesiana, para a previsão de dezenove parâmetros associados à caminhada humana. Esses parâmetros surgem quando a caminhada é modelada por uma função harmônica resultante da soma de cinco harmônicos e cinco sub-harmônicos.

As redes foram projetadas para operar em dezenove etapas sequenciais, sendo que, em cada etapa, é previsto um dos parâmetros da caminhada. A entrada da primeira etapa é composta pelo peso do pedestre e pela frequência da caminhada a ser prevista. Em seguida, o valor previsto em cada etapa é incorporado ao vetor de entrada da etapa subsequente, caracterizando uma abordagem encadeada.

Todos os detalhes referentes à implementação das redes neurais artificiais serão apresentados de forma abrangente no Capítulo 6 deste trabalho, que trata da implementação propriamente dita do modelo de caminhada humana. Já a seção 4.4.1, apresentada a seguir, aborda alguns conceitos básicos relacionados à implementação de RNAs.

4.4.1 Características de RNAs

Os estudos pioneiros de McCulloch e Pitts (1943) introduziram os primeiros modelos de neurônios artificiais, capazes de executar operações lógicas básicas. Posteriormente, Cybenko (1989) demonstrou que redes neurais do tipo *feedforward*, com pelo menos uma camada oculta e funções de ativação contínuas, limitadas e não constantes, são capazes de aproximar qualquer função contínua definida em um intervalo compacto, com determinado grau de precisão, desde que o número de neurônios utilizados na camada oculta seja suficiente.

Monteiro (2023) aponta que cada neurônio artificial j recebe um conjunto de sinais de entrada S_i e fornece um sinal de saída S_j. A interação entre os neurônios artificiais ocorre por meio de conexões às quais são atribuídos coeficientes que quantificam a influência de cada ligação. Esses coeficientes são chamados de pesos ω_{ij} e armazenam o aprendizado do sistema. Dessa forma, os dados de entrada são aplicados aos neurônios e ponderados por seus respectivos pesos, conforme ilustrado na Figura 4.4

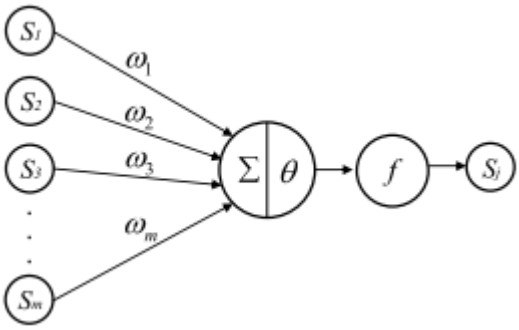


Figura 4.4 – Esquema de um neurônio artificial (Adaptado de MONTEIRO, 2023)

De acordo com Monteiro (2023), se a resposta de um dos neurônios atingir um valor específico da função de ativação f, o neurônio irá propagar o sinal recebido. A condição de ativação do neurônio é determinada pela combinação das m entradas, cada uma ponderada pelo seu respectivo peso, acrescida de um termo de polarização θ_j (*bias*), como apresentado na Equação 4.5

$$S_j = f\left(\sum_{i=1}^{m} S_i\, \omega_{ij} + \theta_j\right) \tag{4.5}$$

A função de ativação pode assumir diferentes formatos, assim como uma rede neural artificial pode apresentar arquiteturas variadas. Os neurônios são organizados em camadas: a camada de entrada, cujos neurônios recebem sinais do ambiente externo; a camada de saída, na qual os neurônios fornecem os resultados processados para o meio externo; e uma ou mais camadas ocultas, cujos neurônios se conectam apenas a outros neurônios da rede (MONTEIRO, 2023). Um exemplo de arquitetura de rede neural artificial é apresentado na Figura 4.5

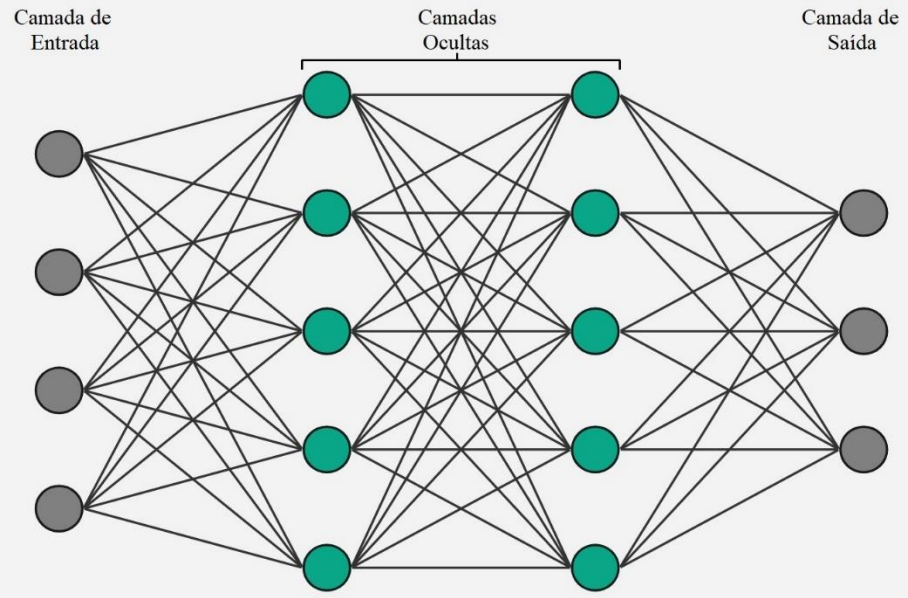


Figura 4.5 – Arquitetura de uma rede neural artificial (Adaptado de MONTEIRO, 2023)

No esquema da Figura 4.5, a rede possui quatro neurônios na camada de entrada e três neurônios na camada de saída, além de duas camadas ocultas contendo cinco neurônios cada.

Todos os aspectos relacionados à configuração da arquitetura de rede para uso efetivo neste trabalho, bem como sua implementação, serão abordados de forma detalhada na seção 6.3.

4.5 ESTRUTURAS ANALISADAS

Diferentes estruturas foram utilizadas neste trabalho para a aplicação e validação do Modelo de Carga desenvolvido. Nesta seção, são apresentadas as principais características de cada estrutura analisada. As estruturas são classificadas em dois grupos: **Estruturas Realistas**, compostas por quatro passarelas treliçadas com características geométricas e estruturais representativas de situações reais e **Estruturas com Frequência Reduzida**, constituídas por três passarelas treliçadas com características geométricas e estruturais, em muitos casos, não realistas, com o objetivo proposital de redução de sua frequência natural e amplificação da resposta estrutural.

4.5.1 Modelos Estruturais de Passarelas Realistas

O primeiro grupo de modelos estruturais de passarelas analisado neste trabalho consiste em um conjunto de quatro estruturas treliçadas, subdivididas em dois subgrupos: treliças do tipo Warren e treliças do tipo Pratt. As características gerais desses modelos – incluindo a

identificação de cada estrutura, o tipo de passarela, o comprimento, o número de nós e o número de elementos – são apresentadas na Tabela 4.2

Tabela 4.2 – Características gerais dos modelos estruturais realistas

Nome do modelo	Tipo de passarela	Comprimento (m)	Número de nós	Número de elementos
ME_{W1}	Treliça Warren	39	29	55
ME_{W2}	Treliça Warren	33	25	47
ME_{P1}	Treliça Pratt	48	32	61
ME_{P3}	Treliça Pratt	36	24	45

Na Figura 4.6 são ilustrados, visualmente, os modelos estruturais das passarelas realistas treliçadas do tipo Warren, denominados ME_{W1} e ME_{W2}. Ressalta-se que todas as estruturas treliçadas do tipo Warren analisadas ao longo deste trabalho derivam da estrutura inicialmente proposta por Miguel et al. 2015, aqui denominada modelo estrutural ME_{W1}. A partir desse modelo, foram realizadas modificações geométricas, com redução ou aumento do comprimento total da estrutura. Por este motivo, todas as estruturas analisadas apresentam características geométricas, construtivas e dinâmicas coincidentes com o do trabalho citado. Essas características englobam a definição dos materiais que constituem a estrutura, as áreas de seção transversal de cada elemento, as taxas de amortecimento bem como a consideração exclusivamente da massa estrutural no cálculo da massa total de cada estrutura, conforme consta no trabalho de Miguel et al. 2015.

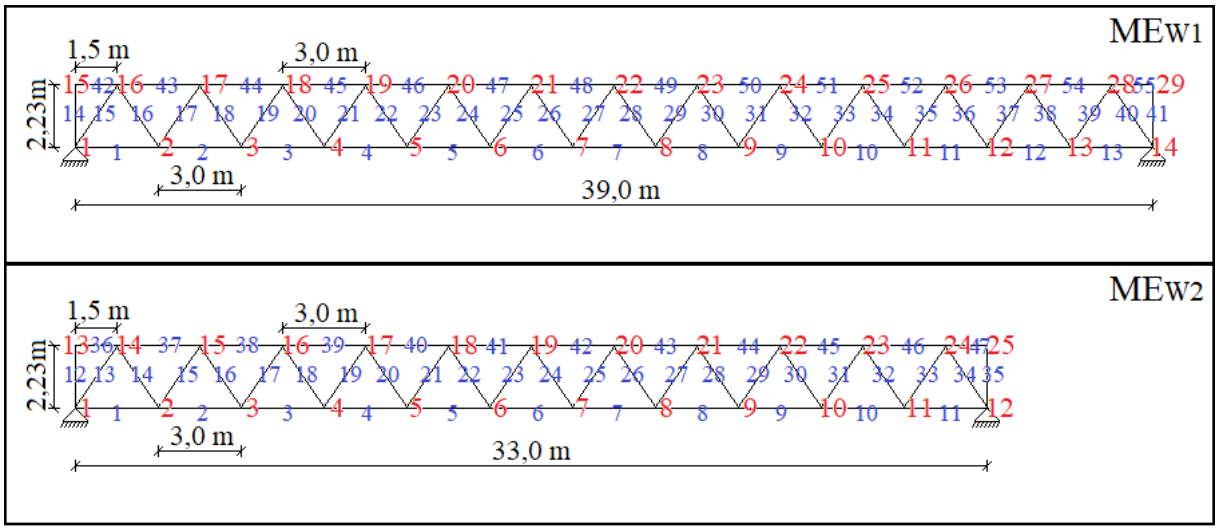


Figura 4.6 – Modelos estruturais realistas treliçados do tipo Warren

Em função dessas alterações geométricas, observa-se o consequente aumento ou diminuição da frequência natural fundamental de cada modelo, o que implica a minoração ou majoração da resposta estrutural dinâmica. Ademais, a mudança da frequência fundamental implica também na mudança de qual harmônico ou sub-harmônico da caminhada humana que exerce maior influência na excitação estrutural. Dessa forma, alguns modelos podem apresentar características estruturais atípicas, uma vez que o objetivo principal da utilização dessas estruturas não é a análise estrutural em si, mas a comprovação e validação da eficiência do modelo numérico-experimental de caminhada humana desenvolvido neste trabalho, bem como a validação de sua aplicabilidade mediante excitações associadas a diferentes harmônicos e sub-harmônicos que compõem o carregamento vertical da caminhada humana.

De forma análoga à figura 4.6, a Figura 4.7 apresenta os modelos estruturais das passarelas realistas treliçadas do tipo Pratt, denominados ME_{P1} e ME_{P2}. A estrutura ME_{P2}, assim como as demais passarelas treliçadas do tipo Pratt analisadas neste trabalho, derivam do modelo estrutural ME_{P1}, proposto por Miguel et al. 2015, a partir da redução ou aumento de seu comprimento total, mantendo-se assim as características geométricas, construtivas e dinâmicas observadas na pesquisa original.

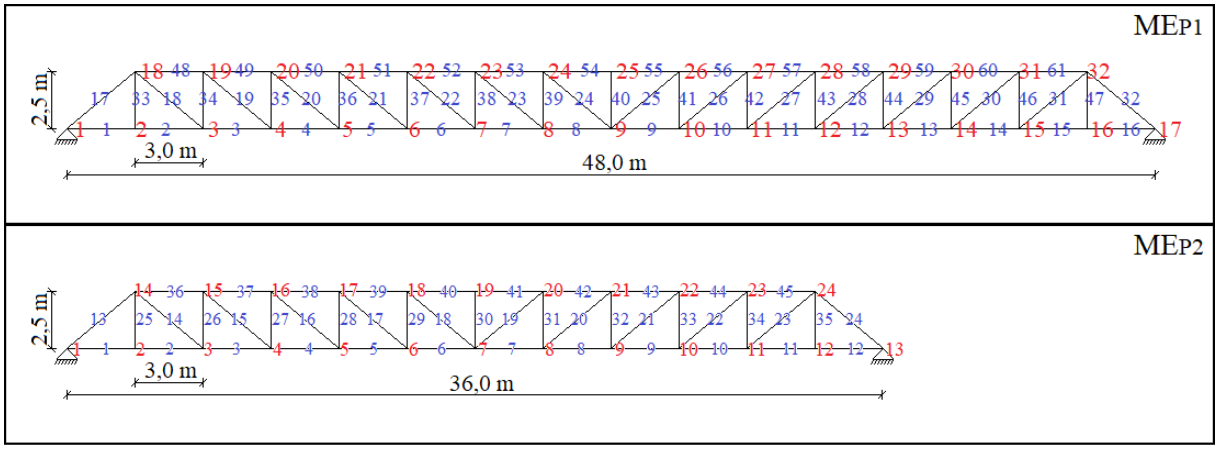


Figura 4.7 – Modelos estruturais realistas treliçados do tipo Pratt

Todos os modelos estruturais do tipo Warren e do tipo Pratt apresentados, respectivamente, nas Figuras 4.6 e 4.7 são constituídos de aço, com módulo de elasticidade $E = 200GPa$ e massa específica $\rho = 7850kg/m^3$. As áreas das seções transversais das barras que compõem essas estruturas, agrupadas de acordo com suas funções estruturais, são apresentadas na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Áreas de seção transversal das estruturas realistas

Tipo	Grupo de barras	Número dos elementos	Área (m^2)
Estruturas do tipo Warren	Banzo inferior	1 a 13 (ME_{W1}) e 1 a 11 (ME_{W2})	0,006
	Diagonais	14 a 41 (ME_{W1}) e 12 a 35 (ME_{W2})	0,004
	Banzo superior	42 a 55 (ME_{W1}) e 36 a 47 (ME_{W2})	0,008
Estruturas do tipo Pratt	Banzo inferior	1 a 16 (ME_{P1}) e 1 a 12 (ME_{P2})	0,0090
	Diagonais	17 a 32 (ME_{P1}) e 13 a 24 (ME_{P2})	0,0065
	Membros verticais	33 a 47 (ME_{P1}) e 25 a 35 (ME_{P2})	0,0055
	Banzo superior	48 a 61 (ME_{P1}) e 36 a 45 (ME_{P2})	0,0105

As taxas de amortecimento associadas ao primeiro e ao segundo modos de vibração de cada modelo estrutural são fixadas em 0,4%, conforme indicado no trabalho de Miguel et al. 2015. Essa consideração resulta no cálculo das constantes de amortecimento a e b, obtidas a partir da formulação de Rayleigh, específicas para cada modelo estrutural e associadas às frequências naturais dos dois primeiros modos de vibração. Essas informações são apresentadas de forma detalhada na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Dados de amortecimento das estruturas realistas treliçadas associados aos dois primeiros modos de vibração

Modelo Estrutural	$f_1\ (Hz)$	$f_2\ (Hz)$	$a\ (s^{-1})$	$b\ (s)$
ME_{W1}	5,9960	16,0360	$2{,}1937 \times 10^{-1}$	$5{,}7790 \times 10^{-5}$
ME_{W2}	8,1895	21,3524	$2{,}9753 \times 10^{-1}$	$4{,}3099 \times 10^{-5}$
ME_{P1}	4,0016	11,385	$1{,}4883 \times 10^{-1}$	$8{,}2748 \times 10^{-5}$
ME_{P2}	6,8256	18,5722	$2{,}5089 \times 10^{-1}$	$5{,}0132 \times 10^{-5}$

De acordo com a primeira frequência natural de cada modelo estrutural, apresentada na Tabela 4.4, tais estruturas tendem a ser excitadas predominantemente pelo segundo ao quinto harmônicos e pelo terceiro ao quinto sub-harmônicos da caminhada humana. O fato de não contemplarem excitações pelo primeiro harmônico nem pelos primeiros sub-harmônicos acarreta a necessidade da consideração de outros modelos estruturais, adaptados a essas situações específicas, nos quais o modelo de carga desenvolvido possa ser aplicado, visando sua validação e avaliação plena.

4.5.2 Modelos Estruturais de Passarelas com Frequência Natural Reduzida

Com o objetivo de avaliar como estruturas com baixa frequência natural fundamental – geralmente estimuladas pelo primeiro harmônico e/ou segundo sub-harmônico – têm sua resposta estimada pelo modelo de caminhada humana proposto neste trabalho, os modelos estruturais apresentados na Seção 4.4.1 foram adaptados de modo a reduzir significativamente suas frequências naturais.

Essa redução foi obtida por meio do aumento do comprimento total do vão das estruturas. Dessa forma, os modelos estruturais do tipo Warren apresentados na Seção 4.4.1 deram origem aos modelos ME_{W3} e ME_{W4}, analisados nesta seção. De maneira análoga, os modelos estruturais do tipo Pratt da Seção 4.4.1 foram adaptados, resultando no modelo ME_{P3}. As características gerais dos novos modelos estruturais propostos nesta subseção são apresentadas na Tabela 4.5

Tabela 4.5 - Características gerais dos modelos estruturais com frequência reduzida

Nome do modelo	Tipo de passarela	Comprimento (m)	Número de nós	Número de elementos
ME_{W3}	Treliça Warren	66	47	91
ME_{W4}	Treliça Warren	69	49	95
ME_{P3}	Treliça Pratt	54	36	69

Os modelos estruturais com frequência natural fundamental reduzida são apresentados visualmente nas Figuras 4.8 (treliças do tipo Warren) e 4.9 (treliça do tipo Pratt).

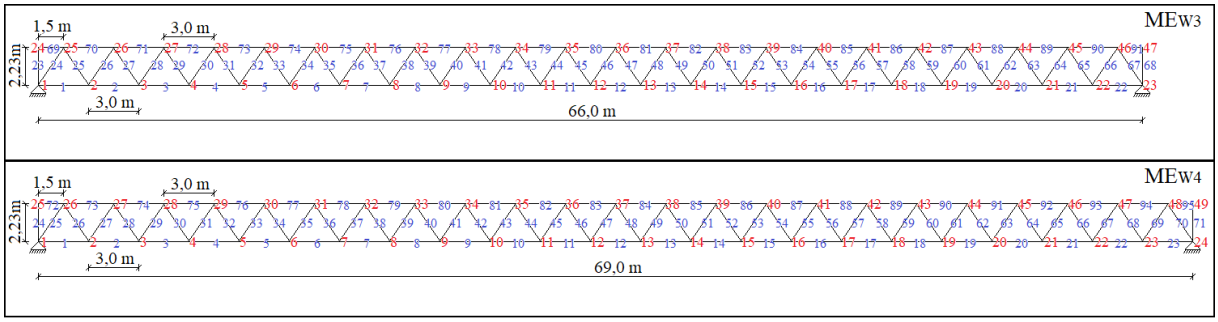


Figura 4.8 – Modelos estruturais com frequência reduzida treliçados do tipo Warren

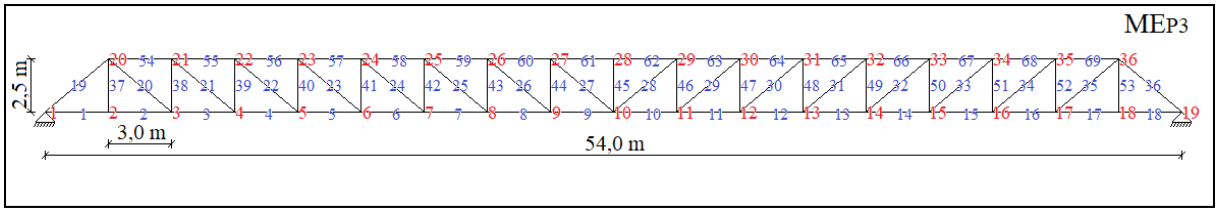


Figura 4.9 – Modelos estruturais com frequência reduzida treliçados do tipo Pratt

Todas as estruturas abordadas nesta subseção, assim como na anterior, são consideradas estruturas de aço, com módulo de elasticidade $E = 200GPa$ e massa específica $\rho = 7850kg/m^3$. As áreas das seções transversais das barras que compõem essas estruturas, conforme os grupos a que pertencem, classificados de acordo com sua função estrutural, são apresentadas na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Áreas de seção transversal das estruturas com frequência reduzida

Tipo	Grupo de barras	Número dos elementos	Área (m^2)
Estruturas do tipo Warren	Banzo inferior	1 a 22 (ME_{W3}) e 1 a 23 (ME_{W4})	0,006
	Diagonais	23 a 68 (ME_{W3}) e 24 a 71 (ME_{W4})	0,004
	Banzo superior	69 a 91 (ME_{W3}) e 72 a 95 (ME_{W4})	0,008
Estruturas do tipo Pratt	Banzo inferior	1 a 18 (ME_{P3})	0,0090
	Diagonais	19 a 36 (ME_{P3})	0,0065
	Membros verticais	37 a 53 (ME_{P3})	0,0055
	Banzo superior	54 a 69 (ME_{P3})	0,0105

Todos os modelos estruturais apresentam taxas de amortecimento de 0,4% associadas aos dois primeiros modos de vibração, possibilitando a determinação das constantes de amortecimento a e b por meio da formulação de Rayleigh. As constantes de amortecimento, bem como as frequências naturais associadas ao primeiro e ao segundo modo de vibração da estrutura, são apresentadas na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Dados de amortecimento das estruturas com frequência reduzida associados aos dois primeiros modos de vibração

Modelo Estrutural	$f_1\ (Hz)$	$f_2\ (Hz)$	$a\ (s^{-1})$	$b\ (s)$
ME_{W3}	2,1780	6,1475	$8{,}0838 \times 10^{-2}$	$1{,}5293 \times 10^{-4}$
ME_{W4}	1,9965	5,6518	$7{,}4159 \times 10^{-2}$	$1{,}6647 \times 10^{-4}$
ME_{P3}	3,2041	9,2415	$1{,}1959 \times 10^{-1}$	$1{,}0230 \times 10^{-4}$

A partir das frequências naturais apresentadas na Tabela 4.7, observa-se que essas estruturas serão estimuladas, essencialmente, pelo primeiro e segundo harmônico da caminhada, bem como pelo segundo sub-harmônico.

4.6 MÉTODO DE NEWMARK

O Método de Newmark é uma metodologia que permite a integração numérica da equação do movimento visando obter a resposta dinâmica de sistemas estruturais discretos e compostos por múltiplos graus de liberdade (NEWMARK, 1959).

Rao (2018) resume a aplicabilidade do método por meio de um conjunto de equações que possibilitam o cálculo da resposta de um sistema estrutural submetido a uma excitação dinâmica, desde que se discretize o tempo t de duração do movimento em intervalos com valores constantes, iguais a Δt. Para a aplicação do método, devem ser conhecidas as condições iniciais do sistema, ou seja, o descolamento e a velocidade iniciais, no tempo $t = 0$. Dessa forma, a aceleração inicial por ser calculada por meio da Equação 4.1:

$$\vec{\ddot{x}}_0 = \mathbf{M}^{-1}(\vec{F}_0 - \mathbf{C}\vec{\dot{x}}_0 - \mathbf{K}\vec{x}_0) \tag{4.1}$$

Em seguida, os deslocamentos, velocidades e acelerações para qualquer instante de tempo podem ser calculados, respectivamente, pelas Equações 4.2, 4.3 e 4.4:

$$\vec{x}_{i+1} = \mathbf{D} \times \left[\vec{F}_{i+1} + \mathbf{M}\left(a_0\vec{x}_i + a_1\vec{\dot{x}}_i + a_2\vec{\ddot{x}}_i\right) + \mathbf{C}\left(a_3\vec{x}_i + a_4\vec{\dot{x}}_i + a_5\vec{\ddot{x}}_i\right)\right] \tag{4.2}$$

$$\vec{\dot{x}}_{i+1} = a_3(\vec{x}_{i+1} - \vec{x}_i) - a_4\vec{\dot{x}}_i - a_5\vec{\ddot{x}}_i \tag{4.3}$$

$$\vec{\ddot{x}}_{i+1} = a_0(\vec{x}_{i+1} - \vec{x}_i) - a_1\vec{\dot{x}}_i - a_2\vec{\ddot{x}}_i \tag{4.4}$$

onde:

$$\mathbf{D} = (a_0\mathbf{M} + a_3\mathbf{C} + \mathbf{K})^{-1} \tag{4.5}$$

$$a_0 = \frac{1}{\alpha\Delta t^2} \tag{4.6}$$

$$a_1 = \frac{1}{\alpha\Delta t} \tag{4.7}$$

$$a_2 = \frac{1}{2\alpha} - 1 \tag{4.8}$$

$$a_3 = \frac{\beta}{\alpha \Delta t} \tag{4.9}$$

$$a_4 = \frac{\beta}{\alpha} - 1 \tag{4.10}$$

$$a_5 = \frac{\Delta t}{2}\left(\frac{\beta}{\alpha} - 2\right) \tag{4.11}$$

Os parâmetros α e β indicam o quanto a aceleração no final do intervalo entra nas equações de velocidade e deslocamento no final do intervalo Δt. O método será incondicionalmente estável quando $\beta \geq \frac{1}{2}$ e $\alpha \geq \left(\beta + \frac{1}{2}\right)^2$ (RAO, 2018). No presente trabalho adotaram-se os valores $\beta = 0{,}5$ e $\alpha = 0{,}25$, que garantem a estabilidade do método e que são amplamente utilizados na literatura consultada.

5 VALIDAÇÃO DAS ROTINAS COMPUTACIONAIS DESENVOLVIDAS

Neste capítulo, realiza-se a validação das rotinas computacionais desenvolvidas para a aplicação da metodologia proposta neste trabalho. Essas rotinas contemplam a modelagem estrutural, a análise modal de estruturas constituídas por diferentes tipos de elementos de barra e a implementação do método de Newmark para a análise dinâmica. Todas as rotinas computacionais foram desenvolvidas no ambiente MATLAB.

5.1 IMPLEMENTAÇÃO E VALIDAÇÃO DOS MODELOS ESTRUTURAIS ANALISADOS

Nesta seção, realiza-se a validação da modelagem das estruturas analisadas no presente trabalho, previamente apresentadas no Capítulo 4. Para esse fim, os resultados obtidos por meio dos códigos computacionais desenvolvidos em MATLAB são comparados com aqueles gerados pelo software comercial ANSYS. Adicionalmente, sempre que possível, ambos os conjuntos de resultados são comparados com estudos prévios realizados por outros pesquisadores.

5.1.1 Implementação e Validação dos Modelos Estruturais de Passarelas Realistas

As tabelas 5.1 e 5.2 apresentam os valores das cinco primeiras frequências naturais obtidas para os modelos estruturais ME_{W1} e ME_{W2}, respectivamente, os quais representam passarelas realistas do tipo Warren. Os resultados obtidos por meio da implementação computacional em MATLAB são comparados com aqueles gerados pelo software ANSYS, sendo realizada uma análise do erro correspondente.

Para o caso do modelo estrutural ME_{W1}, amplamente investigado na literatura, os resultados são ainda comparados com estudos anteriores, como por exemplo, a pesquisa de Miguel et al., (2015) na qual os autores analisaram as três primeiras frequências naturais da estrutura, e a de Silva (2020), trabalho que avaliou as cinco primeiras frequências naturais.

Tabela 5.1 – Frequências naturais (Hz) obtidas para o ME_{W1}

Frequências	Miguel et al. (2015)	Silva (2020)	Presente Trabalho		
			ANSYS	MATLAB	Erro (%)
f_1	5,9960	5,9960	5,9960	5,9960	0,00
f_2	16,036	16,036	16,036	16,036	0,00
f_3	33,916	33,916	33,916	33,916	0,00
f_4	-	41,245	41,245	41,245	0,00
f_5	-	55,977	55,977	55,977	0,00

Conforme se observa na Tabela 5.1, as frequências naturais obtidas por meio da implementação computacional em MATLAB coincidem exatamente com aquelas calculadas pelo software ANSYS. Além disso, os valores obtidos são iguais aos disponíveis na literatura, validando, assim, a implementação desenvolvida neste trabalho.

Tabela 5.2 – Frequências naturais (Hz) obtidas para o ME_{W2}

Frequências	ANSYS	MATLAB	Erro (%)
f_1	8,1895	8,1895	0,00
f_2	21,352	21,352	0,00
f_3	44,238	44,238	0,00
f_4	48,915	48,915	0,00
f_5	70,753	70,753	0,00

Observa-se, na Tabela 5.2, concordância entre os valores obtidos por meio da implementação numérica em MATLAB e aqueles gerados pelo software ANSYS.

As Tabelas 5.3 e 5.4 exibem as cinco primeiras frequências naturais calculadas para os modelos estruturais ME_{P1}, ME_{P2}, respectivamente. Os valores obtidos a partir das rotinas computacionais desenvolvidas em MATLAB são comparados com os resultados fornecidos pelo software ANSYS, comparando-se o erro entre ambas as abordagens.

O modelo estrutural ME_{P1} permite, ainda, a comparação com estudos anteriores, uma vez que essa estrutura foi amplamente estudada por autores como Miguel et al. (2015) e Silva (2020).

Tabela 5.3 – Frequências naturais (Hz) obtidas para o ME_{P1}

Frequências	Miguel et al. (2015)	Silva (2020)	Presente Trabalho		
			ANSYS	MATLAB	Erro (%)
f_1	4,0016	4,0016	4,0016	4,0016	0,00
f_2	11,385	11,385	11,385	11,385	0,00
f_3	24,370	24,370	24,370	24,370	0,00
f_4	-	29,755	29,755	29,755	0,00
f_5	-	41,043	41,043	41,043	0,00

Conforme pode ser observado na Tabela 5.3, os valores obtidos por meio da implementação computacional coincidem com aqueles fornecidos pelo software ANSYS, além de apresentarem concordância com os dados disponíveis na literatura.

Tabela 5.4 – Frequências naturais (Hz) obtidas para o ME_{P2}

Frequências	ANSYS	MATLAB	Erro (%)
f_1	6,8256	6,8256	0,00
f_2	18,572	18,572	0,00
f_3	38,414	38,414	0,00
f_4	40,826	40,826	0,00
f_5	60,710	60,710	0,00

Por fim, os resultados obtidos para o modelo estrutural ME_{P2}, apresentados na Tabela 5.4, concluem a validação da implementação numérica em MATLAB das estruturas realistas analisadas no presente trabalho, abrangendo tanto treliças do tipo Warren quanto do tipo Pratt.

5.1.2 Implementação e validação dos Modelos Estruturais de Passarelas com Frequência Natural Reduzida

Nesta subseção é apresentada a validação da implementação dos modelos estruturais de passarelas com frequência natural reduzida, a saber, os modelos estruturais ME_{W3} e ME_{W4}, que correspondem a passarelas treliçadas do tipo Warren, bem como o modelo estrutural ME_{P3}, correspondente a uma passarela treliçada do tipo Pratt. Em todos os casos, são calculadas as cinco primeiras frequências naturais de cada estrutura por meio da implementação computacional em MATLAB desenvolvida no presente trabalho e por análises realizadas pelo software comercial ANSYS. Uma análise do erro entre ambas as abordagens é introduzida.

Os resultados obtidos para os modelos estruturais elencados – todos eles estruturas fictícias, com comprimento ampliado visando à redução proposital das frequências naturais – são apresentados na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Frequências naturais (Hz) obtidas para os modelos estruturais de passarelas com frequência natural reduzida

Modelo Estrutural	Frequências Naturais	ANSYS	MATLAB	Erro (%)
ME_{W3}	f_1	2,1780	2,1780	0,00
	f_2	6,1475	6,1475	0,00
	f_3	13,770	13,770	0,00
	f_4	20,757	20,757	0,00
	f_5	28,633	28,633	0,00
ME_{W4}	f_1	1,9965	1,9965	0,00
	f_2	5,6518	5,6518	0,00
	f_3	12,707	12,707	0,00
	f_4	19,343	19,343	0,00
	f_5	27,226	27,226	0,00
ME_{P3}	f_1	3,2041	3,2041	0,00
	f_2	9,2415	9,2415	0,00
	f_3	20,050	20,050	0,00
	f_4	25,881	25,881	0,00
	f_5	35,075	35,075	0,00

Observa-se que todas as frequências naturais das estruturas analisadas apresentaram concordância, quando comparados os resultados obtidos por meio da implementação em MATLAB desenvolvida neste trabalho com os resultados calculados pelo software ANSYS. Assim, confirma-se a validação do código de análise dinâmica implementado para estruturas, bem como a modelagem de cada um dos modelos estruturais considerados nesta pesquisa.

5.2 IMPLEMENTAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MÉTODO DE NEWMARK

No presente trabalho, foi criado um programa em MATLAB contendo a implementação do Método de Newmark, de acordo com a formulação apresentada na Seção 4.5. O programa desenvolvido foi testado e validado por meio da solução de um problema proposto por Miguel (2006), no qual o objetivo é calcular a resposta de um sistema amortecido composto por quatro

graus de liberdade (4 GDL) e sujeito a uma excitação harmônica. Detalhes do problema proposto podem ser vistos na Figura 5.1.

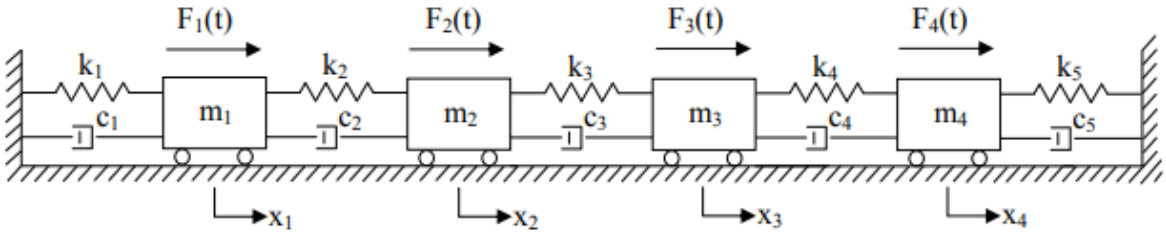


Figura 5.1 – Problema proposto para a validação do Método de Newmark (Adaptado de MIGUEL, 2006)

Na Tabela 5.6 são apresentados os dados do sistema, incluindo as massas (m), rigidezes (k), os coeficientes de amortecimento (c) e as forças externas atuantes (F).

Tabela 5.6 – Dados do problema para validação do Método de Newmark (Adaptado de MIGUEL, 2006).

Valores de m	Valores de k	Valores de c	Valores de F
$m_1 = 8\ kg$	$k_1 = 30\ N/m$	$c_1 = 6\ Ns/m$	$F_1(t) = +20sen5t + 80cos5t$
$m_2 = 9\ kg$	$k_2 = 45\ N/m$	$c_2 = 9\ Ns/m$	$F_2(t) = -50sen5t + 60cos5t$
$m_3 = 5\ kg$	$k_3 = 50\ N/m$	$c_3 = 10\ Ns/m$	$F_3(t) = +70sen5t + 35cos5t$
$m_4 = 6\ kg$	$k_4 = 20\ N/m$	$c_4 = 4\ Ns/m$	$F_4(t) = -45sen5t - 25cos5t$
	$k_5 = 25\ N/m$	$c_5 = 5\ Ns/m$	

As condições iniciais do problema, referentes ao deslocamento $\vec{x}_0$ e à velocidade $\dot{\vec{x}}_0$, são apresentadas a seguir, nas equações 5.1 e 5.2:

$$\vec{x}_0 = \begin{bmatrix} -0{,}500565 \\ -0{,}055132 \\ -0{,}814934 \\ 0{,}450169 \end{bmatrix} m \tag{5.1}$$

$$\dot{\vec{x}}_0 = \begin{bmatrix} 0{,}750247 \\ -0{,}410529 \\ -0{,}411299 \\ 0{,}480426 \end{bmatrix} m/s \tag{5.2}$$

Inicialmente, é descrita a solução analítica do problema, na qual a resposta estacionária pode ser obtida por meio da Equação 5.3:

$$\vec{x}_p(t) = \vec{A}sen(\omega t) + \vec{B}cos(\omega t) \tag{5.3}$$

onde A e B são vetores de coeficientes que podem ser determinados a partir da solução do sistema de equações apresentado na Equação 5.4:

$$\begin{bmatrix} (-\mathbf{M}\omega^2 + \mathbf{K}) & -\mathbf{C}\omega \\ \mathbf{C}\omega & (-\mathbf{M}\omega^2 + \mathbf{K}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{A} \\ \vec{B} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vec{F}_A \\ \vec{F}_B \end{bmatrix} \tag{5.4}$$

Uma vez que as matrizes de massa, rigidez e amortecimento do sistema estrutural possuem dimensões 4×4, o sistema de equações descrito em 5.4 resulta em oito equações e oito incógnitas. Após a resolução do sistema, os valores obtidos para os vetores $\vec{A}$ e $\vec{B}$ são apresentados, respectivamente, em 5.5 e 5.6:

$$\vec{A} = \begin{bmatrix} 0{,}1500 \\ -0{,}0821 \\ -0{,}0823 \\ 0{,}0961 \end{bmatrix} \tag{5.5}$$

$$\vec{B} = \begin{bmatrix} -0{,}5006 \\ -0{,}0551 \\ -0{,}8149 \\ 0{,}4502 \end{bmatrix} \tag{5.6}$$

Substituindo-se 5.5 e 5.6 na Equação 5.3, a resposta do sistema estrutural pode ser calculada para qualquer instante de tempo, de forma analítica, utilizando a equação 5.7:

$$\vec{x}_p(t) = \begin{bmatrix} 0{,}1500 \\ -0{,}0821 \\ -0{,}0823 \\ 0{,}0961 \end{bmatrix} sen(5t) + \begin{bmatrix} -0{,}5006 \\ -0{,}0551 \\ -0{,}8149 \\ 0{,}4502 \end{bmatrix} cos(5t) \tag{5.7}$$

No presente trabalho, a resposta do sistema é avaliada nos instantes $t = 0s$, $t = 2{,}5s$ e $t = 5s$.

Para a solução por meio do Método de Newmark, calcula-se a resposta do sistema nos mesmos instantes considerados na solução analítica, utilizando-se um intervalo de tempo $\Delta t = 0{,}005s$. Na tabela 5.7 são comparados os deslocamentos obtidos de forma analítica com aqueles gerados pelo programa em MATLAB no qual foi implementado o Método de Newmark.

Tabela 5.7 – Deslocamentos do sistema de 4GDL para validação do Método de Newmark

GDL	$t = 0\ s$		$t = 2{,}5\ s$		$t = 5\ s$	
	Analítico	Newmark	Analítico	Newmark	Analítico	Newmark
1	-0,5006	-0,5006	-0,5094	-0,5094	-0,5160	-0,5160
2	-0,0551	-0,0551	-0,0495	-0,0495	-0,0437	-0,0438
3	-0,8149	-0,8149	-0,8076	-0,8076	-0,7968	-0,7968
4	0,4502	0,4502	0,4428	0,4428	0,4335	0,4334

Considerando-se os resultados apresentados até a quarta casa decimal na Tabela 5.7, verifica-se que o Método de Newmark, conforme implementado em MATLAB, fornece resultados idênticos ou extremamente próximos aos obtidos pela solução analítica.

Por fim, na Figura 5.2 são apresentados os gráficos da resposta ao longo do tempo para cada grau de liberdade do sistema, calculados tanto de forma analítica (linha tracejada vermelha) quanto de forma numérica, por meio do Método de Newmark implementado no presente trabalho (linha contínua azul).

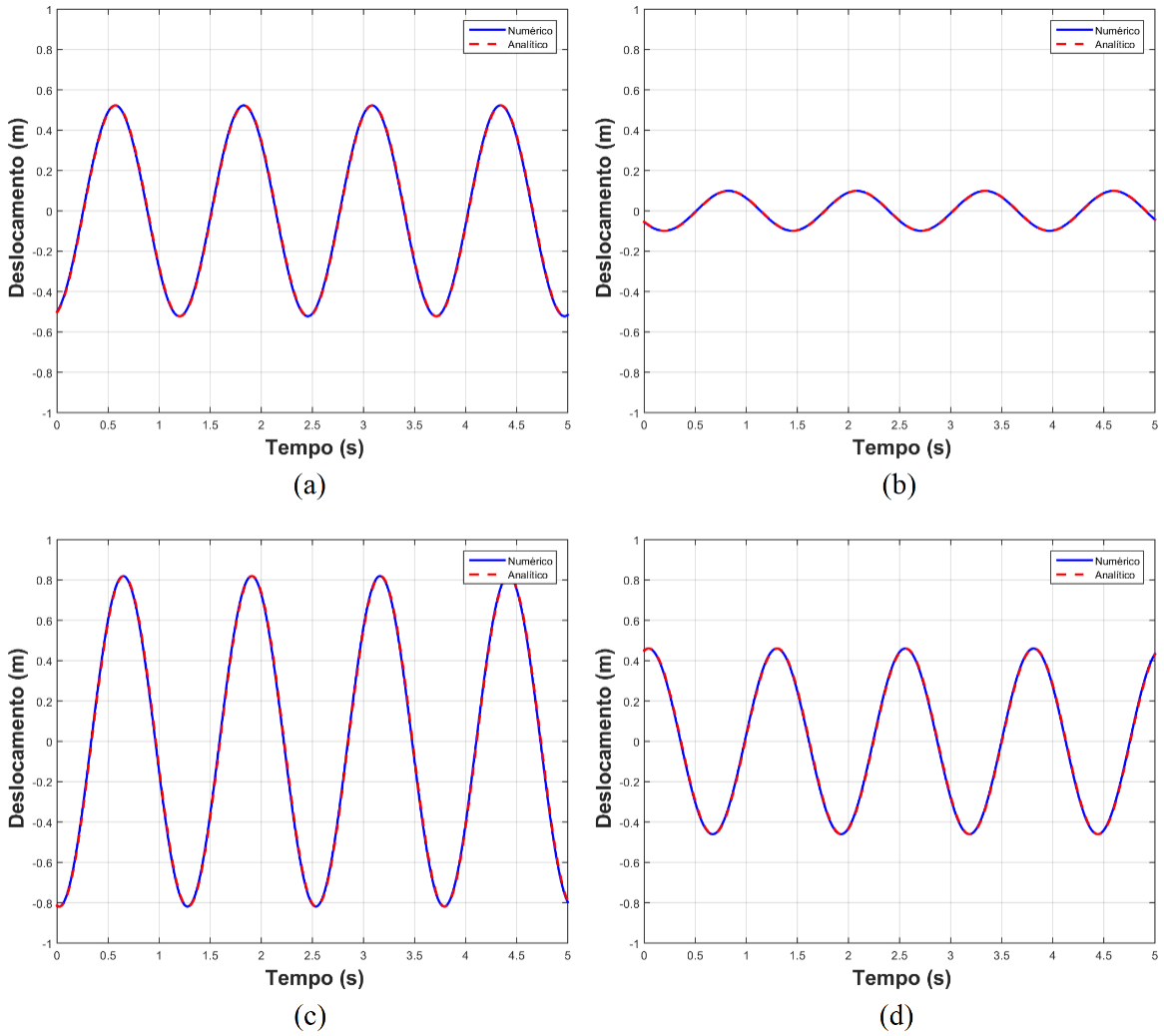


Figura 5.2 – Deslocamentos ao longo do tempo para a validação do Método de Newmark: (a) primeiro GDL, (b) segundo GDL, (c) terceiro GDL, (d) quarto GDL

Observa-se que, em todos os instantes de tempo e para todos os graus de liberdade, as curvas estão sobrepostas, denotando que resultados analíticos e numéricos são coincidentes. Assim, a metodologia implementada em MATLAB está devidamente validada para aplicação nas etapas seguintes deste trabalho.

6. MODELO NUMÉRICO-EXPERIMENTAL PARA A SIMULAÇÃO DAS AÇÕES DINÂMICAS DA CAMINHADA HUMANA

Neste capítulo, desenvolve-se o modelo de carga proposto neste trabalho, o qual tem como ponto de partida os modelos apresentados por Bachmann e Ammann (1987) e pela norma ISO 10137 (2007), previamente discutidos. O diferencial central do modelo de carga aqui proposto, que o torna mais realista e eficiente em relação aos modelos anteriores, reside na consideração dos sub-harmônicos da caminhada – não contemplados em modelos anteriores – e, sobretudo, na forma como são definidos os parâmetros da equação que rege o modelo. Enquanto os modelos de Bachmann e Amman (1987) e da ISO 10137 (2007) adotam parâmetros fixos, tabelados ou obtidos por meio de equações geralmente lineares, no modelo desenvolvido neste trabalho tais parâmetros são obtidos diretamente a partir de registros experimentais.

Cada registro experimental é aproximado matematicamente por meio de uma função matemática, cujos parâmetros ótimos são determinados pelo algoritmo metaheurístico *Circle-Inspired Optimization Algorithm* (CIOA). O conjunto desses parâmetros ótimos, definidos pelo CIOA para todos os registros experimentais analisados, é utilizado para compor um banco de dados robusto, o qual, posteriormente, é utilizado para o treinamento de um conjunto de redes neurais artificiais. Uma vez treinadas, as redes neurais são capazes de prever novos conjuntos de parâmetros para quaisquer valores de peso do pedestre e de frequência de caminhada, sendo esses dois últimos os únicos parâmetros de entrada requeridos durante a utilização do modelo.

A implementação do modelo de carga desenvolvido neste trabalho é descrita de forma detalhada ao longo das seções deste capítulo: A Seção 6.1 aborda os registros experimentais; a Seção 6.2 apresenta o processo de ajuste desses registros por meio do algoritmo metaheurístico CIOA, bem como a construção do banco de dados composto pelos parâmetros ajustados; a Seção 6.3 descreve a arquitetura e o treinamento da rede neural responsável pela geração das previsões necessárias ao funcionamento do modelo de carga; por fim, a seção 6.4 trata da aplicabilidade do modelo desenvolvido.

6.1 REGISTROS EXPERIMENTAIS

Conforme mencionado previamente na Seção 4.2 deste trabalho, 16 pedestres participaram dos registros experimentais. As acelerações de seus corpos, nas três direções, foram medidas para

diferentes frequências de caminhada utilizando o aplicativo *Phyphox*. Um exemplo de medição realizada pelo aplicativo é apresentado na Figura 6.1, onde a linha verde do primeiro gráfico refere-se às acelerações horizontais laterais, a linha azul do segundo gráfico às acelerações verticais (alvo deste trabalho) e a linha amarela do terceiro gráfico às acelerações horizontais longitudinais.

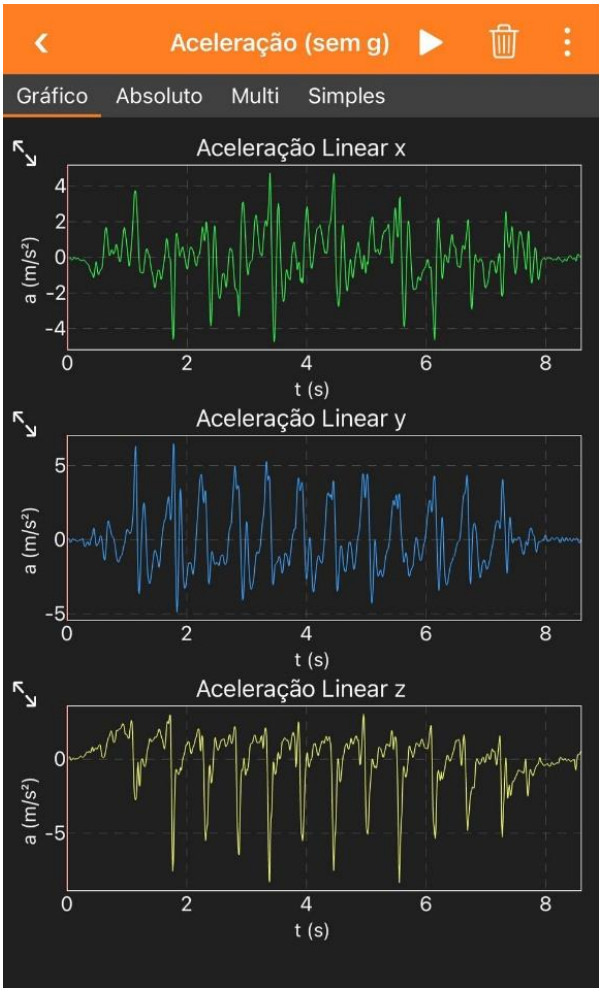


Figura 6.1 – Exemplo de registro utilizando o aplicativo *Phyphox*

Em seguida, os registros foram exportados para planilhas eletrônicas e arquivos de texto (*txt*), a fim de serem tratados e manipulados. É necessário descartar as partes iniciais e finais de cada registro, pois representam, respectivamente, instantes anteriores e posteriores ao período de movimento. Uma vez padronizados, com duração de 6 segundos, mantendo-se apenas a parte correspondente ao efetivo movimento da caminhada, a aceleração vertical de cada registro é convertida em força utilizando a Equação 6.1.

$$F_{Ped} = \left(g.m_{ped}\right) + \left(a_{ped}.m_{ped}\right) \tag{6.1}$$

O primeiro termo representa a parcela estática da força, sendo g a aceleração da gravidade e m_{ped} a massa do pedestre, em quilogramas. O segundo termo refere-se à parcela dinâmica da força, derivada das acelerações efetivamente medidas, sendo a_{ped} a aceleração vertical do corpo do pedestre, registrada durante a caminhada, seguindo de forma rigorosa a metodologia apresentada anteriormente.

Como resultado dessas medições e conversões de aceleração em força, cada pedestre gerou um conjunto de 24 registros, uma vez que foi estimulado a caminhar em oito frequências distintas, com três registros para cada frequência. É importante ressaltar que, embora os pedestres tenham sido estimulados a caminhar em frequências pré-determinadas, a partir de efeitos sonoros de um metrônomo, a frequência real da caminhada apresentou variações muitas vezes consideráveis. Alguns pedestres demonstraram facilidade em sincronizar seus passos com as batidas sonoras, independentemente da frequência, já outros enfrentaram maior dificuldade, especialmente nas frequências de caminhada mais elevadas.

A Figura 6.2 apresenta um mapeamento considerando os pesos dos pedestres (em Newtons) e as frequências (em Hertz) nos quais eles efetivamente caminharam. Nota-se que os dados se tornam mais esparsos nas frequências extremas, especialmente nas mais elevadas. Observa-se, também, que alguns pedestres enfrentaram dificuldades em caminhar em frequências superiores a 2,1 Hz, o que está de acordo com a distribuição de Matsumoto et al. (1972), previamente discutida neste trabalho nos Capítulos 2 e 3 (ver Figura 3.5).

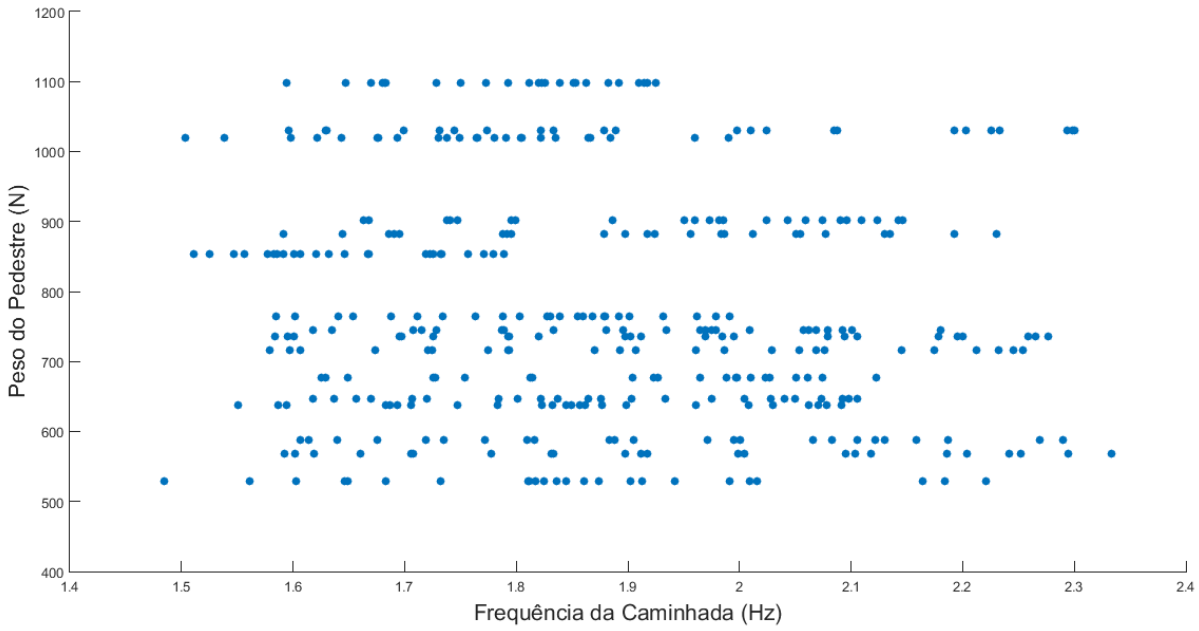


Figura 6.2 – Mapeamento dos registros experimentais

Para fins de exemplo, a Figura 6.3 apresenta cinco registros já manipulados, ou seja, com o recorte dos seis segundos correspondentes ao efetivo período de caminhada – valor cuja adoção será justificada na Seção 6.2 – e com a aceleração já convertida em força, conforme Equação 6.1 previamente apresentada. Esses registros correspondem a cinco pedestres diferentes, caminhando em frequências distintas.

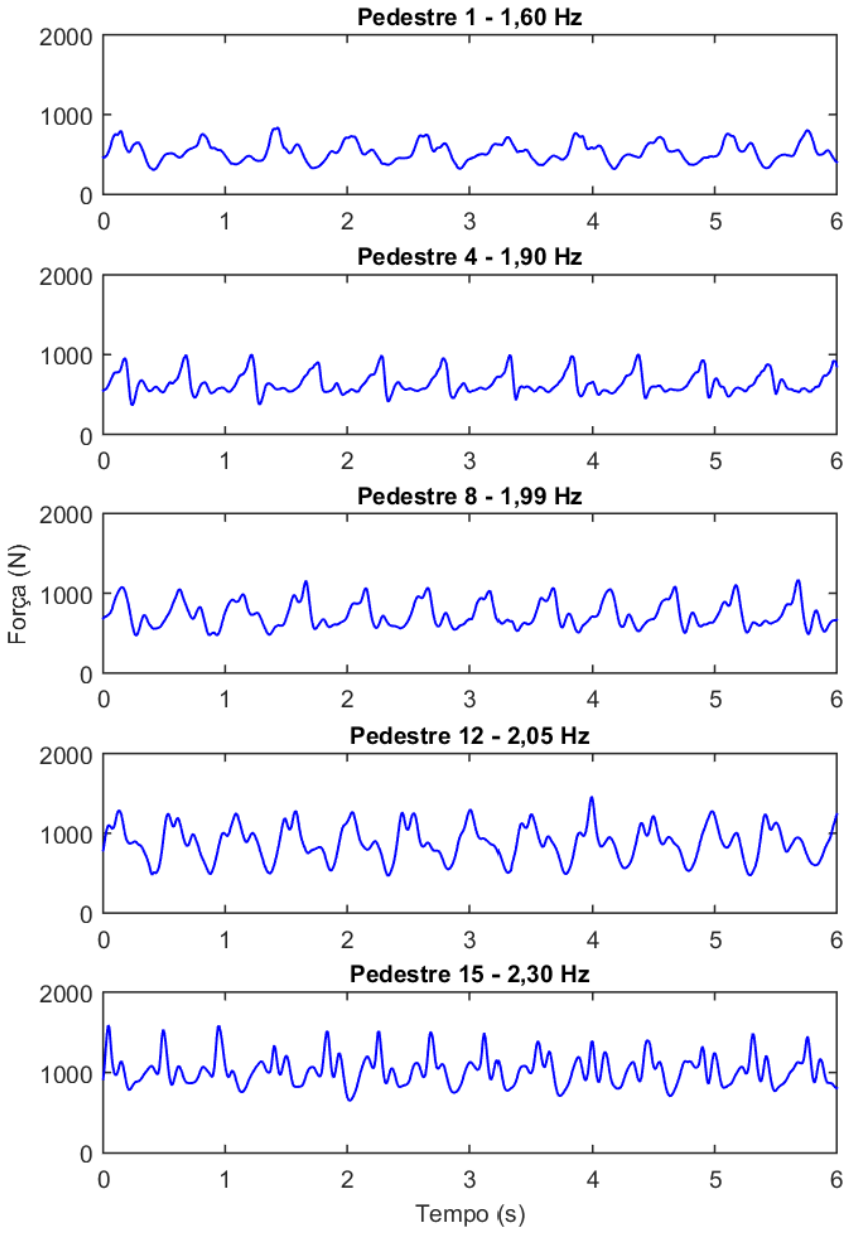


Figura 6.3 – Registros de cinco pedestres diferentes caminhando em frequências distintas

É importante destacar que cada gráfico apresenta curvas com formatos muito diferentes entre si, evidenciando as variações interpedestre da caminhada humana. Essas diferenças são inicialmente decorrentes da diferença entre massas e frequências de caminhada de cada pedestre, mas, sobretudo, demonstram o estilo próprio e único de caminhar de cada pessoa. Da mesma forma, observa-se que cada passo – ou ciclo – de cada registro é único, ou seja, um mesmo pedestre não apresenta carregamento com comportamento idêntico em dois passos diferentes. Além disso, há certa dificuldade em manter frequência, velocidade e comprimento de passo constantes ao longo do tempo; essas variações são chamadas de variações intrapedestre.

Todavia, ainda observando a Figura 6.3, verificam-se padrões mais ou menos bem definidos em cada registro, de modo que as diferenças entre cada ciclo de um mesmo registro são relativamente pequenas. São esses padrões que o modelo proposto neste trabalho deve ser capaz de captar, por meio do processo de generalização das redes neurais artificiais, que, quando alimentadas com dados consistentes e bem definidos, são capazes de prever novos padrões para outras combinações de parâmetros de entrada.

Quando os registros são aproximados por funções matemáticas harmônicas, compostas pela soma de harmônicos e sub-harmônicos da caminhada humana – procedimento que será adotado a partir da próxima seção deste trabalho (Seção 6.2) – os parâmetros responsáveis pelas alterações na intensidade dos picos e na forma do carregamento são, respectivamente, as **amplitudes** e os **ângulos de fase** associados a cada harmônico e sub-harmônico.

6.2 APROXIMAÇÃO DOS REGISTROS POR FUNÇÕES HARMÔNICAS POR MEIO DO AJUSTE DE PARÂMETROS VIA CIOA

Para a formulação do modelo de carga proposto neste trabalho, assume-se que a força induzida pela caminhada humana, F_p, pode ser aproximada por meio da Equação 6.2

$$\begin{aligned} F_p(t) = G &+ \Delta G_{H1} sen(2.\pi.f_s.t) + \Delta G_{H2} sen(4.\pi.f_s.t - \varphi_{H2}) \\ &+ \Delta G_{H3} sen(6.\pi.f_s.t - \varphi_{H3}) + \Delta G_{H4} sen(8.\pi.f_s.t - \varphi_{H4}) \\ &+ \Delta G_{H5} sen(10.\pi.f_s.t - \varphi_{H5}) + \Delta G_{S1} sen(1.\pi.f_s.t - \varphi_{S1}) \\ &+ \Delta G_{S2} sen(3.\pi.f_s.t - \varphi_{S2}) + \Delta G_{S3} sen(5.\pi.f_s.t - \varphi_{S3}) \\ &+ \Delta G_{S4} sen(7.\pi.f_s.t - \varphi_{S4}) + \Delta G_{S5} sen(9.\pi.f_s.t - \varphi_{S5}) \end{aligned} \quad (6.2)$$

em que G é o peso do pedestre, em Newtons; ΔG_{Hi} são as amplitudes das parcelas de carga associadas aos cinco primeiros harmônicos da caminhada; φ_{Hi} são os ângulos de fase correspondentes a cada harmônico; ΔG_{Si} são as amplitudes das parcelas de carga associadas aos cinco primeiros sub-harmônicos da caminhada; φ_{Si} são os ângulos de fase correspondentes a cada sub-harmônico; e f_s é a frequência natural da caminhada.

A Equação 6.2 constitui uma versão expandida e modificada da Equação 3.15, originalmente proposta por Bachmann e Ammann (1987), a qual foi adaptada posteriormente pela ISO 10137 (2007). Enquanto a formulação original considera apenas os três primeiros harmônicos, e a versão da ISO contempla os cinco primeiros harmônicos, o modelo desenvolvido neste trabalho inclui, além dos cinco primeiros harmônicos, os cinco primeiros sub-harmônicos da caminhada humana.

Além disso, no modelo proposto, os parâmetros ΔG_{Hi}, ΔG_{Si}, φ_{Hi} e φ_{Si} não são definidos por valores fixos, tabelados ou calculados por meio de equações lineares. Esses parâmetros são estimados por previsões realizadas por redes neurais artificiais, treinadas a partir de parâmetros previamente ajustados pelo algoritmo metaheurístico *Circle-Inspired Optimization Algorithm* (CIOA), conforme detalhado a seguir.

Utilizando o CIOA, todos os registros experimentais foram aproximados por funções do tipo descrito na Equação 6.2. O algoritmo foi responsável por encontrar os parâmetros ΔG_{Hi}, ΔG_{Si}, φ_{Hi} e φ_{Si} que minimizam a função objetivo apresentada na Equação 6.3, a qual representa o erro entre os dados experimentais e os dados modelados.

$$Minimize\text{:}\quad \frac{\sum_1^{6000}\left(F_{Ped}(t_i)-F_p(t_i)\right)^2}{6000} \quad , \quad i = 0{,}001, 0{,}002, \ldots, 6 \tag{6.3}$$

na qual F_{Ped} é a força obtida experimentalmente ao longo de um intervalo de 6 segundos, discretizado em passos de 0,001 s, e F_p corresponde à força estimada pela Equação 6.2, que aproxima o registro experimental com a mesma duração e discretização.

Os parâmetros próprios do CIOA foram ajustados como $\theta = 17°$ e $Glob_{It} = 0{,}85$, que são valores padrões do algoritmo. Para o processo de otimização foram considerados 250 agentes de pesquisa e 800 iterações, totalizando 200000 avaliações da função objetivo associada a cada um dos registros.

Quanto mais eficiente for o processo de otimização da função objetivo apresentada na Equação 6.3, menor será o erro – ou diferença – entre o registro experimental e a curva aproximada. Os parâmetros ΔG_{Hi}, ΔG_{Si}, φ_{Hi} e φ_{Si} que minimizam a equação, para cada registro composto por um conjunto de frequência de caminhada f e peso do pedestre G, são salvos em um banco de dados que será discutido posteriormente.

Os cinco registros previamente apresentados na Figura 6.3 são revisitados na Figura 6.4 (curvas azuis), agora acompanhados das respectivas aproximações obtidas por meio do CIOA (curvas vermelhas). As aproximações de todos os registros experimentais, bem como os próprios registros, referentes aos 16 pedestres considerados no presente trabalho para composição do banco de dados, são apresentadas no conjunto de gráficos disponível nas **figuras** do **Apêndice A**.

Ao observar os gráficos detalhados do Apêndice A, é possível notar claramente como as características – especialmente a amplitude – de cada registro se modificam com o aumento da frequência natural de caminhada de um mesmo pedestre. Ademais, observa-se de maneira incontestável como os carregamentos modificam suas características de amplitude e de forma para cada pedestre considerado. Essas características são regidas matematicamente pelos parâmetros Δ e φ, quando a carga é modelada através da Equação 6.2.

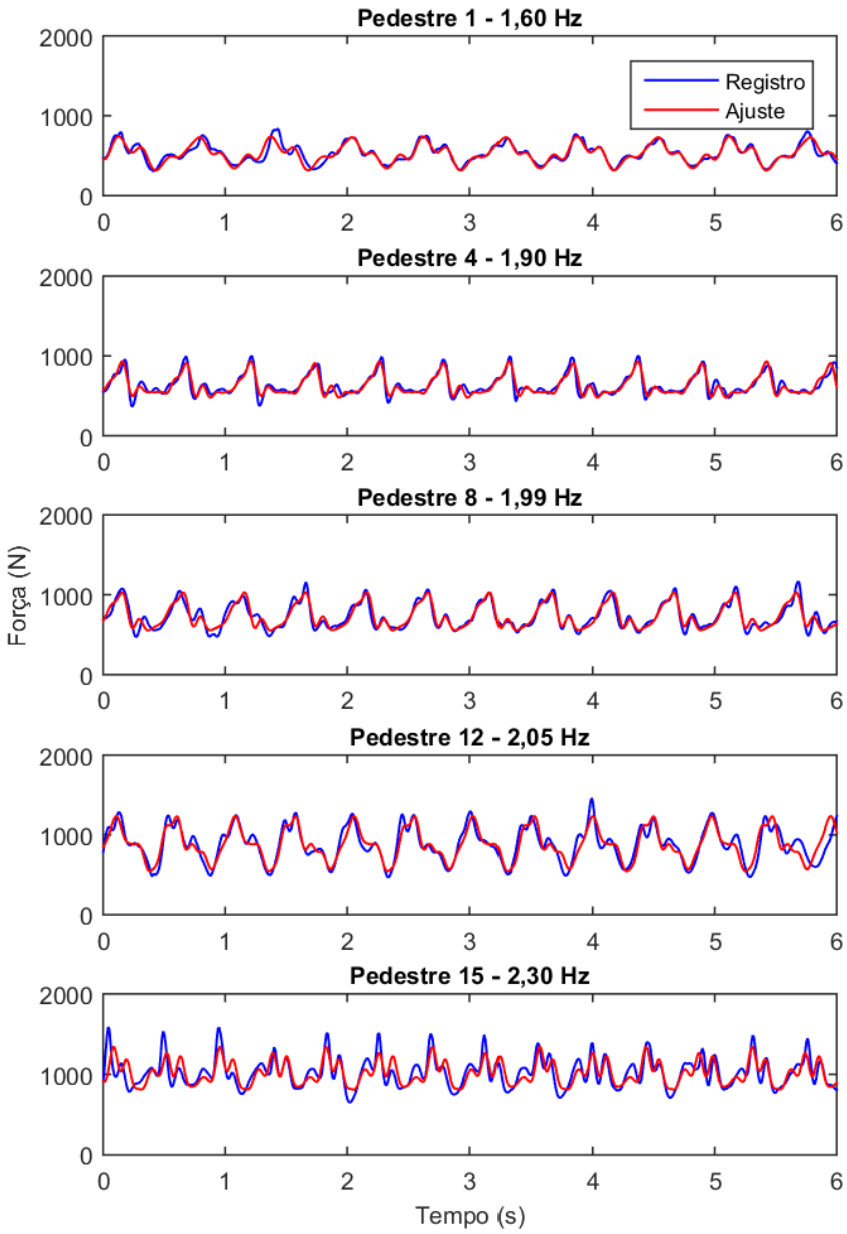


Figura 6.4 – Comparação entre registros experimentais e aproximações por meio do CIOA para cinco pedestres diferentes

A análise da Figura 6.4 indica que o grau de aproximação entre o registro experimental e o ajuste obtido por meio do CIOA varia conforme as características do carregamento de cada registro. Quando o registro analisado corresponde a uma caminhada mais regular, na qual todos os passos apresentam carregamentos bastante semelhantes entre si, o ajuste tende a apresentar elevada precisão em relação ao registro experimental, como observado, por exemplo, no caso do Pedestre 1.

Por outro lado, pedestres cujos registros de carregamento são mais irregulares, apresentando maiores variações intrapedestre – tais como diferenças significativas entre os carregamentos de cada passo ou variações na frequência instantânea de caminhada – tendem a apresentar ajustes com menor precisão, ou seja, com maior erro associado ao processo de otimização descrito anteriormente.

Adicionalmente, a Figura 6.4 justifica a adoção de um intervalo de tempo de 6 segundos para o recorte dos registros, em função das diferenças entre os passos ou ciclos do carregamento. Considerar intervalos de tempo muito curtos, correspondentes a um único passo, por exemplo, resultaria em ajustes muito precisos, porém incapazes de captar o padrão geral de caminhada de um dado pedestre para uma frequência específica, visto que o passo analisado pode não ser representativo dos demais. Por outro lado, aproximações derivadas de registros de longa duração tendem a uniformizar o ajuste, uma vez que a função ajustada passaria a representar, de forma média, muitos passos que diferem entre si, resultando em uma generalização simplista. Assim, o uso de registros com duração de 6 segundos garante um equilíbrio adequado entre a captação dos padrões gerais de caminhada de cada pedestre, para cada frequência, e certa preservação de aleatoriedades inerentes a cada passo individual da caminhada.

As figuras de 6.5 a 6.9 apresentam, a nível de exemplo, a convergência do processo de otimização, por meio do CIOA, para a aproximação dos cinco registros destacados neste capítulo.

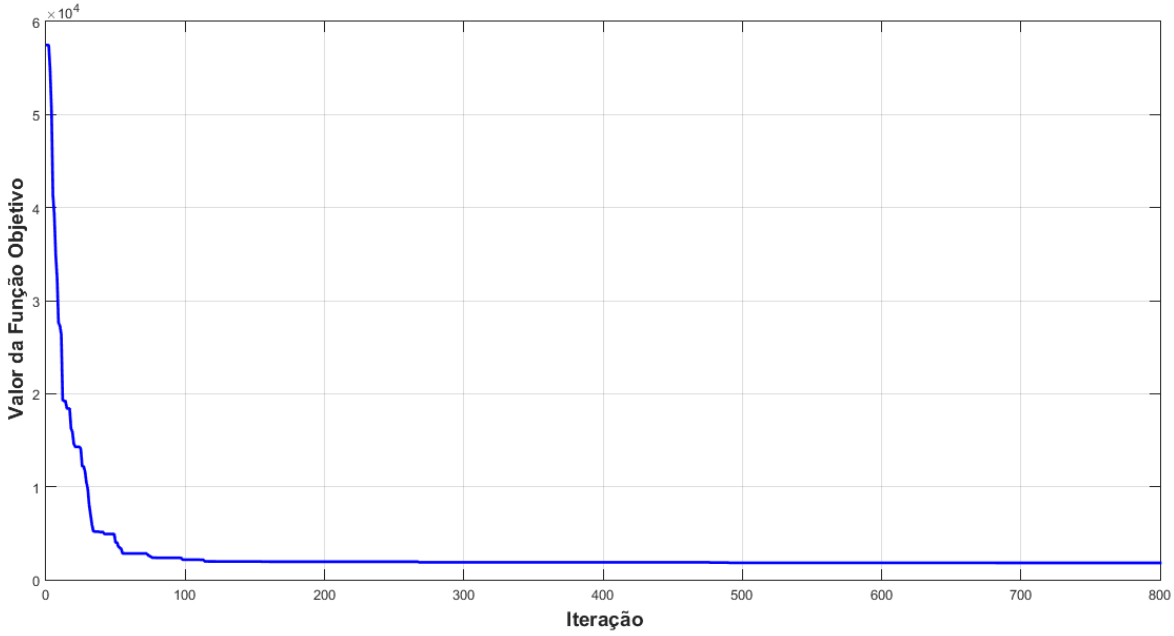


Figura 6.5 – Convergência para o ajuste do registro do pedestre 1 caminhando a 1,60 Hz

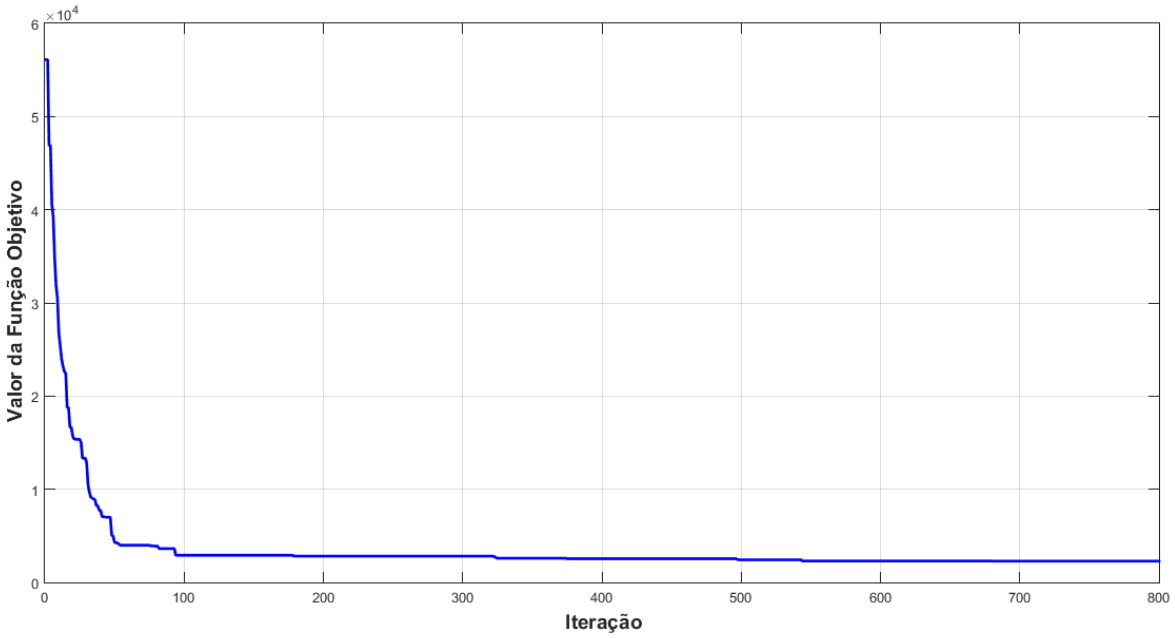


Figura 6.6 – Convergência para o ajuste do registro do pedestre 4 caminhando a 1,90 Hz

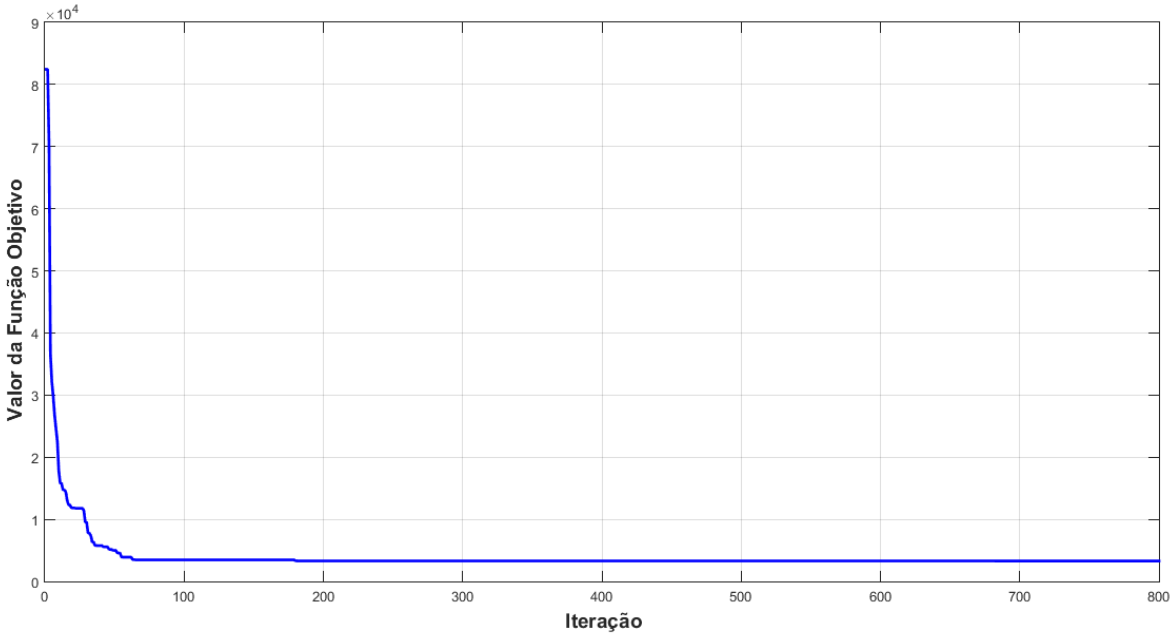


Figura 6.7 – Convergência para o ajuste do registro do pedestre 8 caminhando a 1,99 Hz

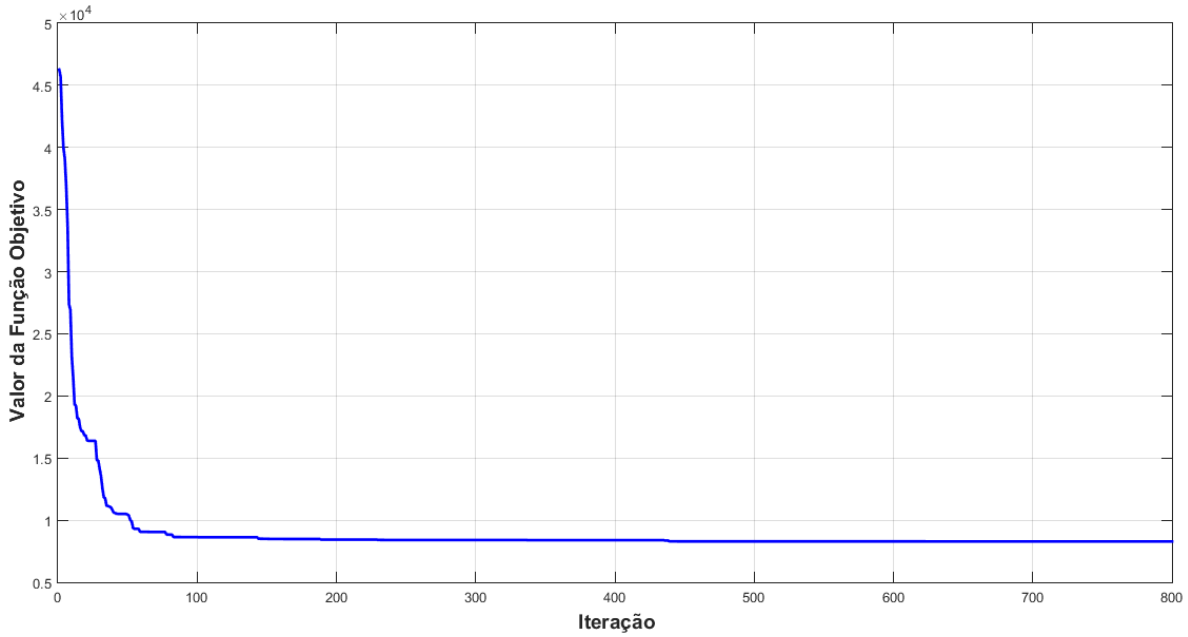


Figura 6.8 – Convergência para o ajuste do registro do pedestre 12 caminhando a 2,05 Hz

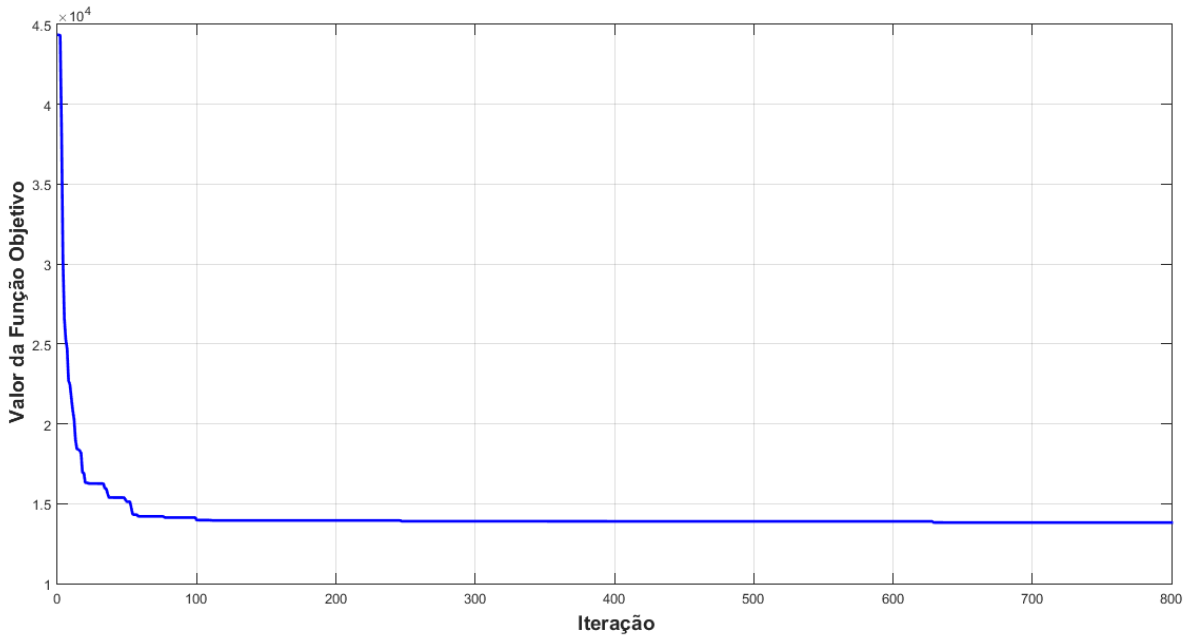


Figura 6.9 – Convergência para o ajuste do registro do pedestre 15 caminhando a 2,30 Hz

Pode-se observar, em todos os gráficos apresentados, que o processo de otimização por meio do algoritmo CIOA convergiu nas primeiras centenas de iterações consideradas.

Nas Tabela 6.1 são apresentados os parâmetros obtidos pelo CIOA para harmônicos e sub-harmônicos, considerando os cinco registros destacados neste capítulo. Esses valores, quando aplicados na Equação 6.2, geram as aproximações ilustradas na Figura 6.4. Todos os parâmetros

de ajuste, Δ e φ, associados a harmônicos e sub-harmônicos de todos os registros são apresentados nas **tabelas** do **Apêndice A**.

Tabela 6.1 – Parâmetros ótimos para o ajuste de registros experimentais

Parâmetros	Pedestre 1 54 kg 1,60 Hz	Pedestre 4 65 kg 1,90 Hz	Pedestre 8 75 kg 1,99 Hz	Pedestre 12 90 kg 2,05 Hz	Pedestre 16 105 kg 2,30 Hz
ΔG_{H1}	141,40	135,14	189,12	248,22	156,00
ΔG_{H2}	10,54	74,29	61,27	105,33	21,35
ΔG_{H3}	61,25	47,32	49,34	37,49	87,02
ΔG_{H4}	5,10	48,78	47,65	26,21	65,55
ΔG_{H5}	6,61	27,47	14,87	17,50	15,42
ΔG_{S1}	3,73	10,85	8,06	9,97	2,57
ΔG_{S2}	2,58	3,77	8,60	35,75	39,83
ΔG_{S3}	17,98	11,89	2,54	17,41	15,32
ΔG_{S4}	26,38	9,51	1,50	2,90	10,14
ΔG_{S5}	3,88	8,39	1,19	28,39	2,39
φ_{H2}	2,34	1,54	1,35	0,15	3,47
φ_{H3}	2,34	3,52	3,99	3,43	1,71
φ_{H4}	5,94	6,28	0,72	4,63	3,33
φ_{H5}	2,09	2,42	3,32	0,33	5,58
φ_{S1}	3,18	6,26	2,42	1,03	2,83
φ_{S2}	3,30	4,54	1,15	2,36	0,99
φ_{S3}	0,21	3,46	4,21	1,88	1,76
φ_{S4}	2,56	6,28	1,95	2,67	0,32
φ_{S5}	3,71	4,20	2,57	3,11	3,62

A Figura 6.10 promove um mapeamento da relação entre os parâmetros $\Delta G_{Hi}/G$ e as frequências de caminhada. Observa-se, para o primeiro harmônico, uma relação direta entre o parâmetro ajustado $\Delta G_{H1}/G$ e f, de modo que ambos são diretamente proporcionais: à medida em que se aumenta a frequência de caminhada, a relação $\Delta G_{H1}/G$ também aumenta. Não são observadas relações diretas entre a frequência natural dos passos e as amplitudes associadas aos demais harmônicos. O que pode ser destacado é o decréscimo de tais amplitudes, de forma geral, em harmônicos superiores.

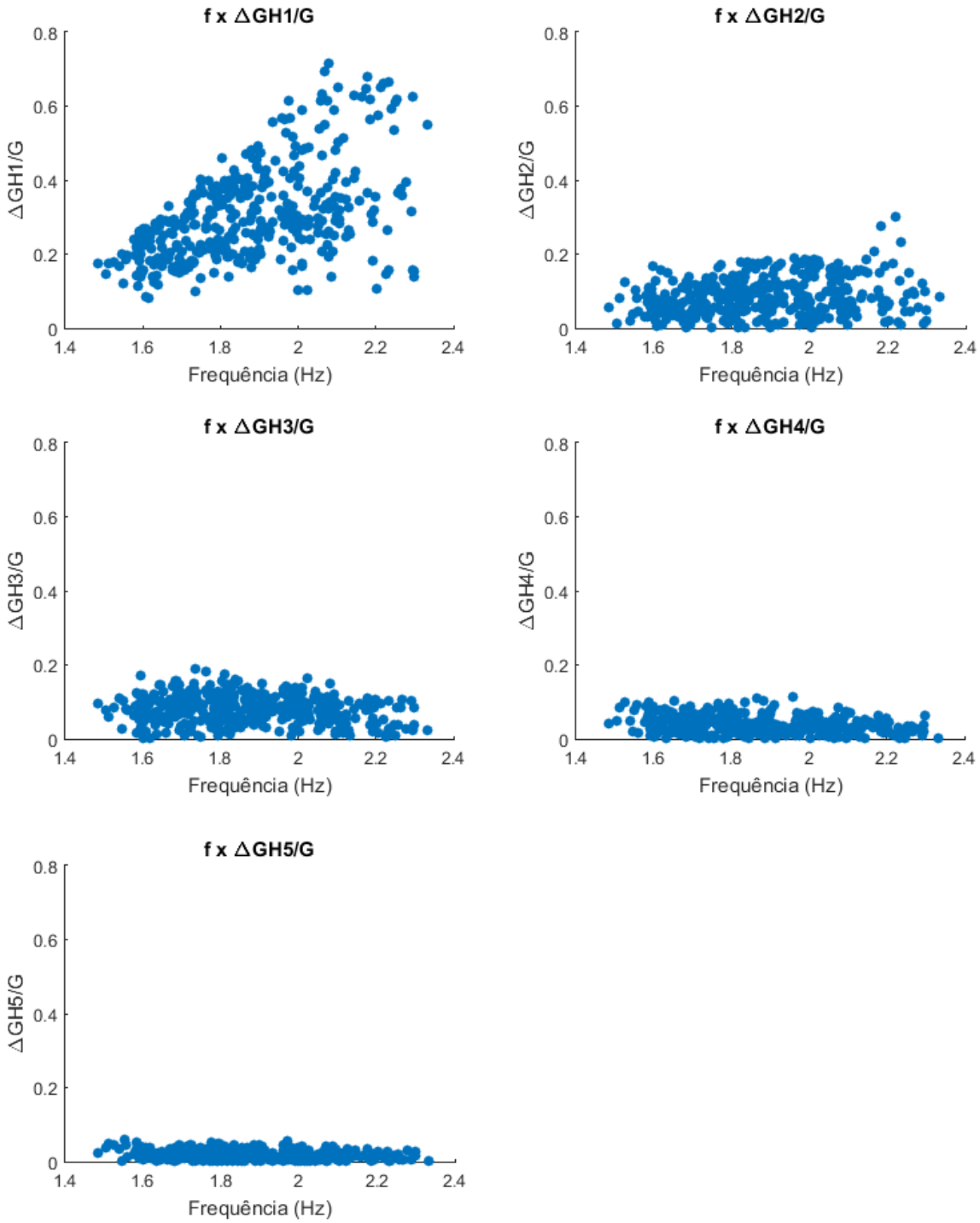


Figura 6.10 – Relação entre f e $\Delta G_{Hi}/G$

Na Figura 6.11 é apresentado o mapeamento para as amplitudes associadas aos sub-harmônicos, relacionando os parâmetros $\Delta G_{Si}/G$ com as frequências de caminhada. Não foi observada relação direta entre essas grandezas. Em comparação com os dados da Figura 6.10, nota-se que

as amplitudes associadas aos sub-harmônicos são menores do que aquelas associadas aos harmônicos.

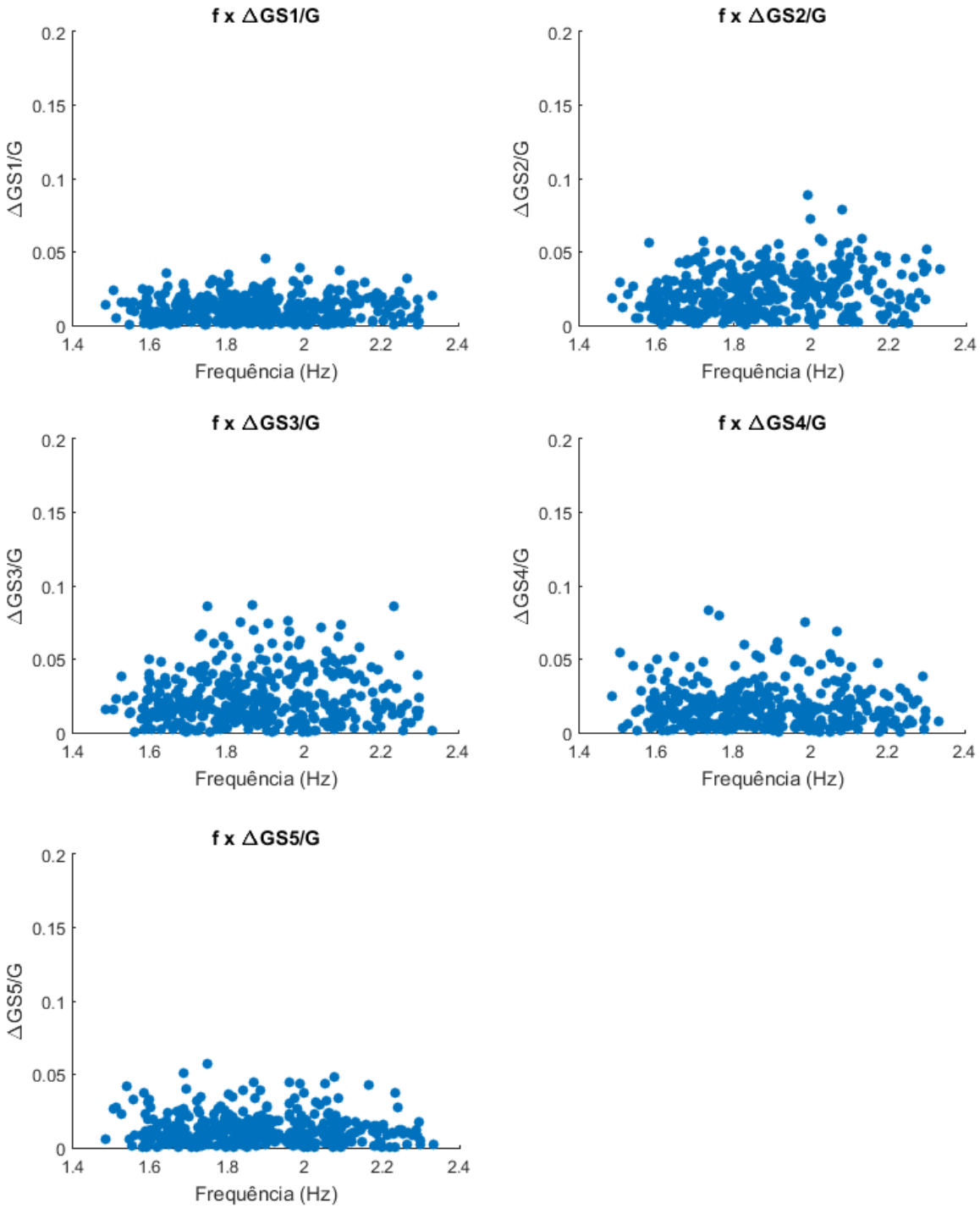


Figura 6.11 – Relação entre f e $\Delta G_{Si}/G$

A Figura 6.12 apresenta o mapeamento da relação entre a frequência da caminhada e os ângulos de fase associados aos harmônicos φ_{Hi}. Nota-se que há uma concentração de parâmetros φ_{H2}

no segundo e terceiro quadrantes da circunferência trigonométrica, enquanto o parâmetro φ_{H3} apresenta valores predominantemente no primeiro e quarto quadrantes.

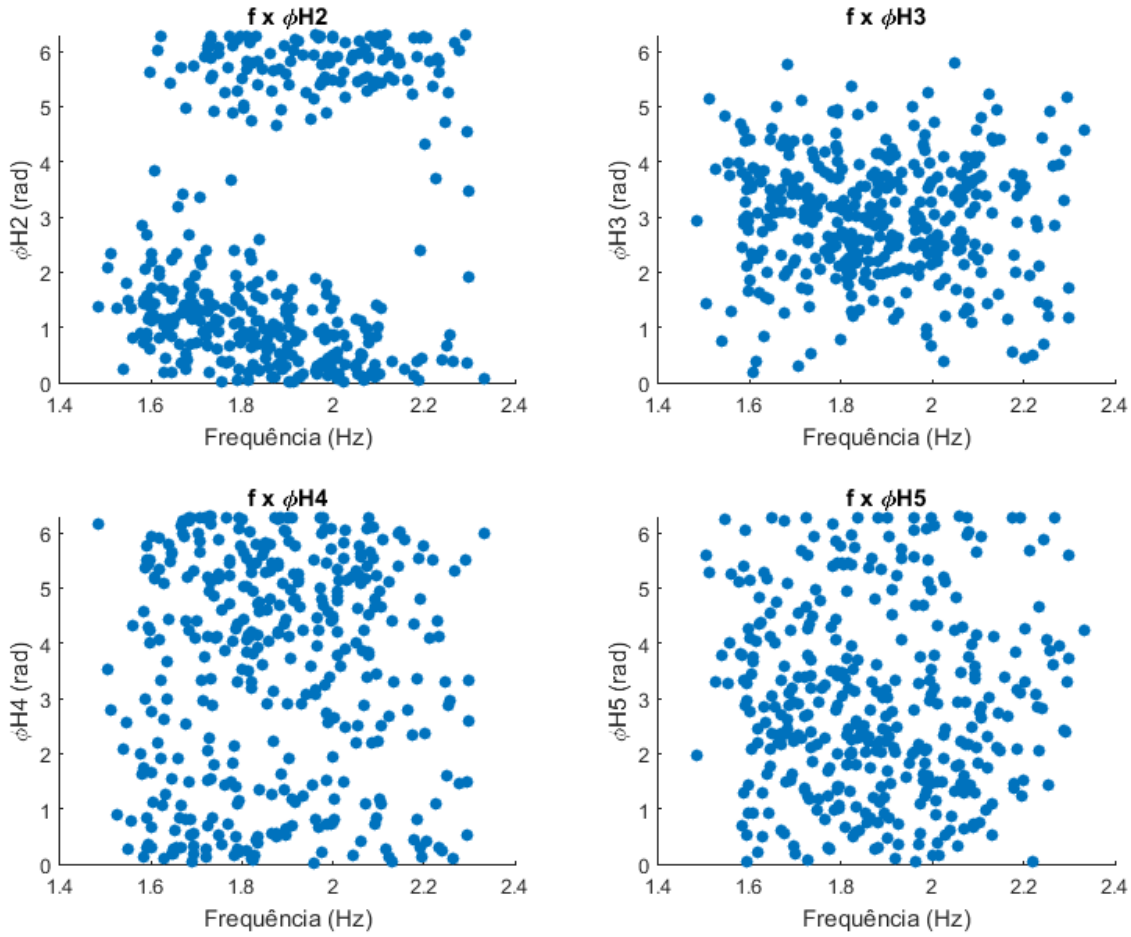


Figura 6.12 – Relação entre f e φ_{Hi}

Por fim, a Figura 6.13 apresenta o mapeamento da relação entre a frequência da caminhada e os ângulos de fase associados aos sub-harmônicos para cada registro realizado. Nenhum padrão específico direto foi observado entre essas grandezas.

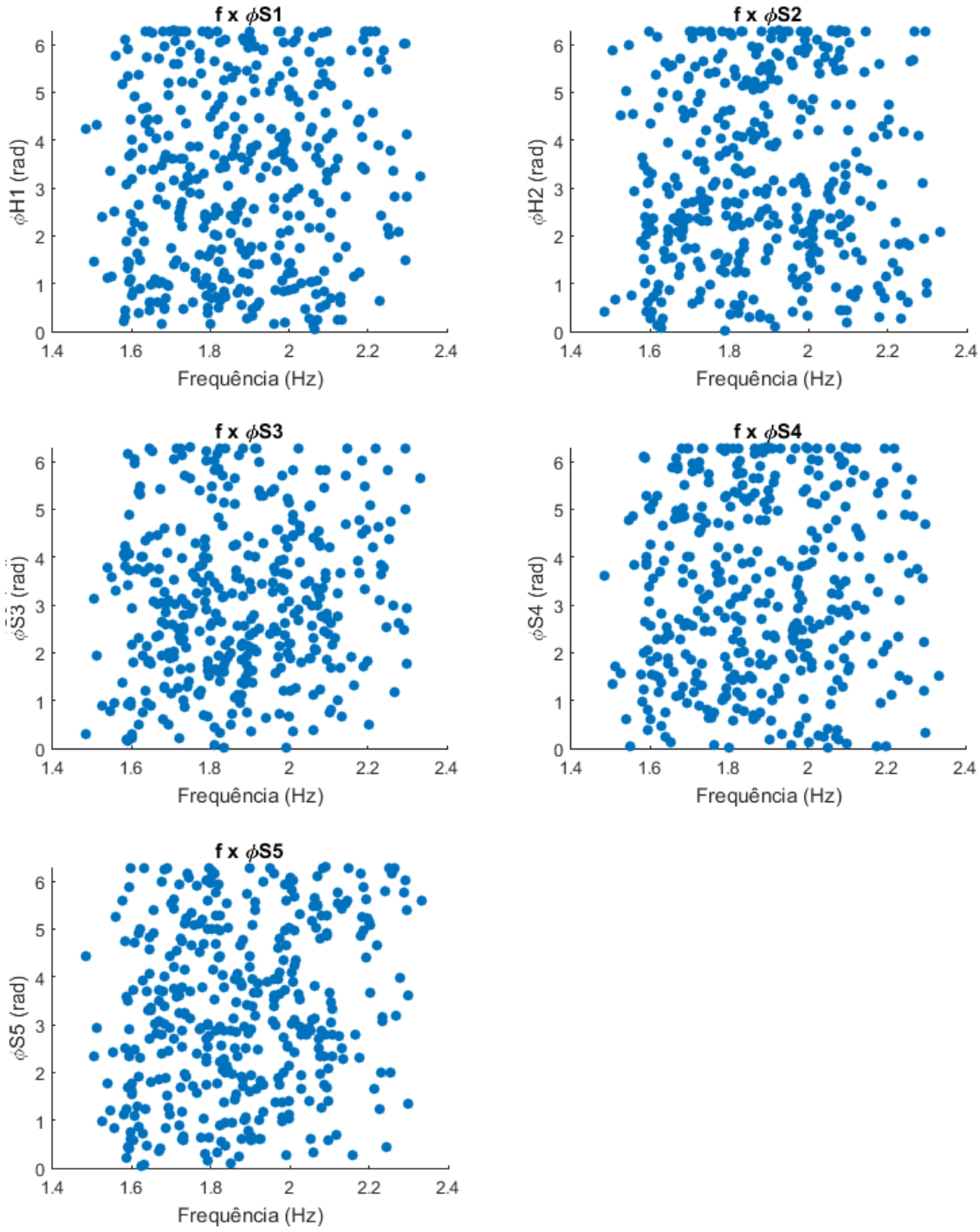


Figura 6.13 – Relação entre f e φ_{Si}

Mapeamentos dos parâmetros ajustados pelo CIOA, organizados em gráficos individuais para cada pedestre, podem ser encontrados no **Apêndice B**. Nestas figuras, pode-se observar com maior clareza as relações destacadas anteriormente, especialmente para as amplitudes

associadas ao primeiro harmônico, bem como para os ângulos de fase associados ao segundo e ao terceiro harmônico.

A Figura 6.14 apresenta uma matriz de correlação entre todos os parâmetros da caminhada ajustados pelo CIOA e utilizados na elaboração do modelo de carga por meio de redes neurais artificiais.

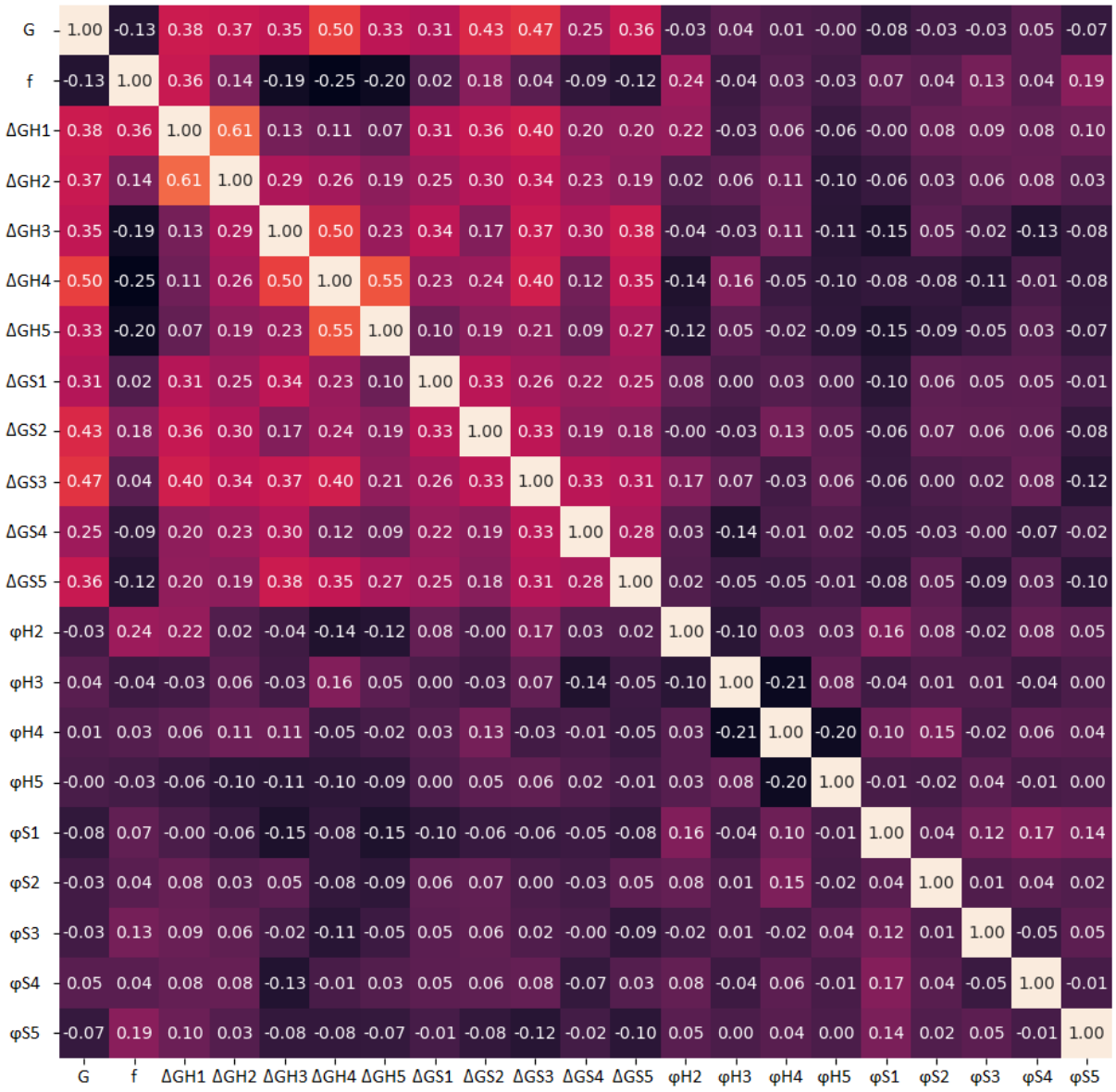


Figura 6.14 – Matriz de correlação entre parâmetros da caminhada ajustados pelo CIOA

Quanto mais clara a cor de cada elemento da matriz, ou mais próximo de 1 for o seu valor, maior será a correlação direta entre as duas grandezas envolvidas. Analisando-se a figura, observa-se que, a partir dos parâmetros de entrada, G e f – correspondentes ao peso do pedestre e à frequência da caminhada –, os parâmetros Δ são os que apresentam as maiores correlações

com esses parâmetros de entrada. Por outro lado, nota-se que os parâmetros Δ praticamente não apresentam correlação direta com os parâmetros φ.

Assim, por apresentarem relações diretas relevantes com os parâmetros de entrada, é conveniente que, no processo de previsão via redes neurais, os parâmetros Δ sejam estimados inicialmente, a partir de entradas que sejam compostas apenas pelos parâmetros iniciais e/ou por parâmetros Δ associados a harmônicos e sub-harmônicos de ordem inferior àquele que se deseja prever.

6.3 IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO POR MEIO DE REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

Conforme discutido anteriormente na Seção 6.2, o CIOA é capaz de determinar os parâmetros ótimos para cada registro experimental da caminhada humana. Uma vez obtidos, o conjunto total desses parâmetros pode ser utilizado, juntamente com o peso do pedestre e a frequência da caminhada, como banco de dados para o treinamento de um conjunto de redes neurais artificiais.

A rede é construída com uma arquitetura encadeada, composta por dezenove etapas, de modo que a saída de cada etapa é incorporada ao conjunto de entradas da etapa subsequente. Na etapa 1, as únicas entradas da rede neural são a frequência da caminhada f e o peso do pedestre G, e a saída corresponde ao parâmetro ΔG_{H1}, que representa a amplitude associada ao primeiro harmônico. Já na etapa 2, uma nova rede é treinada, na qual o parâmetro de saída da etapa anterior passa a compor o conjunto de entradas, que passam a ser f, G e ΔG_{H1}, enquanto a saída é a amplitude associada ao segundo harmônico, ΔG_{H2}.

Esse processo encadeado é repetido sucessivamente ao longo de dezenove etapas, até que todos os parâmetros a serem previstos sejam considerados, uma vez, como parâmetro de saída. O uso de uma abordagem encadeada de redes se justifica especialmente na fase de aplicação do modelo para previsões, após o treinamento. Os parâmetros associados à caminhada humana só poderão ser previstos a partir de parâmetros já conhecidos. Todavia, os únicos parâmetros previamente conhecidos para qualquer situação são o peso do pedestre e a frequência de passos. Sendo assim, os demais parâmetros deverão ser previstos um a um. O encadeamento e a ordem das etapas da rede são esquematizados de forma detalhada na Tabela 6.2.

Tabela 6.2 – Esquema das etapas das Redes Neurais Artificiais

Etapa	Entradas	Saídas
1	f e G	ΔG_{H1}
2	f, G e ΔG_{H1}	ΔG_{H2}
3	f, G, ΔG_{H1} e ΔG_{H2}	ΔG_{H3}
4	f, G, ΔG_{H1}, ΔG_{H2} e ΔG_{H3}	ΔG_{H4}
5	f, G, ΔG_{H1}, ΔG_{H2}, ΔG_{H3} e ΔG_{H4}	ΔG_{H5}
6	f, G, ΔG_{H1}, ΔG_{H2}, ΔG_{H3}, ΔG_{H4} e ΔG_{H5}	ΔG_{S1}
7	f, G, ΔG_{H1}, ΔG_{H2}, ΔG_{H3}, ΔG_{H4}, ΔG_{H5} e ΔG_{S1}	ΔG_{S2}
8	f, G, ΔG_{H1}, ΔG_{H2}, ΔG_{H3}, ΔG_{H4}, ΔG_{H5}, ΔG_{S1} e ΔG_{S2}	ΔG_{S3}
9	f, G, ΔG_{H1}, ΔG_{H2}, ΔG_{H3}, ΔG_{H4}, ΔG_{H5}, ΔG_{S1}, ΔG_{S2} e ΔG_{S3}	ΔG_{S4}
10	f, G, ΔG_{H1}, ΔG_{H2}, ΔG_{H3}, ΔG_{H4}, ΔG_{H5}, ΔG_{S1}, ΔG_{S2}, ΔG_{S3} e ΔG_{S4}	ΔG_{S5}
11	f, G, ΔG_{H1}, ΔG_{H2}, ΔG_{H3}, ΔG_{H4}, ΔG_{H5}, ΔG_{S1}, ΔG_{S2}, ΔG_{S3}, ΔG_{S4} e ΔG_{S5}	φ_{H2}
12	f, G, ΔG_{H1}, ΔG_{H2}, ΔG_{H3}, ΔG_{H4}, ΔG_{H5}, ΔG_{S1}, ΔG_{S2}, ΔG_{S3}, ΔG_{S4}, ΔG_{S5} e φ_{H2}	φ_{H3}
13	f, G, ΔG_{H1}, ΔG_{H2}, ΔG_{H3}, ΔG_{H4}, ΔG_{H5}, ΔG_{S1}, ΔG_{S2}, ΔG_{S3}, ΔG_{S4}, ΔG_{S5}, φ_{H2} e φ_{H3}	φ_{H4}
14	f, G, ΔG_{H1}, ΔG_{H2}, ΔG_{H3}, ΔG_{H4}, ΔG_{H5}, ΔG_{S1}, ΔG_{S2}, ΔG_{S3}, ΔG_{S4}, ΔG_{S5}, φ_{H2}, φ_{H3} e φ_{H4}	φ_{H5}
15	f, G, ΔG_{H1}, ΔG_{H2}, ΔG_{H3}, ΔG_{H4}, ΔG_{H5}, ΔG_{S1}, ΔG_{S2}, ΔG_{S3}, ΔG_{S4}, ΔG_{S5}, φ_{H2}, φ_{H3}, φ_{H4} e φ_{H5}	φ_{S1}
16	f, G, ΔG_{H1}, ΔG_{H2}, ΔG_{H3}, ΔG_{H4}, ΔG_{H5}, ΔG_{S1}, ΔG_{S2}, ΔG_{S3}, ΔG_{S4}, ΔG_{S5}, φ_{H2}, φ_{H3}, φ_{H4}, φ_{H5} e φ_{S1}	φ_{S2}
17	f, G, ΔG_{H1}, ΔG_{H2}, ΔG_{H3}, ΔG_{H4}, ΔG_{H5}, ΔG_{S1}, ΔG_{S2}, ΔG_{S3}, ΔG_{S4}, ΔG_{S5}, φ_{H2}, φ_{H3}, φ_{H4}, φ_{H5}, φ_{S1} e φ_{S2}	φ_{S3}
18	f, G, ΔG_{H1}, ΔG_{H2}, ΔG_{H3}, ΔG_{H4}, ΔG_{H5}, ΔG_{S1}, ΔG_{S2}, ΔG_{S3}, ΔG_{S4}, ΔG_{S5}, φ_{H2}, φ_{H3}, φ_{H4}, φ_{H5}, φ_{S1}, φ_{S2} e φ_{S3}	φ_{S4}
19	f, G, ΔG_{H1}, ΔG_{H2}, ΔG_{H3}, ΔG_{H4}, ΔG_{H5}, ΔG_{S1}, ΔG_{S2}, ΔG_{S3}, ΔG_{S4}, ΔG_{S5}, φ_{H2}, φ_{H3}, φ_{H4}, φ_{H5}, φ_{S1}, φ_{S2}, φ_{S3} e φ_{S4}	φ_{S5}

Observa-se, na Tabela 6.2, que nas primeiras cinco etapas os dados de saída correspondem às amplitudes associadas aos harmônicos da caminhada; nas etapas 6 a 10, as saídas referem-se às amplitudes associadas aos sub-harmônicos; nas etapas 11 a 14, as saídas correspondem aos ângulos de fase associados a harmônicos; e, por fim, nas etapas 15 a 19 as saídas são os ângulos de fase associados aos sub-harmônicos. A ordem de previsões encadeadas leva em consideração tanto a importância de cada parâmetro quanto o grau de correlação existente entre eles.

Em relação à implementação da rede neural artificial, alguns detalhes preliminares foram fornecidos no Capítulo de metodologia, mais especificamente na Seção 4.4. Nesta seção, são apresentadas informações adicionais e mais detalhadas.

Para todas as etapas de previsão, as redes utilizadas são do tipo *Feedforward Neural Network*, na forma de *Multilayer Perceptron* (MLP), com treinamento realizado pelo algoritmo de Regularização Bayesiana, (*Bayesian Regularization*), implementado no MATLAB por meio da função ***trainbr***.

Esse algoritmo, conforme já mencionado no capítulo de metodologia (Seção 4.4), apresenta vantagens relevantes para o conjunto de dados utilizado no presente trabalho, tais como: não requerer um conjunto de dados de validação, reduzindo o risco de *overfitting* (situação em que a rede apresenta baixo erro durante o treinamento, mas não é capaz de realizar generalizações adequadas para dados fora da amostra); adequação a bases de dados de tamanho limitado; e incorporação automática de uma penalização associada aos pesos da rede.

Os parâmetros de treinamento, utilizados em todas as etapas, são apresentados na Tabela 6.3

Tabela 6.3 – Parâmetros de treinamento

Parâmetro de treinamento	Valor adotado
Número máximo de épocas	1000
Critério de parada por erro	10^{-6}
Parâmetro de regularização inicial (μ)	$0{,}001$
Fator de redução do parâmetro μ	$0{,}1$
Fator de aumento do parâmetro μ	10
Valor máximo permitido para o parâmetro μ	10^{10}

Na Tabela 6.4 são apresentados os dados referentes à arquitetura das redes neurais utilizadas nas dezenove etapas de treinamento, sendo indicados o número de camadas ocultas, a

quantidade de neurônios em cada camada e a divisão dos dados entre amostras de treinamento e de teste. Os valores adotados em cada etapa foram definidos de forma empírica. Para isso, cada rede foi treinada diversas vezes, variando-se um ou mais valores dos parâmetros da arquitetura, até a obtenção do melhor desempenho possível, buscando equilíbrio entre precisão e custo computacional.

Tabela 6.4 – Arquitetura das etapas das Redes Neurais Artificiais

Etapa	Número de Camadas Ocultas	Número de Neurônios por camada oculta	Amostras para Treinamento	Amostras para Teste
1	2	12 e 7	80%	20%
2	2	12 e 7	80%	20%
3	2	12 e 7	80%	20%
4	2	12 e 7	80%	20%
5	2	12 e 7	80%	20%
6	2	10 e 7	80%	20%
7	2	10 e 7	80%	20%
8	2	7 e 5	80%	20%
9	2	7 e 5	80%	20%
10	2	6 e 5	80%	20%
11	2	6 e 5	80%	20%
12	2	6 e 5	80%	20%
13	2	6 e 5	80%	20%
14	2	5 e 5	80%	20%
15	2	7 e 5	80%	20%
16	2	7 e 5	80%	20%
17	3	7, 5 e 5	70%	30%
18	3	5, 4 e 3	80%	20%
19	2	7 e 5	80%	20%

Nas subseções a seguir, são apresentadas as linhas de regressão e as métricas de desempenho associadas a cada etapa de treinamento das redes neurais artificiais.

6.3.1 Treinamento das Etapas 1 a 5 – Amplitudes associadas a Harmônicos

Nas cinco primeiras etapas de treinamento, os dados de saída são as amplitudes associadas aos cinco primeiros harmônicos da caminhada. As Figuras 6.15 a 6.19 ilustram as linhas de regressão e os gráficos de desempenho (performance) referentes ao treinamento de cada etapa.

A linha de regressão indica a precisão do treinamento: quanto mais próxima a diagonal contínua azul estiver da diagonal pontilhada, maior é a precisão. Já o gráfico de desempenho apresenta a evolução do erro da rede neural ao longo do treinamento, tanto para os dados utilizados no treinamento (curva azul) quanto para os dados utilizados para teste (curva vermelha).

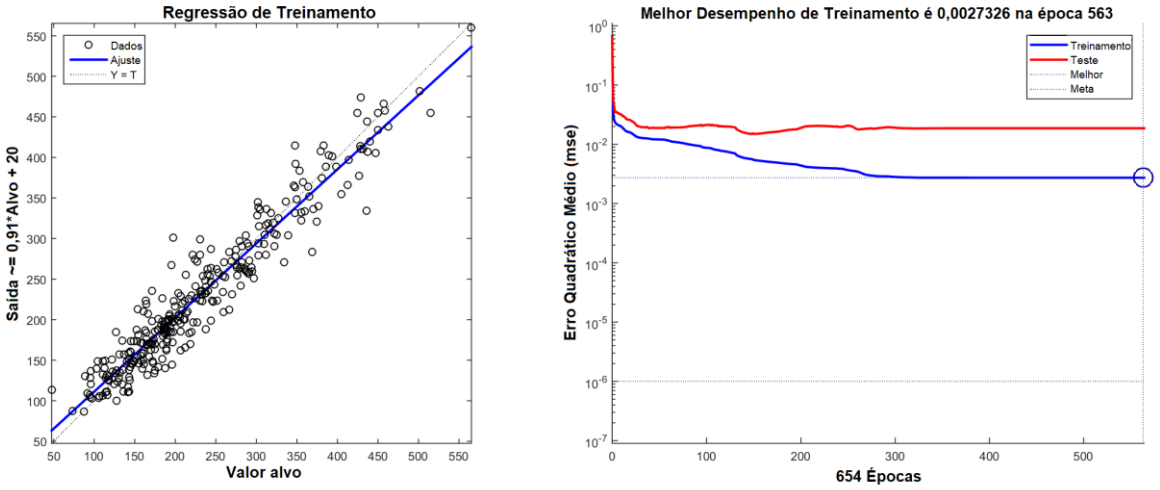


Figura 6.15 – Regressão e desempenho da 1ª etapa de treinamento (Saída ΔG_{H1})

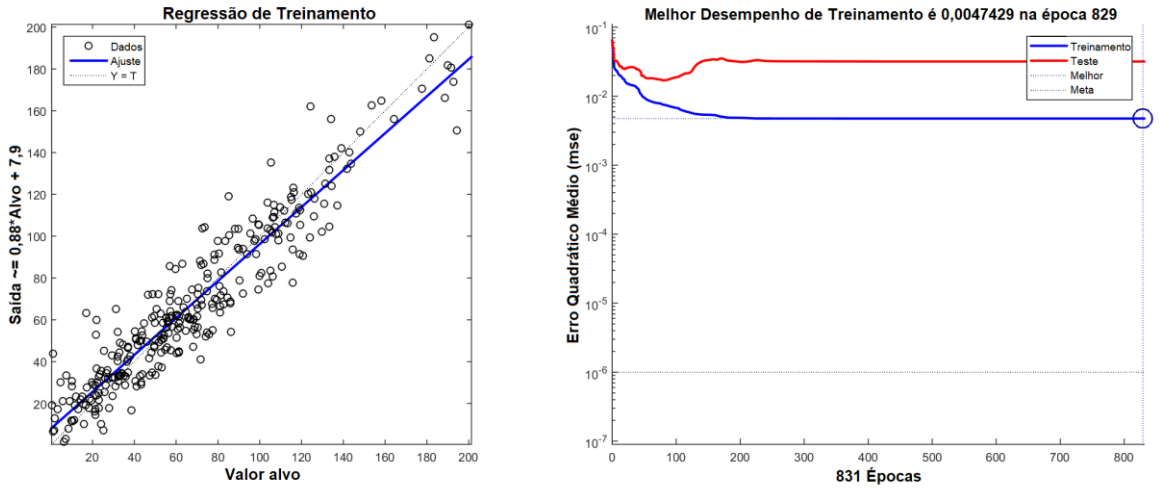


Figura 6.16 – Regressão e desempenho da 2ª etapa de treinamento (Saída ΔG_{H2})

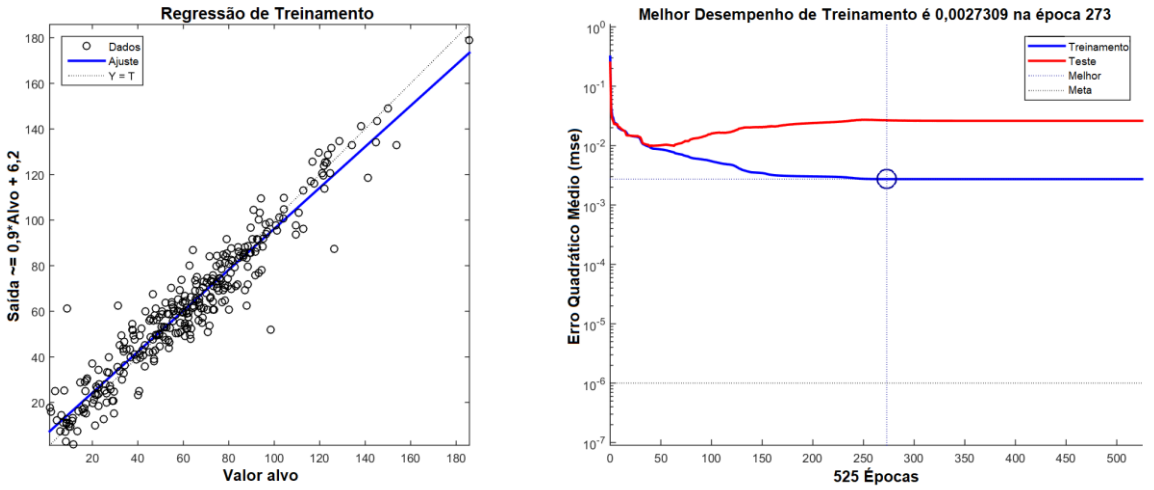


Figura 6.17 – Regressão e desempenho da 3ª etapa de treinamento (Saída ΔG_{H3})

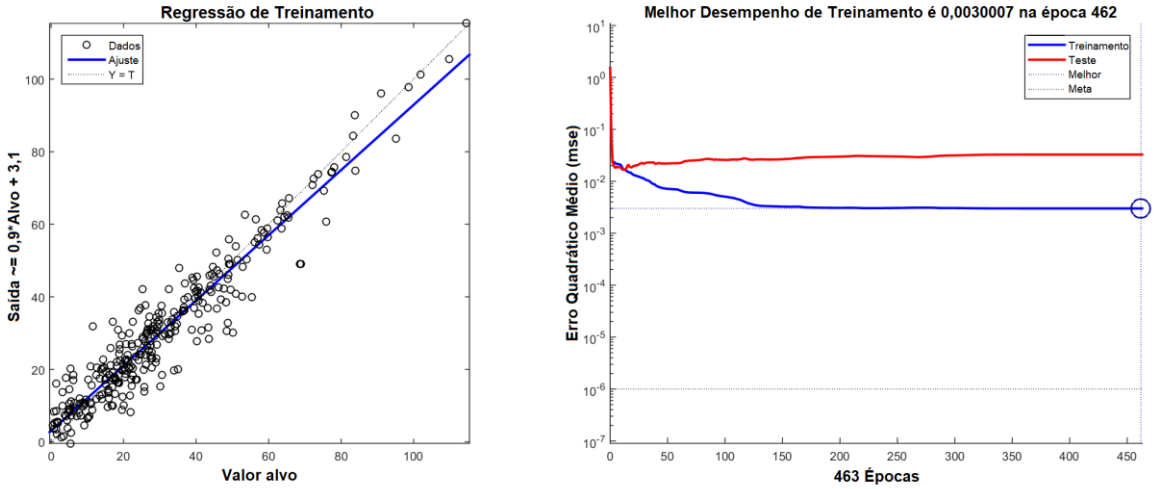


Figura 6.18 – Regressão e desempenho da 4ª etapa de treinamento (Saída ΔG_{H4})

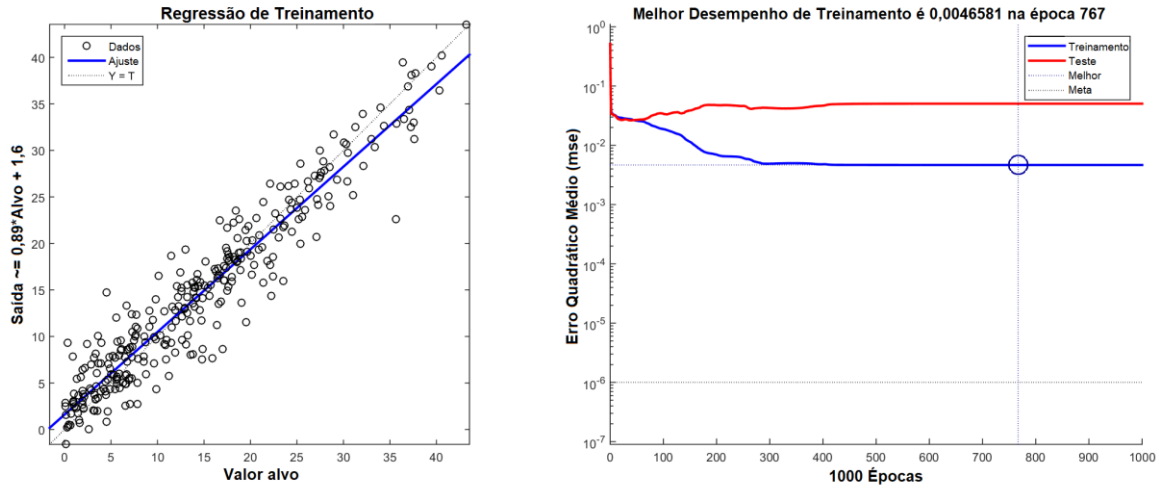


Figura 6.19 – Regressão e desempenho da 5ª etapa de treinamento (Saída ΔG_{H5})

Conforme pode ser observado nas Figuras 6.15 a 6.19, os treinamentos apresentaram regressões adequadas, e os valores de erro associados, tanto ao treinamento quanto ao teste, foram inferiores a 10^{-1} em todas as etapas, sendo inferiores a 10^{-2} em algumas situações. Não foi observado o fenômeno de *overfitting*, geralmente associado a casos em que o erro de treinamento decai rapidamente enquanto o erro de teste aumenta, em vez de se estabilizar.

6.3.2 Treinamento das Etapas 6 a 10 – Amplitudes associadas a Sub-Harmônicos

As etapas de 6 a 10 de treinamento têm as suas linhas de regressão e gráficos de desempenho apresentados nas Figuras 6.20 a 6.24. Nessas etapas, os dados de saída referem-se às amplitudes associadas aos sub-harmônicos da caminhada humana.

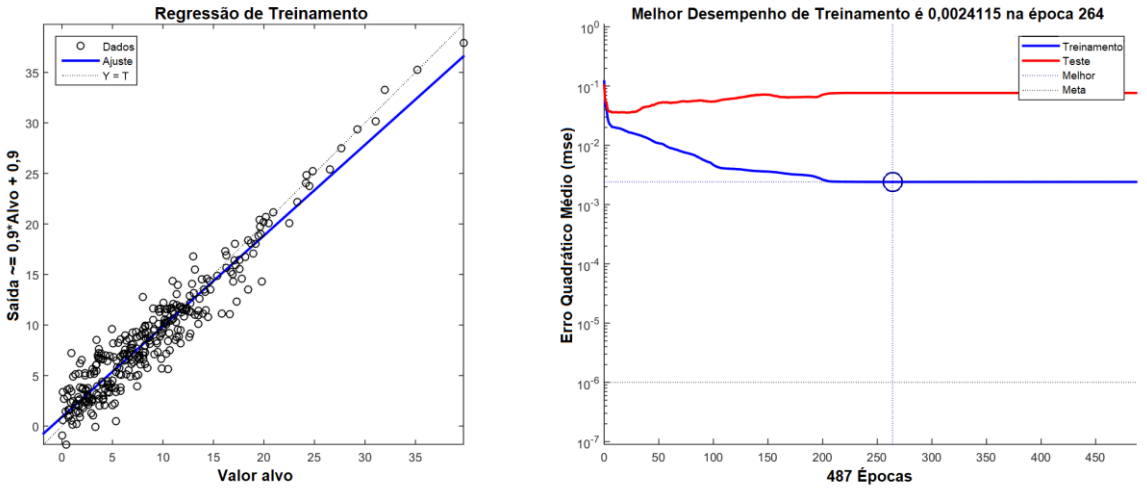


Figura 6.20 – Regressão e desempenho da 6ª etapa de treinamento (Saída ΔG_{S1})

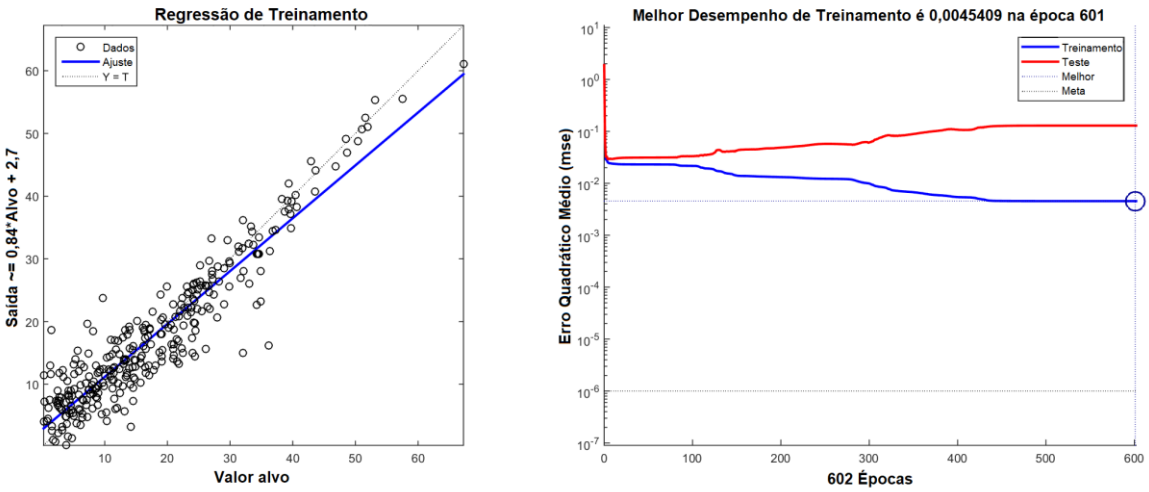


Figura 6.21 – Regressão e desempenho da 7ª etapa de treinamento (Saída ΔG_{S2})

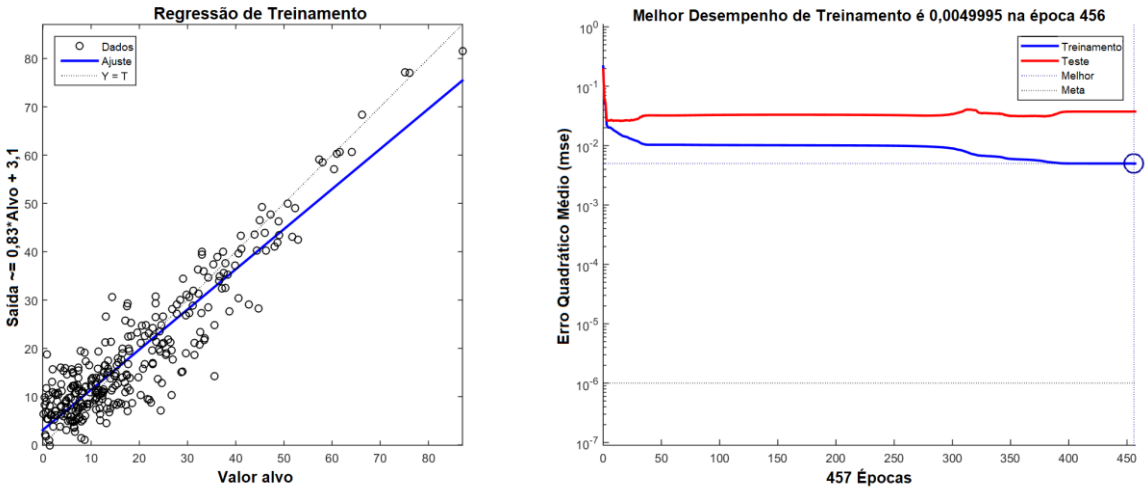


Figura 6.22 – Regressão e desempenho da 8ª etapa de treinamento (Saída ΔG_{S3})

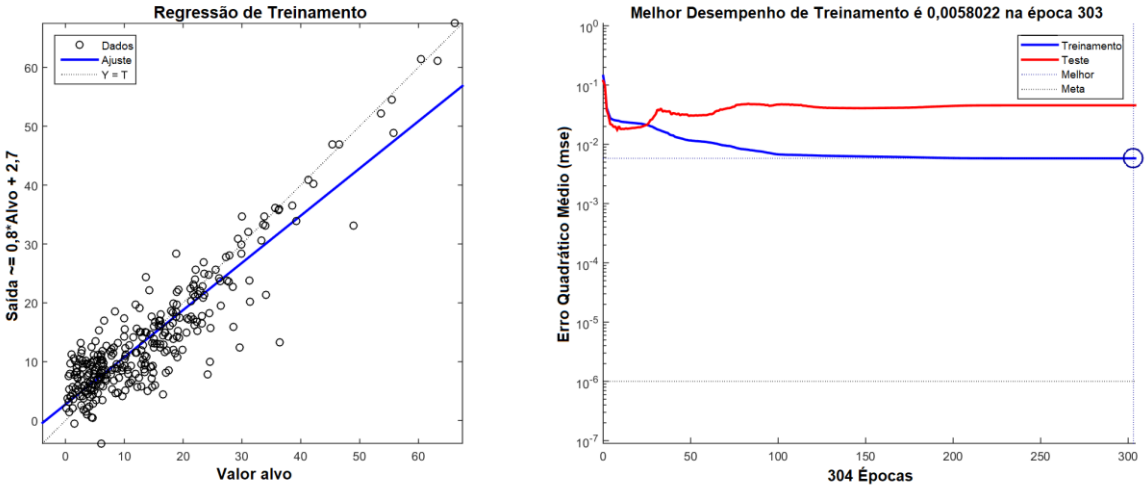


Figura 6.23 – Regressão e desempenho da 9ª etapa de treinamento (Saída ΔG_{S4})

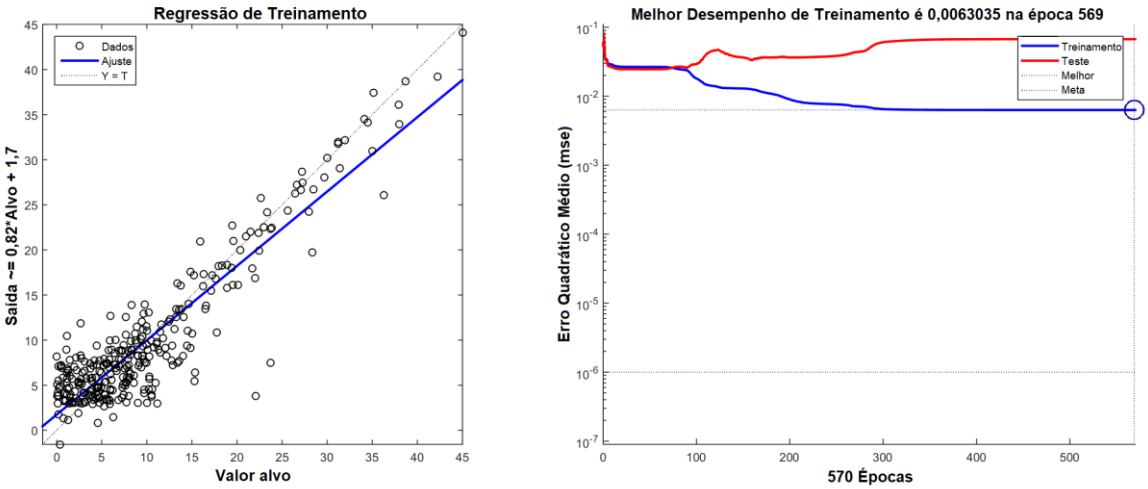


Figura 6.24 – Regressão e desempenho da 10ª etapa de treinamento (Saída ΔG_{S5})

Observa-se, a partir das Figuras 6.20 a 6.24, que as regressões e os treinamentos ocorreram de forma satisfatória. Nos gráficos de regressão, os dados permanecem concentrados em torno da linha de regressão, a qual (representada em azul) se mantém próxima da linha pontilhada (comportamento ideal).

Em relação aos gráficos de desempenho, os erros associados, tanto ao conjunto de treinamento quanto ao de teste, foram, na maioria dos casos, inferiores a 10^{-1} e, em algumas situações, inferiores a 10^{-2}. Verificou-se um indício do fenômeno de *overfitting* durante o treinamento da sétima etapa (Figura 6.21); mas, este comportamento foi amenizado por volta da época 400 de treinamento.

6.3.3 Treinamento das Etapas 11 a 14 – Ângulos de Fase associados a Harmônicos

As etapas de treinamento de 11 a 14 têm como dados de saída os ângulos de fase associados aos harmônicos da caminhada humana, com exceção do primeiro harmônico. Os gráficos de regressão e de desempenho dessas etapas do treinamento das redes neurais artificiais são apresentados nas Figuras 6.25 a 6.28.

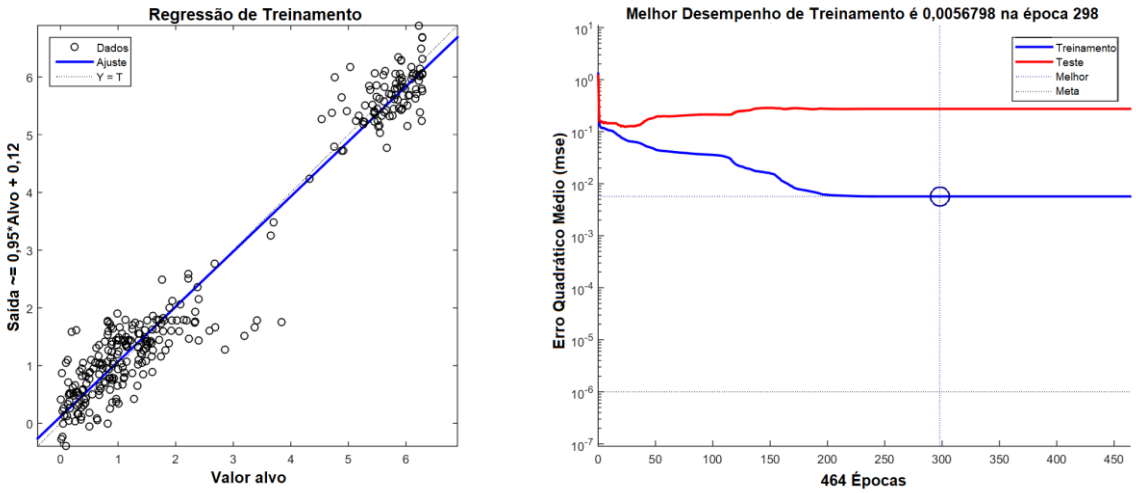


Figura 6.25 – Regressão e desempenho da 11ª etapa de treinamento (Saída φ_{H2})

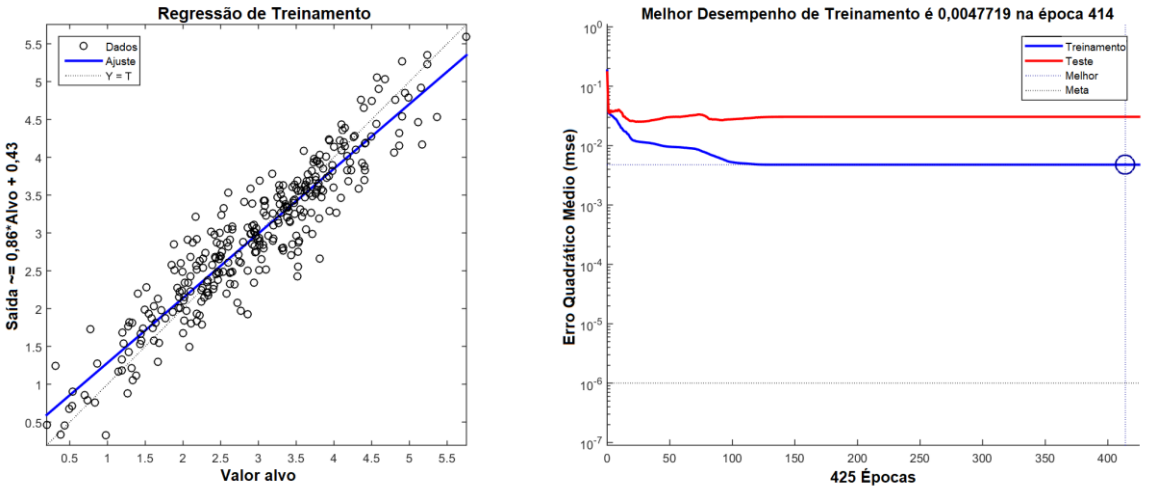


Figura 6.26 – Regressão e desempenho da 12ª etapa de treinamento (Saída φ_{H3})

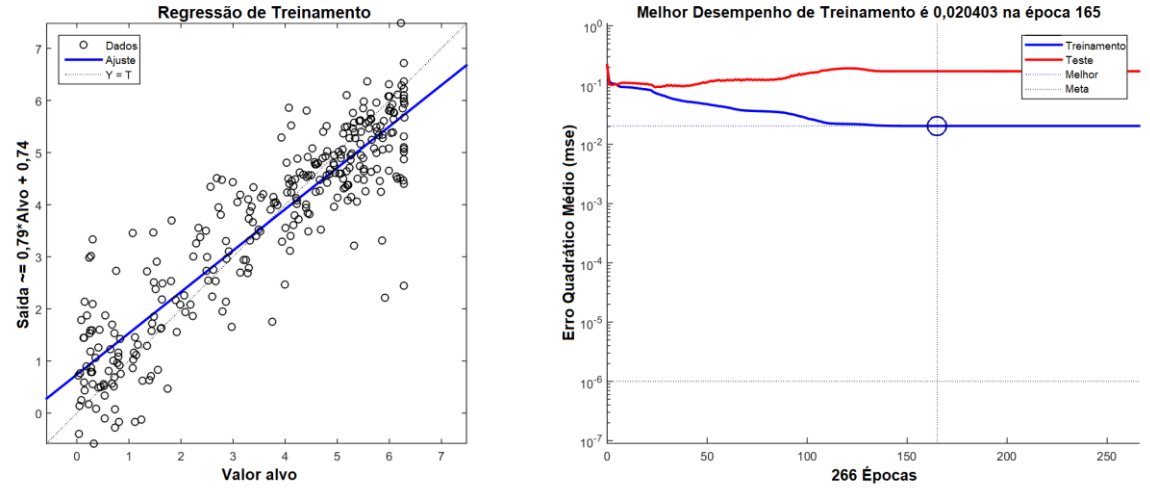


Figura 6.27 – Regressão e desempenho da 13ª etapa de treinamento (Saída φ_{H4})

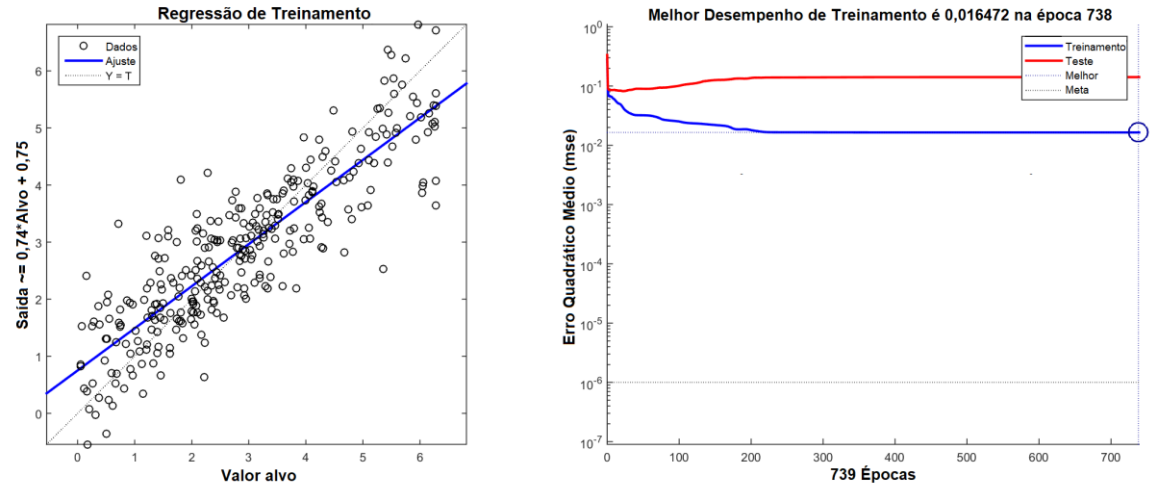


Figura 6.28 – Regressão e desempenho da 14ª etapa de treinamento (Saída φ_{H5})

Nessas etapas, ilustradas nas Figuras 6.25 a 6.28, os dados já se comportam de forma mais dispersa nos gráficos de regressão. Isso ocorre porque os ângulos de fase associados aos harmônicos não seguem padrões tão bem definidos quanto os padrões inerentes aos parâmetros anteriores, relacionados às amplitudes. Essa observação já havia sido feita na Seção 6.2, especificamente na Figura 6.12.

Destaca-se, ainda, nos gráficos de regressão, a concentração dos valores do parâmetro φ_{H2} predominantemente no primeiro e quarto quadrantes da circunferência, enquanto os valores do parâmetro φ_{H3}encontram-se majoritariamente no segundo e terceiro quadrantes.

Embora as regressões ainda sejam adequadas, elas apresentam menor precisão quando comparadas às etapas anteriores. Ainda assim, os gráficos de desempenho continuam indicando erros inferiores a 10^{-1} para a maioria dos casos, seja para os dados de treinamento como para os de teste. Não foram observados fenômenos de *overfitting* nessas etapas.

6.3.4 Treinamento das Etapas 15 a 19 – Ângulos de Fase associados a Sub-Harmônicos

Finalmente, as últimas etapas de treinamento – etapas 15 a 19 – têm como dados de saída os ângulos de fase associados aos sub-harmônicos da caminhada humana. Os gráficos de regressão e de desempenho obtidos durante essas etapas são ilustrados nas Figuras 6.29 a 6.33.

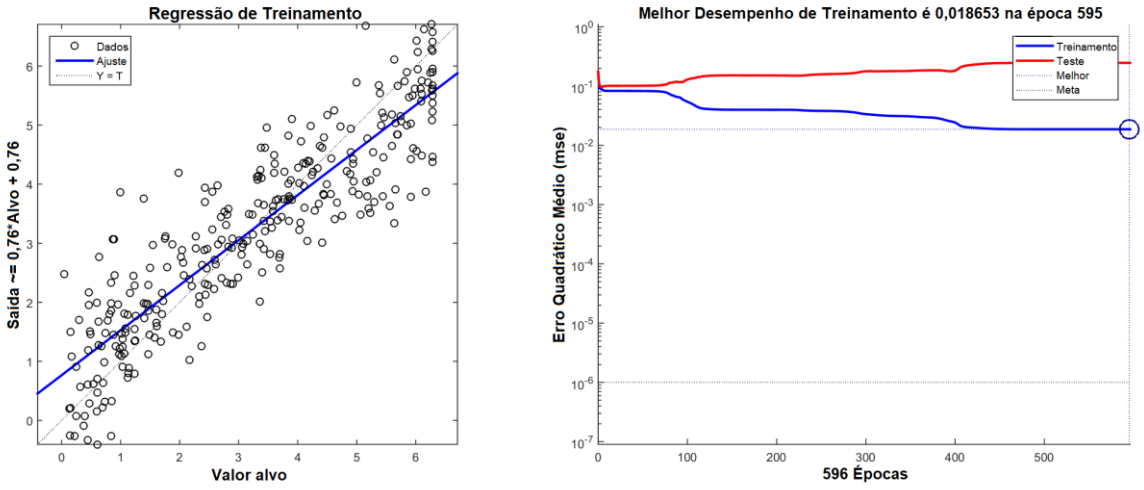


Figura 6.29 – Regressão e desempenho da 15ª etapa de treinamento (Saída φ_{S1})

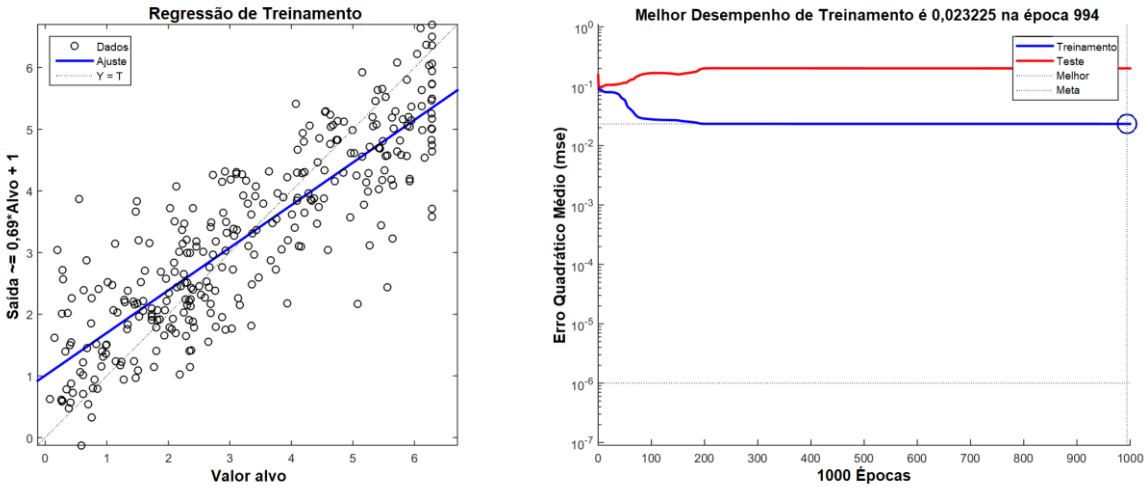


Figura 6.30 – Regressão e desempenho da 16ª etapa de treinamento (Saída φ_{S2})

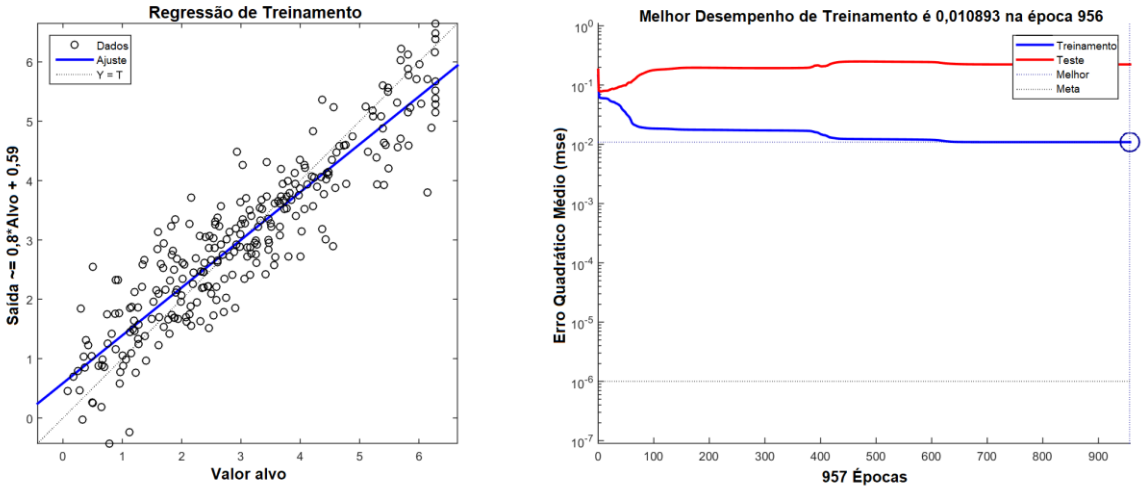


Figura 6.31 – Regressão e desempenho da 17ª etapa de treinamento (Saída φ_{S3})

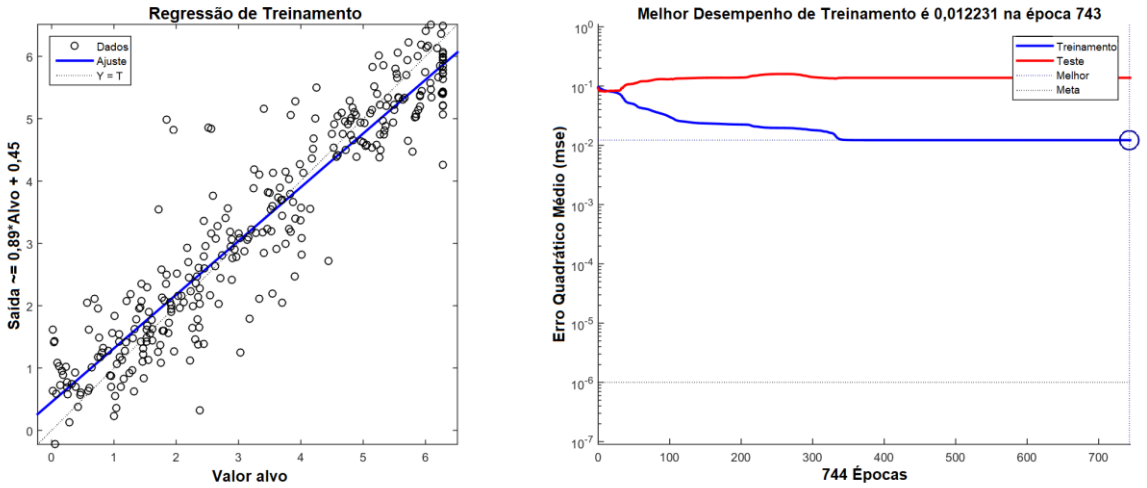


Figura 6.32 – Regressão e desempenho da 18ª etapa de treinamento (Saída φ_{S4})

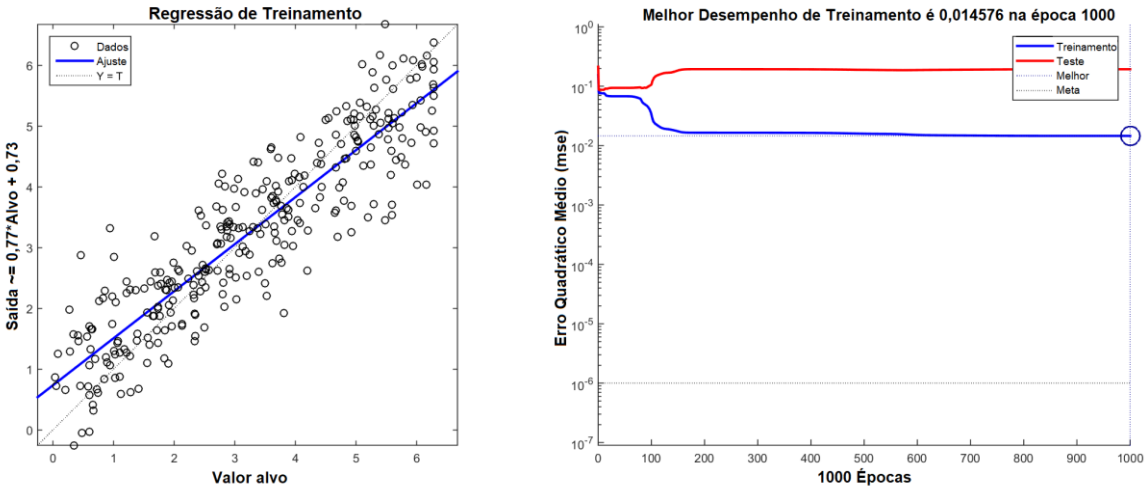


Figura 6.33 – Regressão e desempenho da 19ª etapa de treinamento (Saída φ_{S5})

Nessas etapas, assim como na etapa anterior referente aos ângulos de fase dos harmônicos, os gráficos de regressão apresentam uma maior dispersão de dados. De certa forma, esse comportamento já era esperado, uma vez que os ângulos de fase associados aos sub-harmônicos são os últimos parâmetros a serem introduzidos no treinamento, sofrendo com o carregamento de eventuais erros nas etapas anteriores para as etapas posteriores. Além disso, conforme já foi discutido previamente, os ângulos de fase possuem alta variabilidade e baixa correlação direta com demais parâmetros do modelo.

Ainda assim, as regressões obtidas são adequadas, e os gráficos de desempenho indicam erros inferiores a 10^{-1} para dados de treinamento e muito próximo a 10^{-1} para dados de teste. Não foram observados indícios relevantes de *overfitting*.

Considerando todas as etapas, o tempo computacional total de treinamento das redes neurais foi de aproximadamente uma hora e meia, constituindo em torno de 5 minutos para cada etapa. É importante ressaltar que o MATLAB oferece outros algoritmos e funções de treinamento com tempos computacionais relativamente menores, todavia, conforme já foi discutido previamente, tais algoritmos promoveriam resultados com maior erro ou menor capacidade de generalização do modelo e, em algumas situações, o surgimento do fenômeno de *overfitting*.

6.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE A APLICAÇÃO DO MODELO

Uma vez treinadas, as redes neurais artificiais foram salvas e podem realizar previsões para os parâmetros Δ e φ, associados a cinco harmônicos e cinco sub-harmônicos da caminhada, a partir

de qualquer conjunto de dados de entrada composto apenas pelo peso do pedestre G (em Newtons) e pela frequência de caminhada f (em Hz).

Os parâmetros previstos devem ser inseridos na **Equação 6.2,** previamente apresentada, a qual deve ser aplicada à estrutura que se deseja analisar, na forma de carga móvel, percorrendo os elementos que compõem o tabuleiro da passarela avaliada.

Por se tratar de uma carga móvel, o carregamento deve ser aplicado considerando-se uma velocidade específica de deslocamento ao longo da estrutura. Para determinar essa velocidade, os Pedestres 2 e 8 – previamente apresentados na Tabela 4.1 – realizaram caminhadas de longa duração, registradas pelo aplicativo *Phyphox*, utilizando o acelerômetro e o GPS integrados ao aparelho.

Esses pedestres foram selecionados porque, entre todos os dezesseis participantes da parte experimental do estudo apresentados na Tabela 4.1, foram os que melhor conseguiram manter a frequência de caminhada constante ao longo de períodos prolongados e de grandes distâncias. Dessa forma, os pedestres foram induzidos, por meio de batidas sonoras, a sincronizarem seus passos em frequências específicas de caminhada. Com o aplicativo *Phyphox*, além de se registrarem as acelerações do corpo (para verificar a manutenção da frequência-alvo), avaliou-se também a velocidade média da caminhada ao longo do tempo em que cada pedestre caminhou em cada frequência.

O conjunto de pares ordenados – frequência e velocidade – desses pedestres deu origem ao gráfico ilustrado na Figura 6.34, na qual os pontos formam uma linha de tendência, representada pela equação linear apresentada na Equação 6.4.

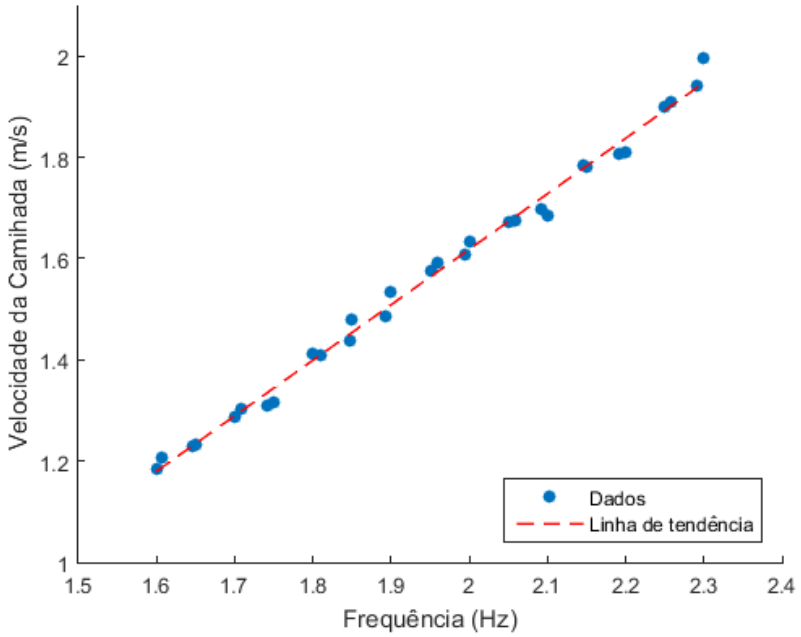


Figura 6.34 – Linha de tendência relacionando frequência e velocidade de caminhada

A Equação 6.4 é sugerida para definir a velocidade de aplicação da carga móvel gerada pelo modelo proposto no presente trabalho.

$$v_{ap} = 1{,}0962 f_s - 0{,}5743 \tag{6.4}$$

na qual, f_s é a frequência de caminhada em questão e v_{ap} é a velocidade de aplicação da carga gerada pelo modelo baseado em redes neurais artificiais.

Visando a aplicação das cargas gerada pelo modelo por meio de uma abordagem de carga móvel, utiliza-se a relação entre a frequência de caminhada f_s, a velocidade de aplicação das cargas v_{ap} e o comprimento de passo do pedestre l_{ap} correspondente à aplicação. Essa relação é definida pela Equação 6.5.

$$l_{ap} = \frac{v_{ap}}{f_s} \tag{6.5}$$

Desta forma, a partir da frequência da caminhada, determinam-se a velocidade de deslocamento e o comprimento do passo, permitindo descrever a posição do pedestre ao longo da estrutura em qualquer instante de tempo. Assim, a carga modelada é aplicada de forma a simular o seu deslocamento ao longo dos elementos estruturais.

Considerando a discretização numérica para a aplicação do modelo proposto, a carga é aplicada diretamente aos nós da estrutura, sendo distribuída entre os nós extremos do elemento sobre o qual o pedestre se encontra em cada instante. Essa distribuição se dá de forma proporcional à posição relativa da carga ao longo do elemento, por meio de uma interpolação linear. Desta forma, quando a carga se encontra, por exemplo, no ponto médio do elemento deverá ser igualmente distribuída aos dois nós extremos.

A Figura 6.35 apresenta uma situação genérica, onde um pedestre que caminha sobre um elemento de comprimento L, ocupa em um determinado instante de tempo, uma posição x_{ped} medida a partir do nó esquerdo do elemento.

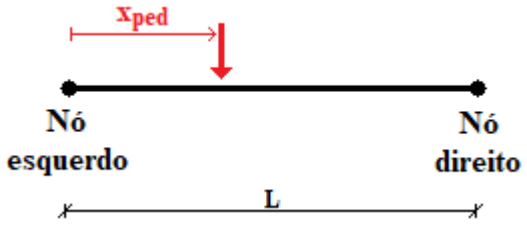


Figura 6.35 – Esquema para aplicação da carga móvel

Para esta situação, as forças aplicadas no nó esquerdo e no nó direito do elemento, serão dadas, respectivamente, pelas Equações 6.6 e 6.7

$$F_{esq} = F_p.\left(\frac{L - x_{ped}}{L}\right) \tag{6.6}$$

$$F_{dir} = F_p.\left(\frac{x_{ped}}{L}\right) \tag{6.7}$$

onde F_{esq} e F_{dir} são as parcelas de força aplicada nos nós esquerdo e direito, respectivamente, que compõem o elemento; e, F_p é a carga total, modelada previamente por meio da Equação 6.2

7 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados deste trabalho são apresentados em cinco seções principais, distribuídas ao longo deste capítulo.

Na Seção 7.1, realiza-se uma comparação entre registros. Os 384 registros reais são comparados com carregamentos gerados a partir de previsões das redes neurais artificiais do modelo de carga desenvolvido neste trabalho. Esses conjuntos de dados são comparados com carregamentos obtidos por meio do modelo de Bachmann e Ammann (1987) e da ISO 10137 (2007). Adicionalmente, é realizada uma análise de erro, na qual o desempenho de cada modelo é avaliado em relação aos registros experimentais.

Na Seção 7.2, apresenta-se uma análise de abrangência do modelo desenvolvido, com o intuito de verificar se este, quando aplicado em estruturas de passarelas, é capaz de gerar respostas estruturais condizentes com a realidade. Busca-se demonstrar que, quando a estrutura é excitada por um dos harmônicos ou sub-harmônicos da caminhada, sua resposta é amplificada devido ao efeito ressonante.

Na Seção 7.3, previsões para um único pedestre, realizadas pelo modelo proposto, são aplicadas individualmente, em cada análise, aos modelos estruturais considerados neste trabalho. Os carregamentos previstos pelo modelo correspondem exclusivamente a caminhadas em frequências de ressonância com a estrutura, de forma que um de seus harmônicos e/ou sub-harmônicos seja capaz de excitar cada estrutura analisada.

Na Seção 7.4, são considerados múltiplos pedestres caminhando em frequências próximas a 2,00 Hz, considerada a frequência típica, ou média, da caminhada humana e geralmente utilizada como frequência padrão em modelos de carga existentes. Todavia, o modelo proposto, diferente dos demais, permite a consideração de múltiplos pedestres caminhando em frequências diversas e, portanto, situações mais realistas podem ser consideradas.

Por fim, na Seção 7.5 – última e mais relevante deste trabalho – são aplicados carregamentos correspondentes a situações de tráfego composto por múltiplos pedestres caminhando aleatoriamente. Cada carregamento é previsto individualmente pelo modelo de carga proposto e, em seguida, todos são aplicados simultaneamente à estrutura, simulando condições reais de tráfego. Esta seção apresenta a abordagem mais realista de todo o estudo, e os resultados obtidos

demonstram, de forma consistente, que o modelo proposto preenche uma importante lacuna na área de análise de cargas humanas em estruturas de passarelas.

7.1 COMPARAÇÕES ENTRE REGISTROS

Conforme mencionado previamente, todos os registros experimentais obtidos neste trabalho estão apresentados no **Apêndice A**. Cada registro corresponde a um pedestre com peso G caminhando a uma frequência f_s. Dessa forma, esses dados são suficientes para servir como entrada do modelo desenvolvido neste trabalho (ver Capítulo 6), permitindo a geração de previsões das ações induzidas pela caminhada, considerando os respectivos valores de peso e frequência.

Nesta seção, foram realizadas previsões com base nos pesos e frequências de caminhada dos 384 registros apresentados no **Apêndice A**. As previsões foram comparadas aos registros reais, e uma análise de erro foi conduzida. Em seguida, os mesmos pesos e frequências foram utilizados para modelar as ações por meio do modelo de Bachmann e Ammann (1987) e do modelo da ISO 10137 (2007), e novas análises de erro em relação aos registros reais foram realizadas.

Na Figura 7.1, são apresentadas, a título de exemplo, comparações entre as ações modeladas para os registros dos cinco pedestres previamente analisados no Capítulo 6 (Figuras 6.3 e 6.4).

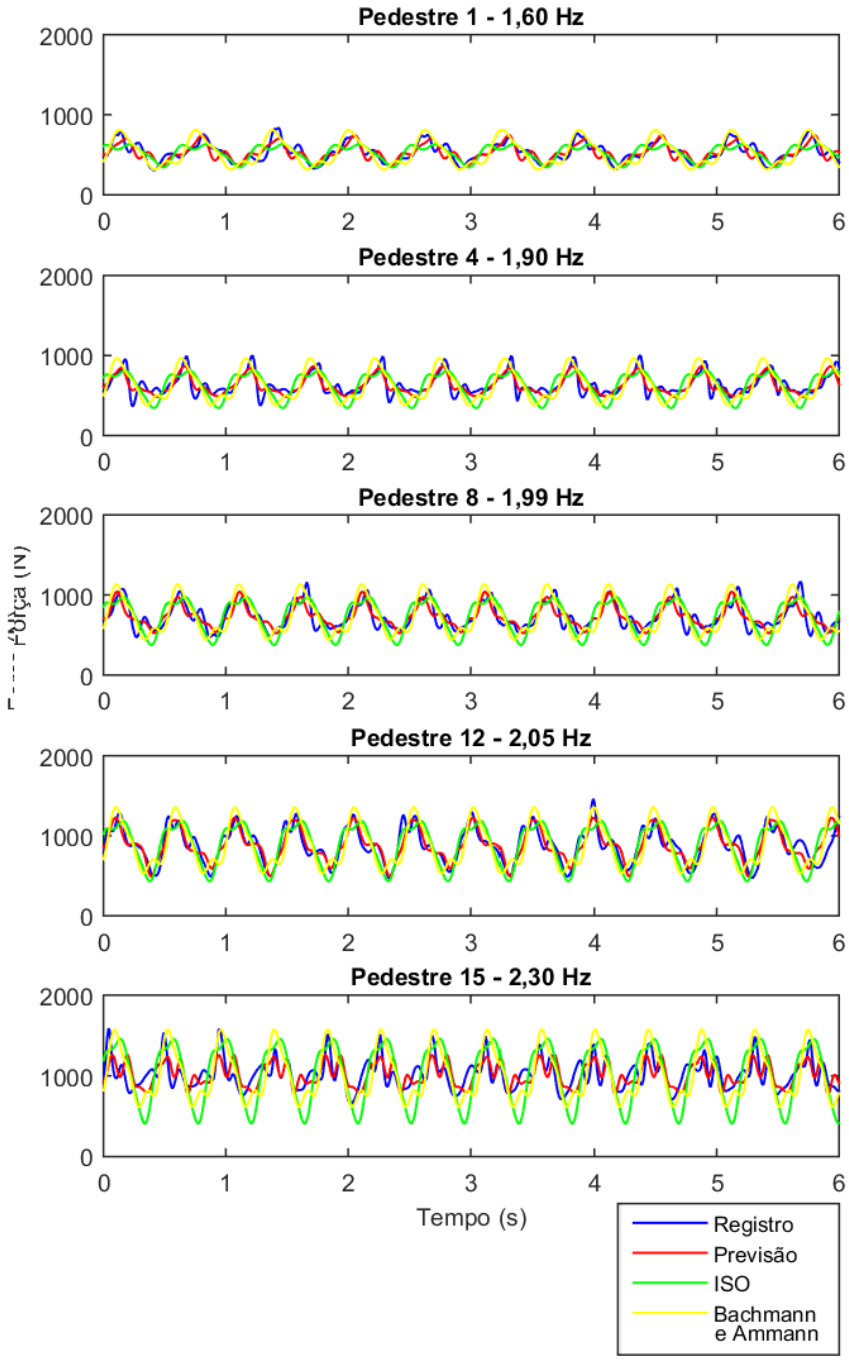


Figura 7.1 – Comparação entre as previsões do modelo de carga desenvolvido neste trabalho, o registro experimental e modelos já existentes.

Observa-se que a curva de carregamento prevista pelo modelo desenvolvido neste trabalho se ajusta melhor ao registro real, quando comparada com curvas geradas pelos demais modelos. Uma análise do erro quadrático médio (*mean square error* – MSE) foi realizada, e os resultados são apresentados na Tabela 7.1.

Tabela 7.1 – Análise do erro (MSE) para as previsões

Pedestre	Presente trabalho	ISO 10137	Bachmann e Ammann
1	5150,21	8801,98	5991,71
4	4425,32	21431,04	18061,90
8	10104,13	21312,40	17141,55
12	10615,40	26198,74	32436,23
15	21234,64	90206,30	53640,82

Nos cinco casos analisados desde o Capítulo 6, o erro resultante do modelo desenvolvido neste trabalho foi menor do que o erro associado aos demais modelos. Considerando os 384 registros realizados, uma análise de desempenho é apresentada na Tabela 7.2, indicando em quantos casos a aproximação de cada modelo apresentou o melhor desempenho (menor erro).

Tabela 7.2 – Comparação de desempenho referente ao erro (MSE) entre modelos

	Quantidade de casos em que cada modelo teve melhor desempenho		
Pedestre	Presente Trabalho	ISO 10137	Bachmann e Ammann
1	21	2	1
2	22	0	2
3	22	0	2
4	20	3	1
5	22	2	0
6	24	0	0
7	18	2	4
8	23	1	0
9	13	1	10
10	19	2	3
11	21	3	0
12	23	0	1
13	17	7	0
14	14	10	0
15	23	0	1
16	14	1	9
TOTAL	**316**	**34**	**34**

Nota-se que, em aproximadamente 82,3% dos casos, o modelo desenvolvido neste trabalho apresentou desempenho superior em relação aos modelos de Bachmann e Ammann (1987) e da

ISO 10137 (2007). Já os modelos de Bachmann e Ammann e da ISO apresentaram o melhor desempenho em apenas 8,85% dos casos cada um.

Esse resultado evidencia a superioridade do modelo proposto em relação a métodos consagrados. Todavia, o principal objetivo de um modelo de carga é sua aplicabilidade em estruturas. Portanto, nas próximas seções, o modelo desenvolvido será avaliado em relação ao seu desempenho quando cargas modeladas por ele forem aplicadas em estruturas de passarelas.

7.2 ABRANGÊNCIA DO MODELO PROPOSTO PARA SITUAÇÕES DE PEDESTRE ÚNICO

Nesta seção, realiza-se uma análise de abrangência do modelo de carga numérico-experimental proposto neste trabalho, quando utilizado como forma de excitação aplicada aos modelos estruturais abordados, para calcular suas respectivas respostas em termos de aceleração. Os resultados obtidos são comparados com as respostas estruturais calculadas a partir da aplicação do modelo de carga de Bachmann e Ammann (1987) e do modelo contido na ISO 10137 (2007).

Cada estrutura de passarela analisada possui respostas ressonantes obtidas a partir da excitação por diferentes harmônicos e/ou sub-harmônicos da caminhada humana. Por exemplo, o modelo estrutural ME_{W1}, com frequência fundamental próxima a 6 Hz, será estimulado pelo 4º harmônico de uma caminhada de aproximadamente 1,5 Hz, pelo 3º harmônico de uma caminhada de 2 Hz e pelo 4º sub-harmônico de uma caminhada de aproximadamente 1,71 Hz. Todos os detalhes de frequências, harmônicos e sub-harmônicos estimulantes para cada modelo estrutural são apresentados na Tabela 7.3.

Tabela 7.3 – Frequências, Harmônicos e Sub-Harmônicos estimulantes para cada modelo estrutural

Modelo Estrutural	Frequência Fundamental (Hz)	Harmônico ou Sub-Harmônico Estimulante
ME_{W1}	5,9960	4º Harmônico de 1,4990 Hz 4º Sub-Harmônico de 1,7131 Hz 3º Harmônico de 1,9987 Hz
ME_{W2}	8,1895	5º Harmônico de 1,6379 Hz 5º Sub-Harmônico de 1,8199 Hz 4º Harmônico de 2,0473 Hz
ME_{P1}	4,0016	3º Sub-Harmônico de 1,6006 Hz 2º Harmônico de 2,0008 Hz
ME_{P2}	6,8256	5º Sub-Harmônico de 1,5168 Hz 4º Harmônico de 1,7064 Hz 4º Sub-Harmônico de 1,9502 Hz 3º Harmônico de 2,2752 Hz
ME_{W3}	2,1780	1º Harmônico de 2,1780 Hz
ME_{W4}	1,9965	1º Harmônico de 1,9965 Hz
ME_{P3}	3,2041	2º Harmônico de 1,6021 Hz 2º Sub-Harmônico de 2,1361 Hz

Para avaliar a abrangência do modelo de carga proposto, foram calculadas as respostas estruturais em termos de aceleração máxima no meio do vão das sete estruturas investigadas, considerando pedestres com diferentes massas e frequências de caminhada. A massa do pedestre variou de 55 kg a 110 kg, com incrementos de 5 kg, enquanto a frequência da caminhada variou de 1,5 Hz a 2,3 Hz, com discretização de 0,01 Hz.

Espera-se que um modelo eficiente seja capaz de gerar amplificações – ou picos – de resposta para cada estrutura, justamente nas frequências estimulantes apresentadas na terceira coluna da Tabela 7.3, que é quando o pedestre caminha com frequências capazes de excitar a estrutura em condição de ressonância através de um dos harmônicos ou sub-harmônicos de sua caminhada.

7.2.1 Abrangência em Modelos Estruturais Realistas

As Figuras 7.2 a 7.5 ilustram as respostas, em termos de aceleração, dos modelos estruturais realistas estudados, considerando a aplicação do modelo de carga de Bachmann e Ammann

(1987), do modelo da ISO 10137 (2007) e do modelo proposto no presente trabalho. Observa-se que o modelo proposto, quando aplicado como carregamento, é o único capaz de gerar picos de resposta claramente detectáveis em estimulações por meio de cada um dos cinco primeiros harmônicos, bem como em estimulações associadas aos sub-harmônicos da caminhada. Os modelos de carga tradicionais não levam em consideração os sub-harmônicos e, por isso, as respostas estruturais associadas a eles não são corretamente amplificadas.

Na Figura 7.2, o modelo desenvolvido, quando aplicado como carga excitadora, gerou respostas estruturais que contemplam os picos associados ao terceiro e ao quarto harmônico da caminhada (3H e 4H na figura), bem como ao quarto sub-harmônico (4S). O modelo de Bachmann e Ammann (1987) abrangeu apenas respostas associadas ao terceiro harmônico, enquanto o da ISO 10137 (2007) captou apenas o terceiro e quarto harmônicos.

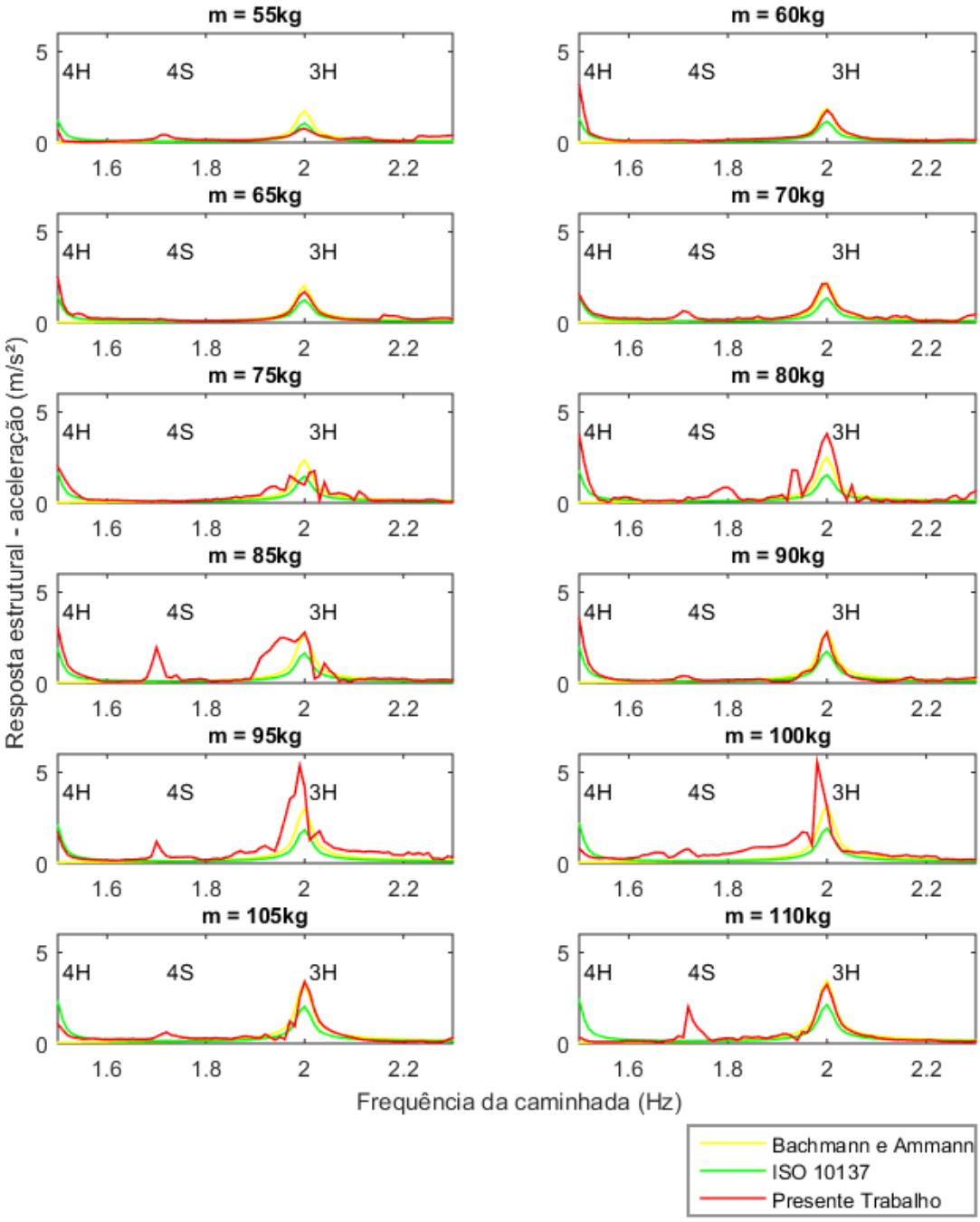


Figura 7.2 – Abrangência do modelo de carga para respostas da estrutura ME_{W1}

Na Figura 7.3 é apresentada a abrangência do modelo de carga proposto quando aplicado ao modelo estrutural ME_{W2}. O modelo gerou respostas ressonantes associadas ao quarto e quinto harmônico da caminhada, bem como ao quinto sub-harmônico. O modelo da ISO 10137 (2007) também contemplou o quarto e o quinto harmônico, geralmente de forma mais conservadora. Já o modelo de Bachmann e Ammann (1987) não abrangeu harmônicos superiores, e nenhum dos dois modelos considerou a amplificação da resposta pelo quinto sub-harmônico.

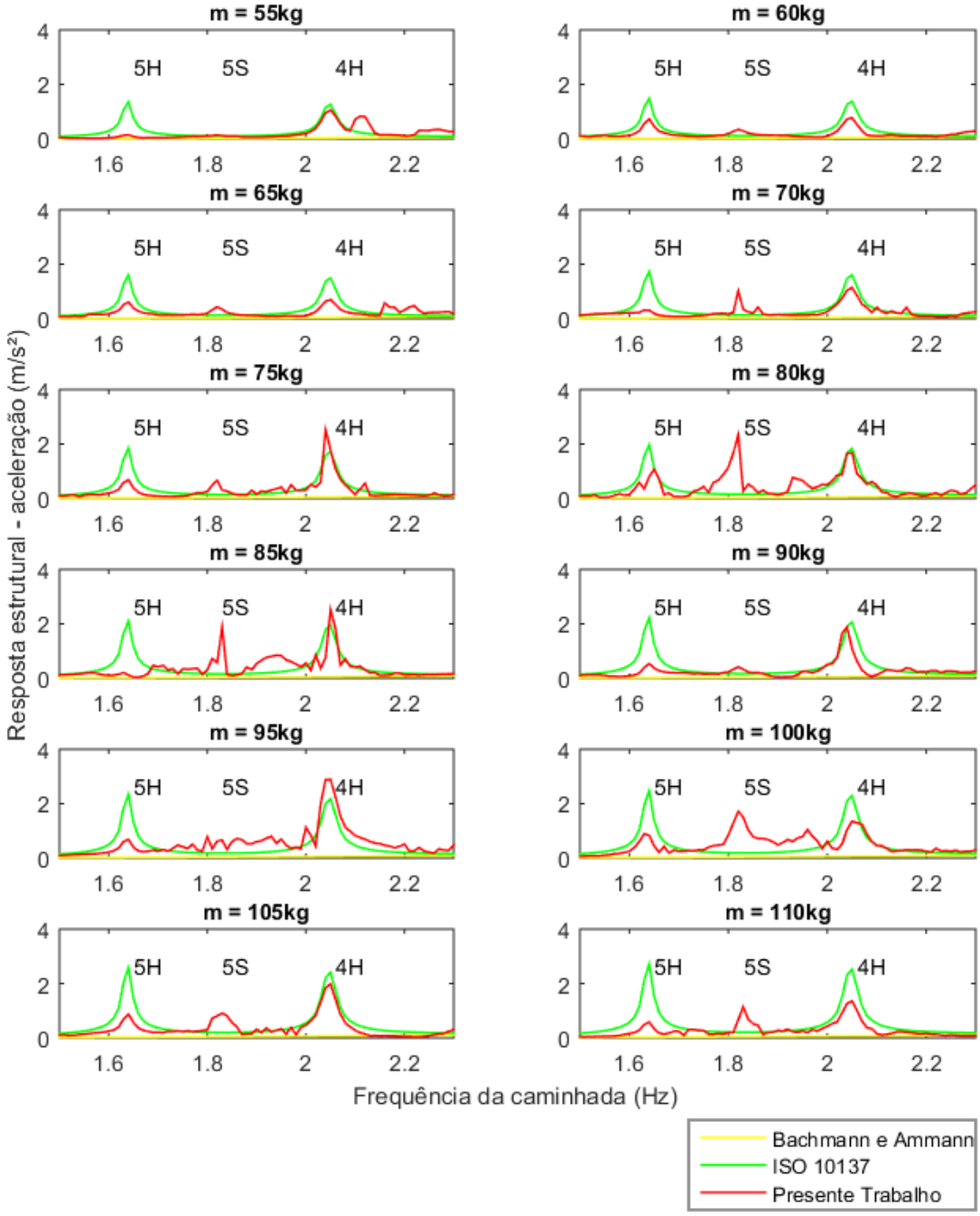


Figura 7.3 – Abrangência do modelo de carga para respostas da estrutura ME_{W2}

A Figura 7.4 ilustra a abrangência do modelo de carga deste trabalho quando utilizado para modelar a excitação aplicada no modelo estrutural ME_{P1}. O modelo desenvolvido gerou respostas captando picos de aceleração nas frequências associadas ao segundo harmônico e ao terceiro sub-harmônico da caminhada. Nos gráficos, as linhas correspondentes aos modelos de Bachmann e Ammann (1987) e da ISO 10137 (2007) coincidem, captando de forma semelhante respostas associadas o segundo harmônico, uma vez que ambos os modelos consideram valores idênticos de amplitude e de ângulo de fase associados ao segundo harmônico.

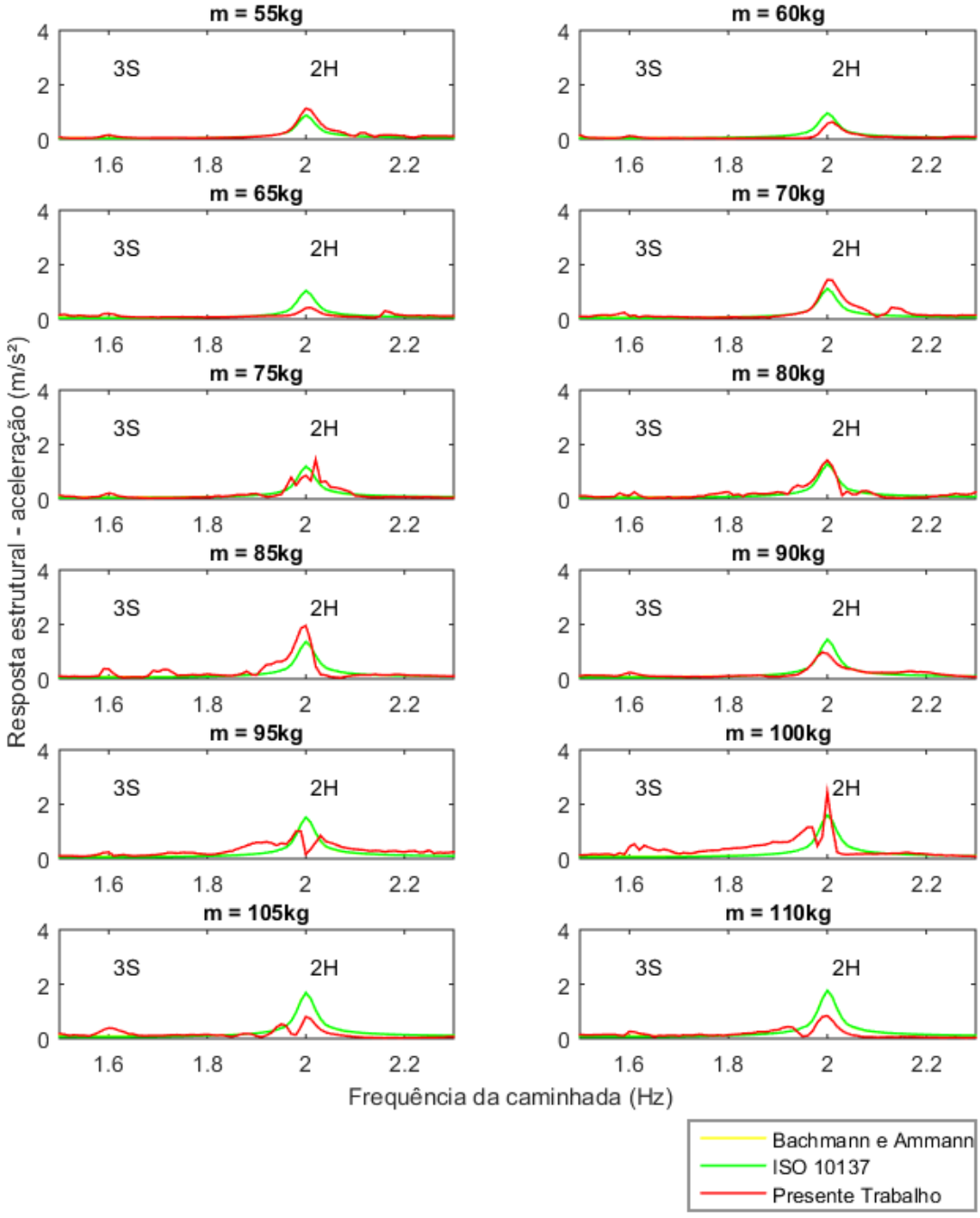


Figura 7.4 – Abrangência do modelo de carga para respostas da estrutura ME_{P1}

Na Figura 7.5, observa-se a abrangência de resposta do modelo ME_{P2} quando excitado por cargas geradas pelo modelo numérico-experimental proposto, pelo modelo da ISO 10137 (2007) e pelo modelo de Bachmann e Ammann (1987). O modelo desenvolvido neste trabalho, quando aplicado à estrutura como carregamento, é o único capaz de gerar picos de resposta associados tanto aos harmônicos (terceiro e quarto) quanto aos sub-harmônicos (quarto e quinto) da caminhada, evidenciando sua vasta abrangência.

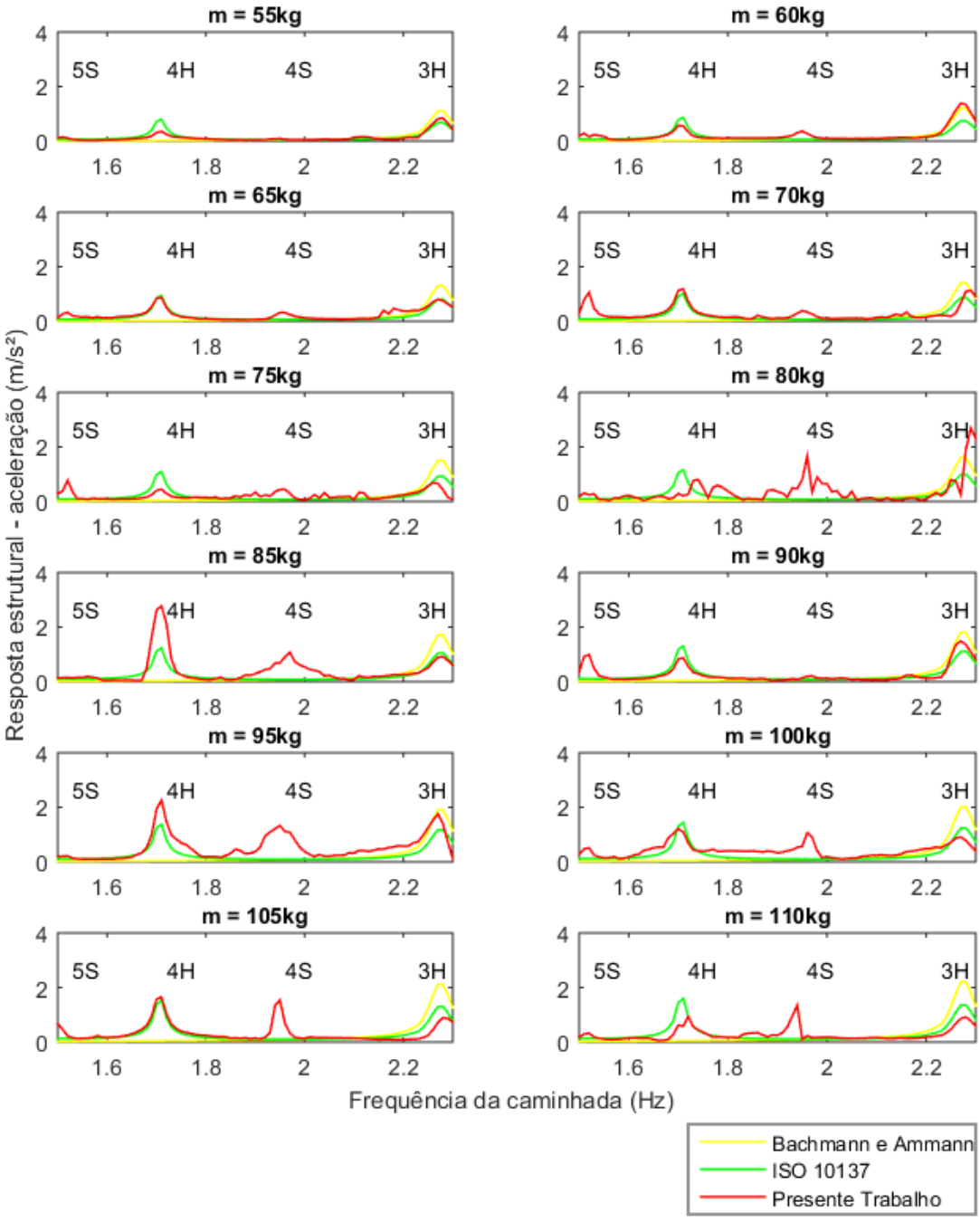


Figura 7.5 – Abrangência do modelo de carga para respostas da estrutura ME_{P2}

7.2.2 Abrangência em Modelos Estruturais com Frequência Reduzida

Nas estruturas com frequência reduzida, a estimulação ocorre predominantemente por meio do primeiro harmônico ou do segundo sub-harmônico da caminhada humana. Os gráficos de abrangência relacionados às estruturas ME_{W3}, ME_{W4} e ME_{P3} são apresentados a seguir.

A Figura 7.6 apresenta a abrangência de respostas do modelo estrutural ME_{W3} quando excitado por carregamentos gerados pelo modelo desenvolvido neste trabalho, pelo modelo da ISO

10137 (2007) e pelo modelo de Bachmann e Ammann (1987). Observa-se que os picos de resposta ocorrem quando a frequência da excitação coincide com a frequência natural fundamental da estrutura, caracterizando a estimulação pelo primeiro harmônico. De modo geral, o modelo desenvolvido neste trabalho foi menos conservador do que modelos existentes.

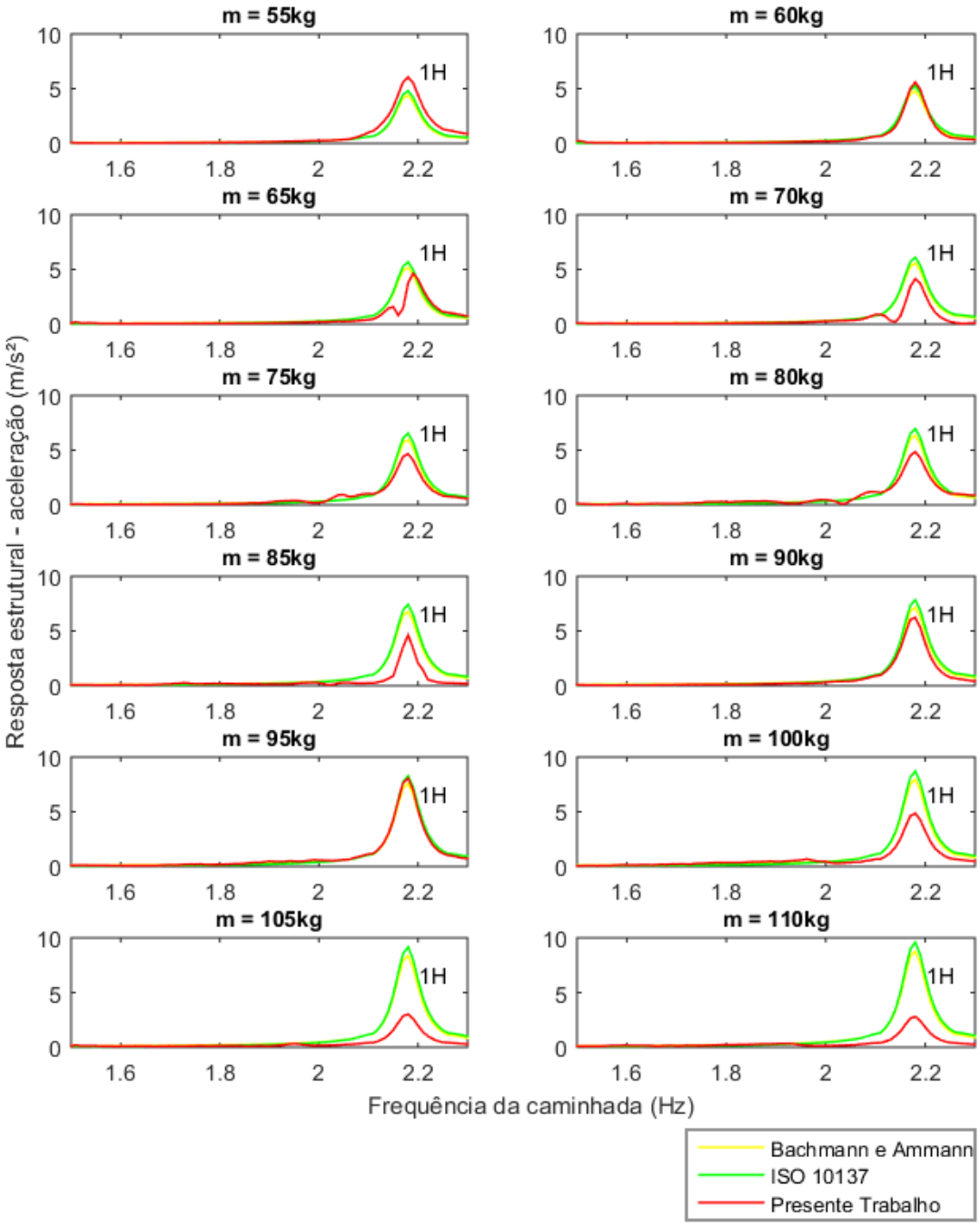


Figura 7.6 – Abrangência do modelo de carga para respostas da estrutura ME_{W3}

Na Figura 7.7, observa-se a abrangência do modelo desenvolvido quando o mesmo é utilizado para modelar cargas aplicadas à estrutura ME_{W4}, excitada predominantemente pelo primeiro

harmônico. Neste caso específico, a frequência de estimulação é aproximadamente 2 Hz, e os resultados demonstram que tanto o modelo proposto quanto os modelos de Bachmann e Ammann (1987) e da ISO 10137 (2007) possuem abrangências similares, produzindo picos de resposta semelhantes quando aplicados como carga dinâmica na estrutura.

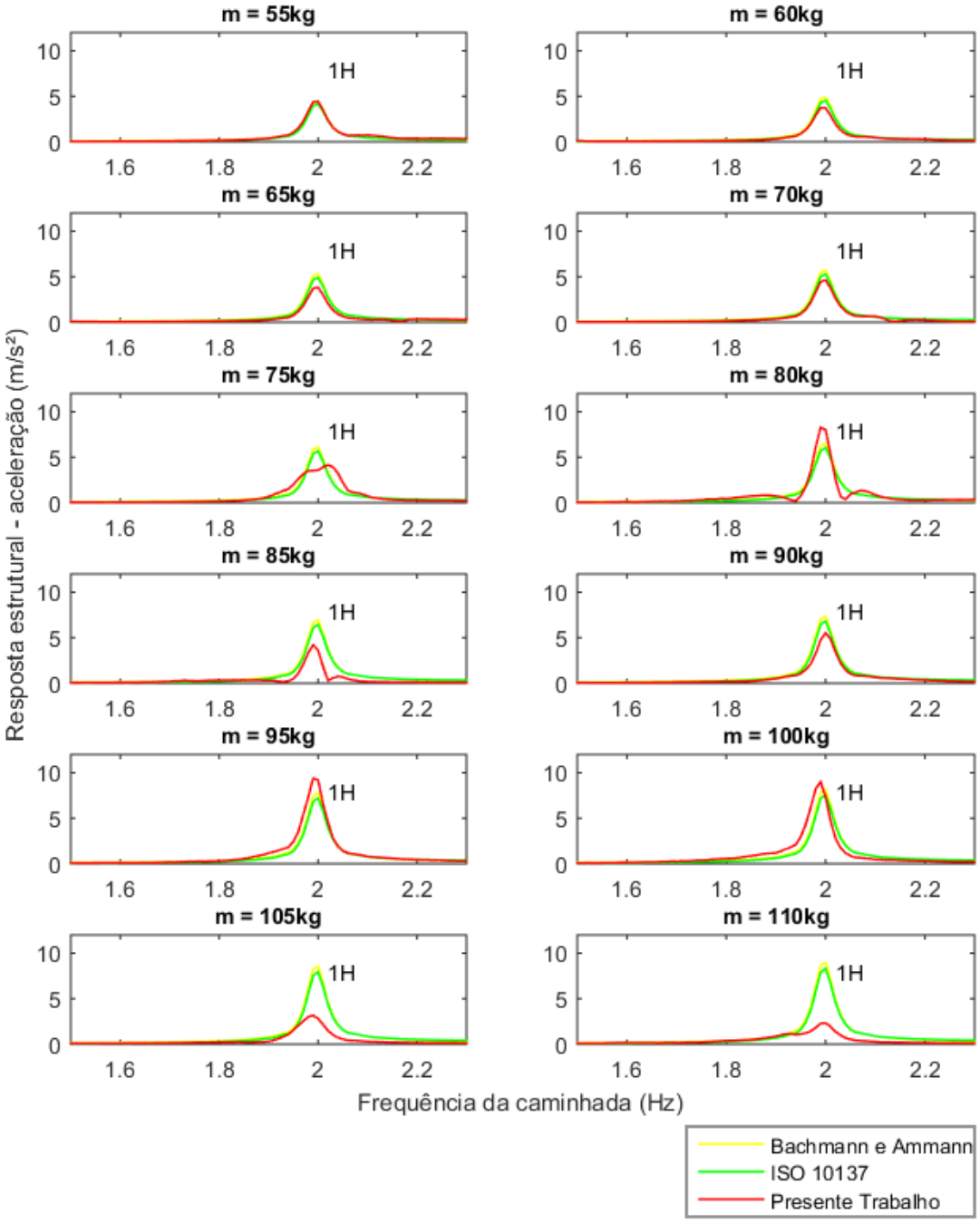


Figura 7.7 – Abrangência do modelo de carga para respostas da estrutura ME_{W4}

Por fim, na Figura 7.8 observam-se as respostas, em termos de aceleração, da estrutura ME_{P3} quando excitada por cargas geradas pelo modelo desenvolvido, pelo modelo da ISO 10137

(2007) e pelo modelo de Bachmann e Ammann (1987). A estrutura é excitada pelo segundo harmônico e pelo segundo sub-harmônico da caminhada. O modelo implementado neste trabalho foi menos conservador em respostas associadas ao segundo harmônico e, dentre os modelos considerados, foi o único capaz de gerar respostas amplificadas associadas ao segundo sub-harmônico.

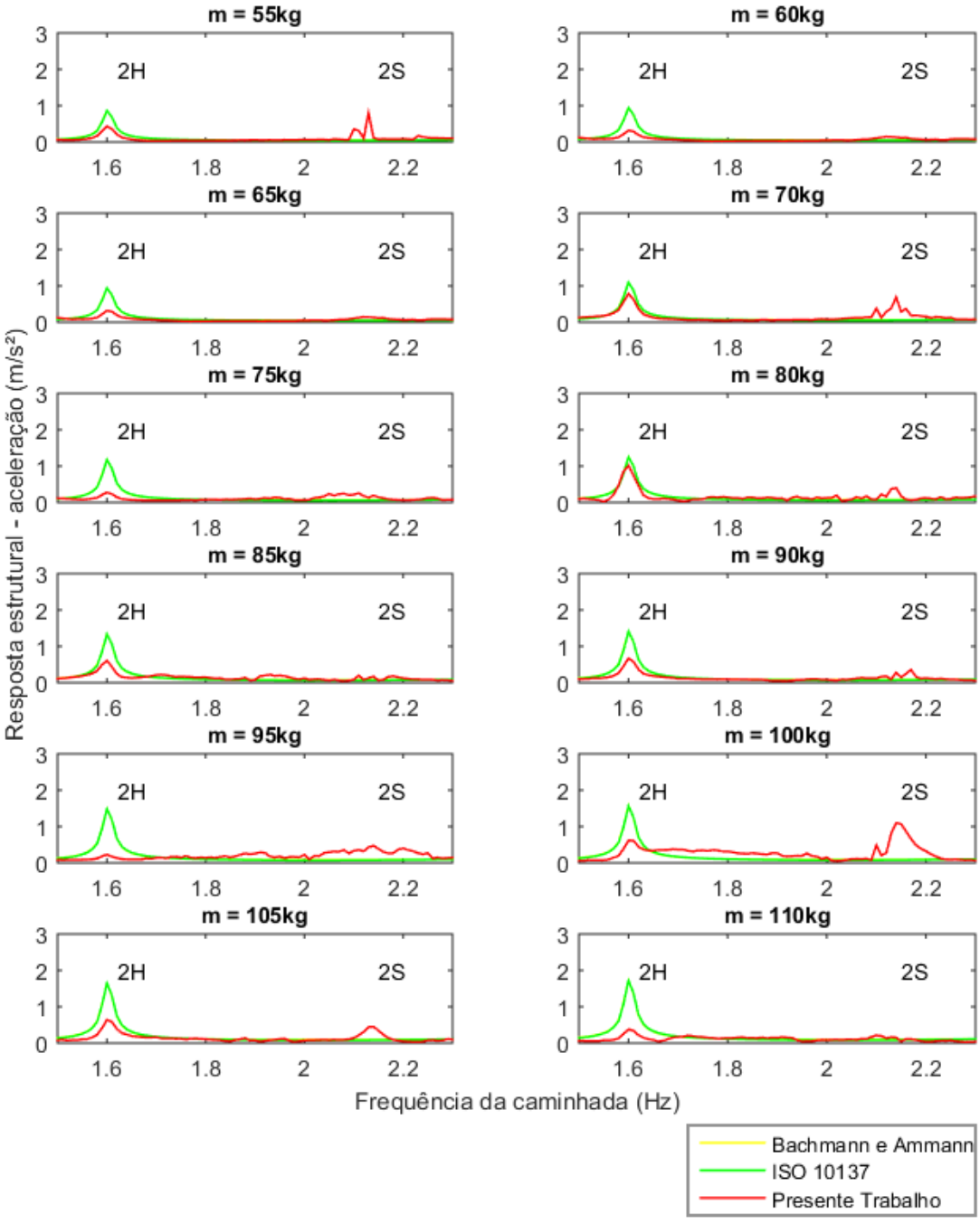


Figura 7.8 – Abrangência do modelo de carga para respostas da estrutura ME_{P3}

Considerando todas as figuras e análises apresentadas nesta seção, pode-se afirmar que o modelo desenvolvido neste estudo apresenta ampla abrangência, contemplando os cinco primeiros harmônicos e os cinco primeiros sub-harmônicos da caminhada humana. Tal característica representa um avanço em relação aos modelos existentes, como o de Bachmann e Ammann (1987), que abrange apenas os três primeiros harmônicos, e o da ISO 10137 (2007), que considera os cinco primeiros harmônicos, mas desconsidera os sub-harmônicos.

Em todos os casos analisados, quando o modelo numérico-experimental foi aplicado como carregamento das estruturas, os picos de resposta ocorreram exatamente nas situações em que a frequência natural fundamental da estrutura correspondia à frequência de um dos harmônicos ou sub-harmônicos considerados na modelagem da carga.

Além disso, na maior parte das situações, o modelo proposto gerou respostas de pico menos conservadoras do que os modelos já existentes, embora, em alguns casos, tenha produzido respostas mais conservadoras. Essa ausência de um padrão rígido de majoração ou minoração pode ser associada à forma como o modelo é construído, baseada em previsões realizadas por redes neurais artificiais. Embora essas redes sejam treinadas para aprender padrões, elas realizam generalizações que envolvem certo nível de erro. Ainda que esse erro seja baixo – conforme demonstrado na Seção 6.3 –, não há garantia de um padrão fixo de superestimação ou subestimação dos parâmetros previstos.

De maneira análoga ao erro associado a redes neurais treinadas por um conjunto limitado de dados, previsões relacionadas a novas caminhadas são desafiadoras. Isso ocorre porque dois indivíduos, ainda que possuam características físicas semelhantes (mesma massa e altura) e caminhem com frequência, velocidade e comprimento de passo idênticos, não produzem carregamentos exatamente iguais. Os parâmetros da caminhada humana, quando modelada como uma carga harmônica – amplitudes e ângulos de fase –, previstos pelas redes neurais que compõem o modelo desenvolvido, não dependem apenas de características quantitativas do pedestre e da caminhada, mas também do estilo de caminhar, que é único para cada indivíduo. (Verificar Apêndice A e os diversos estilos de carregamento da caminhada de cada pedestre).

Essas particularidades podem ser limitadoras quando se considera a previsão da caminhada de um único pedestre. Porém, em situações reais de tráfego, envolvendo múltiplos pedestres com diferentes massas, frequências e velocidades de caminhada, as previsões geradas pelo modelo proposto, **quando aplicadas em conjunto** na estrutura, tendem a produzir respostas mais

eficientes e precisas. Isso ocorre porque os padrões associados a vários pedestres apresentam características – ou parâmetros de função associados a harmônicos e sub-harmônicos – de forma mais aleatória ou variada, que vão ao encontro da generalização inerente às redes neurais utilizadas.

Em outras palavras, ao se considerar e aplicar uma **única** previsão de carga na estrutura, os parâmetros previstos tendem a estar fortemente associados aos dados específicos de um único pedestre do banco de dados. Esse pedestre, por sua vez, pode apresentar parâmetros de caminhada minorados ou majorados em relação ao comportamento geral de caminhar. Entretanto, ao se considerar e aplicar **múltiplas** previsões de carga em uma estrutura, essas previsões passam a ter parâmetros distintos, fortemente associados a um conjunto mais amplo de pedestres – com diferentes massas e frequências de caminhada– contidos no banco de dados. Assim, o conjunto de parâmetros previstos é capaz de representar uma generalização mais adequada da amostra geral de dados.

Nas próximas seções (Seção 7.3 e Seção 7.4), esses aspectos serão evidenciados de forma mais clara, por meio da comparação entre respostas estruturais obtidas a partir da aplicação de registros reais da caminhada e respostas calculadas por meio da aplicação do modelo desenvolvido neste trabalho. Em cada comparação, as massas dos pedestres e as frequências de caminhada utilizadas na previsão, serão exatamente as mesmas observadas nos registros reais.

7.3 RESULTADOS PARA PEDESTRE ÚNICO EM RESSONÂNCIA COM A ESTRUTURA

Nesta seção, o modelo de carga desenvolvido neste trabalho, bem como os modelos consagrados já abordados em seções anteriores, são aplicados às estruturas previamente analisadas, considerando as frequências de harmônicos e sub-harmônicos capazes de excitar cada estrutura em condições de ressonância. Para modelar o carregamento, utilizam-se como dados de entrada as massas dos pedestres e as frequências de caminhada observadas em registros experimentais de longa duração.

Para isso, quatro pedestres distintos, cujas características físicas são apresentadas na Tabela 7.4, foram induzidos a caminhar em frequências pré-determinadas, com o objetivo de produzir registros experimentais de caminhadas de longa duração, com 45 segundos de duração.

Tabela 7.4 – Características físicas dos pedestres para registros de longa duração

Pedestre	Massa (kg)	Altura (m)
Pedestre A*	58	1,62
Pedestre B	61	1,72
Pedestre C*	75	1,78
Pedestre D	90	1,82

O Pedestre A da Tabela 7.4 corresponde ao mesmo indivíduo identificado como Pedestre 2 na Tabela 4.1 (Seção 4.2). De forma análoga, o Pedestre C da Tabela 7.4 corresponde à mesma pessoa identificada como Pedestre 8 na Tabela 4.1 (Seção 4.2). Apesar de se tratar dos mesmos pedestres, ressalta-se que os registros utilizados nesta seção, para fins de validação e comparação do modelo, são diferentes daqueles utilizados na etapa de construção do modelo. Para a criação do modelo, foram utilizados registros com duração de apenas 6 segundos, enquanto nesta etapa, os registros possuem 45 segundos de duração.

Os pedestres B e D, por sua vez, não participaram do processo de criação do modelo, ou seja, são indivíduos cujas características jamais foram apresentadas ao conjunto de redes neurais artificiais que compõem o modelo desenvolvido.

Cada pedestre foi induzido a caminhar em frequências próximas às frequências de ressonância das estruturas analisadas, de modo que a caminhada registrada estimulasse cada modelo estrutural por meio de algum harmônico ou sub-harmônico. Em seguida, a partir dos dados de cada registro – peso do pedestre e frequência predominante da caminhada –, o modelo proposto neste trabalho, bem como os demais modelos, foram utilizados para simular o carregamento vertical induzido pela caminhada.

Por fim, tanto os registros experimentais quanto os carregamentos simulados foram aplicados aos modelos estruturais de passarela analisados neste trabalho. Para cada caso, a resposta máxima, em termos de aceleração no meio do vão, foi computada e as comparações são apresentadas nas Subseções 7.3.1 e 7.3.2.

É importante ressaltar que a frequência efetiva da caminhada de cada pedestre não coincide exatamente com a frequência crítica de estimulação da estrutura. Ainda que os quatro pedestres tenham sido treinados para caminhar em frequências constantes e pré-determinadas por um período prolongado, de quase um minuto, a manutenção dessas frequências por um longo tempo não é uma tarefa fisicamente fácil.

7.3.1 Resposta das estruturas realistas para um único pedestre

Inicialmente, os quatro pedestres previamente apresentados na Tabela 7.4 foram induzidos a caminhar por 45 segundos nas três frequências críticas de estimulação do modelo estrutural ME_{W1}. Essa estrutura possui frequência natural fundamental de 5,996 Hz e, portanto, tende a ser excitada pelo terceiro harmônico de uma caminhada a 1,9987 Hz, pelo quarto sub-harmônico de uma caminhada a 1,7131 Hz e pelo quarto harmônico de uma caminhada a 1,4990 Hz.

Em seguida, considerando-se as massas de cada pedestre e as frequências naturais médias efetivamente observadas ao longo dos 45 segundos de caminhada, o modelo desenvolvido no presente trabalho foi utilizado para simular cargas verticais da caminhada para cada situação analisada. Adicionalmente, os modelos da ISO 10137 (2007) e de Bachmann e Ammann (1987) também foram empregados. Tanto a carga medida experimentalmente quanto aquelas geradas pelos diferentes modelos de carga foram aplicadas à estrutura, e sua resposta dinâmica foi calculada por meio do Método de Newmark.

Os resultados obtidos para a aceleração máxima no nó central da estrutura são apresentados na Tabela 7.5, na qual f_e é a frequência crítica de estimulação da estrutura por meio de um determinado harmônico ou sub-harmônico, enquanto f_s é a frequência predominante observada no registro experimental, utilizada também como dado de entrada nos modelos de carga. Destaca-se em negrito o modelo cuja aplicação gerou a melhor aproximação da resposta estrutural quando comparada àquela obtida mediante a aplicação do registro real.

Tabela 7.5 – Aceleração máxima para o nó central do ME_{W1}

Harm. Ou Sub.	f_e (Hz)	Pedestre	f_s (Hz)	Aceleração máxima do nó central (m/s^2)			
				Registro	Presente Trabalho	ISO 10137	Bachmann e Ammann
3 Harm.	1,9987	A	1,9996	0,96	1,99	**1,13**	1,84
		B	2,0055	1,29	**1,50**	1,08	1,75
		C	1,9966	2,40	2,80	1,43	**2,35**
		D	2,0013	1,93	1,57	**1,72**	2,80
4 Sub.	1,7131	A	1,6974	0,35	0,07	**0,08**	0,06
		B	1,7051	0,36	**0,16**	0,08	0,06
		C	1,7027	0,40	**0,12**	0,10	0,08
		D	1,7043	0,45	**0,35**	0,12	0,09
4 Harm.	1,4990	A	1,4990	0,56	**1,21**	1,30	0,03
		B	1,5054	0,63	**0,57**	1,04	0,03
		C	1,5043	0,95	1,79	**1,38**	0,04
		D	1,5039	0,88	3,01	**1,68**	0,05

Observa-se que o modelo desenvolvido neste trabalho foi aquele que melhor reproduziu as respostas estruturais obtidas por um registro real no maior número de situações analisadas, totalizando seis casos, seguido de perto pelo modelo da ISO 10137 (2007). O modelo de Bachmann e Ammann (1987) apresentou melhor desempenho somente em uma situação.

Mesmo nos casos em que o modelo proposto não teve o melhor desempenho, as respostas estruturais obtidas mostraram-se, em sua maioria, coerentes com as respostas reais, ora majoradas, ora minoradas. Destaca-se, ainda, que os modelos da ISO 10137 (2007) e de Bachmann e Ammann (1987) não são capazes de representar de forma adequada situações de excitação estrutural associadas a sub-harmônicos da caminhada, limitação superada pelo modelo desenvolvido neste trabalho.

Para dar continuidade à análise, os quatro pedestres previamente identificados foram induzidos a caminhar próximo às três frequências críticas de estimulação do modelo estrutural ME_{W2}. Em seguida, a caminhada de cada pedestre foi modelada por meio dos diferentes modelos de carga e aplicada à estrutura, juntamente com a aplicação do respectivo registro experimental.

Os resultados obtidos para a aceleração máxima no meio do vão da estrutura são apresentados na Tabela 7.6.

Tabela 7.6 – Aceleração máxima para o nó central do ME_{W2}

Harm. Ou Sub.	f_e (Hz)	Pedestre	f_s (Hz)	Aceleração máxima do nó central (m/s^2)			
				Registro	Presente Trabalho	ISO 10137	Bachmann e Ammann
4 Harm.	2,0473	A	2,0501	0,87	**0,63**	1,33	0,04
		B	2,0537	1,30	0,64	**1,29**	0,04
		C	2,0443	1,31	3,81	**1,73**	0,05
		D	2,0475	1,08	**0,88**	2,10	0,06
5 Sub.	1,8199	A	1,8204	0,29	**0,33**	0,11	0,02
		B	1,8198	0,57	**0,19**	0,12	0,03
		C	1,8257	0,64	**0,77**	0,14	0,03
		D	1,8213	0,69	**0,58**	0,17	0,04
5 Harm.	1,6379	A	1,6307	0,28	**0,63**	1,18	0,02
		B	1,6445	0,76	**0,56**	1,22	0,02
		C	1,6461	1,25	0,65	**1,35**	0,02
		D	1,6448	1,33	0,43	**1,78**	0,03

Observa-se na Tabela 7.6 que, das 12 situações analisadas, o modelo desenvolvido no presente trabalho apresentou o melhor desempenho em oito delas, com destaque para aquelas associadas à estimulação por meio do quinto sub-harmônico da caminhada. Em quatro situações, o modelo da ISO 10137 (2007) apresentou a melhor aproximação em relação aos registros experimentais, enquanto o modelo de Bachmann e Ammann (1987) não obteve o melhor desempenho em nenhuma das situações analisadas.

Em seguida, ocorre a análise para o modelo estrutural ME_{P1}. Neste cenário, duas frequências naturais de caminhada diferentes foram consideradas, uma vez que a estrutura possui duas frequências críticas que podem ser excitadas por harmônicos ou sub-harmônicos da caminhada. Os resultados obtidos, em termos de aceleração máxima no nó central da estrutura, após a aplicação dos registros experimentais bem como dos modelos de carga, são apresentados na Tabela 7.7.

Tabela 7.7 – Aceleração máxima para o nó central do ME_{P1}

Harm. Ou Sub.	f_e (Hz)	Pedestre	f_s (Hz)	Aceleração máxima do nó central (m/s^2)			
				Registro	Presente Trabalho	ISO 10137	Bachmann e Ammann
2 Harm.	2,0008	A	1,9996	0,44	**0,80**	0,94	0,93
		B	2,0055	0,68	**0,45**	0,95	0,93
		C	1,9966	0,80	**0,99**	1,17	1,17
		D	2,0013	1,03	**0,95**	1,45	1,44
3 Sub.	1,6006	A	1,5969	0,26	**0,12**	0,04	0,05
		B	1,6009	0,14	**0,14**	0,04	0,05
		C	1,6023	0,26	**0,07**	0,05	0,06
		D	1,6008	0,30	**0,24**	0,05	0,08

Para essa estrutura, observa-se mais uma vez a limitação dos modelos da ISO 10137 (2007) e de Bachmann e Ammann (1987) na representação de excitações associadas a sub-harmônicos da caminhada – neste caso, terceiro sub-harmônico – nas quais a aplicação destes modelos como carregamento gerou respostas significativamente inferiores às observadas experimentalmente. Por outro lado, a aplicação do modelo desenvolvido no presente trabalho como carga vertical da caminhada, gerou respostas estruturais próximas àquelas obtidas por meio da aplicação de registros de cargas reais, apresentando o melhor desempenho nas quatro situações envolvendo o terceiro sub-harmônico.

Em relação à excitação pelo segundo harmônico, todos os modelos geraram respostas relativamente próximas entre si. Todavia, os resultados do modelo proposto foram os que mais se aproximaram dos resultados obtidos por meio de registros reais.

Por fim, na Tabela 7.8 são apresentados os resultados obtidos para a aplicação do modelo proposto na estrutura ME_{P2}. Esse modelo estrutural, devido a sua frequência natural fundamental, apresenta possibilidades mais abrangentes de excitação, possuindo quatro frequências naturais críticas – duas associadas a harmônicos e duas associadas a sub-harmônicos – devidamente analisadas.

Tabela 7.8 – Aceleração máxima para o nó central do ME_{P2}

Harm. Ou Sub.	f_e (Hz)	Pedestre	f_s (Hz)	Aceleração máxima do nó central (m/s^2)			
				Registro	Presente Trabalho	ISO 10137	Bachmann e Ammann
3 Harm.	2,2752	A	2,2805	0,68	0,36	**0,77**	1,25
		B	2,2837	1,10	0,31	0,72	**1,16**
		C	2,2774	0,63	**0,42**	1,02	1,66
		D	2,2834	1,32	**1,21**	1,06	1,72
4 Sub.	1,9502	A	1,9475	0,19	**0,14**	0,06	0,05
		B	1,9499	0,21	0,50	**0,06**	0,05
		C	1,9470	0,32	**0,43**	0,08	0,06
		D	1,9486	0,27	**0,45**	0,09	0,07
4 Harm.	1,7064	A	1,6974	0,49	**0,29**	0,70	0,02
		B	1,7051	0,57	**0,69**	0,93	0,02
		C	1,7027	0,92	0,58	**1,20**	0,03
		D	1,7043	0,76	**0,91**	1,37	0,04
5 Sub.	1,5168	A	1,5160	0,24	**0,15**	0,07	0,02
		B	1,5244	0,16	0,38	**0,07**	0,02
		C	1,5235	0,31	**0,21**	0,09	0,02
		D	1,5221	0,22	0,89	**0,11**	0,03

De modo geral, o modelo proposto neste trabalho apresentou desempenho superior em um maior número de situações, com destaque àquelas associadas ao quarto harmônico e ao quarto sub-harmônico. O modelo da ISO 10137 (2007) mostrou-se competitivo em algumas situações, enquanto o modelo de Bachmann e Ammann (1987) geralmente apresentou o pior desempenho.

7.3.2 Resposta das estruturas com frequência reduzida para um único pedestre

Nesta seção, são apresentados resultados para um pedestre único caminhando sobre estruturas com frequências naturais propositalmente reduzidas, obtidas pelo aumento do comprimento do vão. É importante destacar mais uma vez que essas estruturas não representam condições realistas, sendo utilizadas unicamente para avaliar o modelo proposto em situações extremas, especialmente quando a frequência natural da caminhada coincide com a frequência natural fundamental da estrutura, ocasionando excitação por meio do primeiro harmônico.

Inicialmente, cada pedestre foi induzido a caminhar, durante 45 segundos, em uma frequência próxima de 2,18 Hz – correspondente a uma aproximação da frequência natural fundamental

do modelo estrutural ME_{W3} –, sendo que os dados de massa do pedestre e da frequência efetiva de caminhada f_s foram utilizados para simular o carregamento vertical da caminhada por meio do modelo proposto neste trabalho, bem como pelos modelos da ISO 10137 (2007) e de Bachmann e Ammann (1987).

Tanto os registros experimentais quanto os carregamentos simulados por cada modelo de carga foram aplicados à estrutura, e as respostas máximas obtidas no meio do vão são apresentadas na Tabela 7.9.

Tabela 7.9 – Aceleração máxima para o nó central do ME_{W3}

Harm. Ou Sub.	f_e (Hz)	Pedestre	f_s (Hz)	Aceleração máxima do nó central (m/s^2)			
				Registro	Presente Trabalho	ISO 10137	Bachmann e Ammann
1 Harm.	2,1780	A	2,1853	6,47	**5,73**	4,84	4,43
		B	2,1817	3,48	5,13	5,23	**4,78**
		C	2,1848	4,66	**4,43**	6,24	5,71
		D	2,1828	5,57	**6,29**	7,70	7,03

Para esta estrutura, observa-se que o modelo desenvolvido neste trabalho, ao ser aplicado como carregamento vertical da caminhada, é capaz de gerar respostas muito próximas àquelas geradas por um registro real, considerando um pedestre de mesma massa e mesma frequência de caminhada. Os modelos da ISO 10137 (2007) e de Bachmann e Ammann (1987) também geraram aproximações relativamente boas.

De modo geral, não é possível observar um padrão específico de majoração ou minoração de resultados: ora todos os modelos geram resultados mais conservadores que o registro, ora todos os modelos geram resultados menos conservadores. Essa ausência de padrões específicos pode ser explicada por meio das aleatoriedades da caminhada inerentes ao estilo de andar de cada indivíduo.

Por sua vez, na Tabela 7.10 são apresentadas as acelerações máximas no nó central da estrutura ME_{W4}, considerando a aplicação de registros experimentais de pedestres caminhando a frequências muito próximas a 2 Hz, bem como a aplicação de modelos de carga utilizando a mesma frequência para simular o carregamento.

Tabela 7.10 – Aceleração máxima para o nó central do ME_{W4}

Harm. Ou Sub.	f_e (Hz)	Pedestre	f_s (Hz)	Aceleração máxima do nó central (m/s^2)			
				Registro	Presente Trabalho	ISO 10137	Bachmann e Ammann
1 Harm.	1,9965	A	1,9996	3,96	2,54	3,03	**3,25**
		B	2,0055	2,65	**3,42**	4,20	4,52
		C	1,9966	4,36	**3,41**	5,77	6,22
		D	2,0013	4,10	**5,34**	6,69	7,22

Novamente, observa-se que o modelo desenvolvido neste trabalho é o que mais se aproxima da resposta obtida por meio do registro real em um maior número de situações, evidenciando a eficiência e superioridade do modelo, também, em excitações associadas ao primeiro harmônico da caminhada.

Por fim, a Tabela 7.11 apresenta os resultados referentes à aplicação do modelo proposto na estrutura ME_{P3}, excitada por meio do segundo harmônico e do segundo sub-harmônico da caminhada. Observa-se, mais uma vez, que o modelo proposto foi o mais preciso em um maior número de situações, especialmente àquelas associadas ao segundo sub-harmônico, uma vez que os demais modelos de carga não consideram excitações por meio de sub-harmônicos. Já nas excitações associadas ao segundo harmônico, o modelo apresentou resultados coerentes, menos conservadores do que os modelos já existentes, ora majorando e ora minorando a resposta da estrutura em comparação com a resposta obtida por meio de registros reais.

Tabela 7.11 – Aceleração máxima para o nó central do ME_{P3}

Harm. Ou Sub.	f_e (Hz)	Pedestre	f_s (Hz)	Aceleração máxima do nó central (m/s^2)			
				Registro	Presente Trabalho	ISO 10137	Bachmann e Ammann
2 Sub.	2,1361	A	2,1311	0,37	**0,14**	0,05	0,05
		B	2,1341	0,22	**0,15**	0,05	0,05
		C	2,1371	0,48	**0,16**	0,06	0,07
		D	2,1278	0,27	**0,25**	0,07	0,08
2 Harm.	1,6021	A	1,5969	0,47	**0,35**	0,83	0,84
		B	1,6009	0,46	**0,36**	0,96	0,96
		C	1,6023	0,80	0,20	1,20	**1,19**
		D	1,6008	1,04	0,60	1,43	**1,42**

Nas próximas subseções, o modelo proposto será aplicado para o caso de múltiplos pedestres caminhando na estrutura. Conforme já comentado anteriormente, quanto maior o número de pedestres, maior a tendência de precisão e eficiência do modelo.

7.4 RESULTADOS PARA MÚLTIPLOS PEDESTRES EM FREQUÊNCIAS PRÓXIMAS A 2 HZ

Nesta seção, é considerada a ação de múltiplos pedestres caminhando sobre a estrutura em frequências próximas a 2 Hz, variando entre 1,975 Hz e 2,213 Hz. Para essa análise, aplica-se às estruturas consideradas neste trabalho um conjunto de registros de forças geradas por 12 pedestres de massas distintas, estimulados a caminhar em frequências próximas a 2 Hz. A aplicação considera três situações diferentes: Na primeira situação, adota-se um intervalo de 4 segundos entre a entrada de cada pedestre na estrutura. Na segunda, esse intervalo é reduzido para 2 segundos, de modo que os pedestres fiquem mais próximos entre si. Por fim, na terceira situação, o intervalo de entrada é reduzido para apenas 1 segundo.

Como a maioria dos pedestres considerados nesta análise são os mesmos utilizados na construção do modelo baseado em redes neurais, foram introduzidas pequenas variações aleatórias, limitadas a 2%, na massa de cada pedestre durante a conversão das acelerações registradas em forças. Assim, o peso – ou força – efetivamente adotado nos registros desta seção, bem como utilizado como parâmetro de entrada nos modelos de carga, difere levemente daquele presente no banco de dados empregado para o treinamento do modelo de redes neurais. Essa modificação tem como objetivo forçar o conjunto de redes do modelo a realizar previsões a partir de dados de entrada aos quais nunca teve acesso durante o treinamento.

As características dos pedestres selecionados, incluindo massa corporal real, peso real, peso ajustado, e frequência de caminhada observada nos registros, são apresentadas na Tabela 7.12. Nessa tabela também é indicada a ordem de entrada dos pedestres na estrutura, definida de forma aleatória.

É importante ressaltar que os registros utilizados nesta seção – bem como na Seção 7.5, discutida posteriormente – não são de fato registros de longa duração, uma vez que a maioria dos pedestres apresenta dificuldades em caminhar por um longo tempo em frequências pré-determinadas. Dessa forma, foram considerados registros menores, geralmente com 6 a 10

segundos de duração, que foram replicados até alcançar o tempo de estimulação necessário para atravessar cada estrutura, geralmente 45 segundos.

Tabela 7.12 – Características para a ação de múltiplos pedestres caminhando em frequências próximas a 2 Hz

Ordem de entrada	Massa real (kg)	Peso real (N)	Peso ajustado (N)	Diferença no peso (%)	Frequência da caminhada (Hz)
1	66	647,46	642,95	0,70%	1,975
2	90	882,90	884,00	0,12%	2,077
3	58	568,98	577,34	1,47%	2,104
4	73	716,13	707,29	1,23%	2,213
5	65	637,65	634,64	0,47%	2,009
6	105	1030,05	1026,97	0,29%	1,998
7	60	588,86	589,20	0,06%	2,122
8	69	676,89	667,71	1,36%	2,023
9	92	902,52	884,58	1,99%	2,024
10	54	529,74	520,47	1,75%	2,165
11	75	735,75	733,79	0,27%	1,995
12	76	745,56	739,08	0,87%	2,093

Em seguida, as duas últimas colunas da Tabela 7.12 são utilizadas como dados de entrada para a realização de 12 previsões de carregamento por meio do modelo de carga proposto neste trabalho. Os parâmetros previstos para cada caso são organizados em um arquivo no formato .txt, que serve como entrada para a modelagem do carregamento conforme a Equação 6.2, previamente apresentada. Esse arquivo é apresentado na Figura 7.9. A última linha do arquivo, correspondente ao tempo de entrada de cada pedestre na estrutura, é modificada em cada análise de acordo com a distribuição de pedestres adotada.

```
%Dados da Previsão para aplicar na estrutura - cada coluna é um pedestre, cada linha é um parâmetro
642.95  884.00  577.34  707.29  634.64  1026.97 589.20  667.71  884.58  520.47  733.79  739.08          %Peso
1.9753  2.0771  2.1039  2.2128  2.0085  1.9982  2.1218  2.0229  2.0242  2.1646  1.9949  2.0925          %Frequência
185.65  298.97  256.75  444.47  187.62  149.00  206.52  179.53  304.68  335.04  164.20  444.06          %Delta_G_H1
30.53   90.86   37.68   103.07  25.40   45.48   40.80   89.06   56.78   94.23   58.40   117.11          %Delta_G_H2
54.62   40.90   31.41   81.08   53.36   102.16  53.21   73.85   68.33   57.12   31.40   78.10           %Delta_G_H3
10.31   16.99   7.58    15.59   8.65    46.37   13.80   19.68   54.48   16.52   37.66   35.09           %Delta_G_H4
7.27    11.63   2.32    7.01    6.27    17.56   2.59    8.32    23.36   5.69    1.62    21.24           %Delta_G_H5
7.14    6.28    7.68    0.38    7.22    4.52    6.92    7.60    14.11   9.82    3.64    9.60            %Delta_G_S1
15.18   28.85   9.82    12.73   13.64   27.65   10.51   19.58   23.07   -5.59   15.52   50.41           %Delta_G_S2
10.94   19.74   19.23   6.85    11.53   8.52    14.07   6.28    6.44    16.85   22.27   23.47           %Delta_G_S3
14.44   6.72    6.69    32.54   16.73   3.49    13.76   7.44    5.04    58.25   2.18    10.51           %Delta_G_S4
10.02   10.72   3.03    37.94   9.92    21.58   5.56    4.16    4.23    31.08   7.43    9.12            %Delta_G_S5
0.70    6.26    0.46    5.75    0.13    -1.29   1.26    1.33    -1.22   5.96    0.54    0.53            %phi_H2
3.32    3.69    4.10    1.55    3.30    1.47    3.28    3.60    5.28    1.57    2.96    2.97            %phi_H3
5.06    4.51    4.24    2.99    5.90    5.06    6.37    5.40    -1.05   3.42    3.84    3.04            %phi_H4
2.74    1.52    3.22    3.81    2.85    -3.06   2.26    1.60    3.80    4.93    3.37    2.54            %phi_H5
3.97    3.13    3.87    -0.87   5.13    -2.37   5.10    2.92    -1.82   -0.46   4.03    2.43            %phi_S1
4.76    4.20    2.34    5.21    4.95    4.74    3.91    4.90    5.25    5.54    0.90    1.43            %phi_S2
3.50    1.83    4.14    4.66    4.35    1.61    3.16    2.95    5.78    3.15    2.67    5.12            %phi_S3
6.74    5.33    4.26    1.27    5.64    2.71    5.08    5.42    2.86    4.05    5.36    0.05            %phi_S4
0.75    3.62    4.97    5.29    1.16    -0.88   1.93    1.74    4.52    9.32    3.65    -4.09           %phi_S5
0.00    1.00    2.00    3.00    4.00    5.00    6.00    7.00    8.00    9.00    10.00   11.00           %Tempo da Entrada
```

Figura 7.9 – Parâmetros previstos para modelar carregamentos de 12 pedestres em frequências próximas a 2 Hz

Por fim, as respostas estruturais são calculadas, por meio do Método de Newmark, para cada estrutura, considerando tanto a aplicação dos registros reais como a aplicação do modelo desenvolvido neste trabalho e de outros modelos de carga. Ressalta-se que os modelos de Bachmann e Ammann (1987) e da ISO 10137 (2007) não permitem distinguir os pedestres individualmente, seja em termos de massa ou de frequência da caminhada, nem considerar diferentes distribuições ao longo da estrutura. Assim, nas comparações apresentadas a seguir, esses dois modelos são aplicados considerando a massa média dos 12 pedestres e uma frequência de caminhada de 2 Hz. Tais simplificações seguem recomendações de Bachmann e Ammann (1987) e as observações de Matsumoto et al. (1972) sobre frequências típicas de caminhada. Os resultados são apresentados nas Seções 7.4.1 e 7.4.2.

7.4.1 Resposta das estruturas realistas para múltiplos pedestres caminhando em frequências próximas a 2 Hz

A Figura 7.10 apresenta as respostas de aceleração no meio do vão do modelo estrutural ME_{W1}, comparando-se os resultados obtidos a partir da aplicação de registros experimentais com aqueles provenientes do modelo de carga proposto neste trabalho e dos modelos da ISO 10137 (2007) e de Bachmann e Ammann (1987). São consideradas três condições distintas de tráfego de pedestres, correspondentes a intervalos de entrada de 4, 2 e 1 segundo.

Conforme já discutido, os modelos da ISO 10137 (2007) e de Bachmann e Ammann (1987) não permitem distinguir a distribuição dos pedestres ao longo da estrutura, sendo realizada, em

ambos os casos, uma única análise com a massa média dos pedestres e frequência típica de caminhada de 2 Hz.

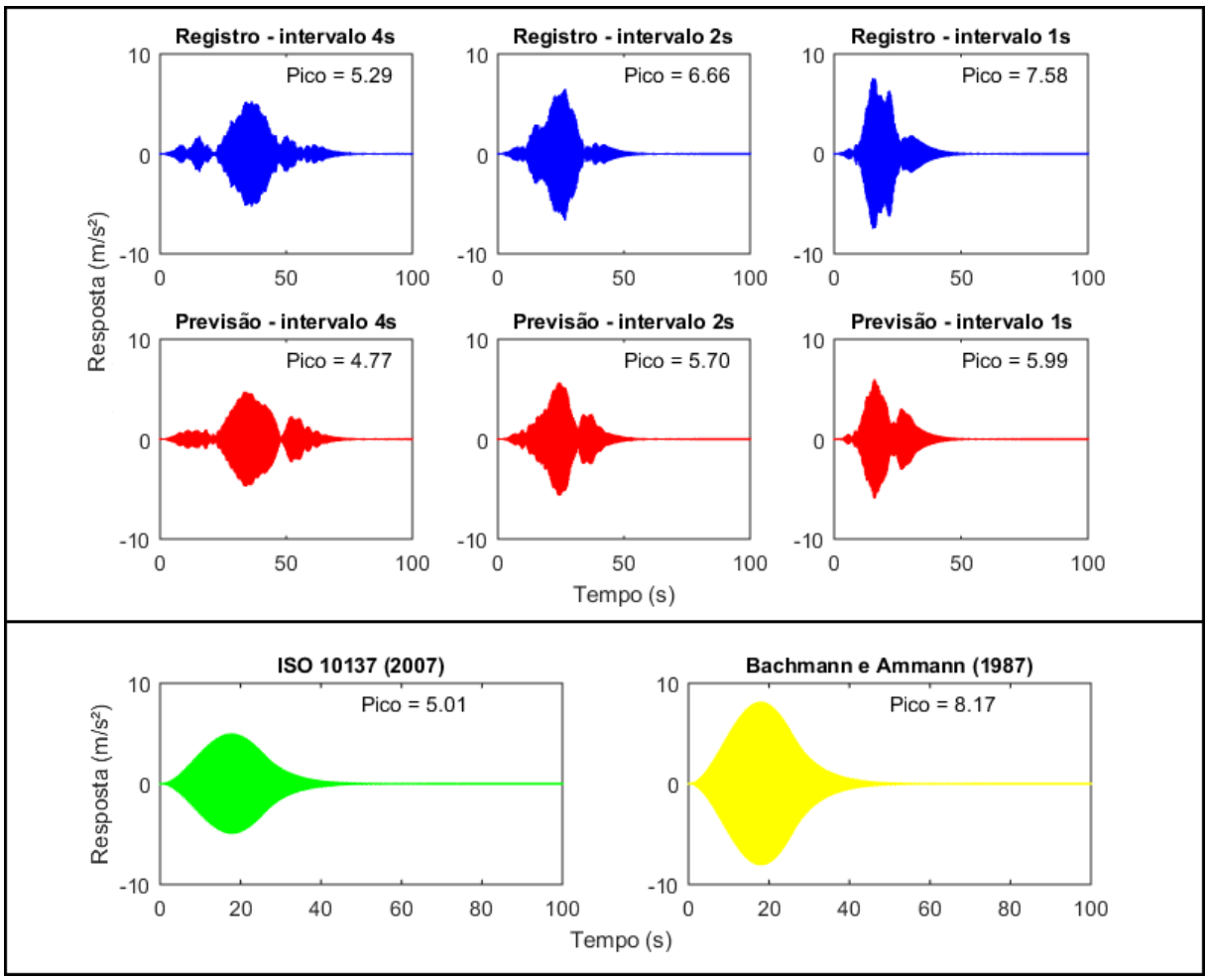


Figura 7.10 – Acelerações no nó central do ME_{W1} para 12 pedestres caminhando em frequências próximas a 2 Hz

Como a frequência natural fundamental dessa estrutura é de 6 Hz, a excitação ocorre predominantemente pelo terceiro harmônico de uma caminhada em torno de 2 Hz, situação contemplada pelos modelos da ISO 10137 e de Bachmann e Ammann (1987). Observa-se que ambos fornecem estimativas de respostas relativamente próximas às obtidas mediante a aplicação dos registros experimentais. Entretanto, o modelo proposto neste trabalho, baseado em previsões por redes neurais e aplicabilidade capaz de considerar diferentes distribuições de pedestres, apresenta maior adequação às diversas situações analisadas, embora tenda a minorar os picos de aceleração para essa análise em questão.

Na sequência, analisam-se os resultados do modelo estrutural ME_{W2}, cuja frequência natural fundamental é de aproximadamente 8,19 Hz, sendo, portanto, excitado pelo quarto harmônico

de caminhadas próximas a 2,05 Hz, pelo quinto sub-harmônico de caminhadas próximas a 1,82 Hz e pelo quinto harmônico de caminhadas próximas a 1,64. As acelerações máximas no nó central da estrutura podem ser visualizadas na Figura 7.11.

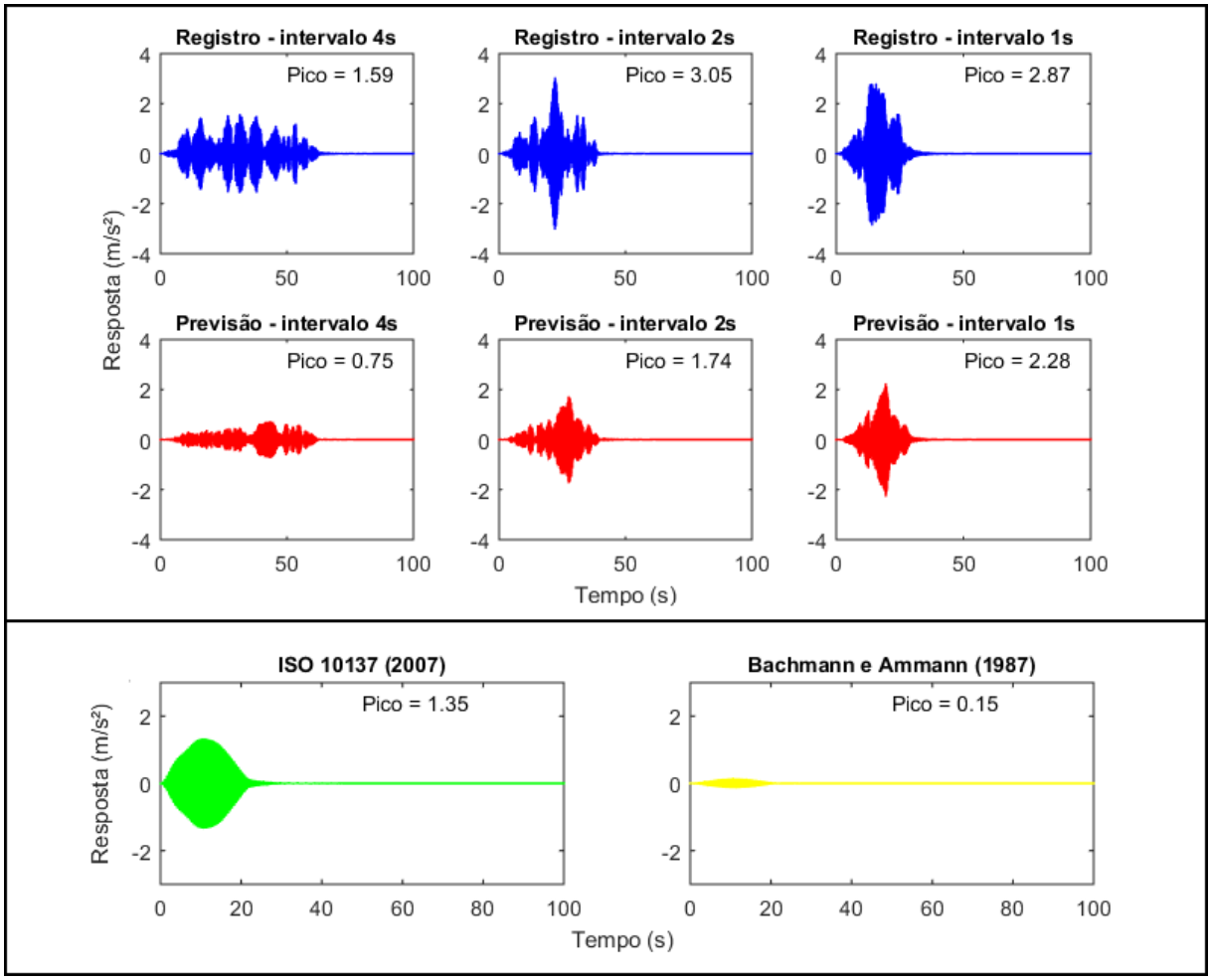


Figura 7.11 – Acelerações no nó central do ME_{W2} para 12 pedestres caminhando em frequências próximas a 2 Hz

Observa-se que a aplicação das previsões de carga do modelo proposto gera respostas compatíveis com aquelas obtidas a partir dos registros experimentais, tanto em termos de forma quanto de duração da resposta, embora os picos de acelerações tenham sido minorados em algumas situações. O modelo da ISO 10137 (2007) fornece uma resposta única, significativamente minorada quando os intervalos de entrada dos pedestres são reduzidos (1 ou 2 segundos). Já o modelo de Bachmann e Ammann (1987) não produz resposta significativa, uma vez que sua formulação considera apenas os três primeiros harmônicos, enquanto essa estrutura é excitada essencialmente por harmônicos superiores.

Em seguida, avalia-se o modelo estrutural ME_{P1}, correspondente a uma passarela treliçada do tipo Pratt, com frequência natural fundamental de aproximadamente 4 Hz. Nessa condição, a estrutura é excitada principalmente pelo segundo harmônico de caminhadas próximas a 2 Hz, sendo a contribuição de sub-harmônicos pouco relevante para os registros analisados. As acelerações no meio do vão são apresentadas na Figura 7.12.

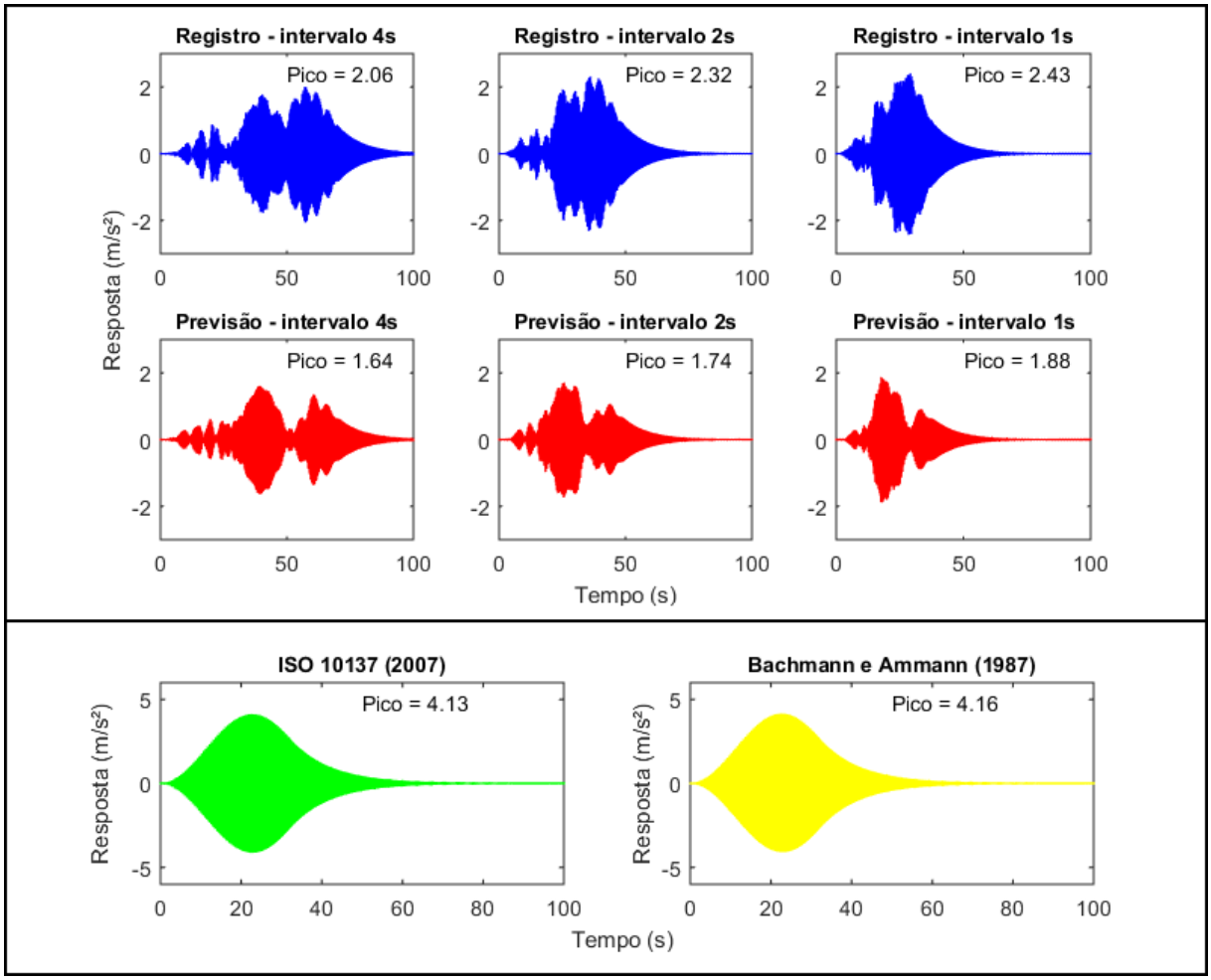


Figura 7.12 – Acelerações no nó central do ME_{P1} para 12 pedestres caminhando em frequências próximas a 2 Hz

Observa-se que o modelo de previsões baseado em redes neurais proposto neste trabalho apresenta respostas mais próximas daquelas observadas mediante a aplicação de registros experimentais, considerando as mesmas condições de massa e frequência de caminhada. Por outro lado, os modelos da ISO 10137 (2007) e de Bachmann e Ammann produzem respostas praticamente idênticas entre si e superestimadas. Essa coincidência está associada ao fato de ambos os modelos adotarem valores tabelados idênticos de amplitudes e ângulos de fase para o segundo harmônico.

Por fim, analisa-se o modelo estrutural ME_{P2}, uma passarela treliçada do tipo Pratt com frequência natural fundamental de aproximadamente 6,83 Hz. Nessa estrutura, a excitação ocorre predominantemente pelo terceiro harmônico de caminhadas em torno de 2,28 Hz, pelo quarto sub-harmônico de caminhadas próximas a 1,95 Hz, pelo quarto harmônico de caminhadas em torno de 1,82 Hz e pelo quinto sub-harmônico de caminhadas próximas a 1,52 Hz. As respostas em termos de aceleração no nó central são apresentadas na Figura 7.13.

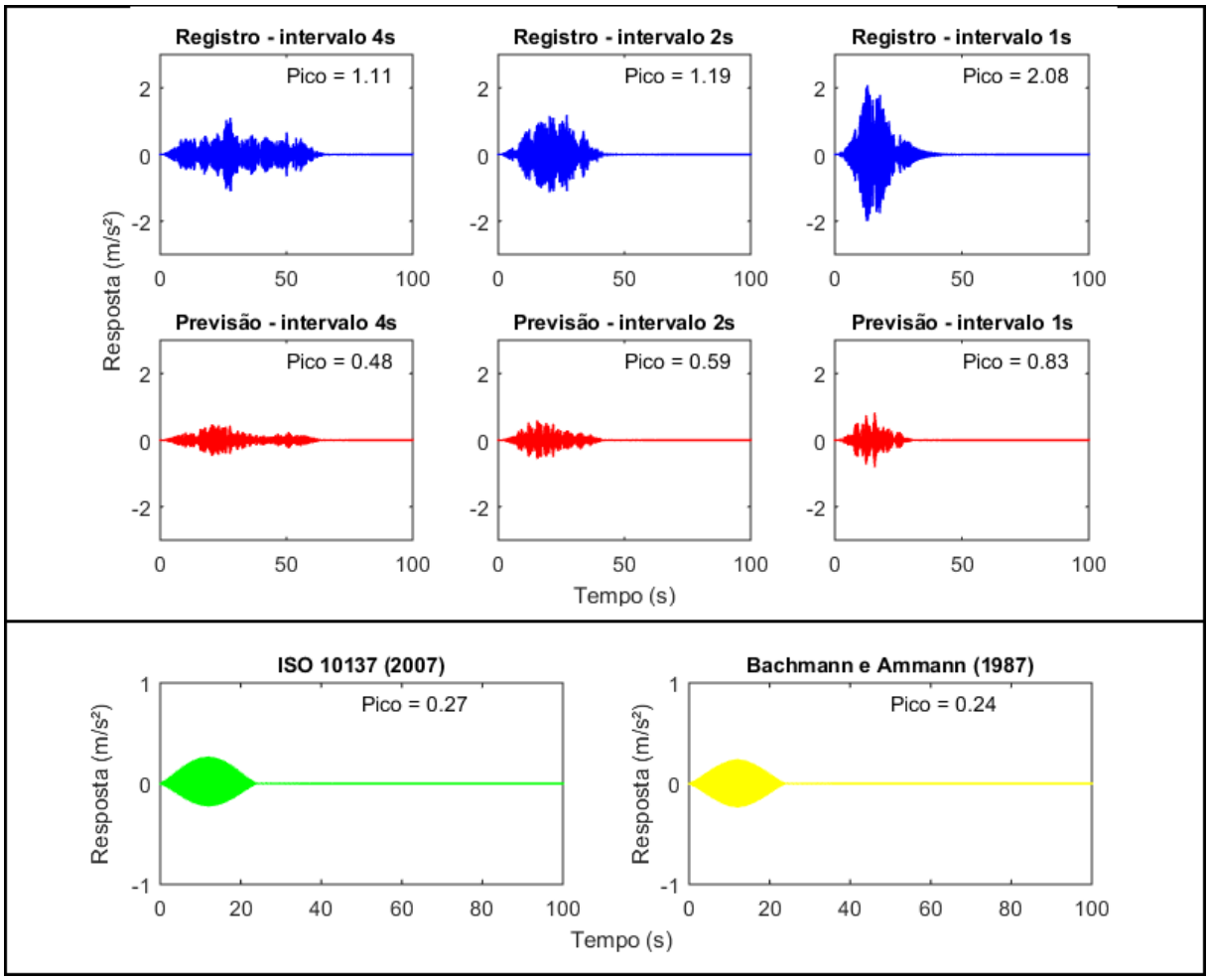


Figura 7.13 – Acelerações no nó central do ME_{P2} para 12 pedestres caminhando em frequências próximas a 2 Hz

Para essa estrutura, todos os modelos de carga minoraram os efeitos observados a partir da aplicação de registros experimentais. Ainda assim, o modelo proposto no presente trabalho gera os picos de acelerações mais próximos da realidade, atingindo valores da ordem de 0,83 m/s² na situação mais crítica, enquanto os demais modelos resultam em picos inferiores a 0,30 m/s². Essa diferença decorre do fato de que o modelo proposto considera a excitação de harmônicos e sub-harmônicos, enquanto os demais modelos contemplam somente a excitação por

harmônicos. Nessa estrutura em questão, caminhadas próximas a 2 Hz excitam a estrutura majoritariamente por meio do quarto sub-harmônico.

Esse resultado reforça a importância de considerar a influência dos sub-harmônicos em modelos de carga. Embora seus efeitos sejam, em geral, menores do que os dos harmônicos, eles não devem ser negligenciados em determinadas configurações estruturais.

7.4.2 Resposta das estruturas com frequência reduzida para múltiplos pedestres caminhando em frequências próximas a 2 Hz

Nesta seção, são apresentados os resultados obtidos com a aplicação do modelo de carga proposto neste trabalho em estruturas com frequência propositalmente reduzida. Conforme discutido anteriormente, tais estruturas não apresentam características necessariamente realistas, uma vez que a redução da frequência foi alcançada por meio do aumento do comprimento do vão. Sua utilização tem como principal objetivo avaliar o desempenho do modelo desenvolvido quando aplicado a estruturas tipicamente excitadas pelo primeiro harmônico ou pelo segundo sub-harmônico da caminhada.

Inicialmente, analisam-se os resultados da estrutura ME_{W3}, uma passarela treliçada do tipo Warren com frequência natural fundamental de aproximadamente 2,18 Hz, sendo, portanto, estimulada pelo primeiro harmônico de uma caminhada com a mesma frequência. As respostas, em termos da aceleração do nó central, obtidas a partir da aplicação de registros experimentais e de diferentes modelos de carga, são apresentadas na Figura 7.14.

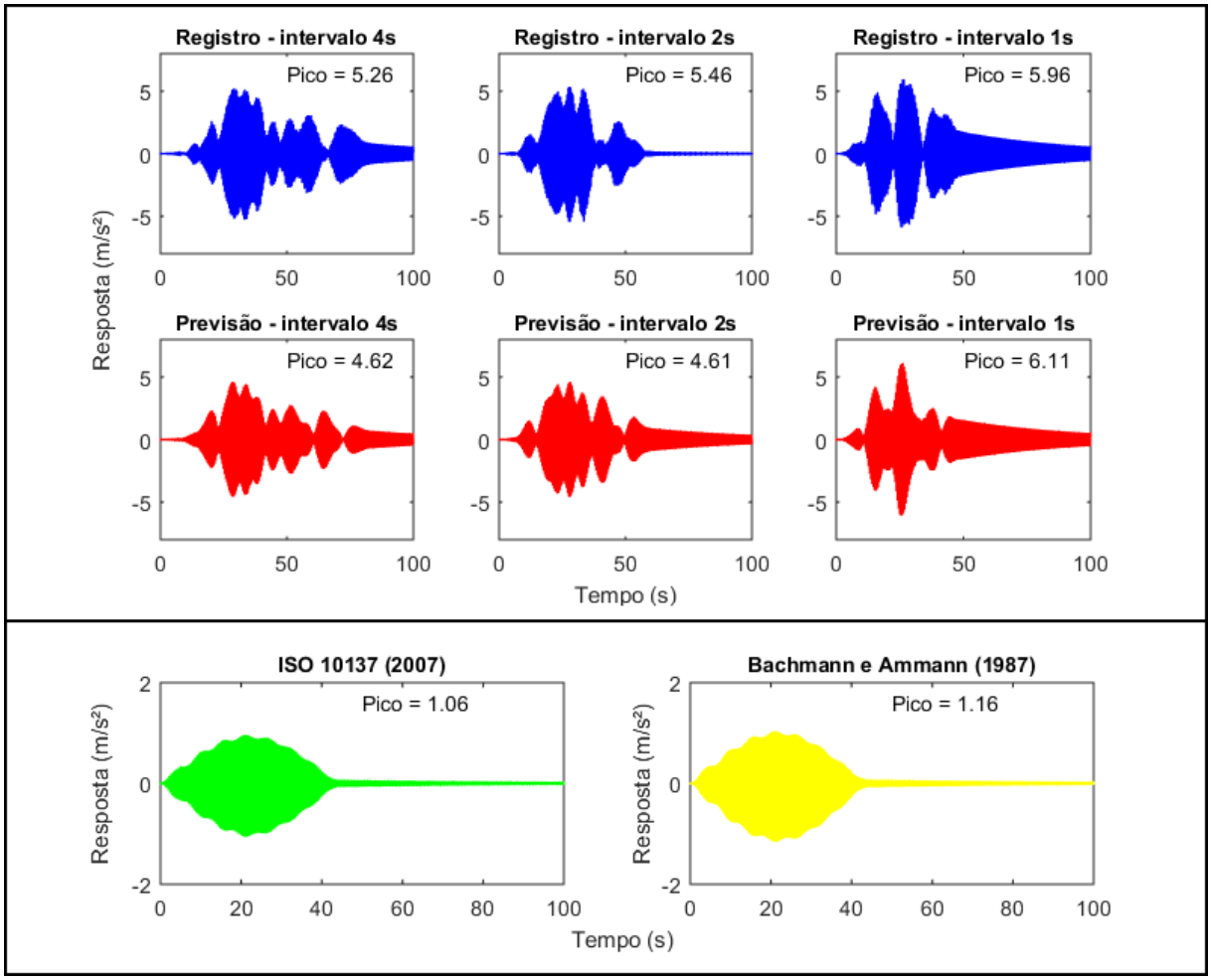


Figura 7.14 - Acelerações no nó central do ME_{W3} para 12 pedestres caminhando em frequências próximas a 2 Hz

Observa-se uma elevada concordância no formato das respostas geradas a partir dos registros experimentais e do modelo de carga proposto neste trabalho, com principais diferenças associadas às amplitudes e, consequentemente, aos picos de aceleração. Essa semelhança em formato, não observada de forma tão intensa nos casos da seção 3.4.1, deve-se ao fato de a excitação da estrutura estar associada ao primeiro harmônico.

Essa configuração, torna o modelo desenvolvido neste trabalho ainda mais eficiente, uma vez que o único parâmetro associado ao primeiro harmônico na função que rege o modelo (ver Equação 6.2) é sua amplitude, representada por ΔG_{H1}. Esse parâmetro é o primeiro a ser previsto no conjunto de redes neurais encadeadas (ver Tabela 6.2), apresentando, portanto, um erro associado muito baixo (ver Figura 6.15). Além disso, tal parâmetro mantém uma relação quase direta em relação aos dados de entrada – massa e frequência da caminhada – do conjunto de redes neurais e previsões (ver Figuras 6.10 e B.1).

Esses fatores contribuem para que o modelo desenvolvido seja particularmente eficiente na previsão de carregamentos dominados pelo primeiro harmônico, que, em geral, é o mais relevante por apresentar as maiores amplitudes associadas e, consequentemente, potencializar as respostas estruturais. Todavia, esse tipo de excitação tende a ser pouco frequente na prática, uma vez que passarelas modernas são comumente projetadas com frequências naturais afastadas da faixa crítica associada ao primeiro harmônico da caminhada, justamente para evitar problemas de vibrações excessivas.

Observa-se ainda que os modelos da ISO 10137 (2007) e de Bachmann e Ammann (1987), por considerarem uma única frequência de entrada para todos os pedestres – adotada como 2,00 Hz –, produzem respostas minoradas, já que esse valor se encontra afastado da frequência fundamental da estrutura. Todavia, caso esses modelos fossem aplicados utilizando a frequência de excitação da estrutura, as respostas tenderiam a ser majoradas, como será evidenciado na análise seguinte.

A análise subsequente trata-se do modelo estrutural ME_{W4}, uma passarela treliçada do tipo Warren com frequência natural fundamental de aproximadamente 2,00 Hz, sendo, portanto, excitada diretamente pelo primeiro harmônico de uma caminhada com a mesma frequência. As acelerações no nó central são apresentadas na Figura 7.15, sendo esse um dos casos previamente introduzidos no parágrafo anterior, no qual a frequência da estrutura e a frequência de excitação considerada nos modelos da ISO 10137 (2007) e de Bachmann e Ammann (1987) são coincidentes. O que se observa, na figura, é a majoração da resposta por parte de tais modelos, levando a uma situação incoerente em relação aos registros.

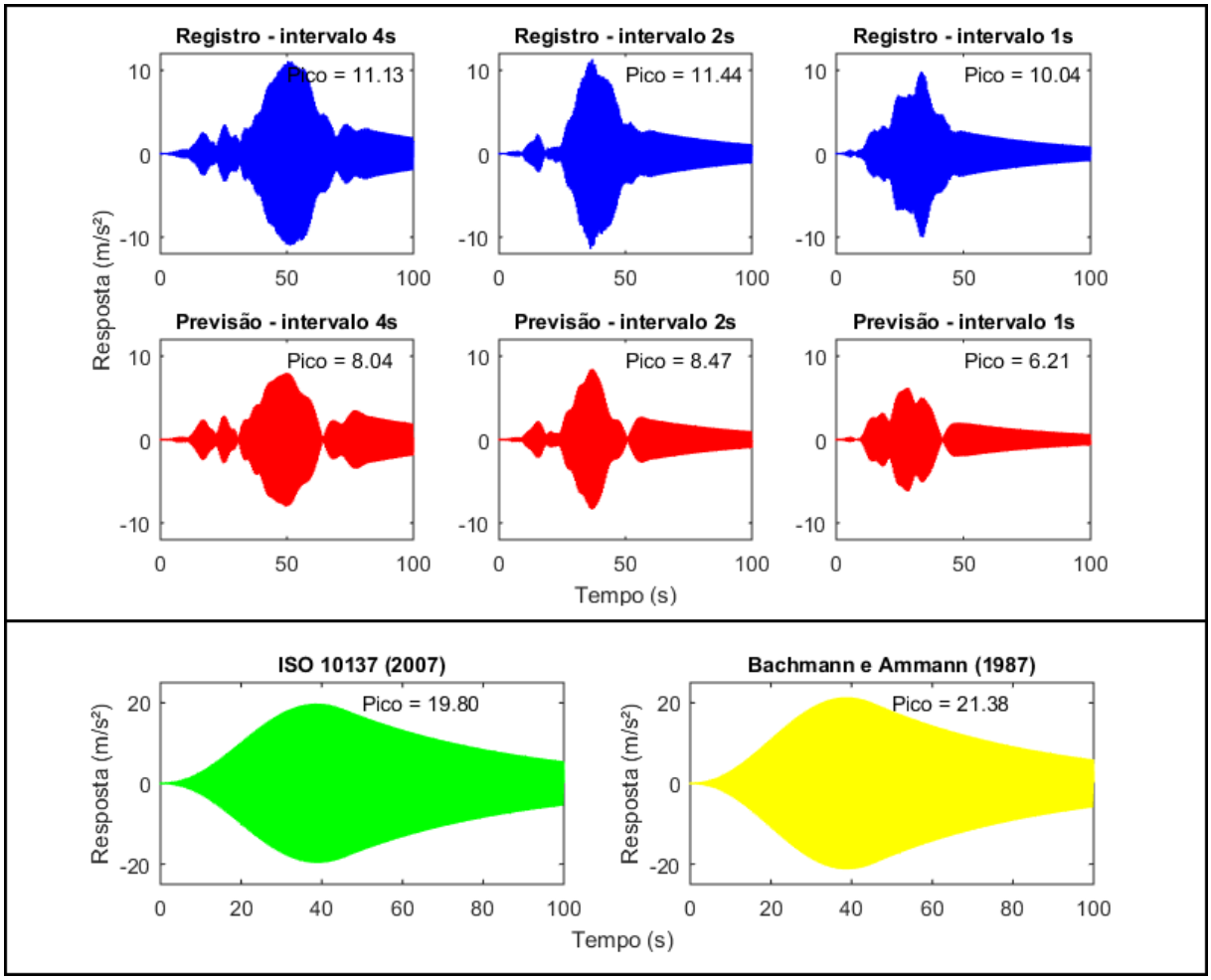


Figura 7.15 – Acelerações no nó central do ME_{W4} para 12 pedestres caminhando em frequências próximas a 2 Hz

De modo geral, apesar de sua aplicação gerar respostas levemente minoradas, o modelo proposto neste trabalho se adequou bem aos resultados obtidos mediante a aplicação de registros experimentais. Destaca-se, contudo, que as análises apresentadas nesta seção ainda não contêm um aspecto importante da realidade, relacionado à variabilidade das frequências de caminhada dos pedestres, que não se limitam a valores próximos a 2 Hz. Essa condição mais realista será abordada na Seção 7.5, na qual se espera observar um desempenho ainda mais eficiente do modelo desenvolvido.

Por fim, ainda considerando múltiplos pedestres caminhando em frequências próximas a 2 Hz, são apresentados na Figura 7.16 os resultados referentes ao modelo estrutural ME_{P3}, que consiste em uma passarela treliçada do tipo Pratt com frequência natural fundamental de aproximadamente 3,20 Hz. Nessa estrutura, a excitação ocorre pelo segundo harmônico de uma caminhada em torno de 1,60 Hz e pelo segundo sub-harmônico de uma caminhada próxima a 2,13 Hz.

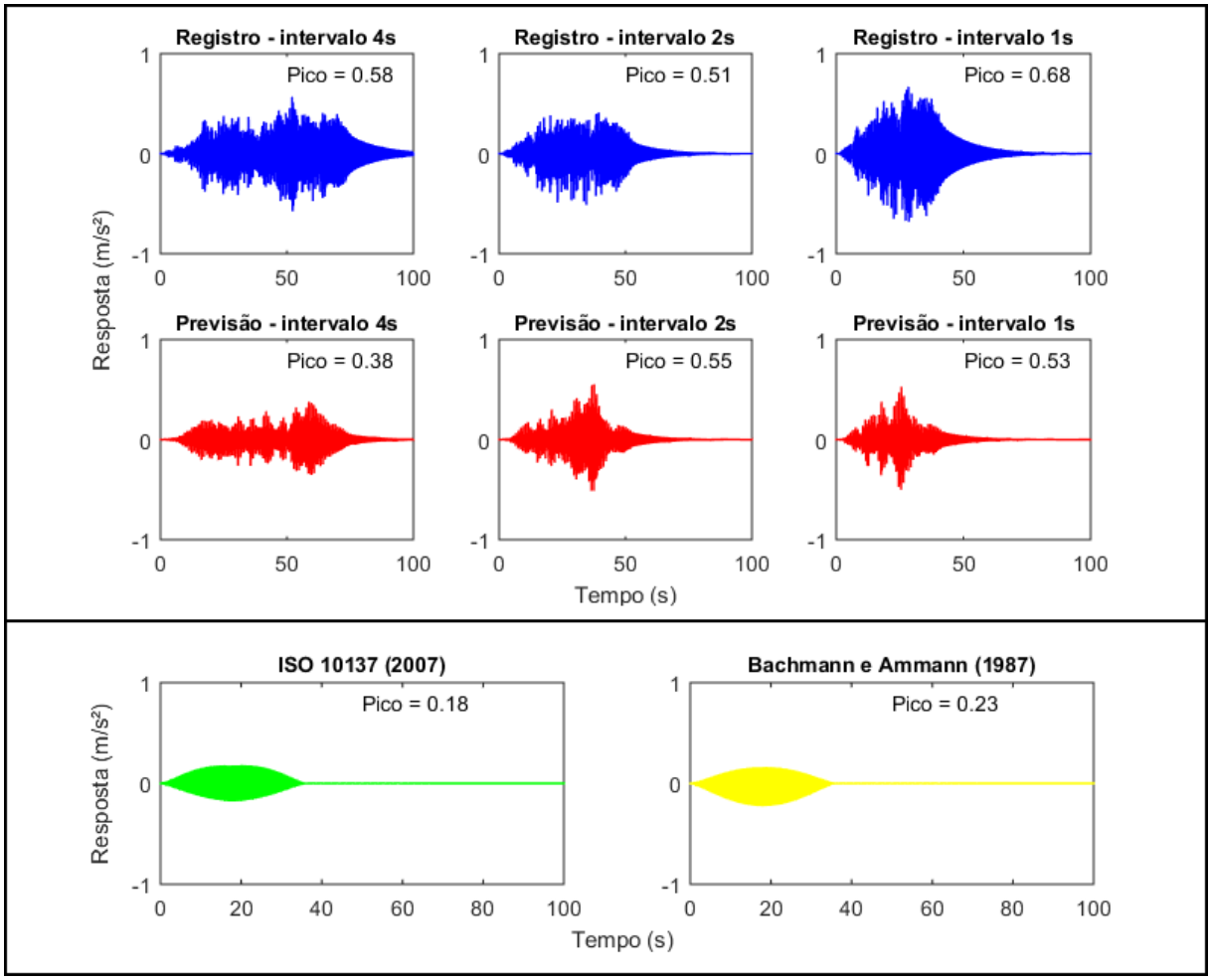


Figura 7.16 – Acelerações no nó central do ME_{P3} para 12 pedestres caminhando em frequências próximas a 2 Hz

Nessa análise, observam-se respostas de baixa magnitude para todas as situações, uma vez que as frequências excitadoras da estrutura – 1,60 Hz e 2,13 Hz – estão relativamente distantes das frequências efetivamente presentes nos registros e simulações (próximas a 2,00 Hz). Ainda assim, o modelo proposto neste trabalho, quando aplicado como carregamento à estrutura, fornece respostas mais coerentes com aquelas obtidas a partir da aplicação de registros experimentais.

Na próxima seção, é apresentada uma abordagem mais realista, na qual se considera que os múltiplos pedestres atravessam a estrutura com frequências de caminhada distintas, não estando limitadas a valores próximos a 2 Hz.

7.5 RESULTADOS PARA MÚLTIPLOS PEDESTRES EM FREQUÊNCIAS DIVERSAS

Nesta seção, são analisados os efeitos de múltiplos pedestres caminhando sobre a estrutura com **frequências de caminhada distintas**. Para tanto, são utilizados registros de forças geradas por 12 pedestres de massas diferentes, aplicados em três cenários temporais: entrada de cada pedestre a cada 4 segundos, 2 segundos e 1 segundo, respectivamente.

Conforme já foi mencionado na Seção 7.4, grande parte desses pedestres já foi utilizada na construção do modelo de redes neurais. Portanto, pequenas variações de massa, limitadas a 2%, foram novamente introduzidas na conversão de aceleração em força. Dessa forma, o peso efetivamente considerado nos registros e nos modelos de carga difere levemente daquele usado no banco de dados original, obrigando o modelo de redes neurais a realizar previsões com dados não incluídos no treinamento.

As características dos pedestres, incluindo massa real, peso real, peso ajustado e frequência de caminhada, bem como a ordem aleatória de entrada, estão apresentadas na Tabela 7.13.

Tabela 7.13 – Características para a ação de múltiplos pedestres caminhando em frequências diversas

Ordem de entrada	Massa real (kg)	Peso real (N)	Peso ajustado (N)	Diferença no peso (%)	Frequência da caminhada (Hz)
1	65	637,65	630,04	1,19	2,070
2	60	588,60	586,81	0,30	2,290
3	54	529,74	520,47	1,75	2,165
4	69	676,89	664,44	1,84	1,649
5	73	716,13	706,71	1,32	1,579
6	78	765,18	765,20	0,00	1,962
7	90	882,90	878,27	0,52	2,193
8	58	568,98	571,11	0,37	1,999
9	105	1030,05	1026,09	0,38	1,731
10	104	1020,24	1016,46	0,37	1,822
11	75	735,75	733,92	0,25	1,793
12	66	647,46	642,65	0,74	2,098

As frequências de caminhada têm média de 1,95 Hz e desvio padrão de 0,23 Hz, valores próximos à distribuição observada por Matsumoto et al. (1972), conferindo realismo às análises.

Em seguida, as duas últimas colunas da Tabela 7.13 foram utilizadas como entradas para 12 previsões de carregamento pelo modelo de carga proposto. Os parâmetros previstos são organizados em um arquivo .txt, apresentado na Figura 7.17, que serve como entrada para a modelagem de carregamento. A última linha do arquivo, referente ao tempo de entrada de cada pedestre, é ajustada conforme a situação analisada.

```
%Dados daPrevisão para aplicar na estrutura - cada coluna é um pedestre, cada linha é um parâmetro
630.04  586.81  520.47  664.44  706.71  765.20  878.27  571.11  1026.09 1016.46 733.92  642.65          %Peso
2.0702  2.2901  2.1646  1.6493  1.5790  1.9615  2.1928  1.9985  1.7311  1.8219  1.7925  2.0984          %Frequência
158.57  184.22  335.04  109.86  147.74  286.05  262.57  184.57  244.28  339.82  145.55  144.80          %Delta_G_H1
28.46   73.33   94.23   48.26   68.92   106.63  175.76  50.16   72.73   92.82   43.33   37.17           %Delta_G_H2
48.53   63.74   57.12   56.23   50.78   82.28   8.96    62.04   159.51  72.43   21.62   46.16           %Delta_G_H3
17.18   5.40    16.52   52.91   45.09   31.28   34.94   9.31    66.37   51.76   28.35   19.09           %Delta_G_H4
10.35   4.10    5.69    11.13   12.55   15.25   7.07    13.03   16.68   5.02    9.68    11.56           %Delta_G_H5
6.27    6.31    9.82    15.46   7.72    20.50   14.60   10.14   13.51   12.72   8.73    7.11            %Delta_G_S1
7.72    19.17   -5.59   20.22   11.97   22.52   5.16    12.17   -1.95   58.14   15.49   6.89            %Delta_G_S2
6.51    -2.44   16.85   3.96    7.45    46.82   9.57    10.09   19.32   73.99   9.84    5.92            %Delta_G_S3
11.12   15.03   58.25   17.60   17.10   46.03   34.70   2.55    24.42   13.21   7.17    4.48            %Delta_G_S4
9.91    4.04    31.08   11.94   7.77    24.76   67.07   4.33    30.65   13.18   4.87    7.54            %Delta_G_S5
0.35    5.37    5.96    1.62    0.37    1.25    6.49    6.52    0.47    5.44    1.70    6.25            %phi_H2
2.82    1.91    1.57    3.15    0.62    4.00    3.59    3.09    2.49    5.43    3.55    1.85            %phi_H3
5.25    3.43    3.42    0.18    4.01    0.11    3.99    4.93    4.61    -0.55   1.87    4.39            %phi_H4
2.31    3.81    4.93    2.47    2.21    2.64    5.13    2.01    3.94    1.91    3.32    4.95            %phi_H5
1.92    2.81    -0.46   3.62    2.10    0.78    -1.63   3.63    8.67    3.16    3.15    6.29            %phi_S1
3.52    0.53    5.54    1.05    4.61    3.15    9.93    4.30    3.15    -0.41   2.03    1.34            %phi_S2
2.87    1.96    3.15    4.39    2.08    2.76    9.57    1.15    8.62    2.10    2.87    3.22            %phi_S3
6.26    5.55    4.05    0.97    2.44    5.02    3.60    4.91    0.24    4.86    5.44    5.46            %phi_S4
3.71    2.53    9.32    5.40    2.29    2.61    4.12    4.36    0.59    -0.99   1.00    3.73            %phi_S5
0.00    1.00    2.00    3.00    4.00    5.00    6.00    7.00    8.00    9.00    10.00   11.00           %Tempo da Entrada
```

Figura 7.17 – Parâmetros previstos para modelar carregamentos de 12 pedestres em frequências diversas

As respostas estruturais são então calculadas pelo Método de Newmark para cada estrutura, considerando tanto os registros experimentais quanto os carregamentos previstos pelos modelos de carga.

Como foi discutido anteriormente, os modelos de Bachmann e Ammann (1987) e da ISO 10137 (2007) não permitem a distinção entre pedestres nem mudanças em sua distribuição ao longo da estrutura. Assim, para as análises nesta Seção, tais modelos foram aplicados considerando-se a massa média de todos os pedestres e a frequência de caminhada coincidente com a frequência excitadora da estrutura associada a algum harmônico da caminhada.

Os resultados são apresentados nas Seções 7.5.1 e 7.5.2.

7.5.1 Resposta das estruturas realistas para múltiplos pedestres caminhando em frequências diversas

Na Figura 7.18 são apresentadas as acelerações no nó central do modelo estrutural ME_{W1}, comparando respostas obtidas a partir de registros experimentais com aquelas geradas pelo

modelo de carga proposto. Como discutido anteriormente, os modelos da ISO 10137 (2007) e de Bachmann e Ammann (1987) não diferenciam pedestres individualmente, sendo possível realizar apenas uma análise com massa média e frequência de caminhada de 2 Hz, responsável por excitar a estrutura por meio do terceiro harmônico.

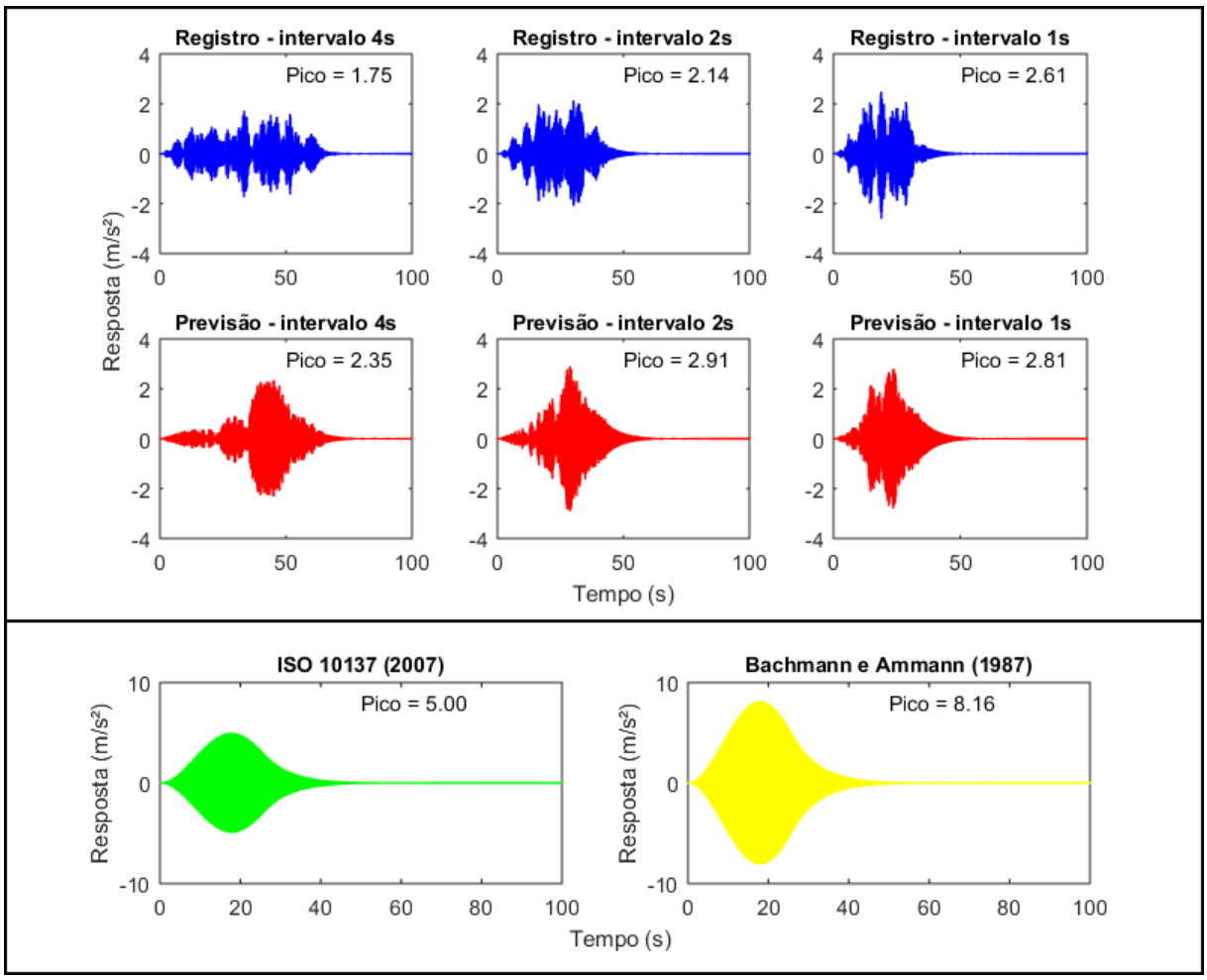


Figura 7.18 – Acelerações no nó central do ME_{W1} para 12 pedestres caminhando em frequências diversas

O modelo proposto no presente trabalho, quando aplicado à estrutura como conjunto de 12 cargas verticais da caminhada, gerou respostas coerentes com aquelas observadas a partir da aplicação do conjunto de 12 registros experimentais da caminhada. Por outro lado, os modelos da ISO 10137 (2007) e de Bachmann e Ammann (1987) foram extremamente conservadores, produzindo gráficos de resposta genéricos. Ainda assim, podem ser válidos se considerados como uma envoltória de respostas, mas não reproduzem condições realistas de tráfego.

Para o modelo estrutural ME_{W2}, cuja frequência natural fundamental é aproximadamente 8,19 Hz, excitação ocorre por meio do quarto e quinto harmônicos, bem como pelo quinto sub-

harmônico da caminhada. As respostas em termos de aceleração são apresentadas na Figura 7.19.

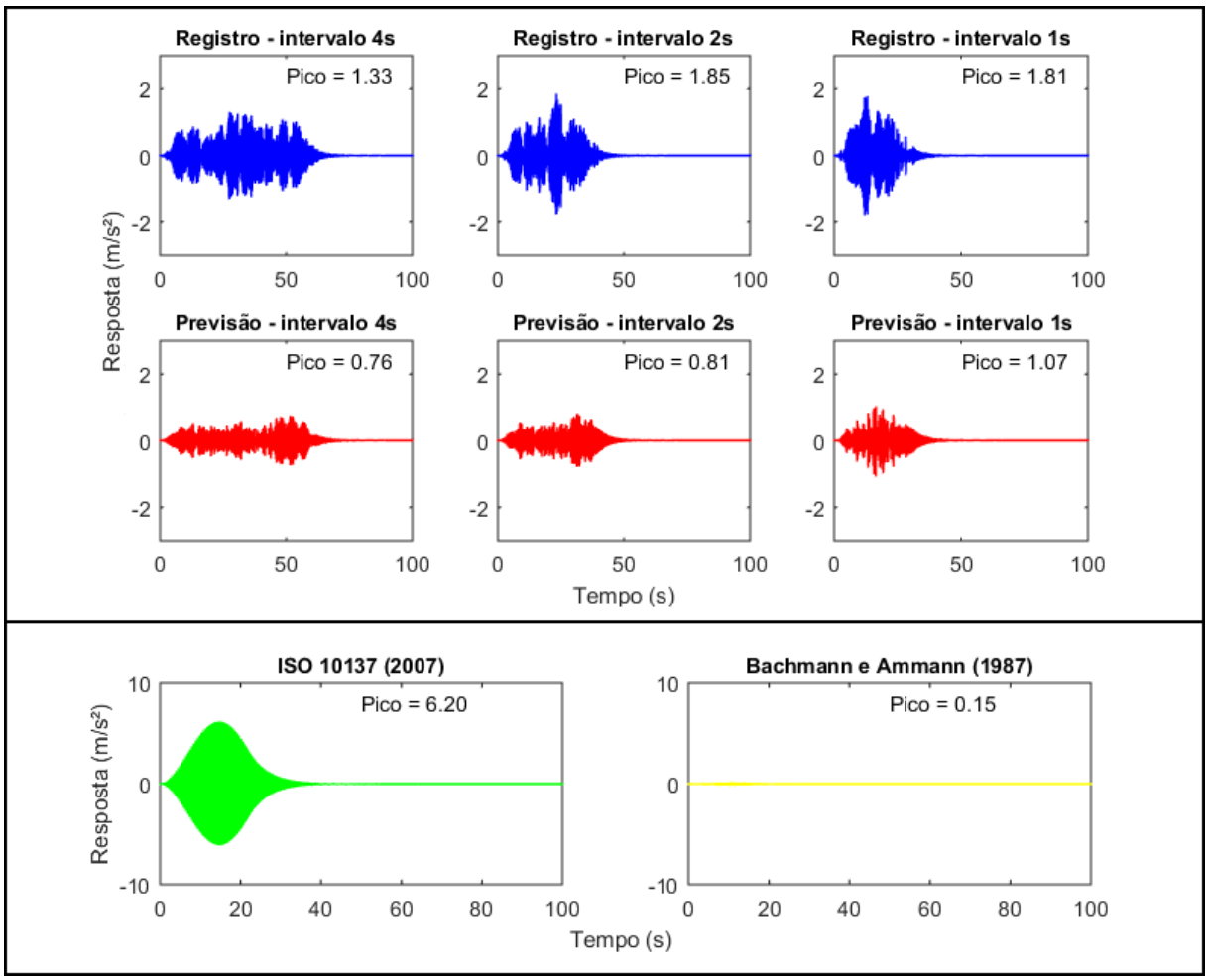


Figura 7.19 – Aceleração no nó central do ME_{W2} para 12 pedestres caminhando em frequências diversas

Novamente, os resultados obtidos pelo modelo proposto foram os que melhor representaram a resposta estrutural nas diferentes distribuições de pedestres consideradas. O modelo da ISO 10137 (2007) forneceu respostas conservadoras, por meio de excitação associada ao quarto harmônico, enquanto o modelo de Bachmann e Ammann (1987) produziu resposta praticamente nula, devido à sua limitação aos três primeiros harmônicos.

Em seguida, o modelo estrutural ME_{P1}, uma passarela treliçada do tipo Pratt com frequência natural fundamental próxima a 4 Hz, foi analisado. A estrutura é excitada principalmente pelo segundo harmônico e pelo terceiro sub-harmônico da caminhada. Os resultados obtidos para este modelo estrutural são apresentados na Figura 7.20.

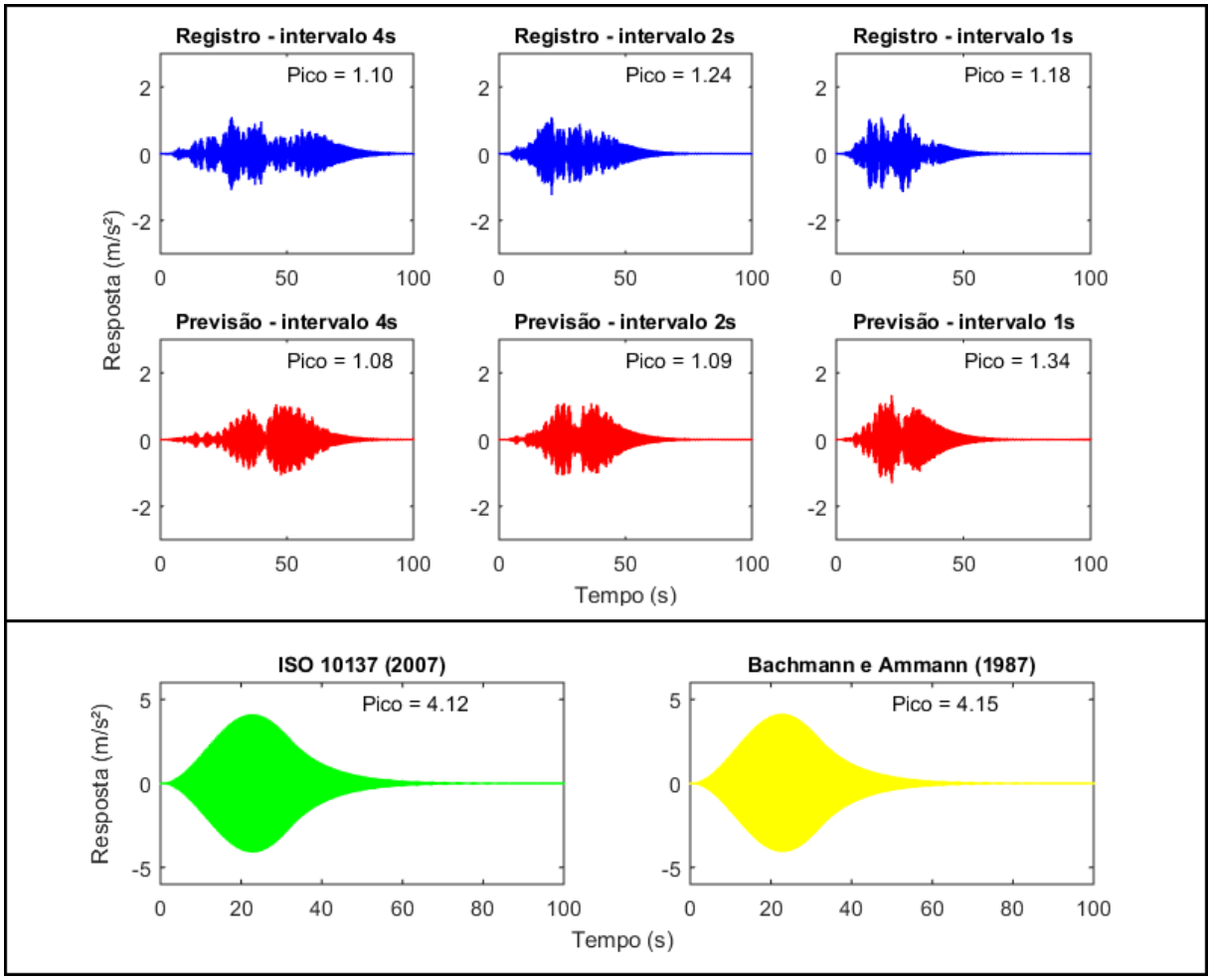


Figura 7.20 – Aceleração no nó central do ME_{P1} para 12 pedestres caminhando em frequências diversas

As respostas obtidas com o modelo proposto apresentam excelente concordância com as respostas calculadas a partir da aplicação de registros experimentais, tanto em picos de aceleração quanto na forma do gráfico. Por sua vez, os modelos simplificados continuaram a gerar resultados conservadores, superestimando a resposta estrutural.

Por fim, são apresentados os resultados para o modelo estrutural ME_{P2}, que devido à sua frequência natural fundamental de aproximadamente 6,83 Hz pode ser estimulado pelo terceiro e quarto harmônico, bem como pelo quarto e quinto sub-harmônico da caminhada. As respostas da estrutura, em termos de aceleração no meio do vão, obtidas mediante a aplicação de registros experimentais e modelos de carga são apresentadas na Figura 7.21.

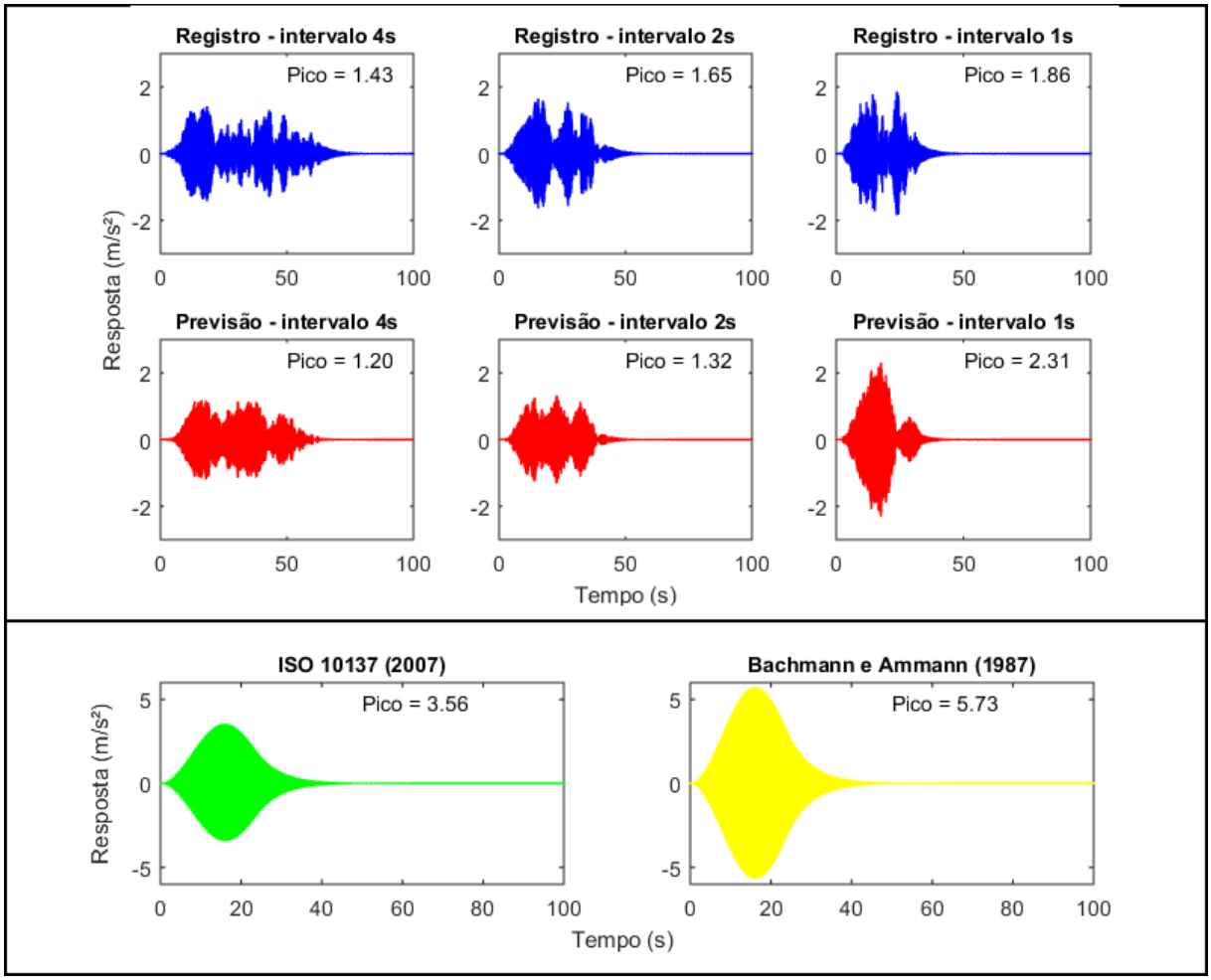


Figura 7.21 – Acelerações no nó central do ME_{P2} para 12 pedestres caminhando em frequências diversas

Mais uma vez o modelo proposto foi o que, mediante sua aplicação, melhor aproximou a resposta estrutural calculada a partir da consideração de registros reais. Os modelos da ISO 10137 (2007) e de Bachmann e Ammann (1987) forneceram respostas conservadoras, especialmente o segundo, que superestimou significativamente os efeitos.

7.5.2 Resposta das estruturas com frequência reduzida para múltiplos pedestres caminhando em frequências diversas

Nesta seção, são apresentados os resultados obtidos para a aplicação do modelo de carga proposto neste trabalho, em estruturas com frequência propositalmente reduzida.

A Figura 7.22 apresenta os resultados obtidos para o modelo estrutural ME_{W3}, estrutura treliçada do tipo Warren com frequência natural fundamental próxima a 2.18 Hz e, portanto, estimulada tipicamente pelo primeiro harmônico de uma caminhada na mesma frequência.

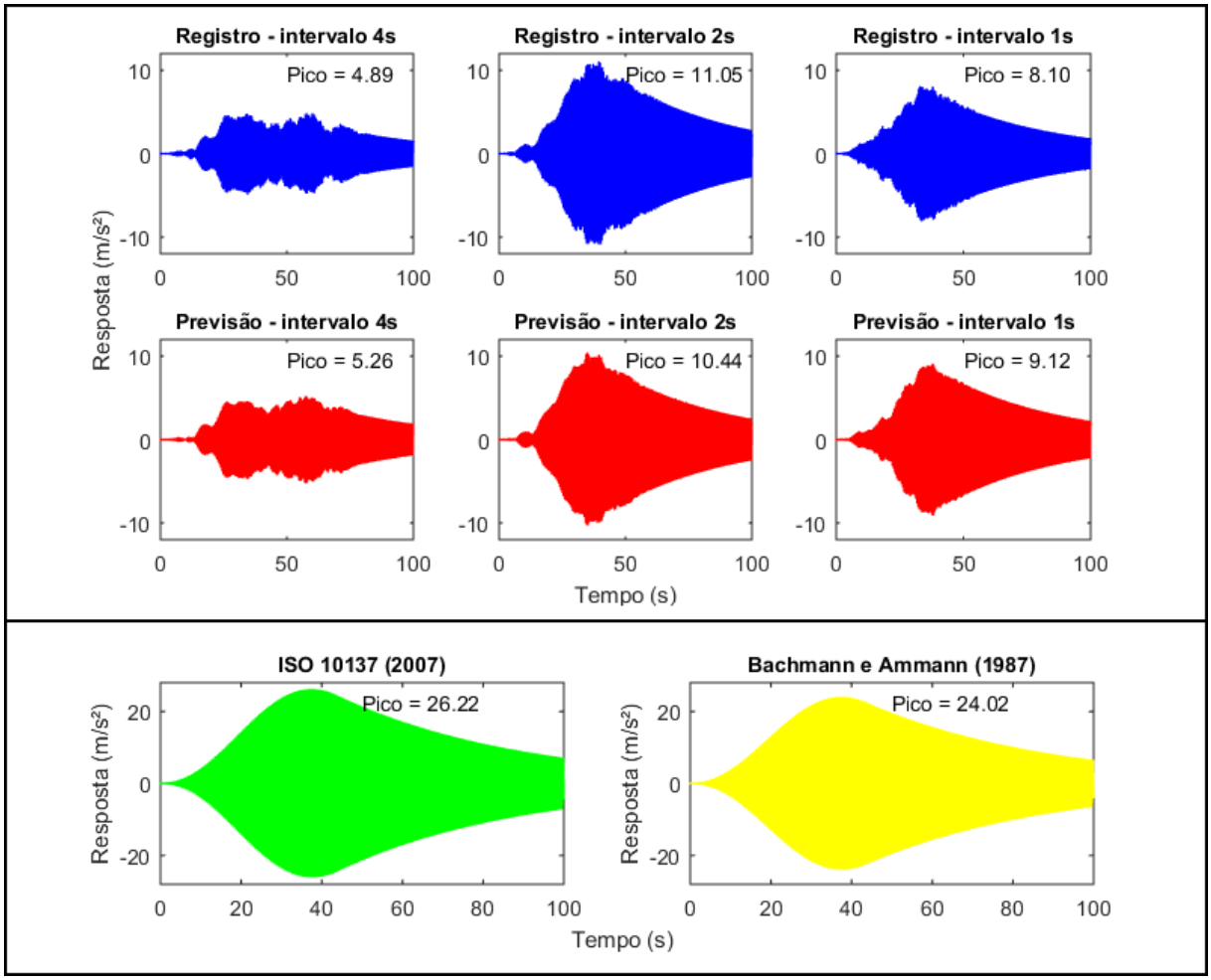


Figura 7.22 – Acelerações no nó central do ME_{W3} para 12 pedestres caminhando em frequências diversas

Observa-se boa concordância entre os registros experimentais e as respostas calculadas pelo modelo proposto, tanto em formato quanto em duração, com pequenas diferenças nas amplitudes dos picos de aceleração. Essa precisão, já comentada anteriormente na Seção 7.4.2, se deve à estimulação integralmente associada ao primeiro harmônico, cujo único parâmetro relevante na função do modelo é a amplitude ΔG_{H1}. Este parâmetro, sendo o primeiro previsto no conjunto de redes neurais encadeadas com baixo erro associado, mantém forte relação com os dados de entrada — massa do pedestre e frequência de caminhada — garantindo alta eficiência na previsão das cargas do primeiro harmônico. Observa-se, ainda, na Figura 7.22, que os modelos da ISO 10137 (2007) e de Bachmann e Ammann (1987) geraram respostas muito conservadoras, com picos de acelerações muito elevadas.

Em seguida, o modelo estrutural ME_{W4}, com frequência natural de aproximadamente 2,00 Hz, foi analisado. Devido a sua frequência natural fundamental, a estrutura é excitada por meio do

primeiro harmônico de caminhadas próximas a 2,00 Hz. As acelerações no nó central são apresentadas na Figura 7.23.

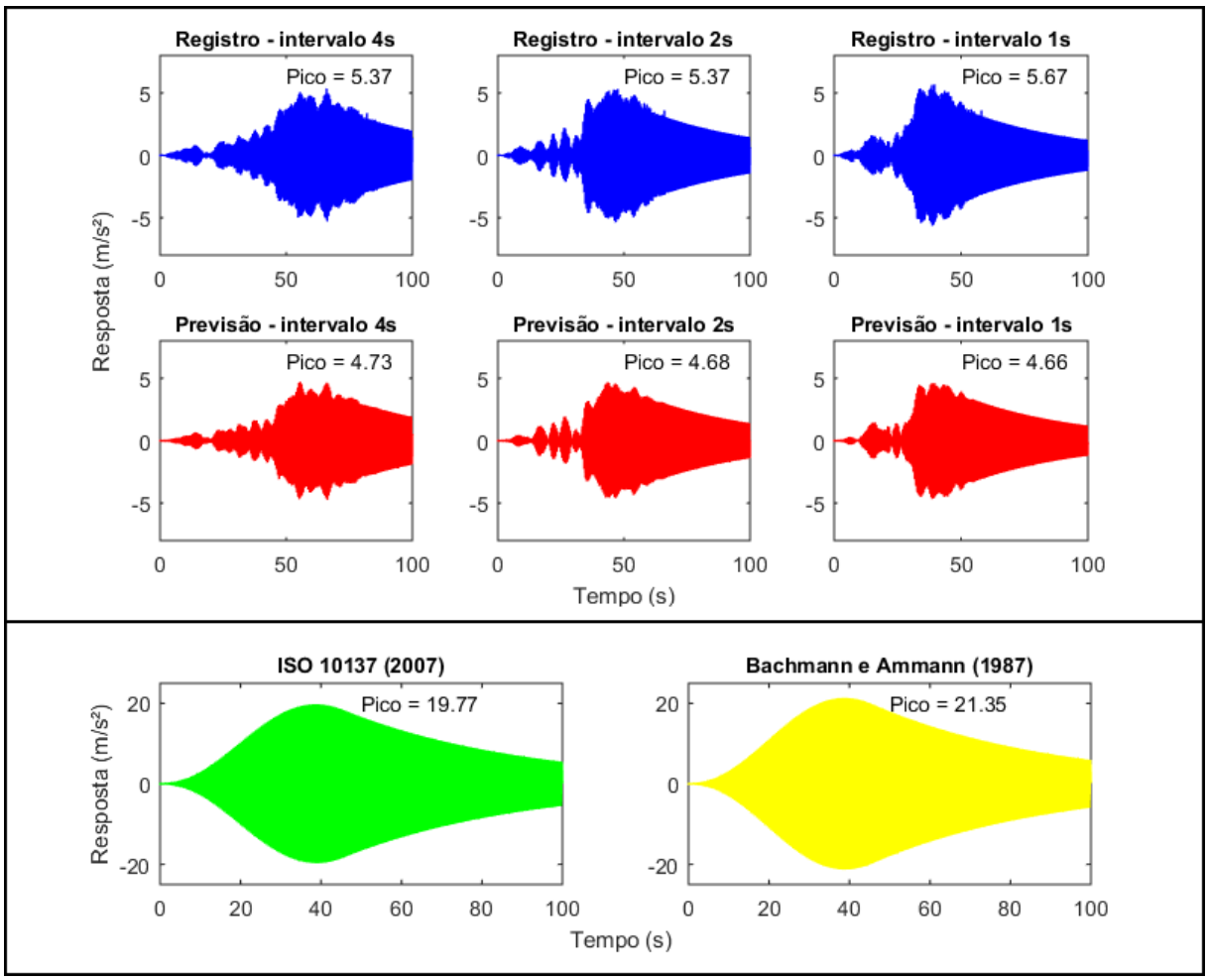


Figura 7.23 – Acelerações no nó central do ME_{W4} para 12 pedestres caminhando em frequências diversas

Como esperado, o modelo proposto reproduziu de forma consistente tanto a forma quanto a duração das respostas observadas experimentalmente. Os modelos simplificados, por sua vez, mostraram picos de aceleração até quatro vezes superiores aos valores experimentais, evidenciando seu caráter conservador.

Por fim, foi analisada a passarela ME_{P3}, com frequência natural fundamental próxima a 3,20 Hz, estimulada pelo segundo harmônico de uma caminhada de 1,60 Hz ou pelo segundo sub-harmônico de uma caminhada de 2,13 Hz. Para os modelos da ISO 10137 (2007) e de Bachmann e Ammann (1987), foram aplicadas frequências de caminhada de 1,60 Hz, para garantir excitação pelo segundo harmônico. Os resultados são apresentados na Figura 7.24.

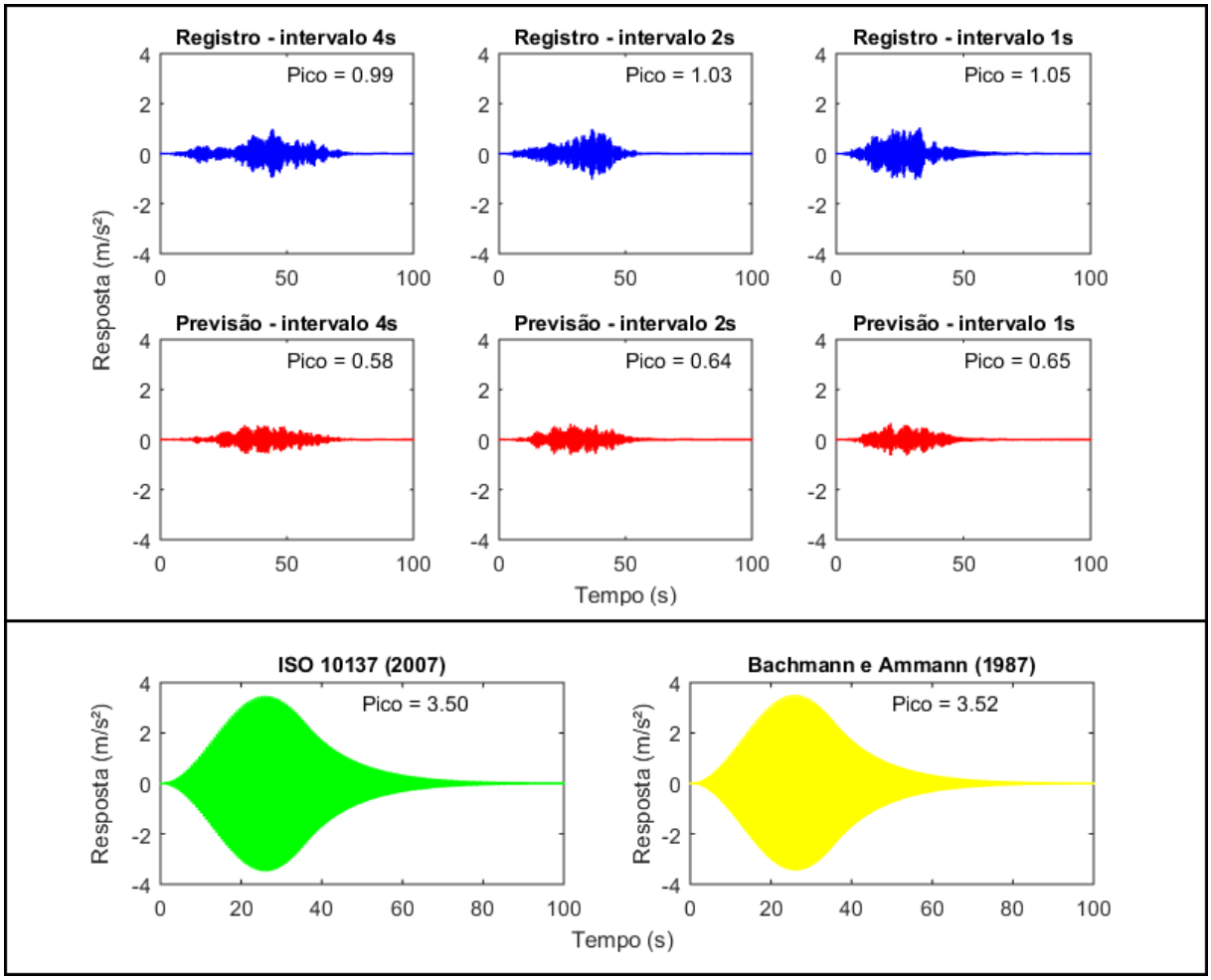


Figura 7.24 – Acelerações no nó central do ME_{P3} para 12 pedestres caminhando em frequências diversas

Mais uma vez, observa-se um comportamento adequado e coerente do modelo proposto nesse trabalho, bem como o conservadorismo excessivo dos modelos da ISO 10137 (2007) e de Bachmann e Ammann (1987). Isso reforça a eficácia e confiabilidade do modelo desenvolvido, capaz de representar de forma realista a ação dinâmica de pedestres em passarelas, superando as limitações e o conservadorismo das metodologias tradicionais de simulação de cargas verticais induzidas pela caminhada humana.

8. CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como contribuição o desenvolvimento de um modelo numérico-experimental de carregamentos capaz de simular as ações dinâmicas induzidas pelas cargas verticais da caminhada humana em estruturas de passarelas, com vasta aplicabilidade e abrangência e muito eficiente, especialmente para os casos de múltiplos pedestres andando simultaneamente na estrutura, com frequências de caminhada aleatórias.

Apesar das semelhanças entre o modelo implementado nesta pesquisa e modelos já existentes como o de Bachmann e Ammann (1987) e da ISO 10137 (2007), o modelo proposto neste trabalho leva em consideração não apenas os cinco primeiros harmônicos da caminhada humana como também os cinco primeiros sub-harmônicos, o que garante uma abrangência maior, conforme foi visto na Seção 7.2.

Além disso, no presente trabalho, os parâmetros da função harmônica de carregamento não apresentam valores fixos, tabelados ou explícitos por meio de equações lineares. Esses parâmetros são previstos por um conjunto de dezenove redes neurais artificiais, treinadas de forma encadeada e capazes de fazer previsões robustas e adequadas para cada situação de caminhada. Em situações de um único pedestre, caminhando em ressonância com uma das frequências estimulantes da estrutura – seja por harmônico, seja por sub-harmônico – o modelo implementado, quando aplicado como função de excitação às estruturas, produziu resultados melhores que modelos famosos já existentes em 68,75% dos casos analisados neste trabalho.

Entretanto, nos resultados para pedestre único, foi observado um comportamento padrão do modelo. Apesar do modelo criado ser mais eficiente que os modelos existentes, seu comportamento não é tão previsível. Ou seja, nem sempre ele é menos conservador – ou mais conservador – do que metodologias existentes. Essa variabilidade pode estar associada ao erro, embora muito pequeno, mas existente, inerente ao treinamento das redes neurais artificiais que o compõem ou, ainda, relacionada às variações interpedestre. Isso acontece em decorrência do modelo ter sido criado a partir de dados experimentais reais.

Como cada pessoa possui uma forma única de caminhar, que muitas vezes não está necessariamente relacionada às suas características físicas nem à frequência de caminhada, uma metodologia baseada em um banco de dados numérico, de pedestres reais, dificilmente

conseguirá prever, de forma exata, o estilo de caminhar de uma pessoa específica não incluída no banco de dados.

Todavia, a capacidade de generalização das redes neurais artificiais utilizadas permite que o modelo aprenda padrões gerais de caminhada, de acordo com as devidas variações interpedestres. Isso ocorre porque os parâmetros de caminhada – amplitudes e ângulos de fase associados a harmônicos e sub-harmônicos – de cada pedestre considerado para compor o banco de dados diferem muito entre si, estando associados também, de alguma forma, a diferentes estilos de caminhada. Previsões envolvendo múltiplos pedestres irão incorporar uma parte dessas variabilidades, de acordo com a pluralidade de massas e frequências de caminhada especificadas para a previsão.

Portanto, a grande contribuição do modelo criado consiste na abordagem para situações de simulação de múltiplos pedestres caminhando simultaneamente em uma estrutura com frequências de caminhada aleatórias. Nestes casos, as generalizações das redes neurais artificiais fazem com que o modelo gere previsões diversificadas, ora majoradas, ora minoradas, mas que se equilibram entre si e em torno de padrões gerais de caminhada regidos pelos parâmetros Δ e $\emptyset$ da equação do carregamento.

A correta aplicação das simulações de carga geradas permite, ainda, análises envolvendo múltiplos pedestres onde são considerados, além das distinções de massa, frequência e velocidade de cada pedestre, diferentes tipos de distribuição espacial ao longo do comprimento da estrutura. As respostas estruturais obtidas a partir da utilização do modelo desenvolvido para essas situações apresentam grande aproximação em relação a respostas obtidas por meio de aplicação de registros reais, correspondendo a um importante avanço em relação a modelos existentes.

Assim, o presente trabalho preenche uma importante lacuna deixada por modelos tradicionais de simulação da caminhada, como o de Bachmann e Ammann (1987) e o da ISO 10137, bem como de demais modelos citados ao longo desse trabalho, uma vez que tais modelos sugerem a adoção de simplificações excessivas, não contemplando de maneira adequada as aleatoriedades inerentes à caminhada humana.

8.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para futuros trabalhos, que possam dar continuidade e aprimoramento à pesquisa já realizada até então, podem ser elencadas:

- Criação de um modelo semelhante, para simular ações horizontais – longitudinais e laterais – induzidas pela caminhada humana, permitindo assim uma abordagem espacial, na qual os pedestres se deslocam também na direção lateral do tabuleiro da estrutura;

- Aprimoramento do modelo, para considerar variações intrapedestre, envolvendo mudanças na frequência e velocidade instantâneas ao longo da caminhada.

REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7188:** Carga móvel rodoviária e de pedestres em pontes, viadutos, passarelas e outras estruturas. Rio de Janeiro: 2013.

ALLEN, D. E. Building vibrations from human activities. **Concrete International: Design and Construction.** v. 12, n. 6, p. 66-73, jun 1990.

ANEJA, S.; SHARMA, A.; GUPTA, R.; YOO, D.-Y. Bayesian regularized artificial neural network model to predict strength characteristics of fly-ash and bottom-ash based geopolymer concrete. **Materials.** v. 14, n. 7, p. 1729, abr 2021.

ANNI, M. Quantitative Comparison between the Smartphone Based Experiments for the Gravity Acceleration Measurement at Home. **Education Sciences.** v. 11, n. 9, p. 1-20, 2021.

ARAUJO JR, M. C.; BRITO, H. M. B. F.; PIMENTEL, R. L. Experimental Evaluation of Synchronization in Footbridges due to Crowd Density. **Structural Engineering International.** v. 19, n. 3, p. 298-303, 2009.

BACHMANN, H. Case studies of structures with man-induced vibrations. **Journal of Structural Engineering.** v. 118, n. 3, p. 631-647, mar 1992

BACHMANN, H. Vibrations of building structures caused by human activities: case study of a gymnasium. **National Research Council of Canada.** Technical Translation, n. 2077, p. 1-21, 1984.

BACHMANN, H.; AMMANN, W. **Vibrations in structures:** Induced by man and machines. 3ª ed. Zürich: International Association for Bridge and Structural Engineering, 1987.

BACHMANN, H.; PRETLOVE, A. J.; RAINER, J. H. Vibrations induced by people. In: **Vibration Problems in Structures: Practical Guidelines.** Basel: Birkhauser, 1995. Cap. 1, p. 1-28.

BROWNJOHN, J. M. W.; PAVIC, A.; OMENZETTER, P. A spectral density approach for modelling continuous vertical forces on pedestrian structures due to walking. C**anadian Journal of Civil Engineering.** v. 31, n. 1, p. 65-77, jan 2004.

CAETANO, E.; CUNHA, A.; MAGALHÃES, F.; MOUTINHO, C. Studies for controlling human-induced vibration of the Pedro e Inês footbridge, Portugal. Part 1: Assessment of dynamic behaviour. **Engineering Structures.** v. 32, n. 4, p. 1069-1081, abr. 2010.

CHIESA, D. D. **Metodologias para a simulação simultânea dos três componentes de acelerogramas sísmicos.** 2020. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica)) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

CHIESA, D. D.; MIGUEL, L. F. F. Methodology for Simulation of the Three Components of Seismic Acceleration. **Bulletin of the Seismological Society of America**, v.109, p. 2427-2436, 2019.

CIVICIOGLU, P. Backtracking Search Optimization Algorithm for numerical optimization problems, **Applied Mathematics and Computation**, vol. 219, p. 8121–8144, 2013.

CYBENKO, G. Approximation by superpositions of a sigmoidal function. **Mathematics of Control, Signals and Systems.** v. 2, n. 4, p. 303–314, 1989.

COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON. **CEB 209:** Vibration Problems in Structures. Pratical Guidelines. Bulletin d'Information, n. 209, 1991.

DALLARD, P.; FITZPATRICK, T.; FLINT, A.; LOW, A.; SMITH, R. R.; WILLFORD, M.; ROCHE, M. London Millennium Bridge: Pedestrian-induced lateral vibration. **Journal of Bridge Engineering.** v. 6, p. 412-417, nov. 2001.

DEBONA, G. L. **Monitoração experimental e modelagem numérica sobre a resposta estrutural dinâmica de passarelas de pedestres.** 2016. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

DEBONA, G. L.; SILVA, J. G. S. Assessment of the dynamic structural behaviour of footbridges based on experimental monitoring and numerical analysis. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais.** v. 13, n. 3, p. 563-577, jun 2020.

DEBONA, G. L.; SILVA, J. G. S. Monitoração experimental e modelagem numérica do comportamento dinâmico de passarelas de pedestres. **Construindo.** v. 11, n. 3, p. 96-115, 2019.

DÍAZ, I. M.; REYNOLDS, P. Robust saturated control of human-induced floor vibrations via a proof-mass actuator. **Smart Materials and Structures.** v. 18, n, 12, p. 125024, dez 2009.

DOZ, G. M.; BRITO, J. L. V.; BRASILIANO, A. Numerical and experimental assessment of a typical Brazilian footbridge. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais.** v. 11, n. 5, p. 1025-1035, out 2018

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **Eurocode 5:** Design of timber structures – Part 2: Bridges. London, 2004.

GALBRAITH, F. W.; BARTON, M. V. Ground Loading from Footsteps. **The Journal of the Acoustical Society of America.** v. 48, p. 1288-1292, jan. 1970.

HIVOSS – HUMAN INDUCED VIBRATION OF STEEL STRUCTURES. **Design of Footbridges: Guideline**, RFS2-CT-2007-00033. Aachen, 2008.

IINTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 10137:2007:** Bases for design of structures – Serviceability of buildings and walkways against vibration. 2007.

IMTINAN, N.; KUSWANTO, H. The use of Phyphox application in physics experiments: A literature review. **Jurnal Ilmu Pendidikan Fisika.** v. 8, n. 2, p. 183-191, mai 2023.

LAI, E.; GENTILE, C.; MULAS, M. G. Experimental and numerical serviceability assessment of a steel suspension footbridge. **Journal of Constructional Steel Research.** v. 132, p. 16-28, mai 2017.

LAI, E.; MULAS, M. G. A MSD model for coupled analysis of pedestrian-footbridge dynamic interaction. **Procedia Engineering.** v. 199, p. 2864-2870, 2017.

LIMA, S. S.; SANTOS, S. H. C. **Análise Dinâmica das Estruturas.** 1ª ed. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna, 2008.

MA, R.; KE, L.; WANG, D.; CHEN, A.; PAN, Z. Experimental Study on Pedestrians' Perception of Human-Induced Vibrations of Footbridges. **Int. Journal of Structural Stability and Dynamics.** v. 18, n. 10, p. 1-19, out 2018.

MARTINEZ-HERNANDEZ, U.; AWAD, M. I.; MAHMOOD, I.; DEHGHANI-SANIJ, A. A. Prediction of gait events in walking activities with a Bayesian perception system. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON REHABILITATION ROBOTICS, 2017, Londres. Proceedings... Londres, 2017, p. 13-18.

MATSUMOTO, Y.; SATO, S.; NISHIOKA, T.; SHIOJIRI, H. A study on dynamic design of pedestrians over-bridges in consideration of characteristics of pedestrians. **Japan Society of Civil Engineers.** n. 205, p. 63-80, set 1972.

MCCULLOCH, W. S.; PITTS, W. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. **The Bulletin of Mathematical Biophysics.** v. 5, n. 4, p. 115–133, 1943.

MENDES, J. P. **Análise dinâmica e controle de vibrações de passarelas de pedestres submetidas ao caminhar humano.** 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

MIGUEL, L. F. F. **Introdução ao Estudo de Vibrações** – Notas de Aula de ENG03374 – Vibrações I. Notas de aula, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

MIGUEL, L. F. F.; COSTA, P. O. B.; ONTIVEROS-PEREZ, S. P.; SOUZA, O. A. P. Reliability-based simultaneous optimization of quantities, positions, and parameters of inerter-based vibration absorbers to minimize the probability of building failure during earthquakes via the CIOA. **Mechanics Based Design of Structures and Machines.** v. 53, p. 4270-4293, 2025.

MIGUEL, L. F. F.; FADEL MIGUEL, F. F.; LOPEZ, R. H. A firefly algorithm for the design of force and placement of friction dampers for control of man-induced vibrations in footbridges. **Optimization and Engineering.** v. 16, p. 633-661, set. 2015.

MIGUEL, L. F. F.; SOUZA, O. A. P. Robust optimum design of MTMD for control of footbridges subjected to human-induced vibrations via the CIOA. **Structural Engineering and Mechanics.** v. 86, n. 5, p. 647-661, 2023.

MIRJALILI, S.; LEWIS A. **The Whale Optimization Algorithm.** Advances in Engineering Software, v. 95, p. 51-67, may. 2016.

MONTEIRO, D. K. **Detecção, Localização e Quantificação de Dano em Estruturas via Algoritmos Metaheurísticos e Redes Neurais Artificiais.** 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

MONTEIRO, D. K.; SOUZA, O. A. P.; MIGUEL, L. F. F. Structural Damage Detection using the Circle-Inspired Optimization Algorithm. In: IBERO-LATIN AMERICAN CONGRESS ON COMPUTATIONAL METHODS IN ENGINEERING, 45., 2024, Maceió. **Proceedings...** Maceió, 2024, p. 1-7.

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

NEWMARK, N. M. A method of computation for structural dynamics. **Journal of the Engineering Mechanics Division.** v. 85, n. 3, p. 67-94, jul. 1959.

NIMMEN, K.; LOMBAERT. G.; ROECK, G.; BROECK, P. Vibration serviceability of footbridges: Evaluation of the current codes of practice. **Engineering Structures.** v. 59, p. 448-461, fev. 2014.

NIMMEN, K.; VERBEKE, P.; LOMBAERT, G.; ROECK, G.; BROECK, P. V. Numerical and Experimental Evaluation of the Dynamic Performance of a Footbridge with Tuned Mass Dampers. **Journal of Bridge Engineering.** v. 21, ago. 2016.

PICCARDO, G.; TUBINO, F. Simplified procedures for vibration serviceability analysis of footbridges subjected to realistic walking loads. **Computers and Structures.** v. 87, p. 890-903, jul. 2009.

PIMENTEL, R. L.; ARAÚJO JR, M. C.; BRITO, H. M. B. F.; BRITO, J. L. V. Synchronization among pedestrians in footbridges due to crowd density. **Journal of Bridge Engineering.** v. 18, n. 5, p. 400-409, mai 2013.

PIMENTEL, R. L.; PAVIC, A.; WALDRON P. Evaluation of design requirements for footbridges excited by vertical forces from walking. **Canadian Journal of Civil Engineering.** v. 28, n. 5, p. 769-777, out, 2001.

RAO, S. S. **Mechanical Vibrations.** 6ª ed. Harlow: Pearson Education, Inc., 2018.

RAINER, J. H.; PERNICA, G. Vertical dynamic forces from footsteps. **Canadian Acoustics/Acoustique Canadienne.** v. 14, n. 2, p. 12-21, abr 1986.

RAINER, J. H.; PERNICA, G.; ALLEN, D. E. Dynamic loading and response of footbridges. **Canadian Journal of Civil Engineering.** v. 15, n. 1, p. 66-71, fev. 1988.

RAMOS-MORENO, C.; RUIZ TERAN, A. M.; Stafford T. J. Impact of stochastic representations of pedestrian actions on serviceability response. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Bridge Engineering.** v. 174, n. 2, p. 113-128, jun. 2021.

REYNOLDS, P.; PAVIC, A. Effects of false floors on vibration serviceability of building floors. I: Modal properties. **Journal of Performance of Constructed Facilities.** v. 17, n. 2, p. 75-86, mai 2003a.

REYNOLDS, P.; PAVIC, A. Effects of false floors on vibration serviceability of building floors. II: Response to pedestrian excitation. **Journal of Performance of Constructed Facilities.** v. 17, n. 2, p. 87-96, mai 2003b.

SARAMAGO, G. A.; SANTOS, S. H. C.; PERLINGEIRO, M. S. P. L. Análise Dinâmica de Passarelas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PONTES E ESTRUTURAS, 10., 2018, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro, 2018. p. 1-10.

SERVICE D'ETUDES TECHNIQUES DES ROUTES ET AUTOROUTES.**SÉTRA/AFGC:** Footbridges, assessment of vibrational behavior of footbridges under pedestrian loading. Paris, 2006.

SHAHABPOOR, E.; PAVIC, A. Comparative evaluation of current pedestrian traffic models on structures. In: IMAC, A CONFERENCE ON STRUCTURAL DYNAMIC, 30., 2012, Jacksonville. **Proceedings...** Bethel, 2012. p. 41-52.

SHAHABPOOR, E.; PAVIC, A.; RACIC. V.; ŽIVANOVIĆ, S. Effect of group walking traffic on dynamic properties of pedestrian structures. **Journal of Sound and Vibration.** v. 387, p. 207-225, jan, 2017

SILVA, G. A. **Otimização de parâmetros de projeto de amortecedores de massa sintonizados para controle de vibrações em passarelas metálicas.** 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

SILVA, G. A.; MIGUEL, L. F. F. Dynamic response analysis of truss footbridges under human load. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SOLID MECHANICS, 7., 2019, São Carlos. **Proceedings...** São Carlos: ABCM, 2019. p. 1-6.

SILVA, I. A. R.; SILVA, J. G. S. Experimental and numerical dynamic structural analysis of footbridges when subjected to pedestrians waking loads. **Journal of Civil Structural Health Monitoring.** v. 8, p. 585-595, jul 2018.

SILVA, J. G. S.; VELLASCO, P. C. G. S.; ANDRADE, S. A. L.; LIMA, L. R. O.; FIGUEIREDO F. P. Vibration analysis of footbridges due to vertical human loads. **Computers & Structures.** v. 85, n. 21-22, p. 1693-1703, nov 2007.

SOUZA, O. A. P. **Elaboração de um algoritmo de otimização aplicado à engenharia estrutural: Circle-Inspired Optimization Algorithm (CIOA).** 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

SOUZA, O. A. P.; MIGUEL L. F. F. CIOA: Circle-Inspired Optimization Algorithm, an algorithm for engineering optimization. **SoftwareX.** v. 19, p. 101192, 2022.

TIAN, Y.; CHEN, W. MEMS-based human activity recognition using smartphone. In: CHINESE CONTROL CONFERENCE, 35., 2016, Chengdu, China. **Proceedings…** New York: IEEE, 2016. p. 3984–3989.

TICKNOR, J. L. A Bayesian regularized artificial neural network for stock market forecasting. **Expert Systems with Applications.** v. 40, n.15, p. 5501-5506, 2013.

TILLY, G. P.; CULLINGTON, D. W.; EYRE, R. Dynamic Behavior of Footbridges. **IABSE Surveys.** s. 26-84, p. 13-24, 1984.

TOSO, M. A.; GOMES, H. M. A smart force platform using artificial neural networks. **Measurement.** v. 91, p. 124-133, set 2016.

TOSO, M. A.; GOMES, H. M.; SILVA, F. T.; PIMENTEL, R. L. A biodynamic model fit for vibration serviceability in footbridges using experimental measurements in a designed force platform for vertical load gait analysis. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON EXPEERIMENTAL MECHANICS, 15., 2013, Porto. **Proceedings…** INEGI, 2012. p. 23-33.

TOSO, M. A.; GOMES, H, M.; SILVA, F. T.; PIMENTEL, R. L. Experimentally fitted biodynamic models for pedestrian–structure interaction in walking situations. **Mechanical Systems and Signal Processing.** v. 72-73, p. 590-606, mai 2016.

VENUTI, F.; RACIC, V.; CORBETTA, A. Modelling framework for dynamic interaction between multiple pedestrians and vertical vibrations of footbridges. **Journal of Sound and Vibration.** v. 379, p. 245-263. Set. 2016.

VIJAYAN, A.; ABRAHAM, N. M.; KUMARI, A. Analysis of structures subjected to crowd loads. **Procedia Structural Integrity.** v. 14, p. 696-704, 2019.

YANG, X-S. **Nature-inspired Metaheuristic Algorithms.** 2ª ed. Frome: Luniver Press, 2010.

ŽIVANOVIĆ, S. **Probability-based estimation of vibration for pedestrian structures due to walking.** 2006. Thesis (Ph.D. in Engineering) - Department of Civil & Structural Engineering, University of Sheffield, Sheffield.

ŽIVANOVIĆ, S.; PAVIĆ, A.; INGÓLFSSON, E. T. Modeling Spatially Unrestricted Pedestrian Traffic on Footbridges. **Journal of Structural Engineering.** v. 169 p. 1296-1308. Oct 2010.

ŽIVANOVIĆ, S.; PAVIĆ, A.; REYNOLDS, P. Probability based estimation of footbridge vibration due to walking. In: INTERNATIONAL MODAL ANALYSIS CONFERENCE, 25., 2007, Orlando. **Proceedings...** 2007a. p. 1772-1782.

ŽIVANOVIĆ, S.; PAVIĆ, A.; REYNOLDS, P. Probability-based prediction of multi-mode vibration response to walking excitation. **Engineering Structures.** v. 29 p. 942-954. Jun 2007b.

ŽIVANOVIĆ, S.; PAVIĆ, A.; REYNOLDS, P. Vibration serviceability of footbridges under human-induced excitation: a literature review. **Journal of Sound and Vibration.** v. 279 p. 1-74. Jan 2005.

APÊNDICE A: REGISTROS DA CAMINHADA HUMANA E AJUSTES POR MEIO DO *CIRCLE-INSPIRED OPTIMIZATION ALGORITHM* (CIOA)

Este apêndice apresenta todos os registros experimentais obtidos no presente trabalho por meio da medição das forças da caminhada humana de 16 pedestres. Para cada pedestre foram gerados 24 registros, totalizando um conjunto de 384 registros que, ao serem ajustados pelo algoritmo metaheurístico *Circle-Inspired Optimization Algorithm* (CIOA) geraram os parâmetros que alimentam a rede neural artificial responsável pelo modelo de simulação da caminhada humana desenvolvido neste trabalho. As Figuras de A.1 até A.16 ilustram os registros obtidos experimentalmente (em azul) bem como o ajuste gerado por meio do CIOA (em vermelho). As Tabelas de A.1 até A.16 apresentam os parâmetros que regem a Equação do ajuste gerado pelo CIOA. O conjunto de todos os parâmetros de todas as tabelas compõe o banco de dados utilizado para o treinamento das redes neurais artificiais do modelo de carga.

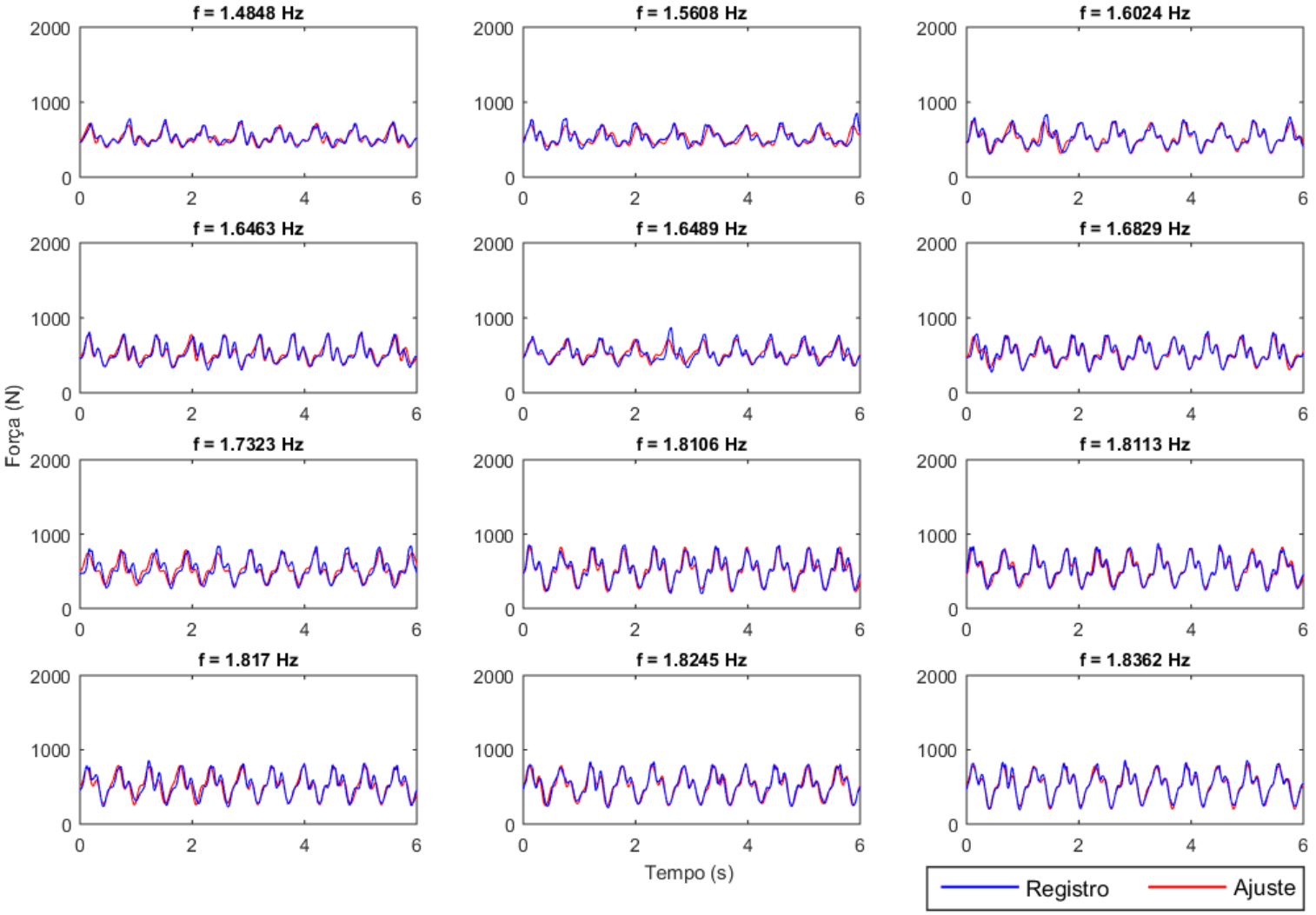


Figura A.1 – Registros e ajustes do pedestre 1 ($m = 54\ kg$)

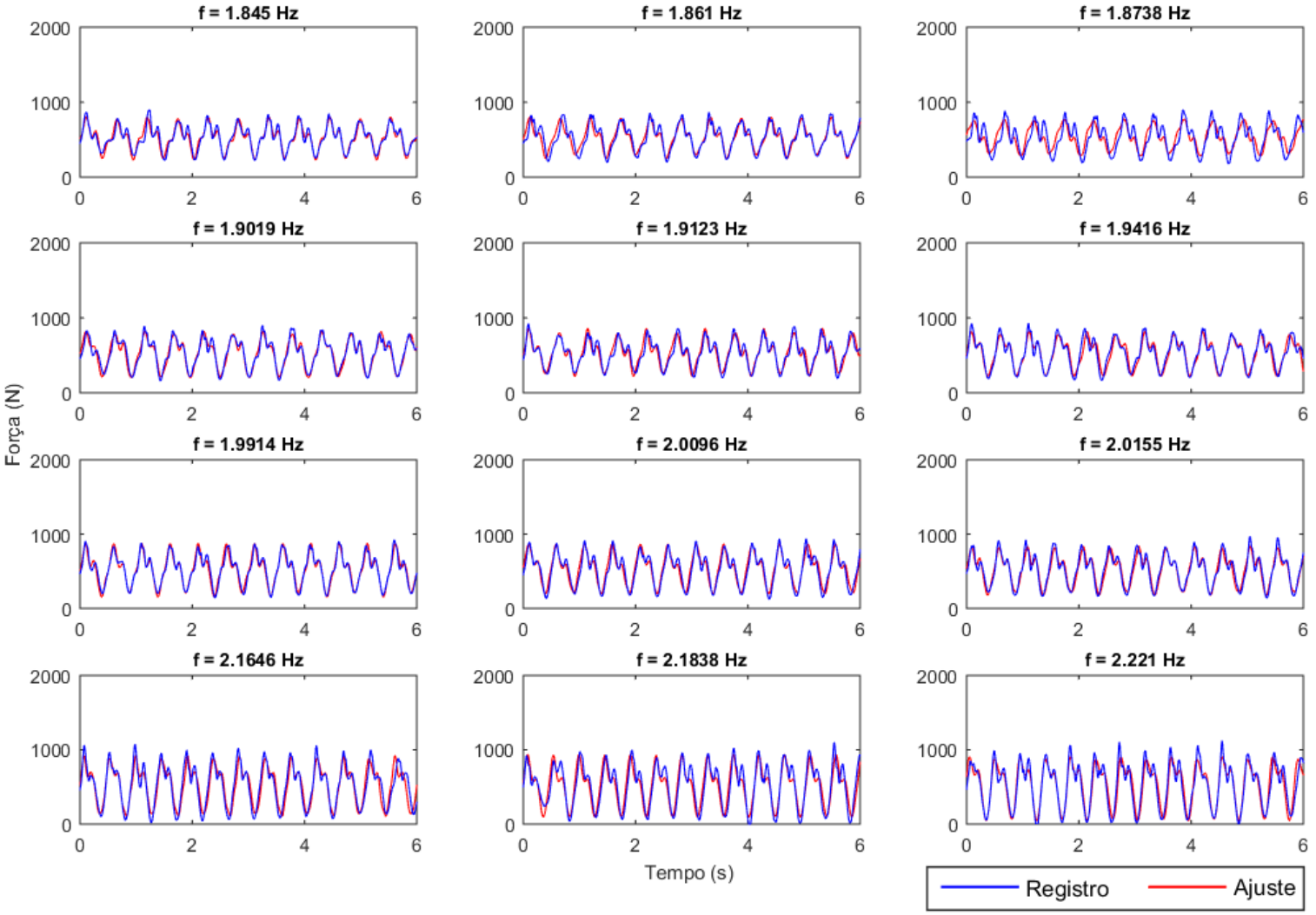


Figura A.1 – Continuação

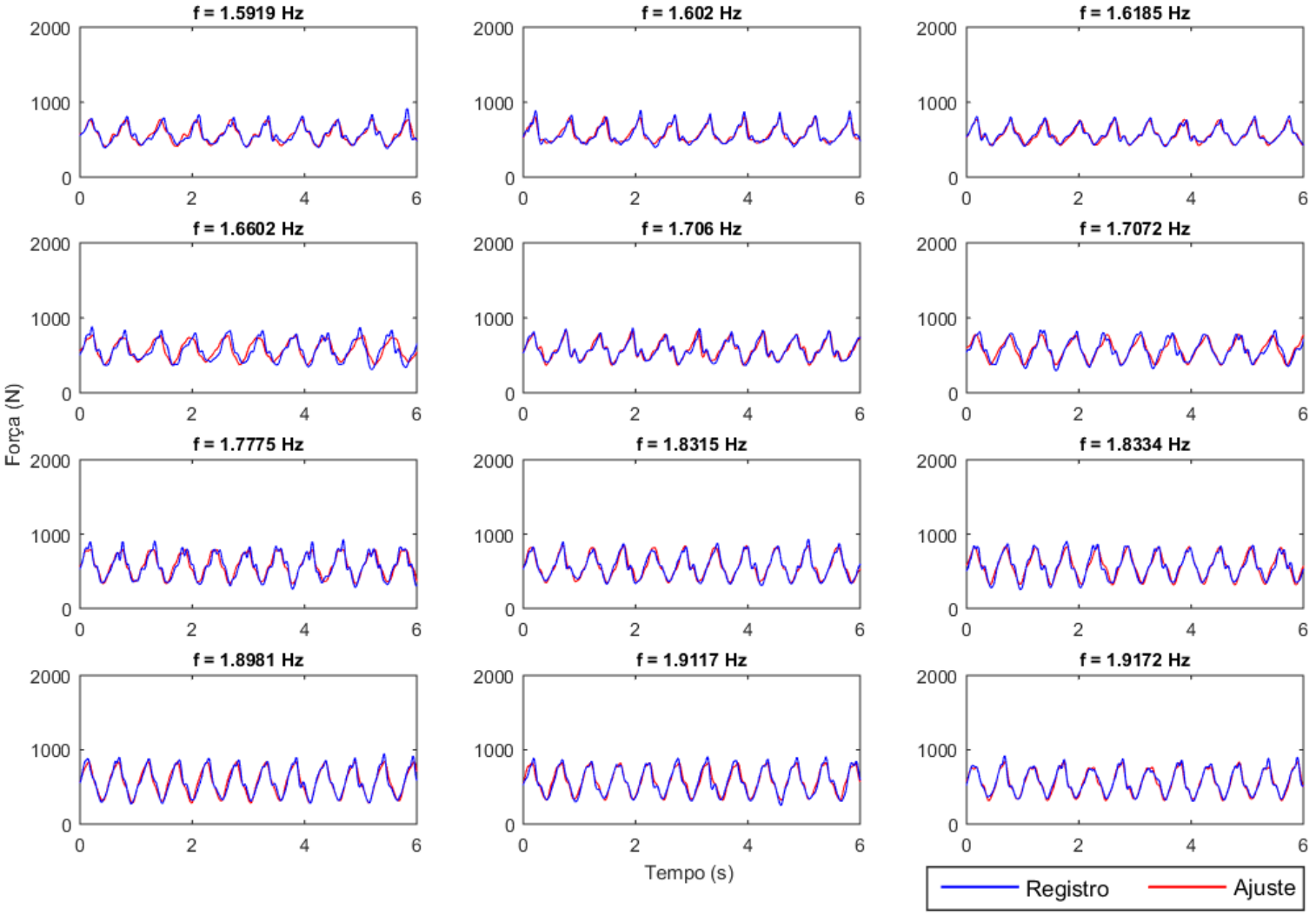


Figura A.2 – Registros e ajustes do pedestre 2 ($m = 58\ kg$)

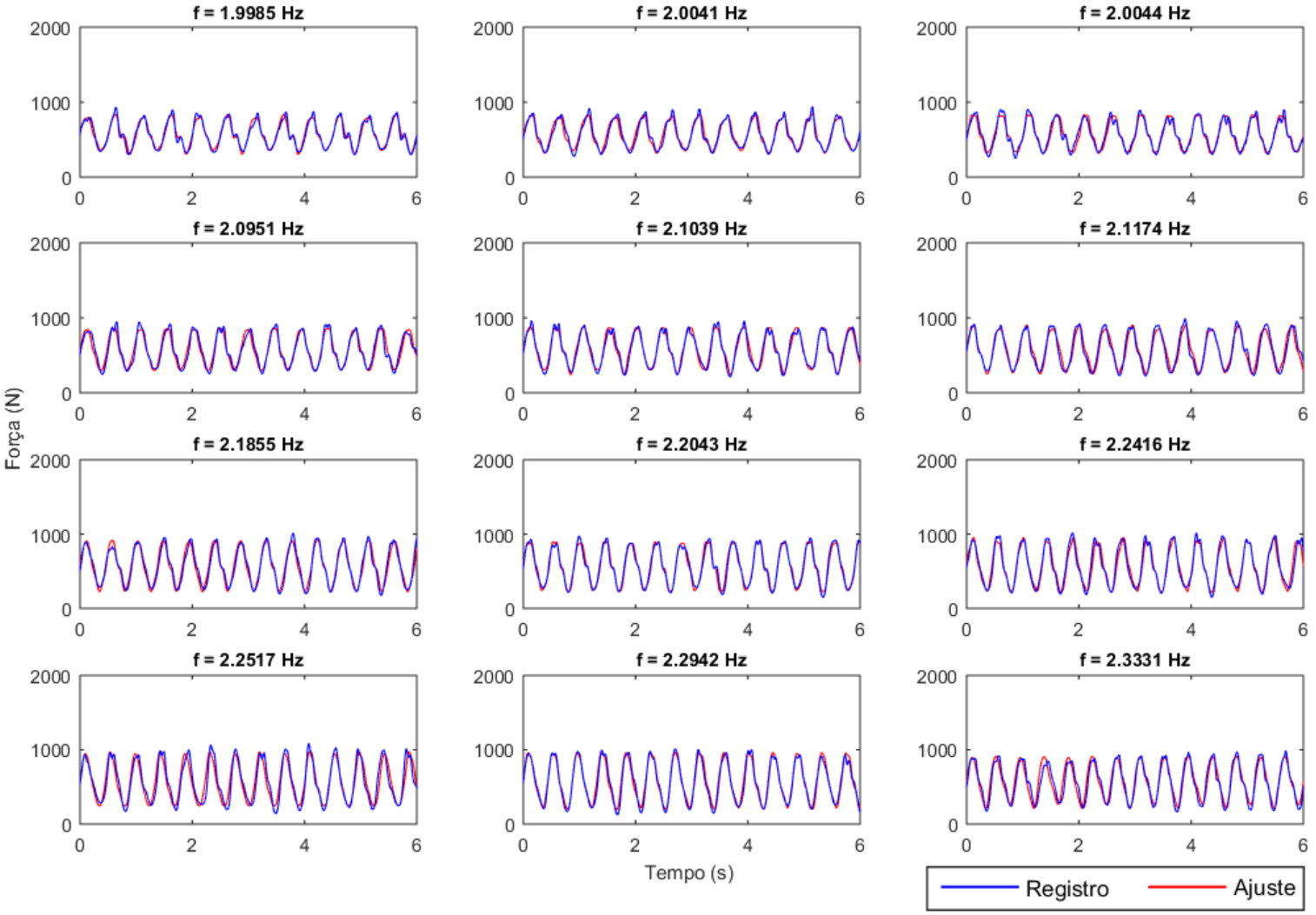


Figura A.2 – Continuação

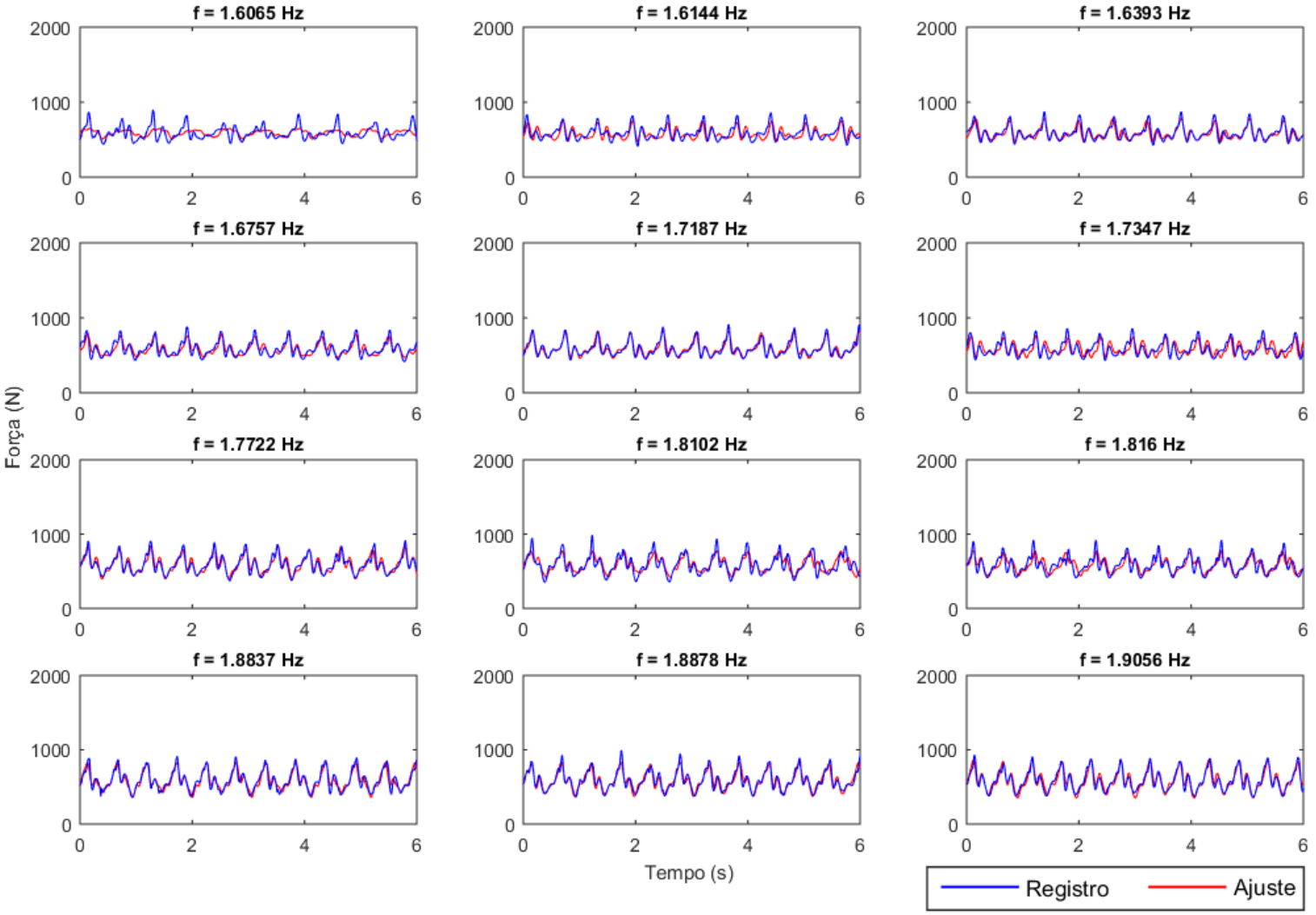


Figura A.3 – Registros e ajustes do pedestre 3 ($m = 60\ kg$)

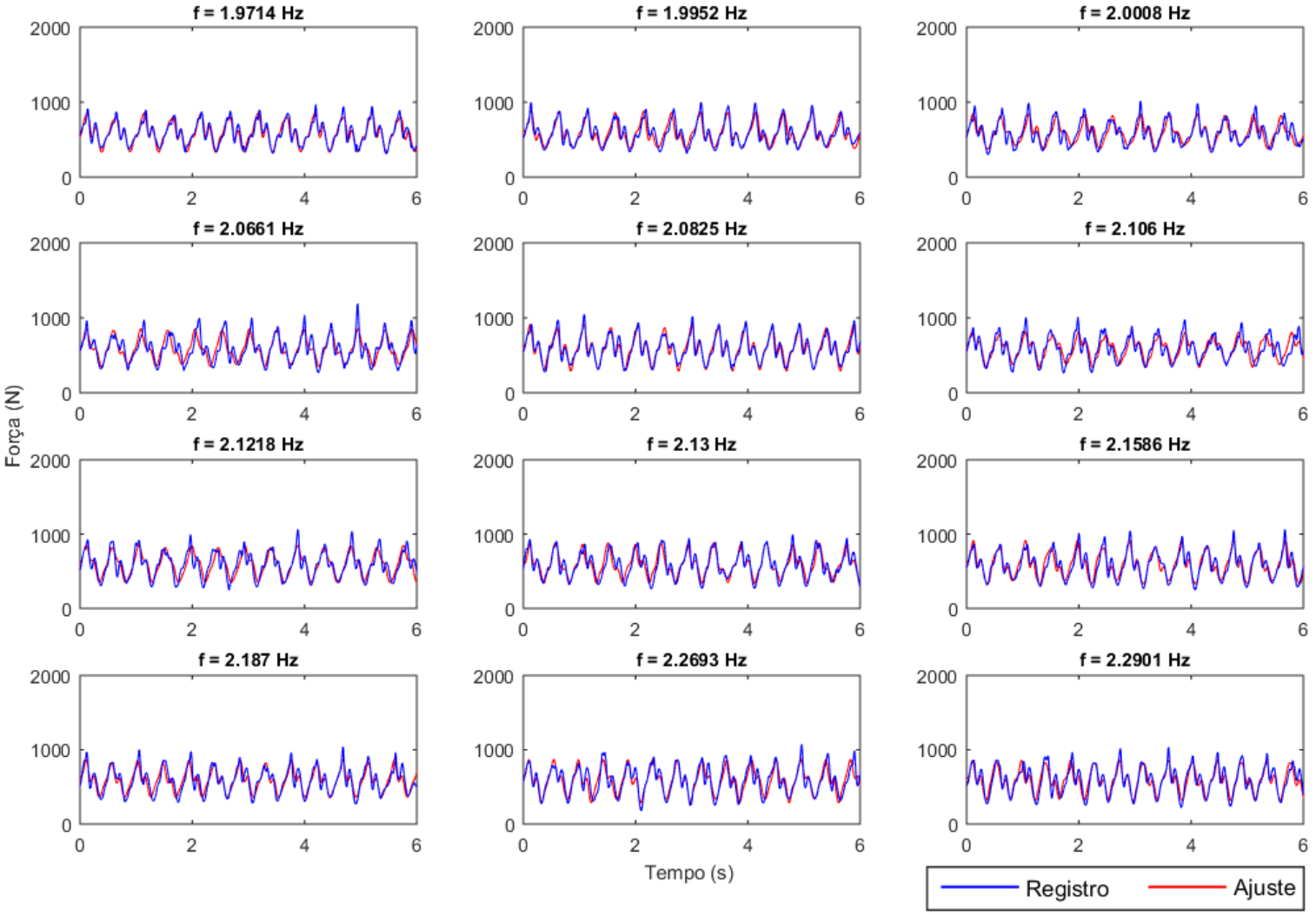


Figura A.3 – Continuação

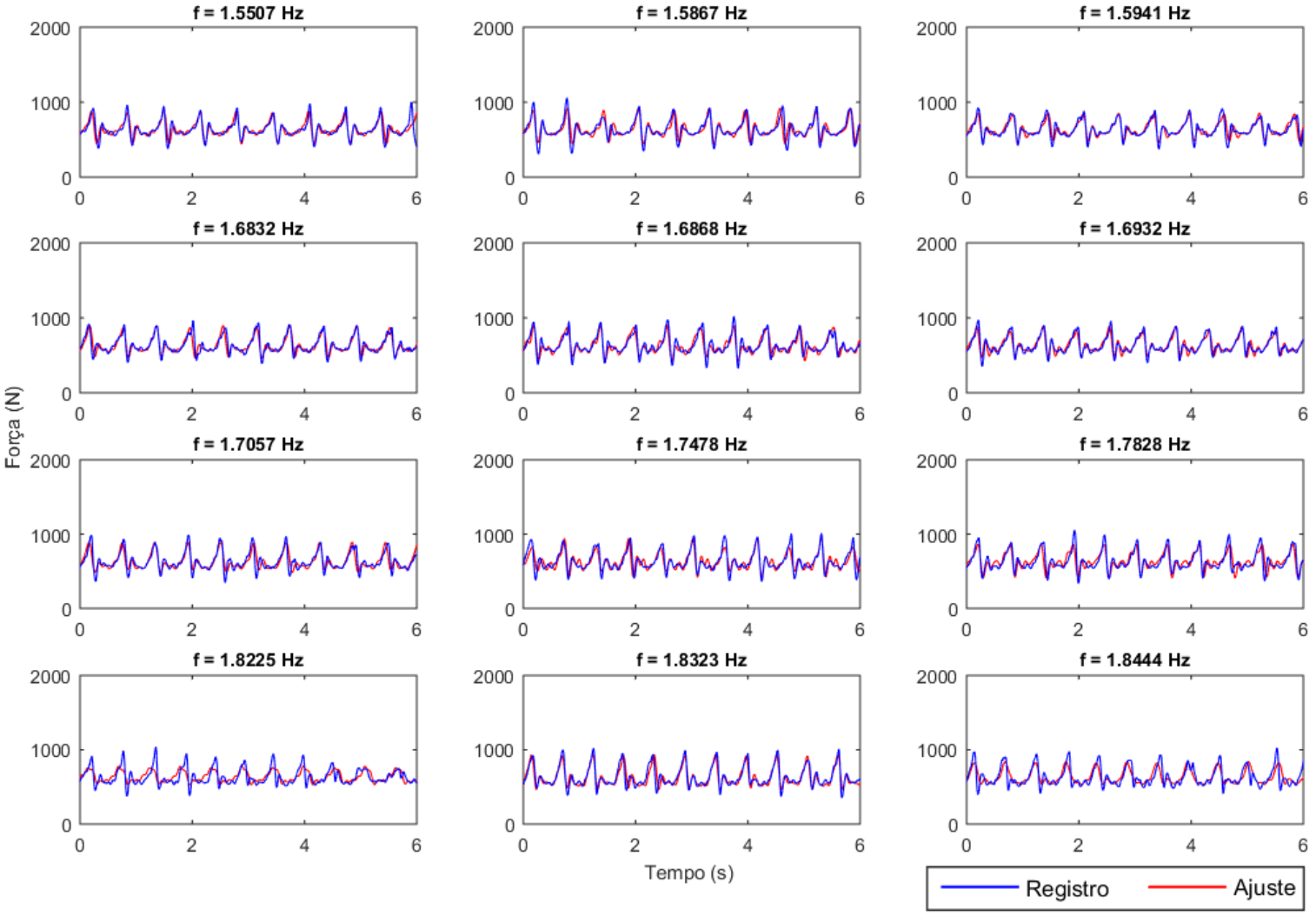


Figura A.4 – Registros e ajustes do pedestre 4 ($m = 65\ kg$)

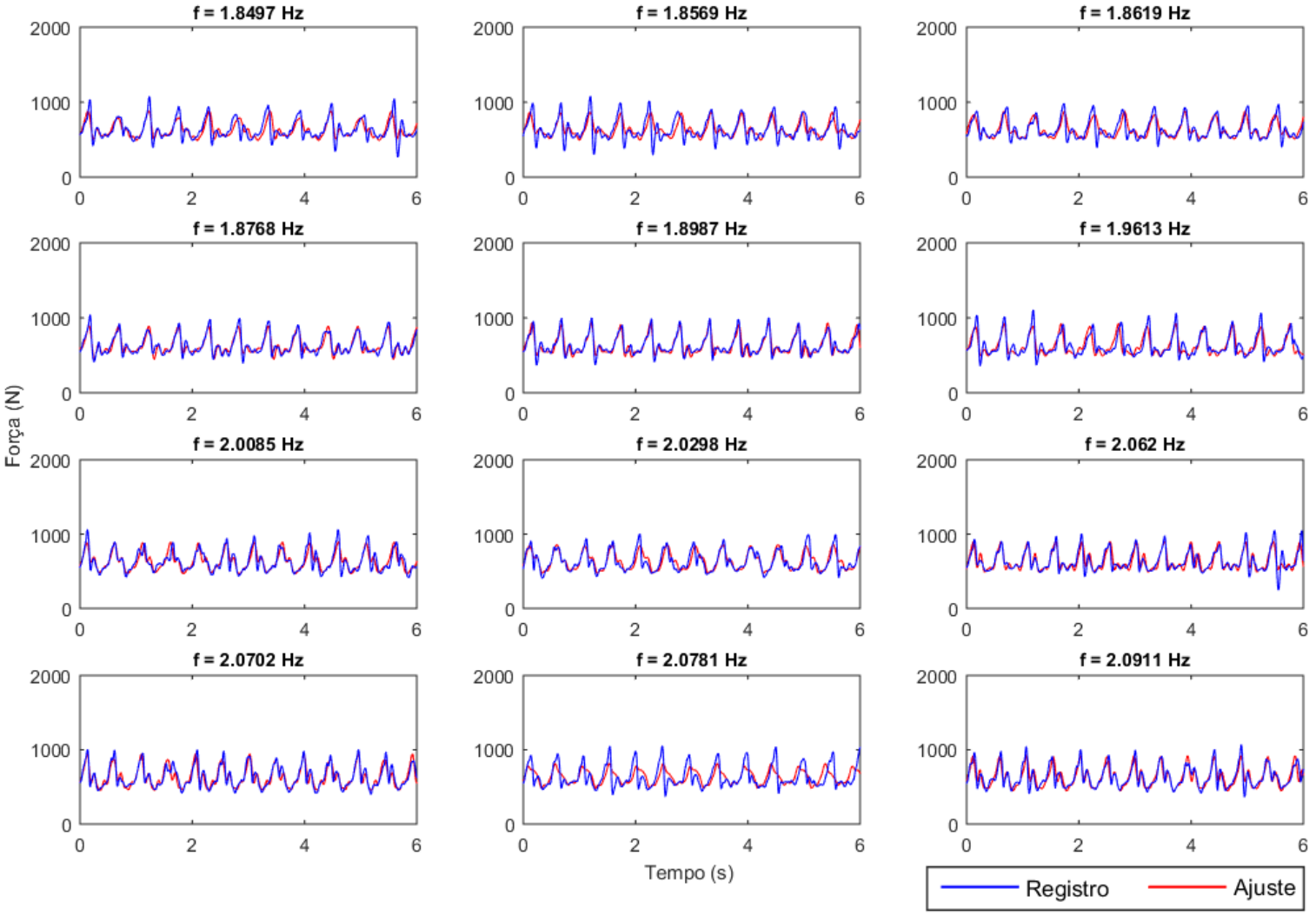


Figura A.4 – Continuação

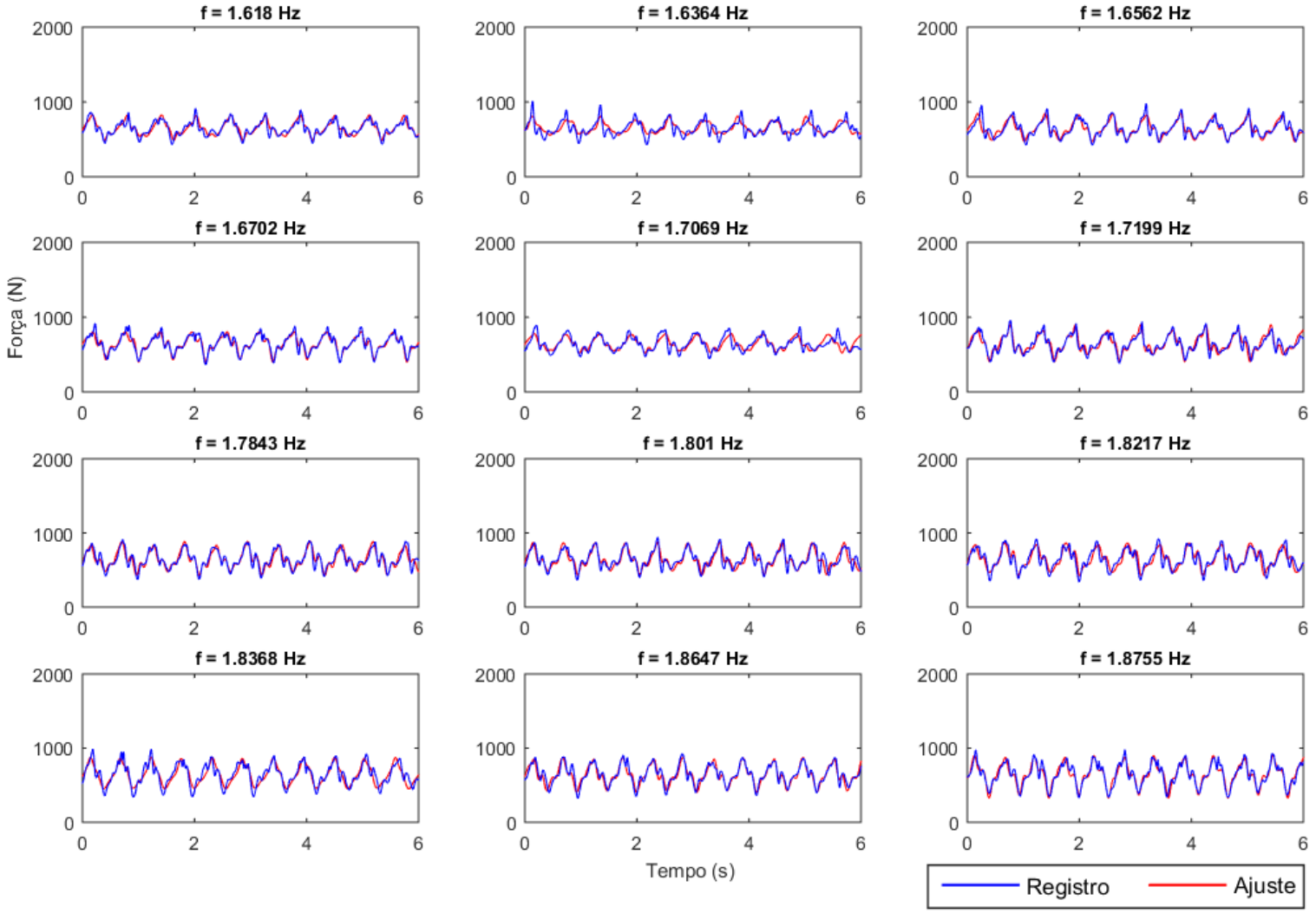


Figura A.5 – Registros e ajustes do pedestre 5 ($m = 66\ kg$)

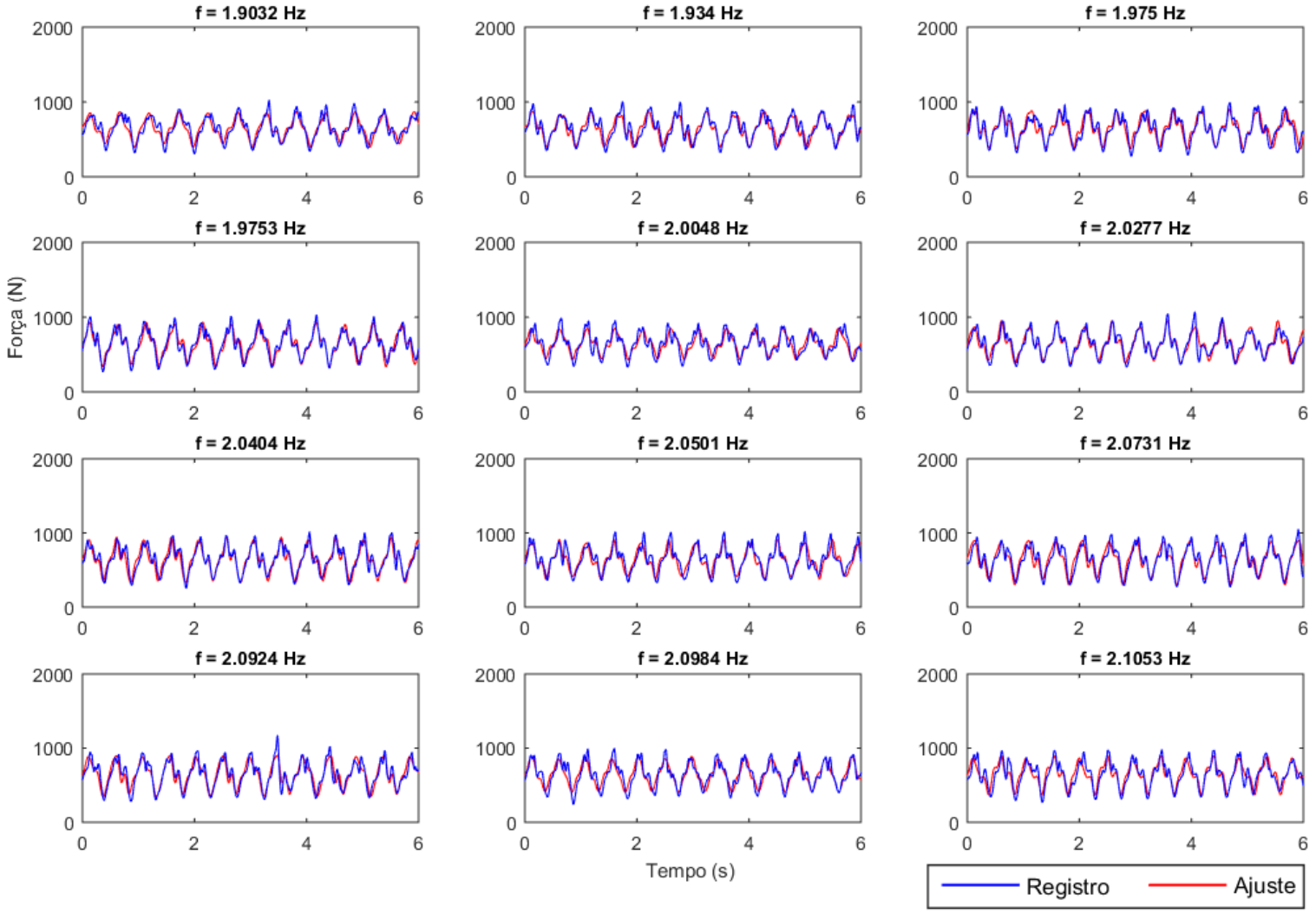


Figura A.5 – Continuação

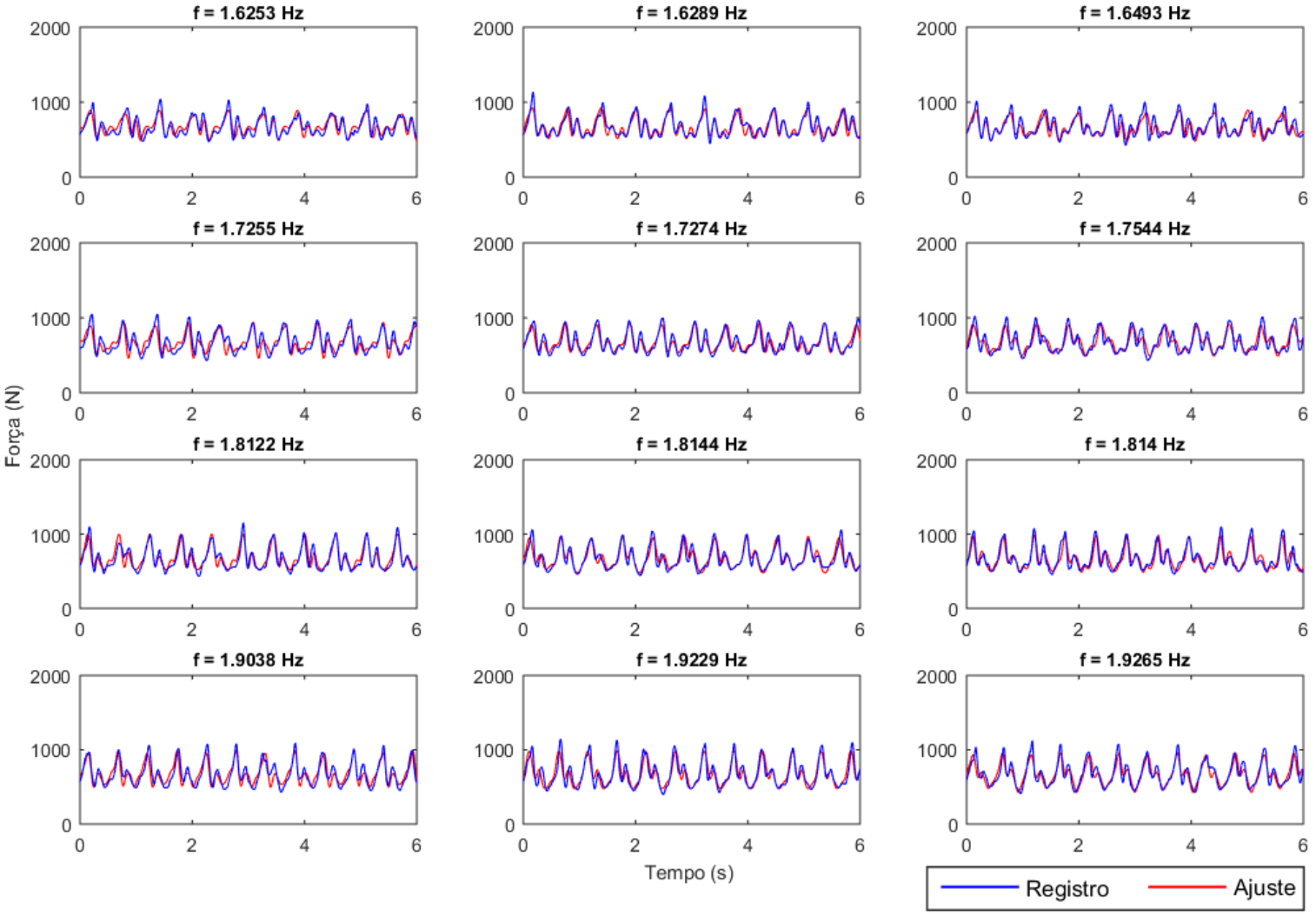


Figura A.6 – Registros e ajustes do pedestre 6 ($m = 69\ kg$)

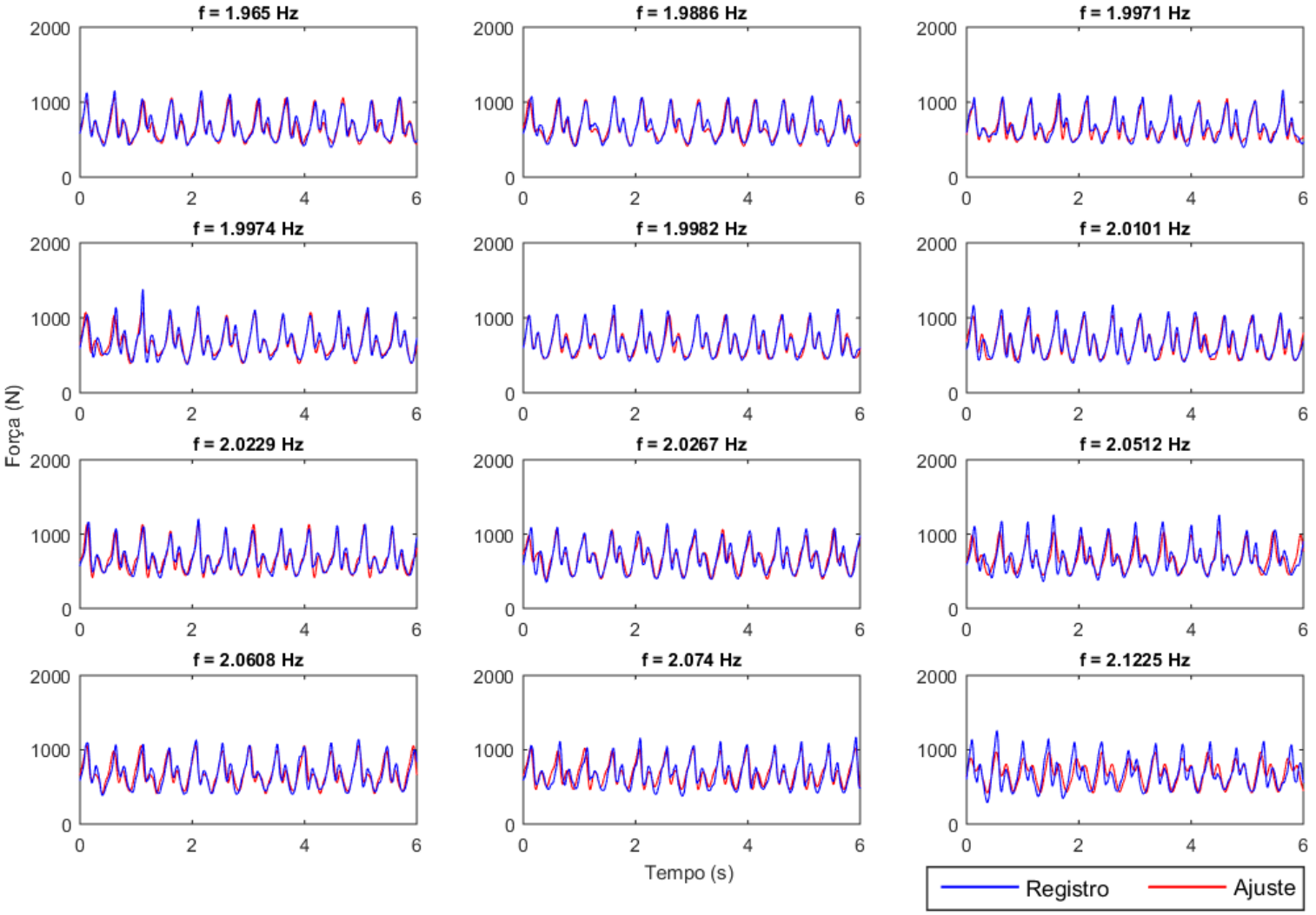


Figura A.6 – Continuação

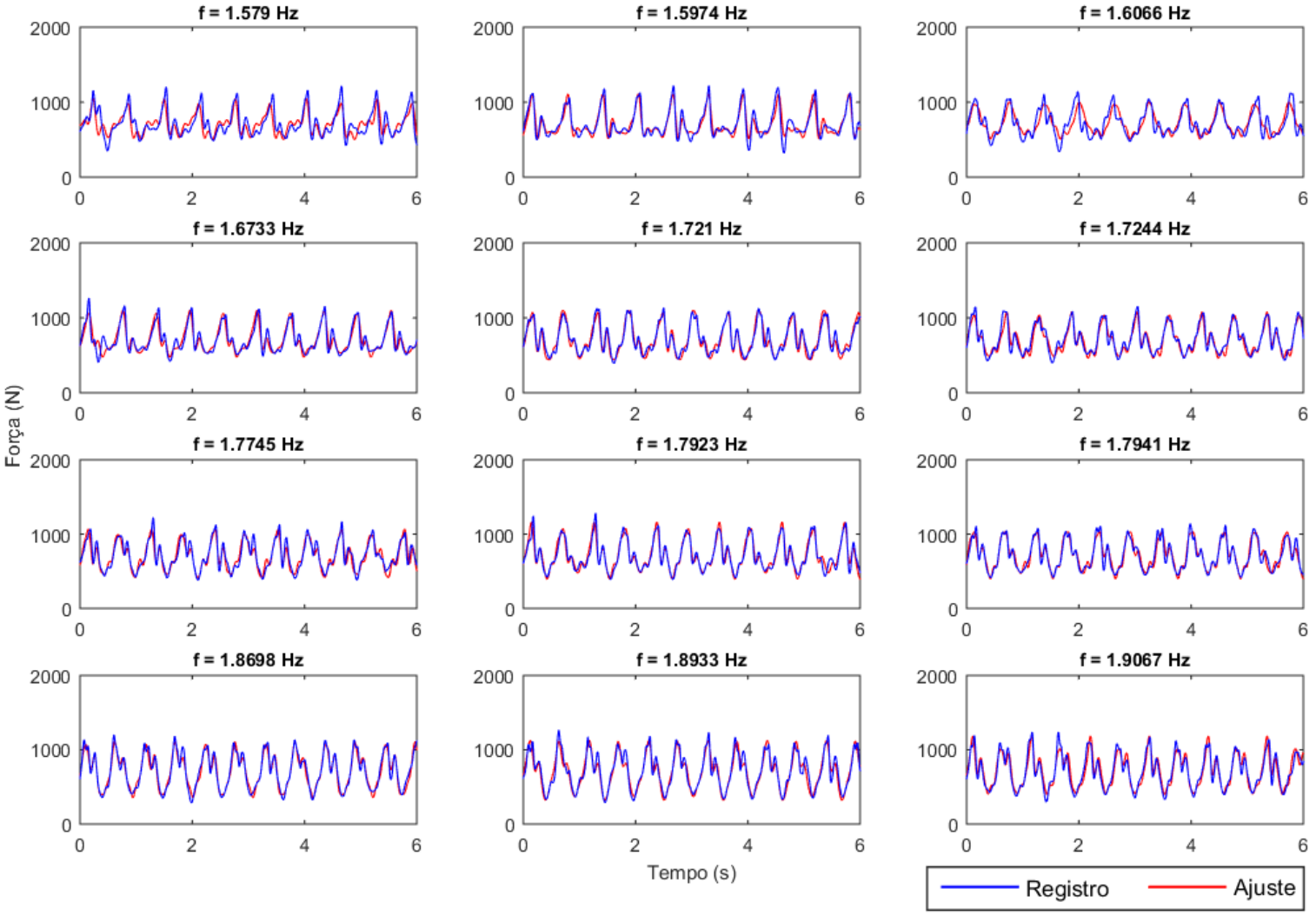


Figura A.7 – Registros e ajustes do pedestre 7 ($m = 73\ kg$)

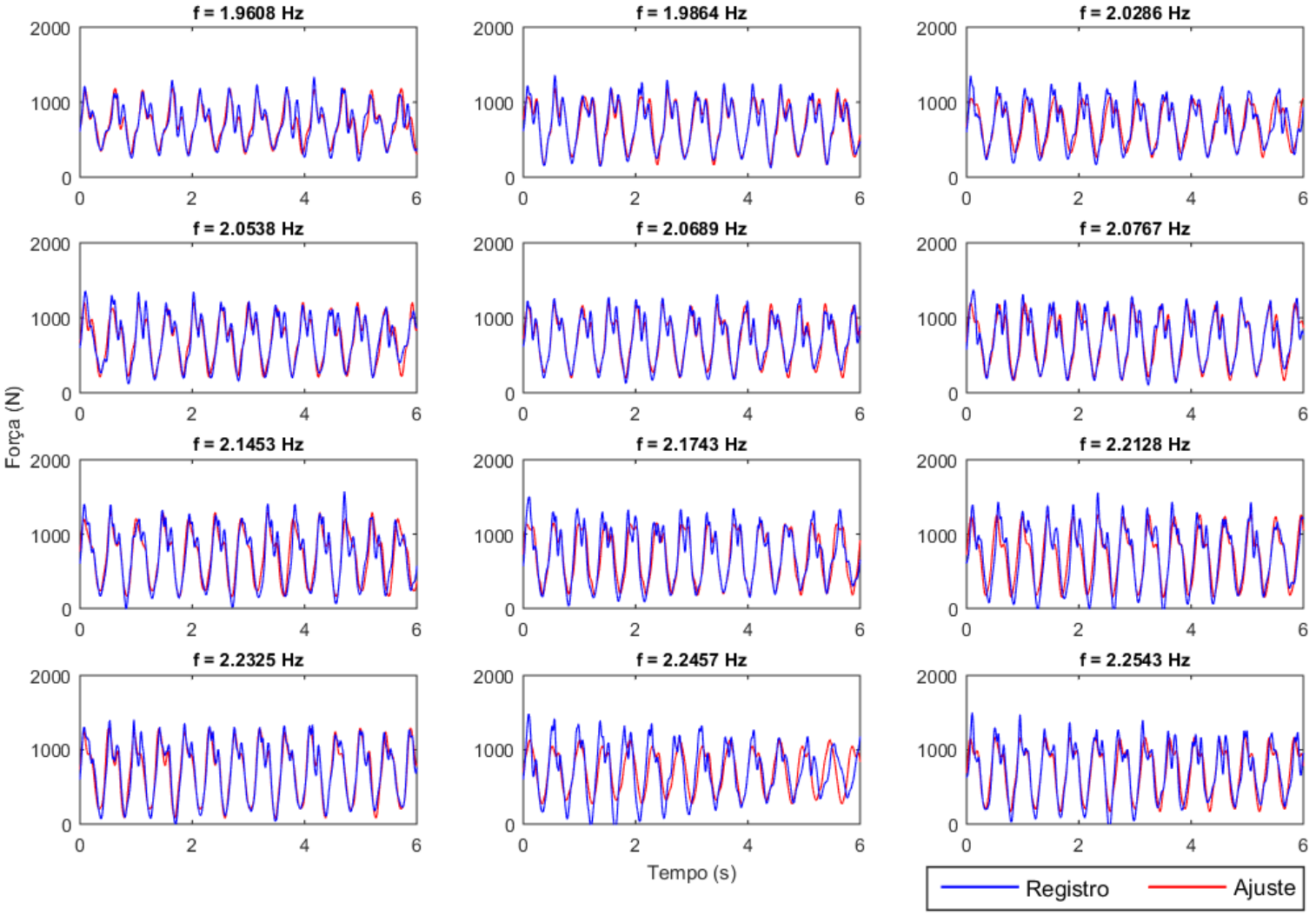


Figura A.7 – Continuação

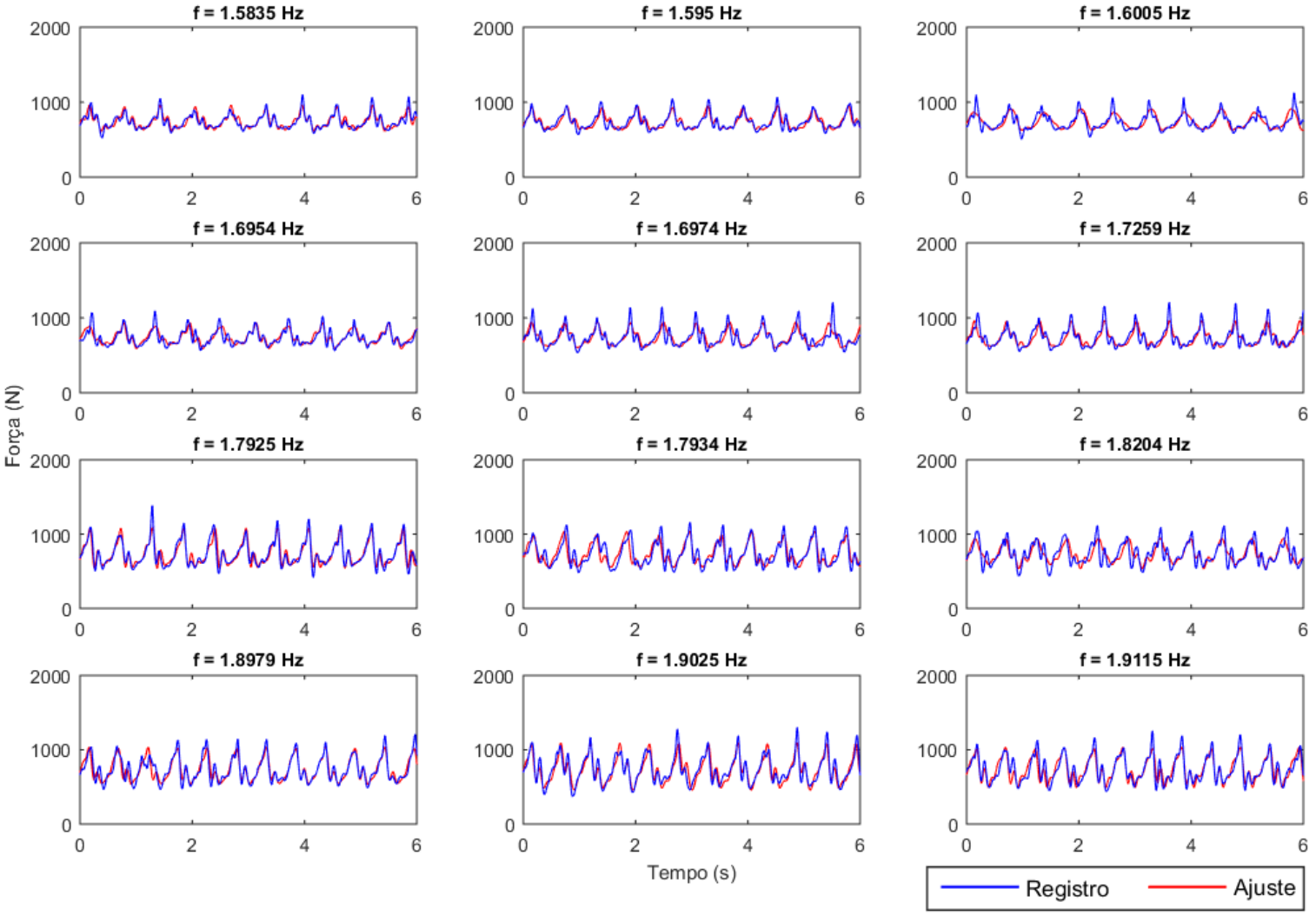


Figura A.8 – Registros e ajustes do pedestre 8 ($m = 75\ kg$)

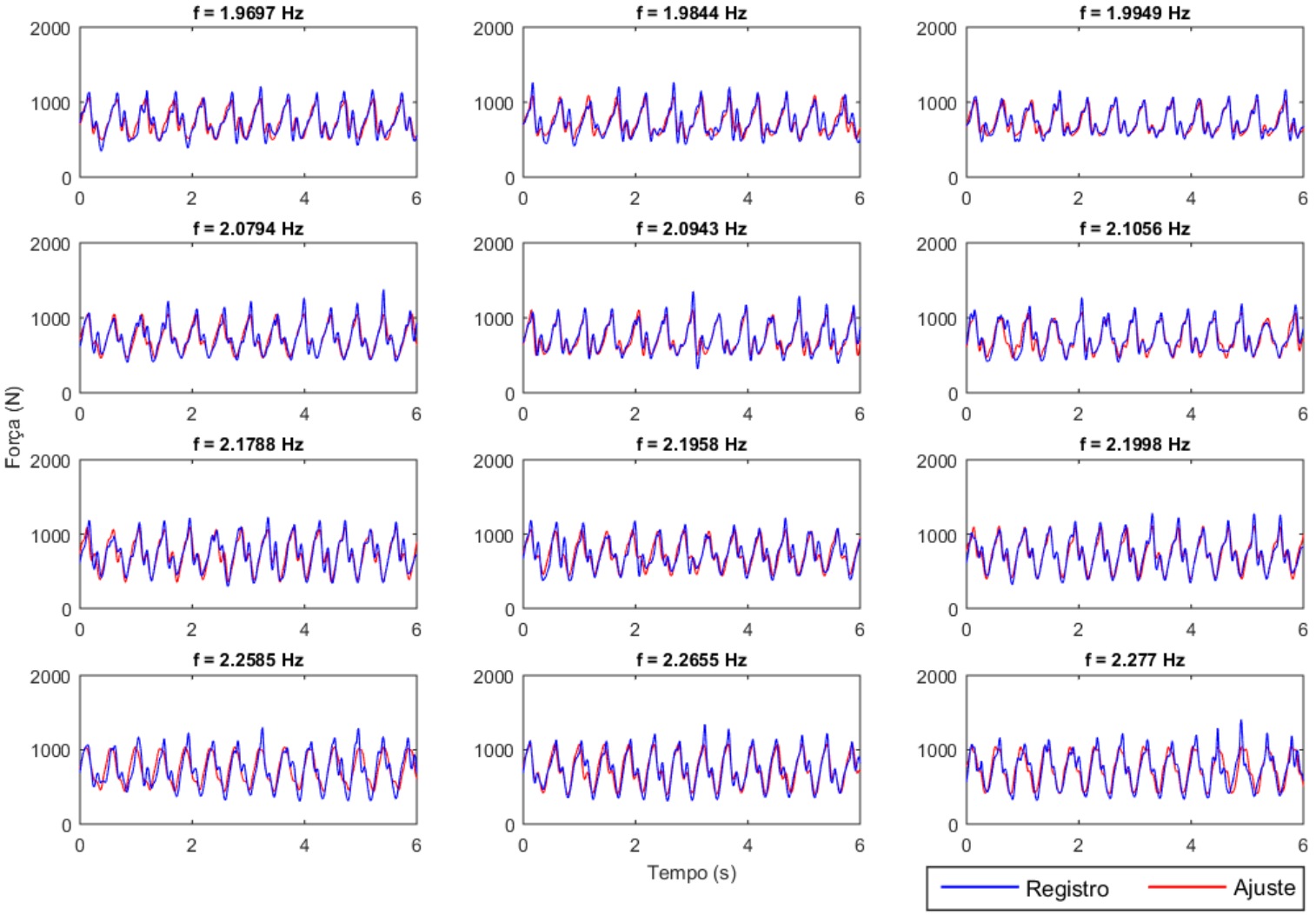


Figura A.8 – Continuação

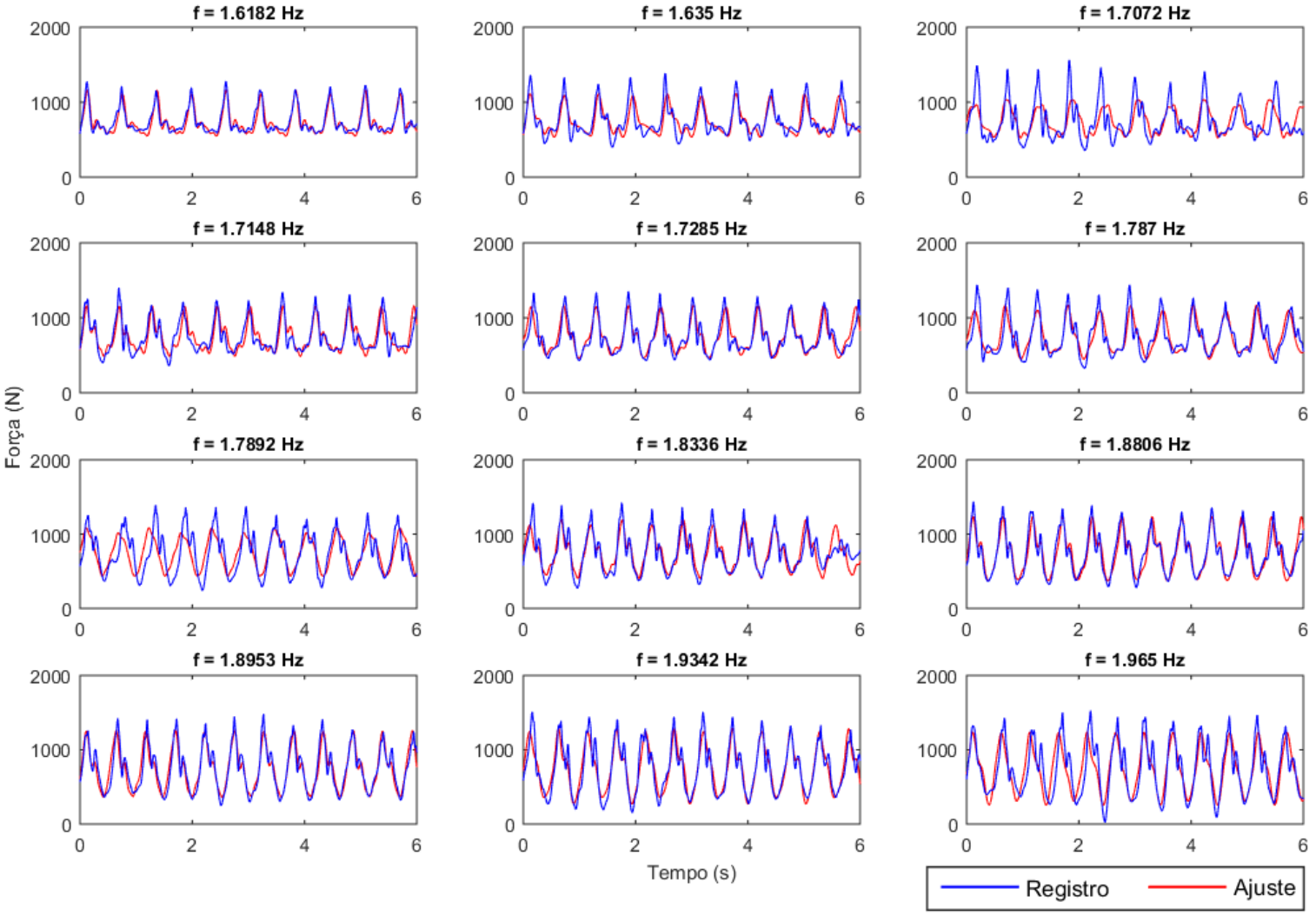


Figura A.9 – Registros e ajustes do pedestre 9 ($m = 76\ kg$)

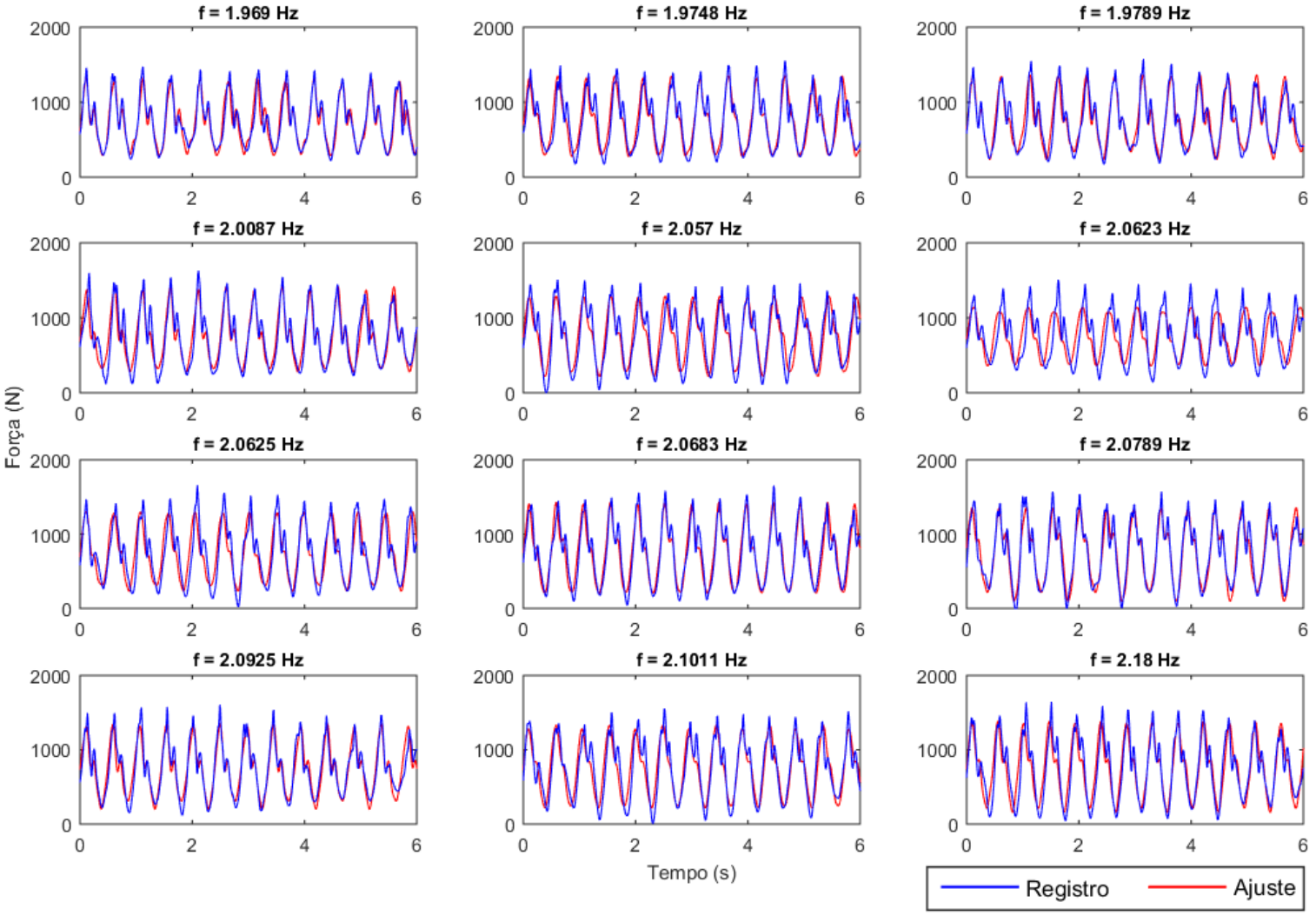


Figura A.9 – Continuação

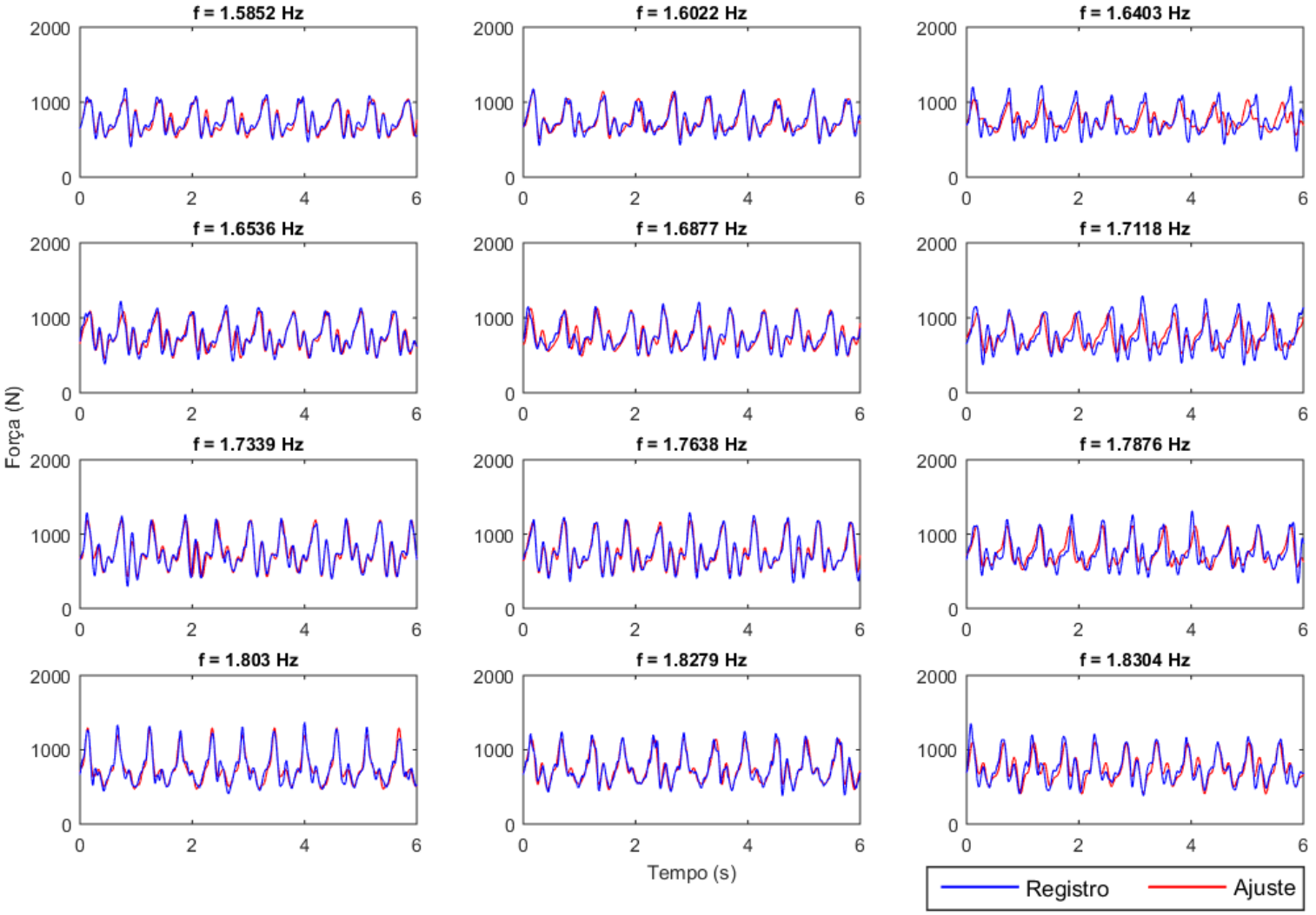


Figura A.10 – Registros e ajustes do pedestre 10 ($m = 78\ kg$)

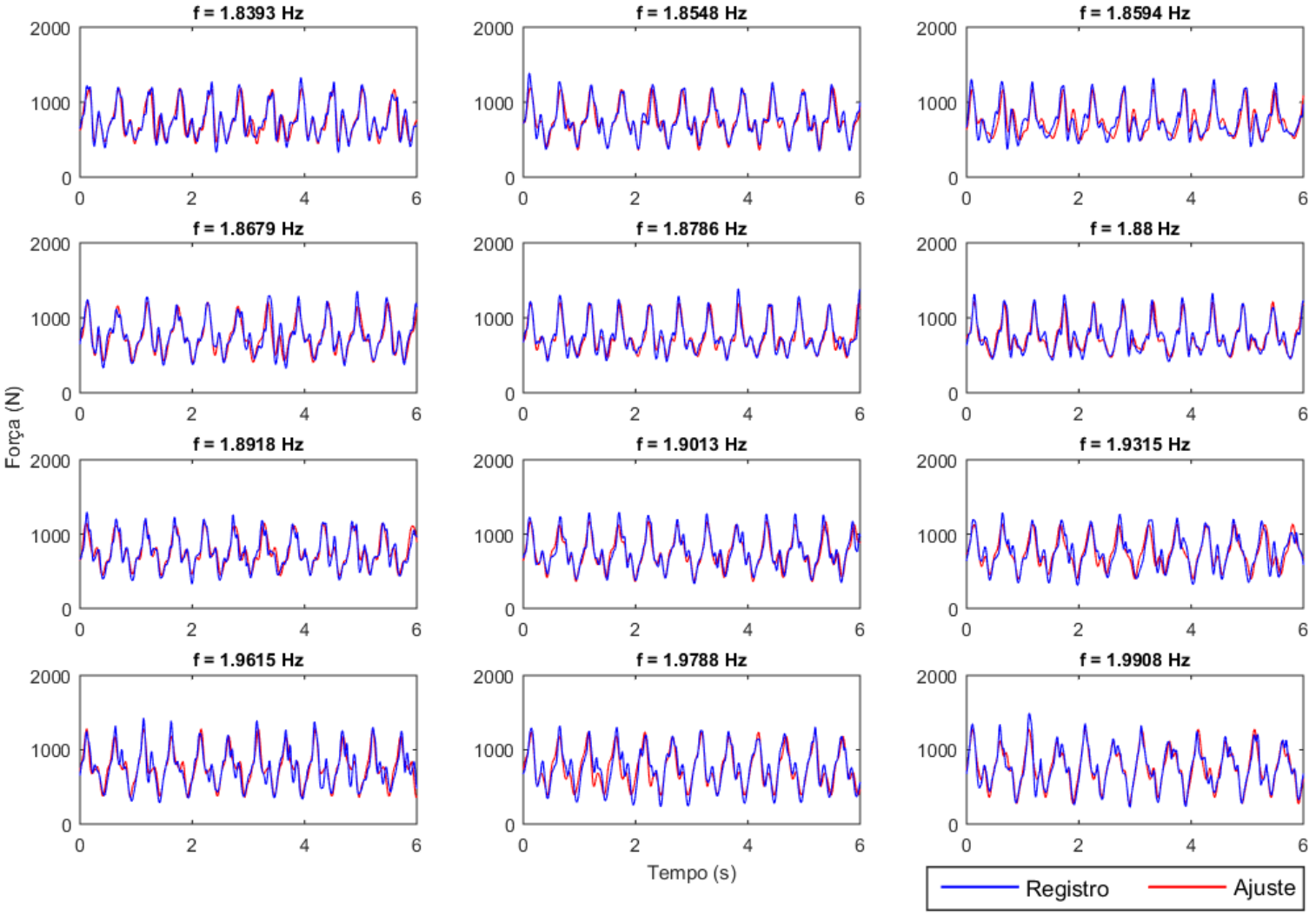


Figura A.10 – Continuação

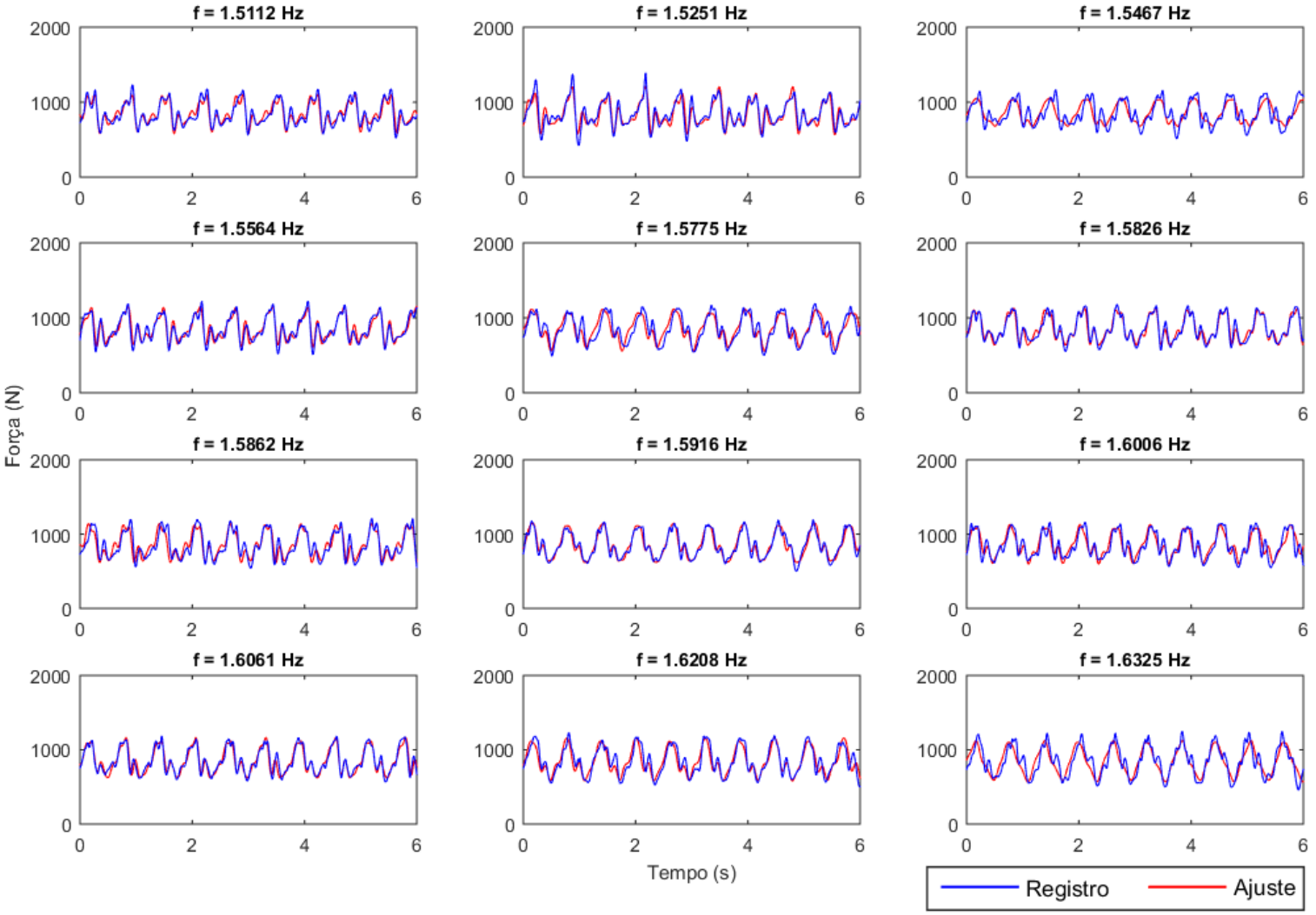


Figura A.11 – Registros e ajustes do pedestre 11 ($m = 87\ kg$)

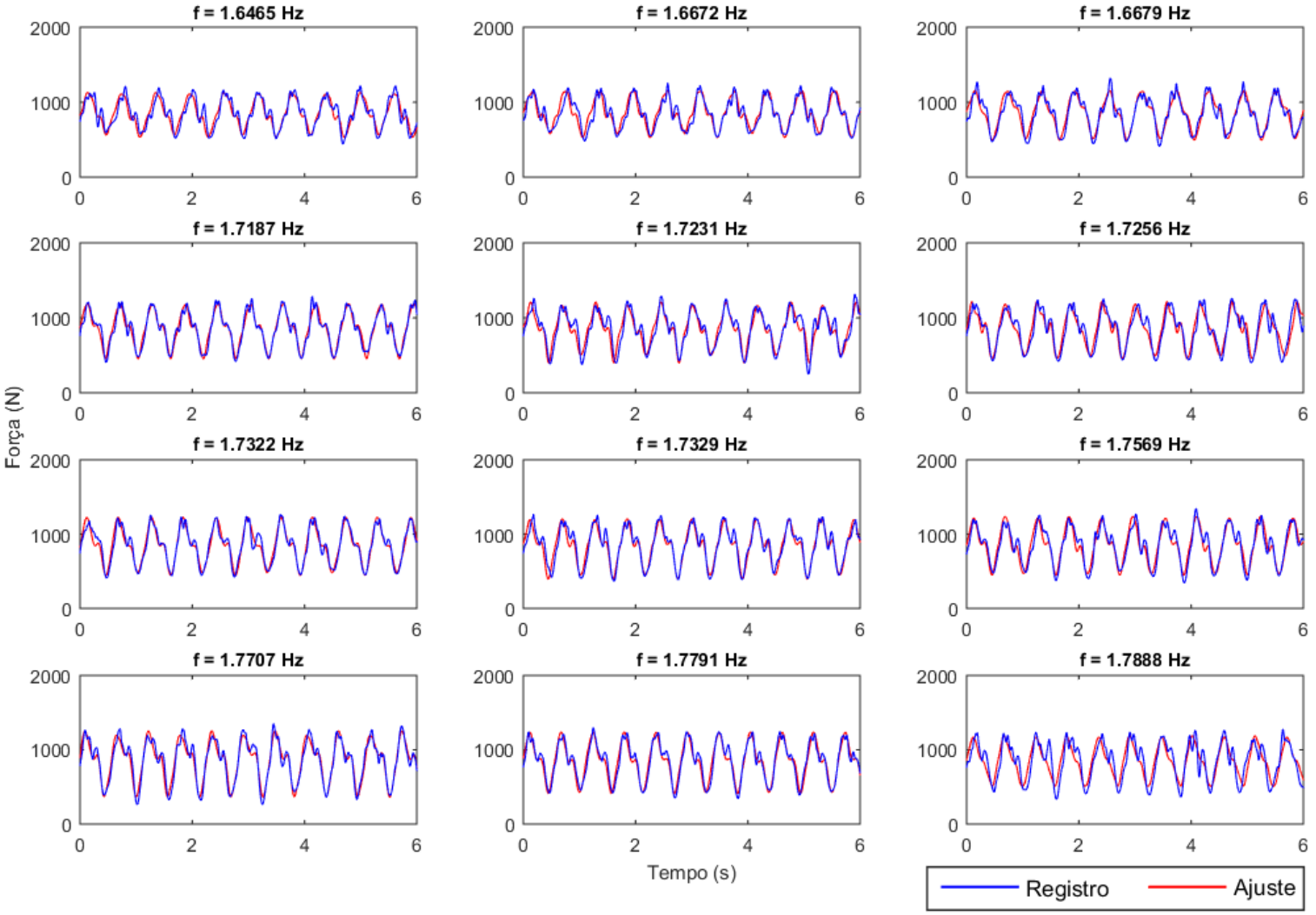


Figura A.11 – Continuação

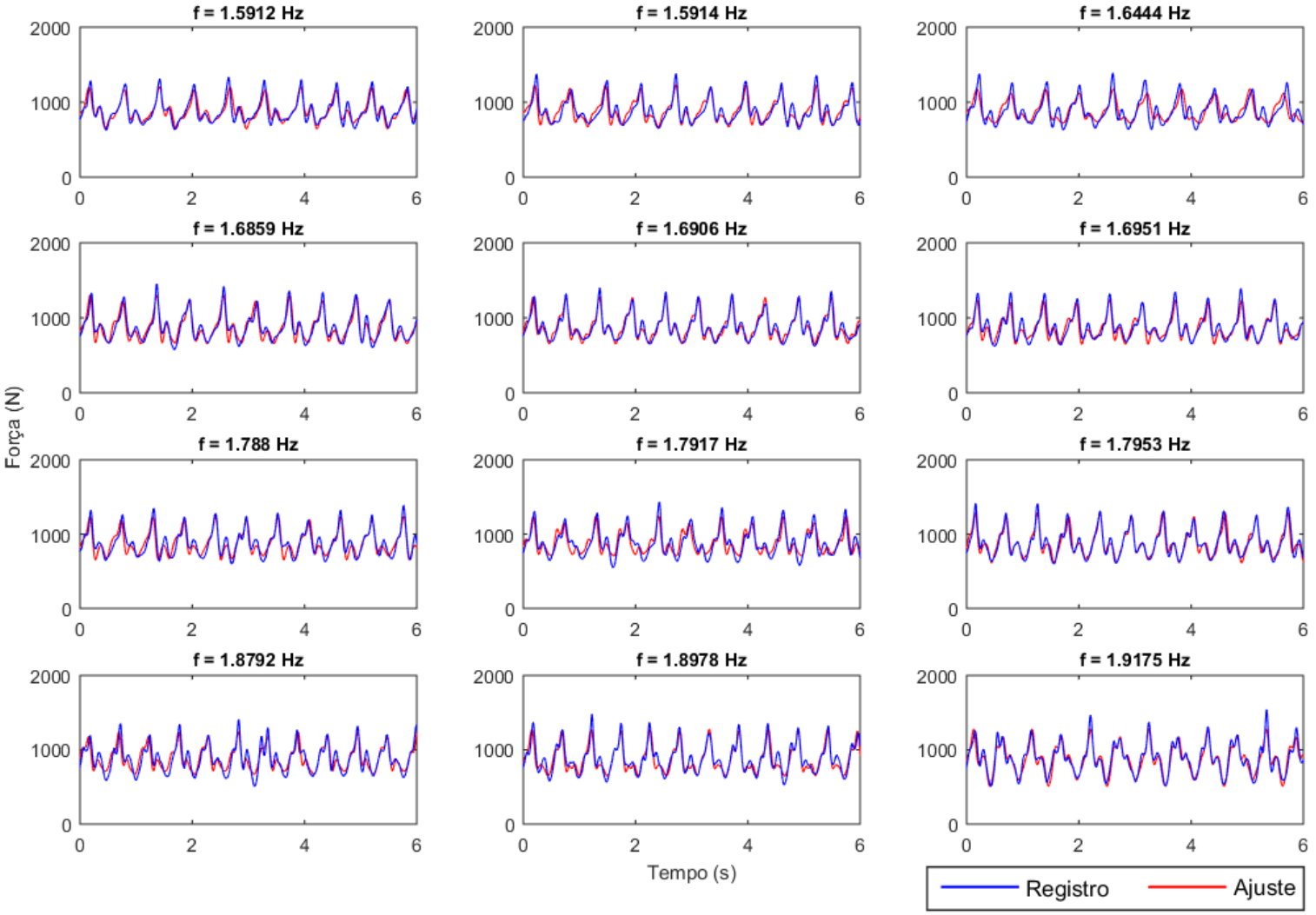


Figura A.12 – Registros e ajustes do pedestre 12 ($m = 90\ kg$)

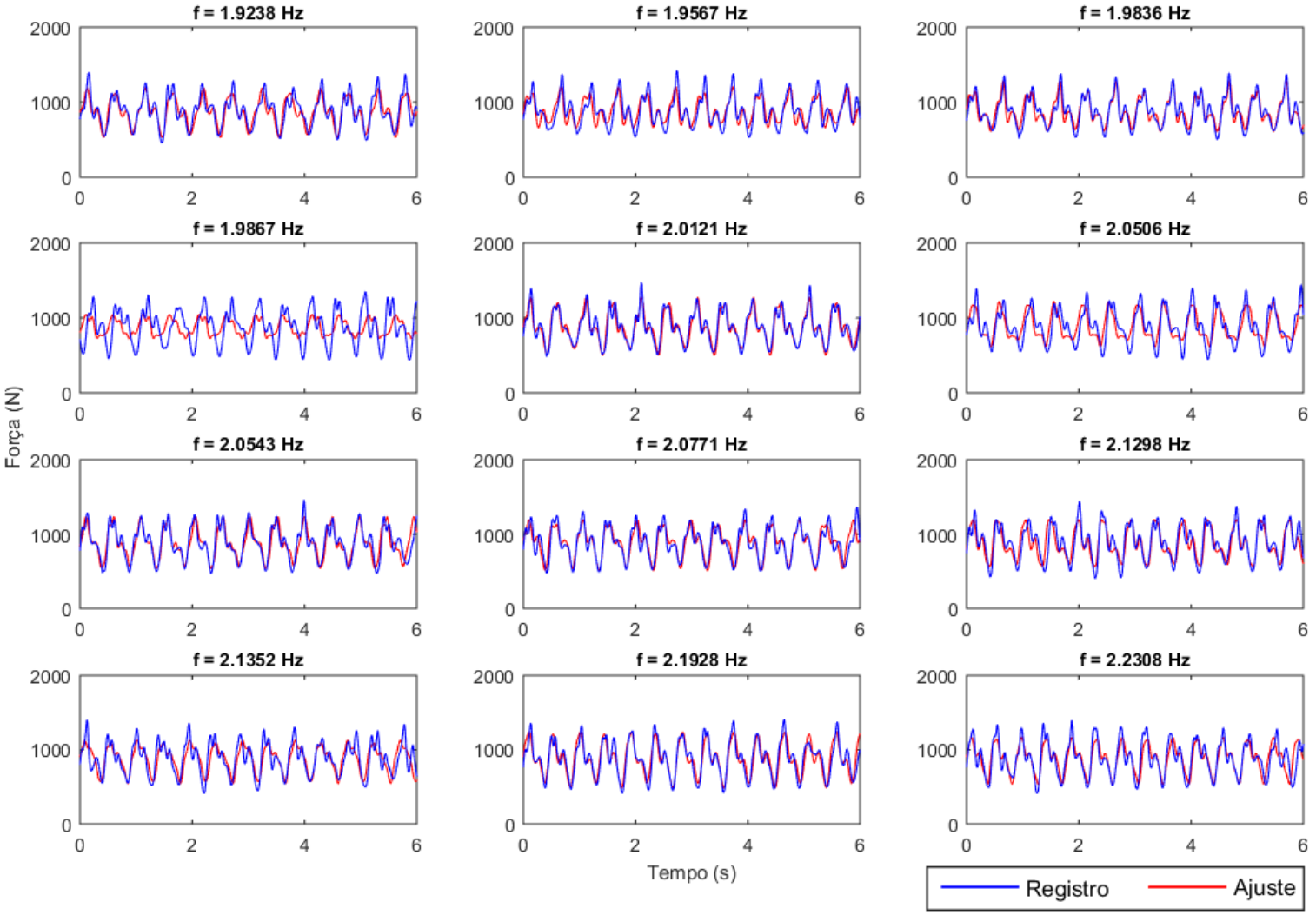


Figura A.12 – Continuação

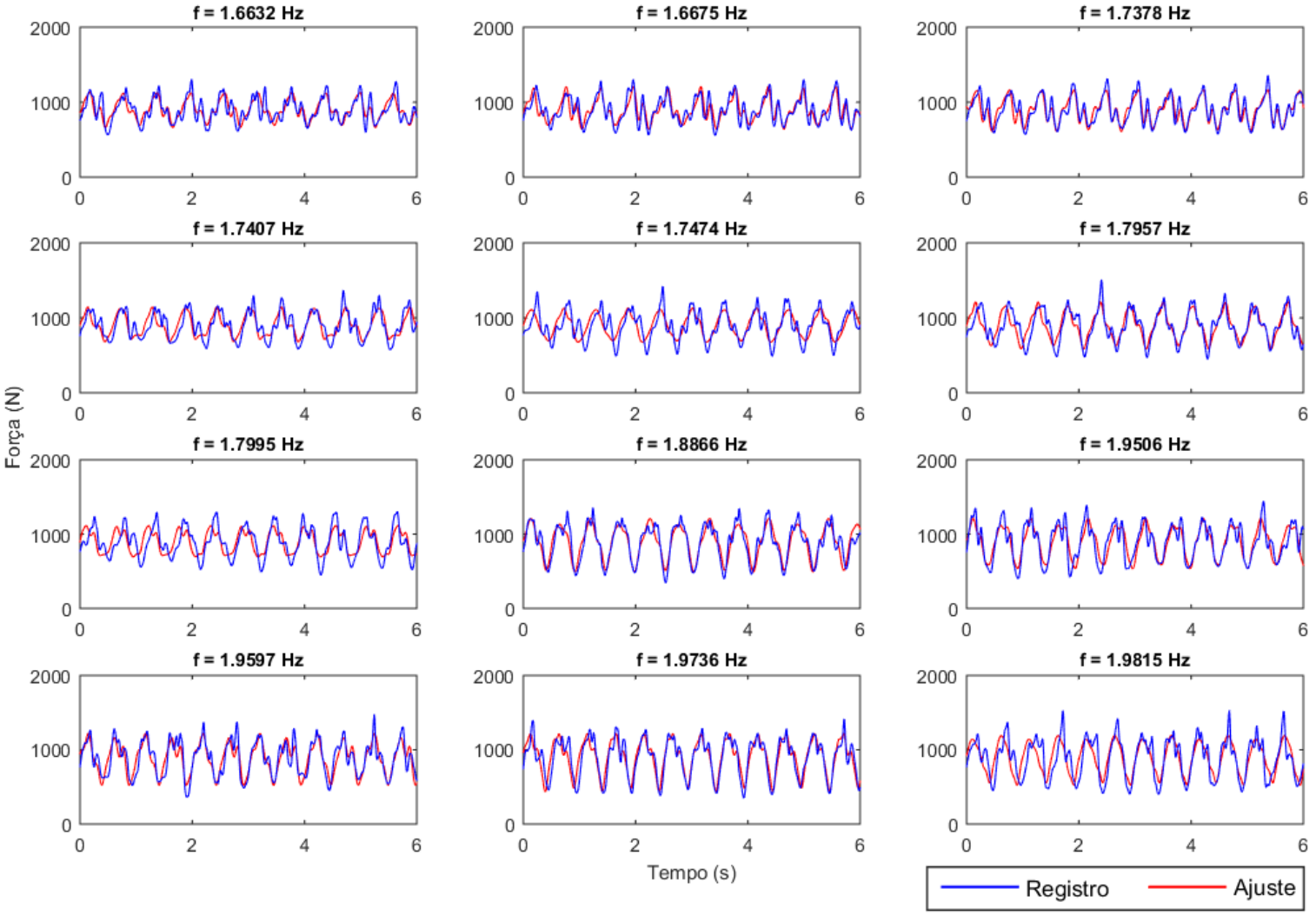


Figura A.13 – Registros e ajustes do pedestre 13 ($m = 92\ kg$)

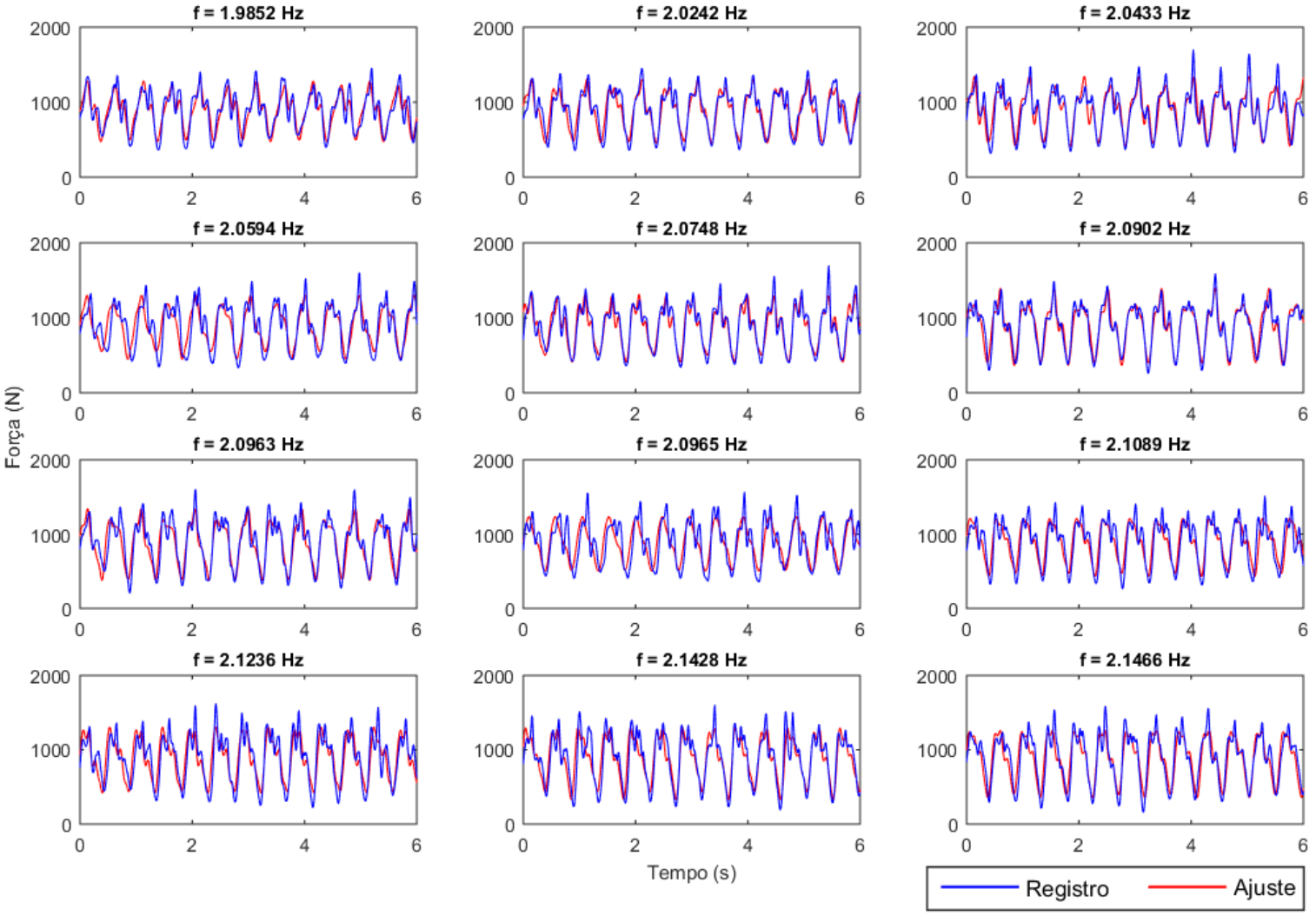


Figura A.13 – Continuação

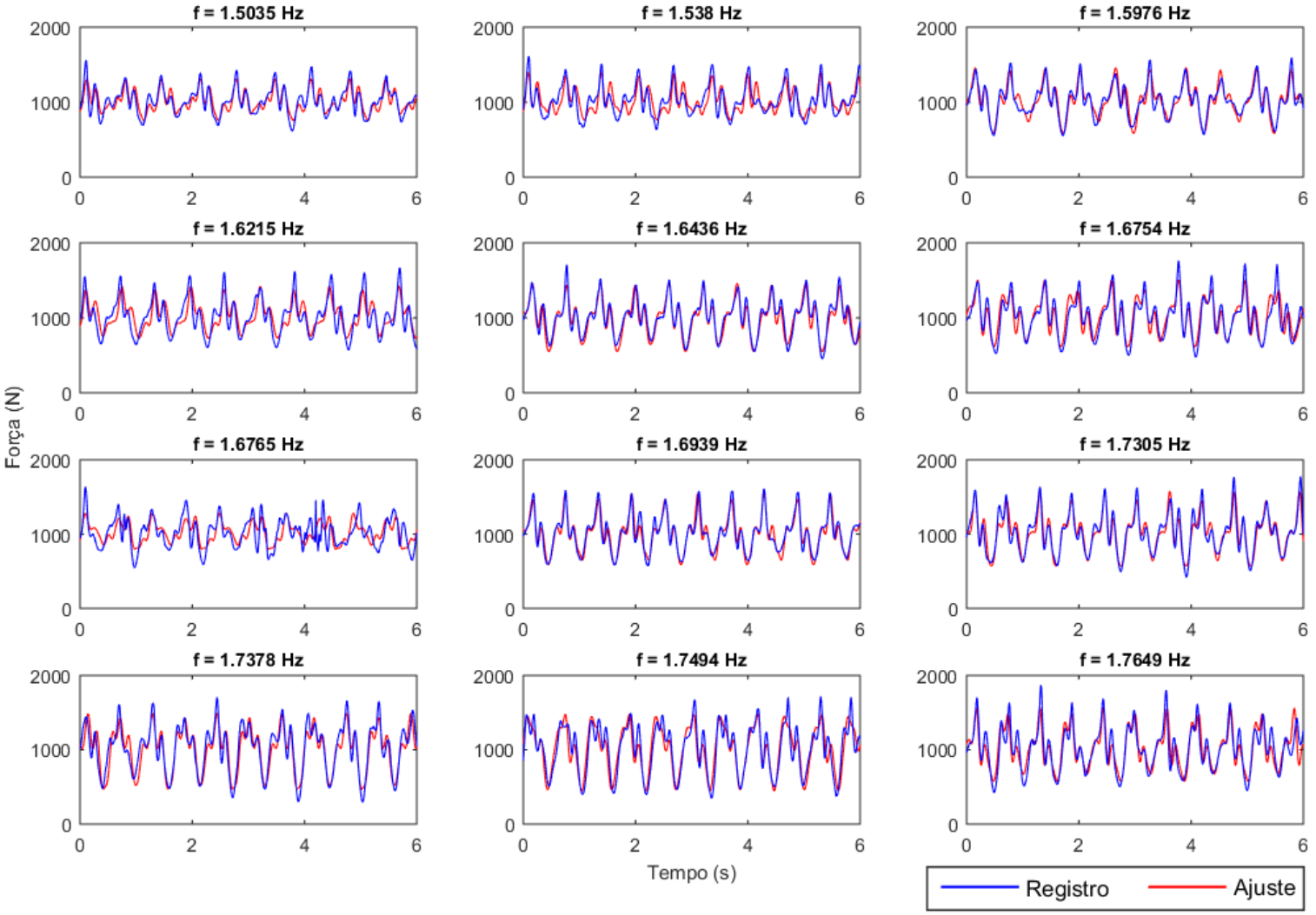


Figura A.14 – Registros e ajustes do pedestre 14 ($m = 104\ kg$)

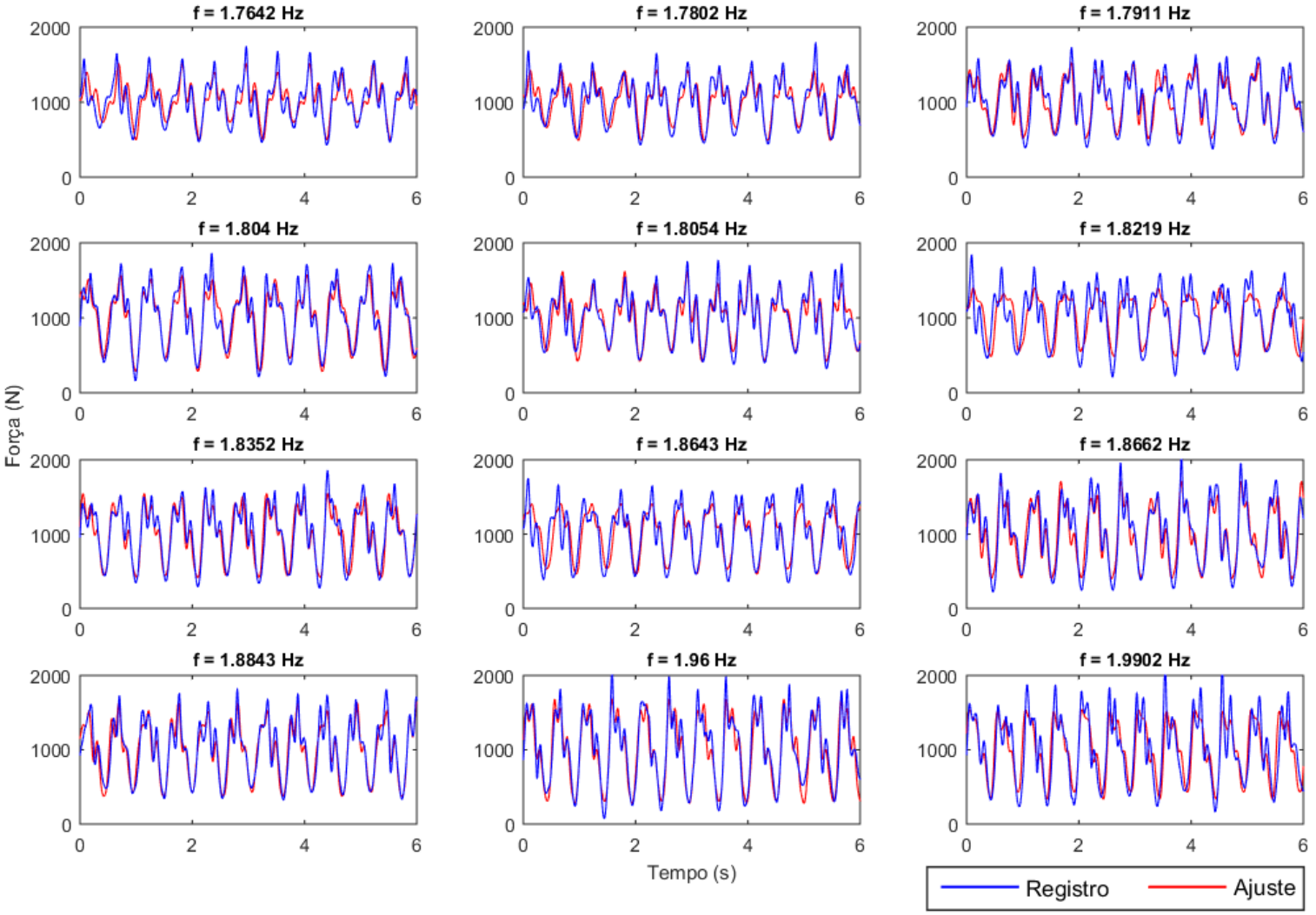


Figura A.14 – Continuação

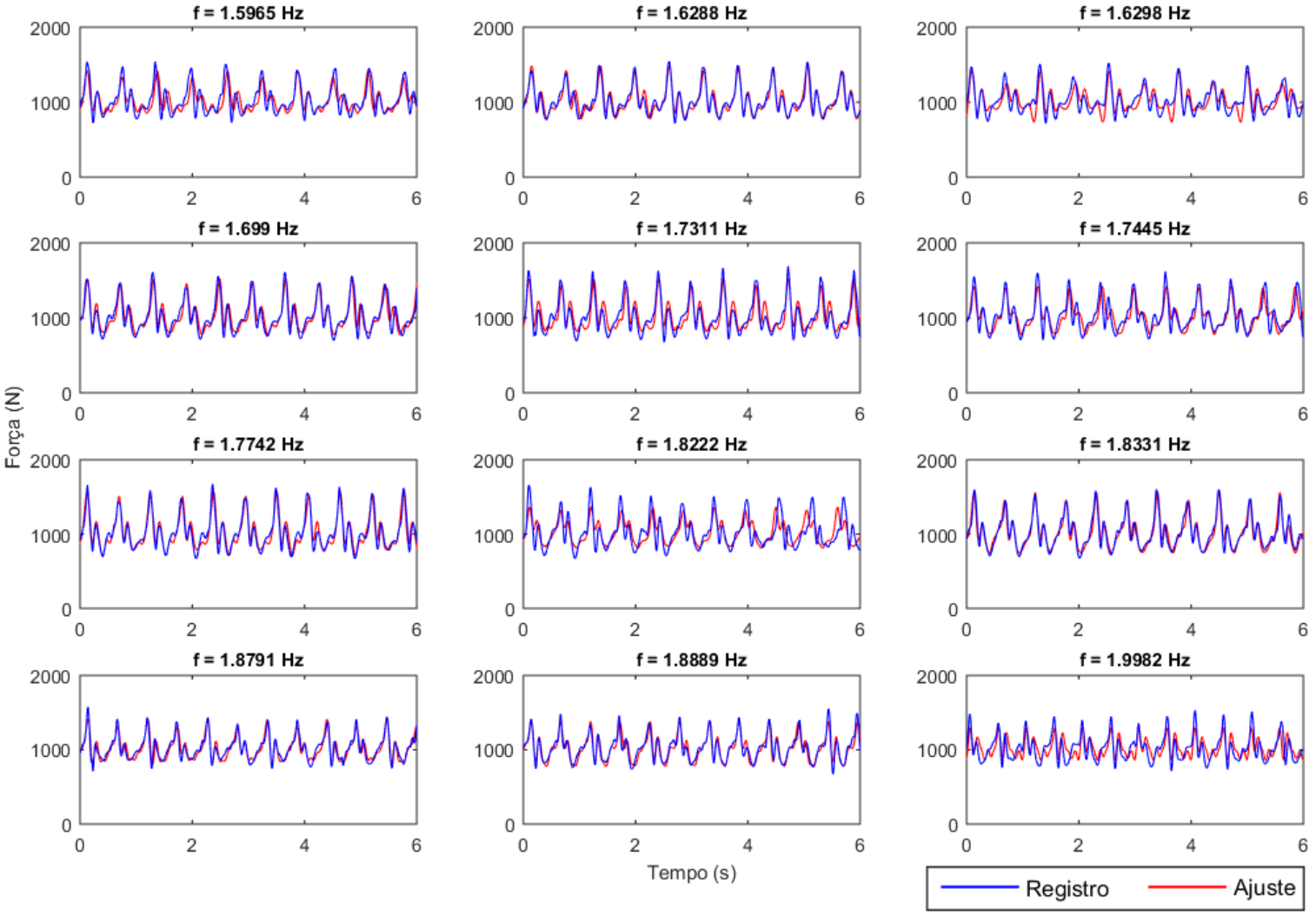


Figura A.15 – Registros e ajustes do pedestre 15 ($m = 105\ kg$)

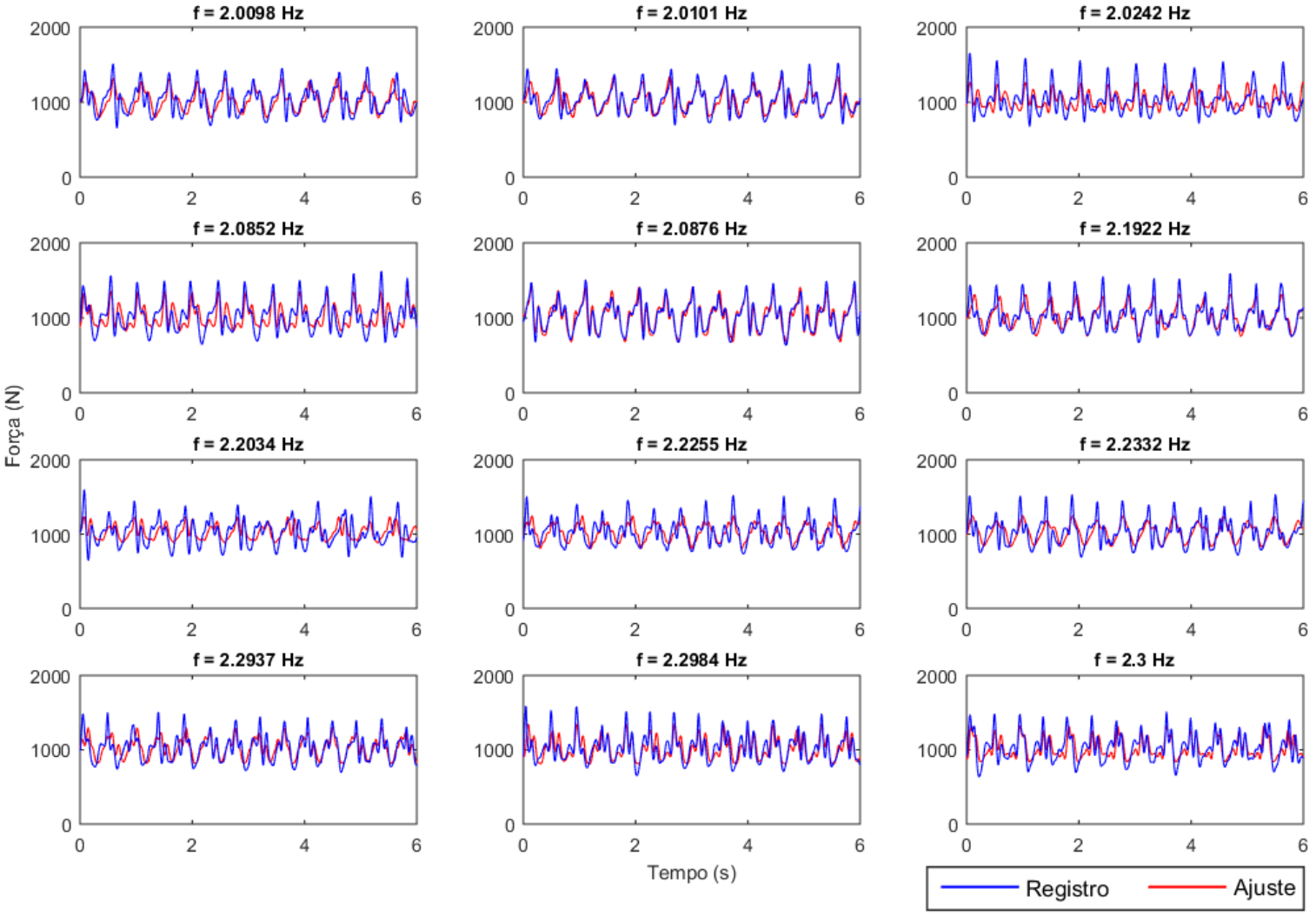


Figura A.15 – Continuação

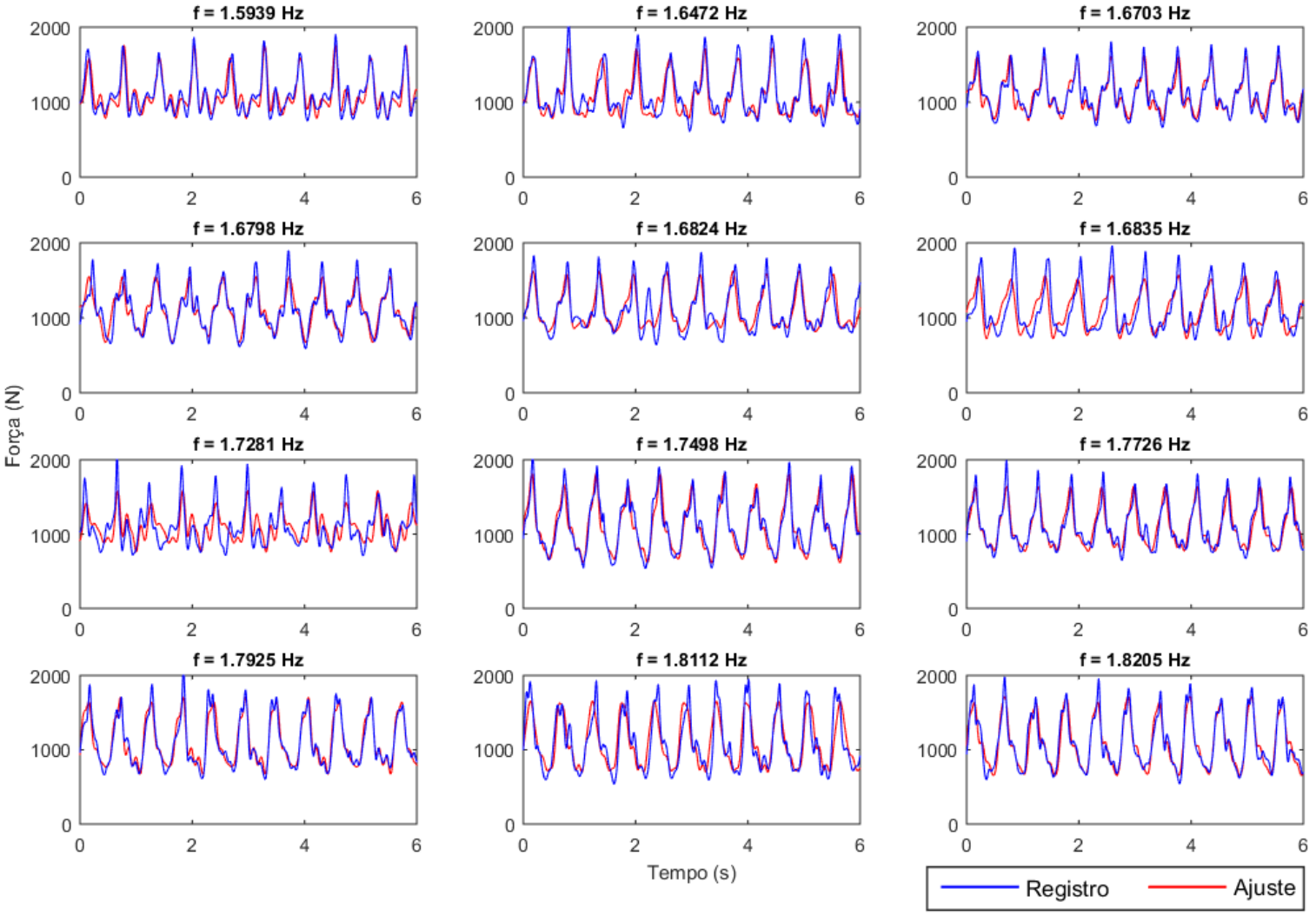


Figura A.16 – Registros e ajustes do pedestre 16 ($m = 112\ kg$)

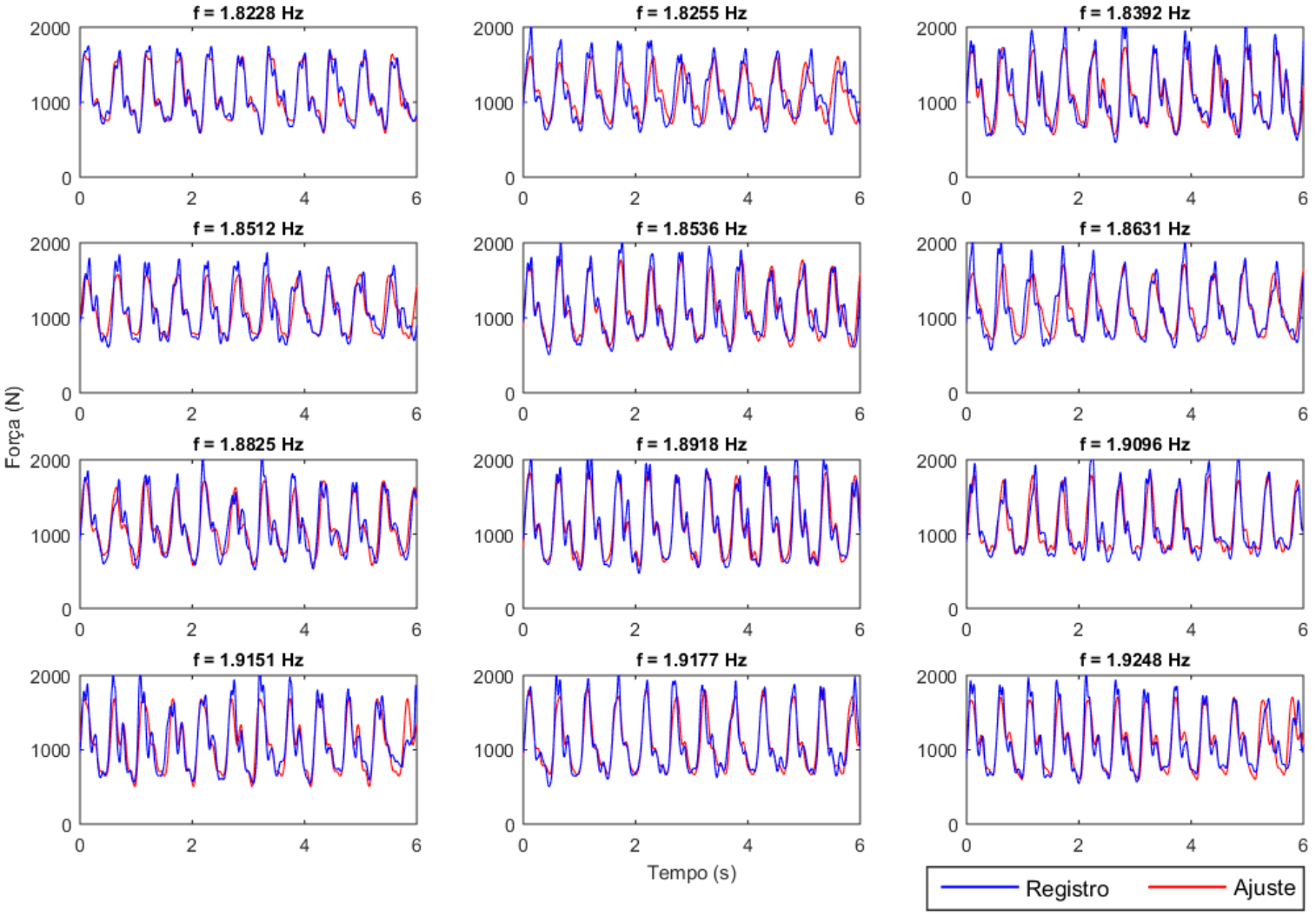


Figura A.16 – Continuação

Tabela A.1 – Parâmetros ajustados pelo CIOA para o pedestre 1 ($m = 54\ kg$, $G = 529{,}74\ N$)

f_s	ΔG_{H1}	ΔG_{H2}	ΔG_{H3}	ΔG_{H4}	ΔG_{H5}	φ_{H2}	φ_{H3}	φ_{H4}	φ_{H5}	ΔG_{S1}	ΔG_{S2}	ΔG_{S3}	ΔG_{S4}	ΔG_{S5}	φ_{S1}	φ_{S2}	φ_{S3}	φ_{S4}	φ_{S5}
1,4848	91,89	29,50	50,30	22,59	13,18	7,37	9,56	8,14	12,88	2,95	1,37	2,92	6,15	1,97	4,22	0,42	0,30	3,61	4,43
1,5608	104,48	22,91	41,17	7,70	7,03	5,03	6,64	0,40	15,20	4,50	0,82	1,29	4,31	5,26	5,75	2,93	3,29	3,84	5,25
1,6024	141,40	10,54	61,25	5,10	6,61	3,73	2,58	17,98	26,38	3,88	2,34	2,34	5,94	2,09	3,18	3,30	0,21	2,56	3,71
1,6463	126,08	29,47	78,39	27,54	10,85	2,51	9,52	5,81	8,13	12,86	0,82	2,85	5,65	1,77	4,16	2,01	6,27	2,38	4,07
1,6489	115,82	17,19	46,53	14,05	3,93	1,56	4,76	6,80	11,30	1,18	1,67	3,32	0,27	6,28	0,62	2,87	1,78	2,38	1,78
1,6829	145,35	1,09	81,65	17,58	2,08	4,83	4,35	17,61	12,56	2,20	1,77	2,02	4,23	2,35	3,61	4,63	3,26	5,02	3,02
1,7323	164,17	15,94	61,31	5,66	1,24	4,83	6,14	2,22	17,53	7,00	1,00	3,33	6,16	2,10	6,28	3,56	2,46	1,30	3,25
1,8106	206,50	29,20	91,11	18,08	15,58	9,14	2,58	13,98	7,65	2,50	5,82	2,62	4,07	3,35	3,69	3,84	0,08	3,52	6,15
1,8113	198,72	10,08	78,60	20,52	6,50	2,28	7,01	13,27	15,11	2,81	5,68	2,06	3,85	1,81	4,63	5,49	0,43	1,43	2,87
1,8170	184,25	43,76	70,43	6,21	5,12	2,85	15,16	4,89	16,93	0,37	6,15	3,01	6,03	3,19	1,99	3,41	5,82	2,76	0,34
1,8245	196,94	41,28	73,90	12,38	12,08	5,60	5,48	26,70	6,13	1,17	5,80	2,45	4,94	2,25	0,63	1,47	6,28	1,99	0,90
1,8362	210,03	53,06	76,12	6,39	3,38	8,06	6,40	6,13	13,53	4,62	5,40	2,33	3,92	2,28	4,29	1,84	3,17	5,50	2,01
1,8450	191,92	38,21	81,95	5,27	3,18	10,50	5,90	10,10	9,10	0,80	5,66	2,59	3,61	2,37	5,54	5,26	5,48	3,33	5,03
1,8610	202,24	29,20	55,87	8,16	0,09	2,66	6,37	20,07	2,88	3,74	5,97	2,55	5,32	2,22	3,86	4,01	1,06	5,66	3,94
1,8738	193,00	49,67	40,91	18,59	11,25	8,70	10,07	14,08	6,13	0,70	0,09	3,81	6,28	4,80	1,87	5,92	6,12	4,13	4,65
1,9019	246,67	61,32	50,96	14,11	6,09	11,76	4,20	21,72	2,69	14,45	5,38	2,01	4,12	0,47	6,10	3,89	2,71	5,22	2,91
1,9123	216,69	68,36	63,28	0,80	4,64	6,27	0,96	19,80	29,89	4,45	6,01	2,68	4,78	4,51	5,96	3,87	6,28	2,37	5,40
1,9416	236,56	61,07	60,09	5,15	4,23	0,93	1,58	7,17	9,99	3,58	5,26	1,62	3,08	1,58	3,43	6,28	0,65	1,46	3,90
1,9914	259,06	74,95	73,00	15,94	1,07	11,64	15,73	6,42	10,62	7,82	5,80	2,32	3,39	1,59	4,01	3,05	0,01	1,92	4,67
2,0096	257,82	99,49	41,63	15,01	10,63	16,73	12,36	0,76	7,71	3,83	5,91	2,33	4,21	2,91	6,05	2,10	5,81	5,15	5,68
2,0155	252,90	83,48	51,31	20,19	0,62	6,88	9,92	8,84	8,26	8,10	5,46	1,76	3,58	0,15	6,10	2,45	1,26	4,15	4,33
2,1646	325,53	107,10	47,75	15,97	8,53	9,68	9,24	2,62	5,41	22,07	5,47	1,15	2,79	2,66	1,16	4,05	1,33	1,76	2,79
2,1838	320,55	141,93	42,34	10,29	1,98	7,75	14,45	8,79	5,29	0,92	5,89	2,00	3,35	3,84	3,43	0,85	6,02	5,53	5,24
2,2210	346,15	157,11	27,75	4,73	5,66	7,33	6,05	17,34	4,28	0,21	5,36	0,50	5,51	0,05	6,28	2,29	6,28	6,28	4,67

Tabela A.2 – Parâmetros ajustados pelo CIOA para o pedestre 2 ($m = 58\ kg$, $G = 568{,}98\ N$)

f_s	ΔG_{H1}	ΔG_{H2}	ΔG_{H3}	ΔG_{H4}	ΔG_{H5}	φ_{H2}	φ_{H3}	φ_{H4}	φ_{H5}	ΔG_{S1}	ΔG_{S2}	ΔG_{S3}	ΔG_{S4}	ΔG_{S5}	φ_{S1}	φ_{S2}	φ_{S3}	φ_{S4}	φ_{S5}
1,5919	141,92	33,15	28,79	4,11	6,04	7,80	8,03	12,58	2,51	11,16	2,69	3,48	5,50	2,95	5,91	3,10	0,15	4,02	5,88
1,6020	135,94	42,73	25,82	26,55	13,91	2,30	3,04	5,71	6,14	7,23	2,19	4,40	0,68	2,77	3,99	0,27	2,93	1,83	1,59
1,6185	134,65	23,58	30,98	14,29	6,92	5,22	8,87	7,14	4,16	7,74	1,93	3,06	5,90	2,45	2,65	6,16	2,32	5,27	1,92
1,6602	165,85	21,14	8,55	8,76	13,26	2,01	24,42	1,41	5,26	2,87	3,19	4,99	1,92	4,75	1,09	2,37	3,47	1,61	3,02
1,7060	154,99	19,54	40,55	24,08	22,44	7,63	16,08	23,84	9,68	0,81	2,22	3,40	6,27	2,90	5,59	2,69	6,03	2,56	4,19
1,7072	172,12	21,35	22,78	7,72	4,86	1,41	4,81	1,32	7,85	1,54	3,37	3,72	6,28	4,53	6,28	6,12	1,92	3,65	5,62
1,7775	206,56	11,58	17,05	15,61	18,94	2,47	7,48	8,15	5,22	1,42	3,65	3,71	1,47	3,49	5,39	1,28	1,20	3,70	3,77
1,8315	211,88	25,26	32,93	13,86	12,48	3,21	0,31	5,28	4,03	9,68	1,58	3,21	0,44	3,13	4,89	2,23	5,69	1,09	4,04
1,8334	218,30	1,58	33,72	3,45	3,24	4,56	14,08	6,88	2,99	1,16	1,82	3,39	0,37	2,58	5,25	4,07	1,59	3,87	2,29
1,8981	243,96	1,82	29,58	8,92	6,64	7,43	3,32	3,09	5,82	1,25	5,60	4,10	0,64	2,69	0,84	1,69	4,03	2,38	1,61
1,9117	226,69	7,09	20,68	14,70	16,60	0,10	1,09	9,24	6,38	3,19	0,50	3,60	0,68	2,77	2,55	2,42	2,09	1,00	5,57
1,9172	220,06	5,39	17,47	21,61	9,52	2,94	26,09	6,05	3,55	10,05	0,91	4,13	1,12	3,33	5,55	3,93	6,28	2,32	3,86
1,9985	220,01	30,88	22,67	16,75	1,76	1,73	5,05	25,49	6,42	2,80	0,50	3,64	0,76	3,06	0,87	0,32	5,14	2,20	1,40
2,0041	232,83	11,51	26,24	16,88	3,23	4,09	14,66	3,65	1,58	2,16	1,49	4,70	1,17	3,79	3,53	1,51	2,19	0,14	4,08
2,0044	248,39	21,48	11,08	13,37	19,51	7,57	14,86	2,33	2,05	5,59	0,84	3,04	0,80	3,19	1,44	1,59	1,88	2,68	3,00
2,0951	275,70	19,78	7,17	15,20	10,96	2,33	13,97	2,96	2,23	2,26	0,83	4,10	0,84	3,34	4,05	3,48	2,72	2,89	5,27
2,1039	290,18	24,26	10,39	5,10	4,44	4,71	3,53	24,33	13,45	2,03	0,16	4,08	1,17	2,77	5,66	2,34	4,22	2,79	3,05
2,1174	294,42	27,17	8,67	15,84	5,55	8,25	7,42	22,82	3,14	5,16	6,28	3,38	0,27	0,96	3,41	0,72	2,30	5,83	0,70
2,1855	322,44	26,00	21,21	16,11	2,63	9,51	4,11	11,76	2,09	8,59	0,39	3,38	0,81	3,15	4,05	4,28	4,48	0,95	4,97
2,2043	327,32	37,01	8,73	25,72	15,72	1,78	7,27	17,20	8,16	9,22	6,25	3,54	0,41	3,29	6,27	4,73	5,09	3,99	5,07
2,2416	336,04	40,75	18,31	13,35	9,66	8,58	3,84	16,92	9,67	15,37	0,41	4,42	0,25	2,82	5,89	4,18	3,77	4,04	5,79
2,2517	347,83	52,93	4,47	7,90	6,54	4,34	1,02	7,38	3,53	6,93	0,67	1,40	1,61	4,07	2,16	0,62	5,83	5,32	6,28
2,2942	361,85	58,16	13,50	11,06	8,57	10,16	10,28	6,64	1,22	10,31	0,36	5,17	1,47	3,31	1,50	6,28	6,28	2,24	5,40
2,3331	316,71	48,33	13,99	1,94	0,69	11,46	22,03	0,63	4,22	1,43	0,06	4,56	5,99	4,23	3,25	2,07	5,63	1,51	5,59

Tabela A.3 – Parâmetros ajustados pelo CIOA para o pedestre 3 ($m = 60\ kg$, $G = 588{,}60\ N$)

f_s	ΔG_{H1}	ΔG_{H2}	ΔG_{H3}	ΔG_{H4}	ΔG_{H5}	φ_{H2}	φ_{H3}	φ_{H4}	φ_{H5}	ΔG_{S1}	ΔG_{S2}	ΔG_{S3}	ΔG_{S4}	ΔG_{S5}	φ_{S1}	φ_{S2}	φ_{S3}	φ_{S4}	φ_{S5}
1,6065	49,13	3,34	9,60	6,41	5,84	0,85	12,61	8,11	6,13	5,87	3,84	0,19	5,18	0,91	4,90	0,71	5,96	3,55	1,10
1,6144	47,46	37,65	52,99	45,67	17,60	1,01	0,37	13,53	0,62	7,40	6,02	0,38	2,18	4,03	1,62	5,37	3,76	1,52	1,28
1,6393	68,96	38,59	60,62	30,50	13,19	7,23	12,42	9,17	9,71	4,96	1,15	2,96	5,79	1,64	5,74	1,51	0,95	0,75	0,46
1,6757	94,77	22,14	45,02	29,41	12,60	5,45	2,47	13,42	3,50	10,24	0,53	1,95	4,39	6,22	3,48	1,34	2,66	2,27	5,97
1,7187	95,85	37,05	68,44	29,61	8,18	5,34	8,67	0,73	5,83	4,73	1,59	3,45	6,27	1,36	5,59	1,46	1,27	1,58	5,92
1,7347	57,62	35,96	64,31	40,67	17,19	9,03	4,81	6,43	8,40	10,09	5,57	0,53	2,86	3,19	1,34	5,64	0,88	6,28	3,21
1,7722	127,57	27,93	61,70	48,40	10,33	6,17	17,38	1,07	5,51	1,02	6,27	2,33	5,23	0,31	5,69	1,62	3,82	4,71	4,50
1,8102	122,59	13,06	33,45	18,69	23,51	8,21	19,14	9,72	4,46	9,57	6,26	2,19	5,03	0,68	5,64	2,18	6,02	2,27	3,53
1,8160	113,11	0,45	47,62	26,25	9,78	2,77	1,42	5,15	2,81	8,80	2,34	1,77	4,11	5,45	6,28	1,22	6,14	3,16	5,00
1,8837	148,66	39,82	57,77	10,94	25,84	8,24	16,96	7,07	1,34	4,57	0,51	2,65	4,68	1,13	1,24	5,53	3,18	1,13	1,01
1,8878	145,13	20,37	65,49	32,45	13,99	5,04	21,87	6,33	4,80	9,53	0,83	3,06	6,28	2,03	3,37	5,13	1,34	6,28	1,03
1,9056	154,23	35,75	87,82	23,31	18,01	13,95	14,53	5,79	3,62	4,78	0,02	2,41	4,97	0,82	0,47	5,52	1,38	0,59	3,96
1,9714	179,11	44,64	73,46	21,77	17,53	17,30	8,15	12,74	4,66	2,56	6,28	3,00	6,28	2,16	6,28	2,40	1,90	3,40	3,94
1,9952	179,11	47,04	66,90	24,42	7,27	2,41	2,30	11,92	2,96	1,08	0,87	3,58	6,08	2,95	5,65	2,89	3,64	5,43	2,53
2,0008	164,22	40,77	50,68	16,99	3,96	0,61	15,94	12,63	7,80	11,13	6,23	2,37	4,50	0,16	5,06	2,10	0,67	3,83	6,07
2,0661	187,68	46,06	43,33	0,76	5,85	9,42	16,58	10,34	4,61	7,33	0,50	3,33	3,87	4,29	0,04	3,43	2,08	2,08	5,03
2,0825	199,46	60,22	88,41	19,72	13,80	10,46	3,26	7,99	4,29	4,64	6,26	3,06	5,64	1,42	6,24	2,20	2,76	3,41	6,28
2,1060	171,33	40,31	37,62	11,37	13,59	1,71	7,22	13,31	9,98	9,95	5,43	1,99	4,66	5,92	5,15	1,97	0,82	2,36	2,78
2,1218	204,33	17,13	39,20	7,08	0,97	13,53	1,32	8,00	6,76	3,04	5,94	2,42	5,11	2,30	0,24	3,76	1,00	4,59	5,54
2,1300	192,18	47,45	59,74	4,07	6,53	16,02	34,88	1,70	14,92	10,55	0,38	3,07	4,41	1,08	0,73	3,42	3,68	4,00	5,43
2,1586	203,60	48,55	55,86	25,72	6,91	17,57	22,34	20,27	17,05	9,54	0,25	3,56	5,88	3,39	5,88	2,63	1,90	3,55	0,27
2,1870	180,99	36,99	60,77	19,21	1,52	12,98	2,44	5,70	1,38	5,41	0,04	2,90	5,55	2,08	6,10	3,07	1,70	4,90	5,88
2,2693	208,75	54,03	62,10	12,22	3,09	18,44	7,27	11,23	11,14	5,89	6,16	2,85	5,32	6,28	2,81	6,28	1,18	4,86	3,19
2,2901	185,81	70,39	60,79	4,49	3,89	3,87	24,51	8,83	22,56	7,33	6,28	3,31	5,51	2,41	6,01	3,11	2,47	3,55	5,75

Tabela A.4 – Parâmetros ajustados pelo CIOA para o pedestre 4 ($m = 65\ kg$, $G = 637{,}65\ N$)

f_s	ΔG_{H1}	ΔG_{H2}	ΔG_{H3}	ΔG_{H4}	ΔG_{H5}	φ_{H2}	φ_{H3}	φ_{H4}	φ_{H5}	ΔG_{S1}	ΔG_{S2}	ΔG_{S3}	ΔG_{S4}	ΔG_{S5}	φ_{S1}	φ_{S2}	φ_{S3}	φ_{S4}	φ_{S5}
1,5507	77,53	65,29	65,68	48,67	36,82	6,41	3,42	8,80	0,68	1,14	1,49	3,98	0,28	3,26	1,14	0,76	3,57	0,04	2,43
1,5867	73,02	70,44	77,57	63,60	24,79	5,22	12,04	1,17	23,23	7,24	0,87	2,87	5,37	1,30	1,89	2,40	4,12	6,08	1,22
1,5941	87,35	60,17	48,32	50,89	27,28	6,80	5,36	13,74	5,97	1,05	1,41	3,73	0,36	3,26	1,03	3,35	3,74	2,06	0,42
1,6832	97,25	77,54	59,83	36,86	25,00	3,63	6,40	2,61	3,75	5,61	1,36	3,65	6,28	2,62	5,95	2,12	1,27	3,76	6,25
1,6868	105,56	79,01	46,81	49,38	22,08	18,05	13,11	8,19	3,84	31,99	1,57	4,28	0,53	3,11	2,65	4,46	2,86	4,86	0,84
1,6932	95,30	56,47	42,96	55,41	27,58	2,42	10,37	0,13	20,98	14,63	1,38	3,67	0,18	3,17	4,94	1,73	0,50	4,00	1,27
1,7057	110,29	74,73	52,75	41,02	8,05	3,31	16,53	7,26	10,09	3,70	1,29	3,47	5,99	2,32	3,61	6,28	2,58	1,84	2,72
1,7478	84,90	80,87	61,55	48,77	24,47	12,63	11,29	22,06	11,56	36,28	1,12	3,20	5,87	2,15	2,90	2,73	5,63	5,56	3,68
1,7828	95,76	81,59	53,64	53,93	24,77	7,72	8,95	1,50	10,15	17,93	2,40	4,90	2,15	5,38	3,31	6,28	0,69	6,28	1,03
1,8225	88,75	36,07	13,06	9,17	18,29	1,62	3,40	4,30	3,05	1,97	2,23	5,37	3,20	5,94	4,20	3,65	5,85	5,93	2,23
1,8323	124,89	86,22	64,63	44,62	29,29	3,65	11,37	5,19	5,55	3,11	1,11	3,01	5,79	1,81	1,12	6,28	3,15	2,67	1,36
1,8444	114,27	51,51	29,47	1,39	1,42	7,02	19,09	14,18	4,57	10,30	1,51	3,55	5,58	2,47	3,05	5,15	1,92	5,18	2,06
1,8497	118,35	57,28	33,75	25,50	13,84	12,60	21,05	20,78	15,53	2,54	0,97	2,99	5,66	2,50	1,08	0,29	2,26	4,79	2,87
1,8569	110,60	70,73	33,84	27,09	2,40	0,95	5,90	1,34	2,10	8,86	0,57	2,43	4,61	0,75	5,29	5,95	3,25	5,26	3,13
1,8619	130,54	60,81	32,11	18,74	3,68	1,67	4,58	5,83	8,80	8,68	0,88	2,89	5,79	5,36	4,50	5,06	5,64	0,60	1,42
1,8768	118,63	77,49	58,60	30,41	10,85	8,31	4,04	14,67	17,45	13,56	1,60	3,69	0,51	3,13	2,65	5,08	3,56	5,64	3,81
1,8987	135,14	74,29	47,32	48,78	27,47	10,85	3,77	11,89	8,51	8,39	1,54	3,52	6,28	2,42	6,26	4,54	3,46	6,28	4,20
1,9613	148,25	68,28	55,52	20,84	12,64	1,34	2,89	0,61	2,12	14,51	1,89	3,94	0,81	2,79	2,79	5,56	3,79	2,34	3,60
2,0085	152,57	27,63	53,78	27,73	12,23	10,15	0,31	0,35	0,75	0,50	1,10	2,32	4,85	0,88	1,24	2,27	0,35	1,68	6,01
2,0298	153,29	35,00	34,02	15,60	4,39	3,44	21,43	0,67	3,18	1,93	0,67	1,88	5,13	2,45	0,99	2,45	1,80	2,59	2,80
2,0620	131,00	66,20	56,74	33,79	17,63	0,53	24,41	26,69	22,61	15,05	1,11	2,42	5,61	1,44	6,16	3,12	0,39	2,89	5,66
2,0702	160,65	41,23	68,29	21,59	26,59	4,09	8,08	11,21	22,13	1,97	0,98	2,59	5,18	1,61	0,25	0,91	2,98	4,76	5,48
2,0781	121,79	13,97	27,36	3,18	10,83	0,91	23,33	1,61	0,61	3,36	0,71	1,32	3,77	3,74	5,63	2,45	5,82	3,21	1,27
2,0911	157,76	43,22	66,84	40,21	14,53	4,56	5,04	2,92	5,99	11,29	0,33	2,31	4,66	0,66	0,56	1,60	3,56	1,88	6,28

Tabela A.5 – Parâmetros ajustados pelo CIOA para o pedestre 5 ($m = 66\ kg$, $G = 647{,}46\ N$)

f_s	ΔG_{H1}	ΔG_{H2}	ΔG_{H3}	ΔG_{H4}	ΔG_{H5}	φ_{H2}	φ_{H3}	φ_{H4}	φ_{H5}	ΔG_{S1}	ΔG_{S2}	ΔG_{S3}	ΔG_{S4}	ΔG_{S5}	φ_{S1}	φ_{S2}	φ_{S3}	φ_{S4}	φ_{S5}
1,6180	117,75	27,09	1,93	24,74	15,04	2,61	14,84	9,68	8,27	0,14	2,02	3,83	5,35	2,19	5,37	0,84	5,37	2,27	0,86
1,6364	93,14	21,76	7,66	14,29	5,91	3,74	4,12	11,05	13,19	3,87	1,67	1,99	3,00	5,16	4,34	5,63	1,21	3,91	3,69
1,6562	127,55	27,28	29,19	28,00	11,38	4,22	3,86	7,61	13,51	5,99	2,34	3,07	0,30	2,84	3,39	5,56	3,06	5,88	4,92
1,6702	129,70	22,94	40,00	36,48	14,08	0,74	12,01	4,45	22,44	7,94	3,42	2,32	6,21	3,33	5,69	4,91	2,36	5,84	3,07
1,7069	101,10	17,04	6,36	18,03	8,75	1,65	0,76	6,59	13,15	0,13	1,33	2,58	5,66	3,39	1,42	0,57	2,02	5,96	5,43
1,7199	143,05	30,73	14,70	43,52	17,39	9,64	24,00	15,33	31,33	0,44	2,40	3,11	0,26	3,38	2,47	2,37	0,20	2,86	3,25
1,7843	144,03	26,70	51,77	34,29	7,61	16,11	2,81	7,35	12,23	5,75	1,07	2,62	0,15	0,97	2,17	4,59	4,00	1,01	0,28
1,8010	143,28	32,17	50,43	22,45	0,35	1,37	10,72	8,77	16,15	14,58	1,39	2,73	6,23	3,04	0,15	4,64	2,24	0,02	6,09
1,8217	159,38	9,07	51,08	19,58	17,03	6,44	6,92	17,59	21,89	4,42	0,92	1,97	5,27	1,99	2,50	3,34	2,66	5,72	2,95
1,8368	175,09	31,41	20,05	11,17	4,98	1,61	4,72	6,64	10,07	5,18	2,59	2,25	4,58	6,28	6,09	2,87	1,83	5,21	0,94
1,8647	164,26	9,86	53,84	24,19	7,28	3,45	14,75	4,69	20,54	7,66	1,94	3,03	0,54	2,80	4,02	5,21	4,27	6,28	1,55
1,8755	187,61	15,55	68,58	18,40	9,16	2,35	21,56	6,86	24,65	9,65	4,64	2,85	0,54	0,26	0,90	2,39	0,96	3,03	3,89
1,9032	172,62	5,66	48,26	4,90	0,09	6,94	24,62	1,05	6,95	2,53	0,02	3,52	1,90	3,01	1,77	5,59	2,08	0,17	0,57
1,9340	182,72	9,81	47,46	21,65	15,88	11,52	6,22	3,88	24,60	11,51	5,92	3,48	1,24	4,06	5,91	2,92	5,29	3,91	6,00
1,9750	187,63	21,93	60,61	6,21	9,90	4,98	22,46	24,46	31,26	22,12	5,77	2,97	0,22	1,09	4,06	5,87	2,14	0,32	1,74
1,9753	206,70	6,30	65,96	33,84	5,59	0,08	16,46	3,81	15,84	7,30	5,45	2,52	5,98	0,55	5,33	1,79	3,92	2,94	3,64
2,0048	157,59	1,08	46,62	0,53	1,94	0,36	16,46	15,09	8,45	12,06	0,86	2,40	2,66	6,14	4,91	4,63	1,21	5,82	5,81
2,0277	189,41	24,15	62,40	14,20	1,33	9,85	17,09	0,78	29,61	7,15	0,32	2,92	6,06	0,53	1,75	5,38	3,90	0,26	1,66
2,0404	212,52	34,60	72,92	5,46	3,18	2,27	16,21	17,10	21,73	18,79	5,84	3,00	5,19	0,60	0,46	5,95	3,43	0,25	2,89
2,0501	188,93	17,40	50,12	3,82	7,86	0,56	13,96	14,39	34,06	10,43	0,32	3,37	5,30	1,32	0,28	5,92	1,87	0,42	2,92
2,0731	214,70	40,50	60,74	15,21	0,93	1,95	31,63	32,68	12,15	10,43	6,03	3,52	1,08	2,92	1,07	5,46	2,99	0,23	2,50
2,0924	212,89	35,83	52,07	19,71	5,95	15,42	36,14	6,67	24,14	8,63	6,18	3,20	0,72	3,59	5,23	3,06	5,82	2,26	4,91
2,0984	196,29	4,65	36,56	5,41	5,49	0,77	14,47	9,11	3,49	4,46	1,00	3,41	2,23	4,14	3,33	0,19	2,41	0,09	2,09
2,1053	183,31	47,49	58,51	5,33	1,02	9,91	5,13	7,33	28,57	4,32	6,12	3,71	2,50	0,76	2,47	6,05	1,69	1,70	3,46

Tabela A.6 – Parâmetros ajustados pelo CIOA para o pedestre 6 ($m = 69\ kg$, $G = 676{,}89\ N$)

f_s	ΔG_{H1}	ΔG_{H2}	ΔG_{H3}	ΔG_{H4}	ΔG_{H5}	φ_{H2}	φ_{H3}	φ_{H4}	φ_{H5}	ΔG_{S1}	ΔG_{S2}	ΔG_{S3}	ΔG_{S4}	ΔG_{S5}	φ_{S1}	φ_{S2}	φ_{S3}	φ_{S4}	φ_{S5}
1,6253	94,34	37,96	71,40	42,11	11,89	4,02	20,93	18,51	10,28	6,07	1,71	3,64	1,07	4,38	3,37	0,15	4,02	3,70	0,04
1,6289	116,00	61,44	74,74	45,57	15,17	10,69	17,16	1,61	10,41	11,47	1,03	2,74	0,09	1,28	4,67	0,08	4,02	0,47	3,91
1,6493	112,52	49,50	65,18	45,57	9,65	0,66	7,41	14,18	16,61	3,44	1,08	2,86	0,19	2,37	0,99	0,86	0,89	4,24	3,35
1,7255	118,07	68,51	76,87	31,35	23,50	9,10	13,19	26,91	10,58	9,58	1,60	4,41	0,70	4,27	4,62	0,83	6,28	3,33	3,77
1,7274	116,66	70,18	74,57	17,01	1,92	3,98	9,20	11,51	5,45	4,56	1,01	3,53	6,28	2,70	2,71	6,28	6,13	1,33	4,73
1,7544	143,28	37,06	62,86	1,77	0,47	9,77	8,83	14,88	1,55	8,02	0,37	2,05	4,60	4,77	5,20	6,17	3,66	2,44	1,72
1,8122	156,19	75,91	86,25	28,82	12,93	5,82	13,62	7,37	6,92	7,97	0,90	3,14	5,55	2,35	2,42	0,55	5,82	0,57	5,29
1,8140	144,13	75,38	83,18	26,02	12,20	11,99	10,23	17,40	5,99	14,05	0,05	1,89	3,48	4,92	0,73	2,30	1,67	1,55	5,76
1,8144	159,69	55,55	70,89	19,49	0,91	3,48	32,07	6,28	15,11	7,32	0,19	2,26	4,15	2,45	2,58	5,33	2,81	5,37	1,77
1,9038	134,53	97,91	75,92	26,39	14,15	7,06	7,03	7,49	5,14	11,83	1,14	4,03	6,28	2,31	3,84	6,13	0,37	3,24	3,38
1,9229	182,40	79,32	74,68	13,85	7,86	6,76	6,69	12,25	7,16	2,67	0,38	2,49	5,18	2,47	4,45	5,24	5,98	1,25	1,01
1,9265	174,63	57,87	57,73	18,98	11,20	6,37	20,65	14,02	2,43	3,29	0,11	2,63	4,67	0,37	3,20	5,77	5,29	1,15	1,84
1,9650	188,28	110,53	81,04	32,27	3,34	7,89	18,91	24,73	8,96	7,11	0,29	2,49	4,46	0,03	1,55	2,13	3,70	2,55	1,37
1,9886	203,76	97,53	69,03	26,75	4,24	8,23	27,98	17,50	12,19	10,62	0,44	2,80	4,58	2,07	3,58	5,91	4,37	1,04	3,73
1,9971	174,62	103,62	87,75	34,23	25,37	4,66	24,66	0,46	27,88	0,75	0,86	3,28	5,70	1,45	1,20	6,28	1,99	0,64	5,04
1,9974	192,49	117,57	84,77	24,58	7,21	6,62	48,96	7,68	0,84	0,54	0,27	2,60	4,40	6,28	2,80	5,92	5,22	6,28	1,12
1,9982	182,61	121,25	91,73	30,72	5,95	4,49	20,57	1,94	3,67	4,49	6,28	2,13	4,43	4,97	1,39	1,82	2,20	6,28	2,14
2,0101	197,10	121,24	92,41	43,35	5,20	20,88	13,55	13,44	2,73	1,14	0,15	2,66	5,33	0,37	4,95	4,85	4,47	6,04	2,41
2,0229	184,60	120,73	109,43	47,03	2,28	7,54	39,38	27,80	2,72	7,90	0,87	3,47	5,54	1,50	4,78	6,10	2,89	6,28	3,62
2,0267	190,80	115,97	59,25	36,22	14,80	3,17	26,77	6,35	18,30	0,19	6,15	2,48	3,88	5,19	4,49	4,22	4,67	6,00	5,30
2,0512	185,03	95,65	69,92	16,96	5,64	8,09	9,73	4,74	0,55	2,41	0,27	2,60	4,01	4,83	2,16	3,02	5,05	0,02	0,62
2,0608	196,59	109,76	68,04	24,33	8,33	14,22	13,91	2,69	5,01	15,69	0,51	3,26	5,07	1,79	4,94	6,28	1,13	1,19	5,48
2,0740	153,87	119,43	78,21	27,94	7,22	4,45	29,01	6,99	2,67	0,18	0,98	4,09	6,06	2,17	3,83	6,24	3,25	1,44	2,71
2,1225	168,22	106,81	37,95	10,08	8,49	18,52	34,61	18,22	1,25	2,67	5,54	1,44	2,69	1,73	1,55	1,65	2,75	3,00	5,77

Tabela A.7 – Parâmetros ajustados pelo CIOA para o pedestre 7 ($m = 73\ kg$, $G = 716{,}13\ N$)

f_s	ΔG_{H1}	ΔG_{H2}	ΔG_{H3}	ΔG_{H4}	ΔG_{H5}	φ_{H2}	φ_{H3}	φ_{H4}	φ_{H5}	ΔG_{S1}	ΔG_{S2}	ΔG_{S3}	ΔG_{S4}	ΔG_{S5}	φ_{S1}	φ_{S2}	φ_{S3}	φ_{S4}	φ_{S5}
1,5790	140,05	63,67	63,18	62,51	18,61	17,58	39,73	11,70	31,07	0,36	2,85	4,68	1,62	3,80	0,22	3,63	4,07	0,97	1,12
1,5974	156,96	119,67	75,13	62,02	25,56	6,04	13,06	35,58	12,83	5,93	1,19	2,94	5,51	1,44	1,08	3,14	0,96	3,06	0,60
1,6066	193,75	57,03	14,92	15,78	19,76	2,10	15,05	8,86	8,69	9,02	1,44	2,25	5,19	3,75	2,27	2,12	6,04	5,14	2,48
1,6733	206,04	77,09	66,97	43,93	18,76	12,77	12,92	20,55	19,15	0,02	1,39	3,10	5,92	2,32	3,01	1,17	5,41	2,71	0,42
1,7210	240,37	72,11	92,56	36,69	30,87	9,01	40,60	18,82	16,13	22,45	0,82	2,95	0,11	2,66	2,37	3,54	2,33	4,83	0,88
1,7244	213,71	61,93	69,10	29,77	30,89	6,34	34,90	28,99	24,36	9,99	0,66	1,95	5,20	6,26	3,61	0,67	4,59	0,91	1,69
1,7745	225,46	33,05	89,70	20,49	36,40	7,49	2,19	34,28	13,13	18,93	0,37	2,44	5,51	1,73	1,61	3,66	2,45	4,21	0,65
1,7923	239,58	68,14	91,71	41,39	30,48	5,13	29,94	27,76	19,28	9,53	0,84	2,90	6,08	1,39	0,38	2,65	1,73	4,01	5,59
1,7941	237,29	57,79	71,62	19,00	35,67	1,01	26,66	22,74	6,32	0,51	0,25	2,10	6,28	1,01	1,58	3,11	1,83	5,27	2,76
1,8698	288,73	66,60	79,69	30,08	12,24	6,89	12,14	11,96	36,41	23,87	5,63	1,49	3,14	1,20	0,81	2,94	1,12	3,55	0,23
1,8933	307,76	55,67	79,93	21,36	6,54	5,86	12,92	24,72	22,11	14,11	6,10	2,28	4,35	0,93	5,45	2,98	1,95	4,78	0,77
1,9067	272,10	53,55	88,40	30,79	30,39	12,32	13,86	52,87	41,05	6,40	5,83	1,47	3,72	5,92	0,32	5,27	1,62	3,68	5,09
1,9608	300,77	84,57	96,51	13,84	1,73	6,79	9,77	48,85	35,64	14,85	6,28	2,46	3,14	6,28	2,55	1,33	5,41	1,89	3,53
1,9864	369,93	133,41	76,46	27,95	14,61	19,48	24,88	42,69	53,57	31,22	4,89	0,98	1,51	1,31	6,03	3,13	1,21	3,81	4,97
2,0286	347,44	59,81	46,28	5,44	12,57	11,36	40,66	12,93	5,83	21,98	5,18	1,20	2,48	5,12	2,43	1,29	4,53	5,70	1,95
2,0538	380,60	113,36	80,87	16,47	3,60	10,27	21,02	33,33	36,20	31,23	5,45	1,67	2,49	1,77	4,17	2,02	5,09	1,75	2,87
2,0689	389,09	114,59	70,33	17,58	22,21	9,53	27,07	29,02	48,94	13,58	5,51	1,25	2,86	1,29	0,78	4,73	2,05	3,53	5,50
2,0767	431,39	89,47	74,77	19,62	22,45	4,97	38,29	5,10	33,62	34,13	5,27	1,33	3,38	5,97	2,71	6,28	4,30	0,39	1,97
2,1453	449,67	133,36	56,72	1,67	20,88	12,72	23,38	41,72	18,83	8,58	5,79	1,60	5,38	2,72	2,83	6,28	4,68	5,71	5,60
2,1743	456,94	72,55	55,34	26,48	25,39	13,64	33,59	31,43	33,28	7,98	5,21	0,54	2,34	6,28	4,37	0,94	3,92	0,05	2,32
2,2128	459,55	124,69	67,76	8,86	10,37	6,37	1,24	14,48	4,40	5,94	5,82	1,94	4,09	5,67	4,56	1,44	4,21	1,11	1,65
2,2325	474,06	164,23	73,06	1,56	9,83	12,40	2,10	61,03	21,33	26,65	5,62	1,45	0,29	2,05	2,43	0,28	3,85	1,52	3,06
2,2457	379,36	32,22	25,50	1,38	12,00	16,53	32,04	37,10	19,40	8,47	4,71	0,70	3,29	5,88	5,46	1,86	2,53	4,89	0,43
2,2543	436,95	106,68	61,06	23,35	13,84	11,57	10,07	11,54	16,60	6,88	5,24	1,19	2,88	1,42	2,02	1,81	4,37	1,44	1,99

Tabela A.8 – Parâmetros ajustados pelo CIOA para o pedestre 8 ($m = 75\ kg$, $G = 735{,}75\ N$)

f_s	ΔG_{H1}	ΔG_{H2}	ΔG_{H3}	ΔG_{H4}	ΔG_{H5}	φ_{H2}	φ_{H3}	φ_{H4}	φ_{H5}	ΔG_{S1}	ΔG_{S2}	ΔG_{S3}	ΔG_{S4}	ΔG_{S5}	φ_{S1}	φ_{S2}	φ_{S3}	φ_{S4}	φ_{S5}
1,5835	106,43	23,14	11,69	34,99	37,54	4,30	12,43	12,30	2,02	1,01	1,44	2,44	4,57	0,68	0,44	1,51	3,99	6,09	2,52
1,5950	113,87	33,98	22,59	29,30	21,27	4,00	7,72	3,40	6,14	1,71	1,15	2,11	4,28	0,51	1,43	2,66	4,07	0,82	2,89
1,6005	115,63	34,25	1,20	3,15	3,60	4,48	21,74	18,02	4,95	3,97	1,70	1,85	2,77	4,08	3,73	4,33	0,25	4,25	1,55
1,6954	112,66	21,23	16,55	30,67	11,45	4,08	14,15	3,21	17,04	6,43	1,71	3,52	0,32	2,94	5,18	5,27	3,11	2,62	4,43
1,6974	129,08	32,20	25,06	18,95	12,64	2,03	1,19	11,55	5,27	4,04	1,93	2,17	4,09	0,32	6,28	5,32	1,89	6,28	1,11
1,7259	131,52	38,74	14,72	27,43	19,01	5,82	6,27	1,10	12,92	5,96	1,28	2,62	4,12	0,07	2,59	1,34	4,55	4,53	1,18
1,7925	165,79	69,86	66,07	68,95	36,92	9,54	6,10	4,93	18,39	8,81	1,49	3,71	0,22	2,87	0,49	3,77	1,62	6,28	3,02
1,7934	174,96	49,90	49,70	32,49	21,37	4,11	25,65	2,04	18,59	9,57	1,75	4,00	1,14	3,40	6,28	3,75	3,98	1,26	2,99
1,8204	144,91	33,01	34,00	25,41	3,47	15,82	18,75	10,95	15,43	6,15	1,75	2,50	0,10	1,99	0,49	2,40	3,35	1,18	4,39
1,8979	184,55	55,42	54,14	48,97	14,59	6,06	1,51	11,07	4,08	5,94	1,27	3,76	0,52	3,16	3,57	1,73	4,42	6,28	6,28
1,9025	211,60	31,50	77,44	59,73	20,61	19,98	27,14	15,67	0,93	12,15	1,01	2,95	5,86	1,70	3,76	5,42	3,32	3,70	1,95
1,9115	190,50	49,62	57,73	68,58	18,94	10,36	13,00	5,73	7,51	8,21	1,70	4,23	1,17	4,96	1,41	3,16	2,42	1,85	3,18
1,9697	212,96	50,68	68,44	41,13	28,56	14,68	20,95	5,91	2,73	1,12	0,92	3,80	0,68	3,27	3,36	0,98	4,57	6,28	4,59
1,9844	198,27	65,80	75,48	40,25	4,54	10,94	14,51	14,92	12,13	6,08	1,61	4,19	0,73	1,84	3,76	0,63	3,94	2,19	2,01
1,9949	189,12	61,27	49,34	47,65	14,87	8,06	8,60	2,54	1,50	1,19	1,35	3,99	0,72	3,32	2,42	1,15	4,21	1,95	2,57
2,0794	233,94	33,56	54,04	23,52	7,74	5,53	2,45	11,62	19,93	6,51	0,82	3,60	6,28	2,16	0,50	0,43	3,16	0,18	2,86
2,0943	209,92	79,33	72,73	52,52	17,10	1,43	3,26	28,95	9,56	0,09	1,40	3,98	0,84	3,44	6,28	6,28	2,71	6,28	1,69
2,1056	230,57	48,55	40,78	50,46	6,70	7,66	1,77	35,62	14,55	13,08	1,34	3,76	1,08	2,66	0,70	0,77	2,60	6,28	2,35
2,1788	266,32	61,93	80,13	45,80	7,25	1,81	4,86	1,71	10,78	11,06	0,13	3,77	0,45	1,38	1,24	0,29	3,66	3,28	6,14
2,1958	232,75	53,83	63,08	22,30	6,53	11,47	5,71	11,84	5,68	3,04	0,44	3,74	0,14	1,23	6,27	1,14	4,56	6,28	5,23
2,1998	258,89	43,24	76,98	39,79	16,41	10,70	15,68	2,73	10,57	0,09	6,27	3,49	5,76	1,52	5,85	4,12	1,84	0,03	5,16
2,2585	269,23	33,29	27,23	16,43	4,84	1,76	13,58	1,31	6,20	7,64	0,86	4,91	2,95	3,87	3,78	5,65	4,74	3,66	6,17
2,2655	274,20	73,22	62,09	25,31	2,73	10,28	23,82	4,91	4,90	1,74	0,38	3,91	0,09	3,61	3,34	5,67	2,99	5,61	6,28
2,2770	290,85	40,11	19,40	19,51	21,81	3,98	16,24	4,88	16,15	6,54	6,02	3,94	1,45	3,96	2,09	4,09	2,62	3,76	3,98

Tabela A.9 – Parâmetros ajustados pelo CIOA para o pedestre 9 ($m = 76\ kg$, $G = 745{,}56\ N$)

f_s	ΔG_{H1}	ΔG_{H2}	ΔG_{H3}	ΔG_{H4}	ΔG_{H5}	φ_{H2}	φ_{H3}	φ_{H4}	φ_{H5}	ΔG_{S1}	ΔG_{S2}	ΔG_{S3}	ΔG_{S4}	ΔG_{S5}	φ_{S1}	φ_{S2}	φ_{S3}	φ_{S4}	φ_{S5}
1,6182	179,93	115,67	71,84	36,63	27,53	4,02	8,25	7,39	11,79	12,41	0,80	2,24	4,06	0,20	0,39	0,13	0,49	1,90	4,92
1,6350	195,34	110,43	54,79	18,35	2,05	3,01	22,45	8,63	22,30	5,27	0,89	1,54	3,66	2,56	6,28	1,68	4,35	2,27	1,22
1,7072	218,38	48,67	9,90	3,17	16,44	11,03	34,58	10,96	28,45	3,06	1,13	0,31	5,84	2,34	3,15	4,56	3,51	5,80	3,74
1,7148	230,90	72,36	78,41	36,73	31,29	5,80	32,05	14,32	4,39	3,37	0,93	1,70	2,96	5,67	1,47	1,73	6,27	1,40	4,55
1,7285	261,73	53,08	74,74	27,03	10,14	9,95	23,92	14,06	5,17	9,76	1,47	2,54	4,94	1,22	5,23	4,96	3,98	4,83	2,88
1,7870	279,47	68,94	38,66	2,83	0,93	0,90	19,01	39,29	10,87	2,40	1,54	2,49	4,26	4,06	2,46	5,18	4,19	6,25	1,74
1,7892	285,69	10,15	17,07	6,63	14,37	11,63	29,60	6,65	2,39	5,75	5,28	1,89	3,30	4,44	4,93	0,00	6,22	6,21	2,21
1,8336	296,54	46,48	71,91	27,66	23,33	13,53	29,85	23,42	4,41	7,54	0,23	2,18	4,15	1,02	3,58	5,15	5,14	5,75	2,87
1,8806	355,21	43,64	86,42	40,77	16,16	12,90	12,36	15,59	2,60	9,41	0,32	1,97	4,19	0,28	0,54	2,50	1,37	0,76	1,72
1,8953	363,73	85,86	76,15	38,75	19,04	18,13	17,23	17,69	13,78	12,74	0,31	2,27	4,43	1,21	1,22	2,57	2,14	1,74	2,81
1,9342	412,45	50,57	69,81	22,60	4,37	4,53	22,53	29,68	12,58	5,88	0,15	2,07	4,22	5,52	5,87	6,12	4,29	0,29	1,18
1,9650	413,83	71,52	45,65	6,74	5,90	11,03	29,95	24,11	12,08	2,13	0,14	2,76	3,94	4,69	0,85	3,10	1,57	2,26	2,98
1,9690	385,61	131,35	103,70	51,44	40,33	5,34	26,62	36,18	22,07	5,40	6,24	1,93	4,23	0,35	1,47	2,60	2,46	2,44	1,88
1,9748	455,09	81,36	79,22	25,90	3,53	10,60	35,63	12,26	7,51	13,25	0,37	2,10	4,81	3,76	1,79	4,12	0,71	3,52	4,79
1,9789	426,76	130,76	87,17	48,95	27,12	9,30	36,58	33,43	11,90	9,18	0,29	2,47	4,69	1,62	6,28	3,20	1,68	3,20	1,07
2,0087	439,99	123,28	92,49	55,58	30,04	11,50	2,96	25,85	3,76	0,13	0,44	2,55	4,93	1,15	2,90	1,43	4,44	4,54	3,89
2,0570	459,90	103,80	47,95	19,68	4,88	3,45	17,61	4,76	7,92	7,69	6,18	2,40	5,21	2,92	4,26	2,77	2,56	0,93	5,18
2,0623	347,41	56,72	32,09	23,70	10,92	16,29	19,90	13,64	4,92	2,43	0,12	3,74	0,42	3,46	0,13	2,03	2,31	4,20	3,13
2,0625	462,57	99,79	42,99	26,70	19,38	13,19	28,05	4,32	13,23	6,23	0,43	2,72	5,55	2,23	2,88	5,63	4,40	3,25	3,82
2,0683	514,61	105,85	81,08	45,10	0,51	18,72	22,37	10,83	18,32	2,70	0,04	2,14	4,24	0,63	3,65	5,48	3,35	5,48	6,09
2,0789	522,75	106,84	66,89	38,10	25,19	11,90	57,52	35,37	11,94	16,33	5,87	1,62	3,82	6,02	3,53	5,89	4,22	6,10	5,28
2,0925	436,37	115,06	88,41	48,19	26,30	27,68	26,02	8,70	13,15	2,08	0,10	2,51	4,79	1,29	4,57	3,26	3,68	6,00	4,86
2,1011	482,61	106,36	37,44	20,46	7,45	11,23	34,41	15,68	11,02	1,41	6,27	2,22	4,94	1,83	1,98	4,21	0,74	1,62	3,65
2,1800	508,04	111,71	70,43	30,69	20,19	2,41	11,99	20,74	0,55	1,28	6,25	2,29	4,35	1,46	4,42	5,58	4,77	5,34	4,84

Tabela A.10 – Parâmetros ajustados pelo CIOA para o pedestre 10 ($m = 78\ kg$, $G = 765{,}18\ N$)

f_s	ΔG_{H1}	ΔG_{H2}	ΔG_{H3}	ΔG_{H4}	ΔG_{H5}	φ_{H2}	φ_{H3}	φ_{H4}	φ_{H5}	ΔG_{S1}	ΔG_{S2}	ΔG_{S3}	ΔG_{S4}	ΔG_{S5}	φ_{S1}	φ_{S2}	φ_{S3}	φ_{S4}	φ_{S5}
1,5852	167,34	80,54	92,79	65,51	24,08	1,03	18,12	1,98	13,12	3,93	0,73	2,95	0,14	3,34	0,30	1,80	3,80	1,24	3,59
1,6022	173,28	95,79	90,38	36,79	21,92	0,17	8,62	26,03	17,04	4,91	1,40	3,52	0,29	3,43	0,74	0,42	2,16	5,00	0,57
1,6403	144,63	55,85	45,96	40,57	12,09	17,13	5,11	28,55	21,99	13,76	0,96	1,52	4,44	0,92	4,68	3,01	2,13	0,25	3,29
1,6536	187,93	71,91	96,82	76,40	11,95	0,66	16,40	12,34	21,21	3,60	1,18	3,36	0,61	4,01	6,25	1,53	6,21	0,12	5,38
1,6877	171,84	104,62	119,63	21,08	5,43	8,21	2,58	0,70	33,83	9,62	0,68	3,07	0,80	4,24	3,69	1,71	3,03	2,56	1,51
1,7118	178,43	78,35	71,97	10,88	20,12	3,10	16,50	16,49	18,22	0,69	2,14	5,12	3,32	2,28	6,07	5,54	3,03	1,18	3,59
1,7339	211,56	103,32	144,65	29,25	4,67	10,94	23,16	50,77	63,23	9,03	0,99	3,25	0,82	2,39	6,28	2,66	5,69	3,14	5,12
1,7638	203,39	123,92	138,07	29,18	23,33	13,00	11,55	12,05	60,46	17,23	1,34	3,81	1,43	3,24	1,24	1,59	3,57	0,74	5,89
1,7876	206,59	73,54	78,21	16,99	1,50	16,62	11,28	24,96	19,03	5,75	1,94	4,28	1,39	5,83	1,01	1,45	4,37	1,02	2,70
1,8030	251,95	106,33	90,91	22,07	22,44	16,15	18,89	23,82	23,33	27,19	0,91	3,13	4,44	5,43	0,69	0,34	2,61	5,04	6,21
1,8279	225,11	99,38	90,12	12,55	9,11	8,51	3,18	30,35	45,32	5,45	0,86	3,45	0,14	3,52	1,70	0,56	2,63	6,02	2,55
1,8304	195,17	95,81	110,84	5,44	0,51	0,75	24,74	25,06	13,47	10,27	6,28	2,53	5,46	5,72	4,90	6,28	4,66	2,22	2,06
1,8393	232,38	129,73	122,05	34,69	12,34	9,38	2,75	12,99	13,64	29,69	1,13	3,94	1,35	2,50	0,71	1,23	2,16	0,78	2,14
1,8548	276,32	78,44	100,66	31,04	2,11	6,31	3,03	17,04	27,76	14,82	0,78	3,55	2,89	2,03	3,66	4,18	0,72	3,89	1,98
1,8594	212,90	119,16	97,39	28,56	2,87	11,83	16,89	29,61	39,19	8,35	0,27	2,18	4,04	2,30	3,70	0,65	4,25	1,47	2,50
1,8679	270,22	82,15	103,99	10,22	15,52	19,78	29,95	52,31	12,41	3,13	1,06	3,76	2,23	5,53	2,47	5,78	2,55	0,66	2,34
1,8786	224,37	131,69	96,26	23,92	13,05	6,19	6,18	6,16	16,57	13,42	0,90	3,43	4,18	3,61	1,72	0,28	2,18	5,91	0,60
1,8800	232,78	103,11	84,25	52,61	10,71	15,36	33,06	3,80	14,69	12,49	1,01	3,62	5,45	6,28	4,83	2,50	1,85	1,96	4,77
1,8918	242,23	85,13	93,14	27,82	11,57	0,53	13,03	7,94	18,92	9,51	0,50	2,85	1,35	3,01	2,27	2,87	0,74	3,05	3,42
1,9013	259,86	85,40	64,33	48,84	19,63	33,95	30,36	36,58	7,64	21,51	0,67	3,73	2,90	6,26	1,68	0,26	2,38	5,40	0,66
1,9315	267,33	64,16	63,15	25,15	2,18	12,25	23,92	38,31	21,72	6,93	0,86	3,80	2,91	5,69	1,77	6,28	3,44	6,26	1,73
1,9615	275,22	119,36	94,89	17,53	22,65	1,80	20,34	35,31	4,64	34,05	0,22	3,09	3,08	5,55	0,15	0,41	2,54	2,47	6,15
1,9788	302,64	107,84	102,32	20,66	4,70	3,42	13,60	29,83	7,98	20,14	0,99	4,29	6,28	4,67	2,06	6,28	3,36	0,46	1,38
1,9908	320,79	103,41	51,55	44,89	21,36	6,94	67,24	47,22	6,29	16,86	0,13	3,54	2,57	5,50	0,17	6,11	2,37	5,36	0,28

Tabela A.11 – Parâmetros ajustados pelo CIOA para o pedestre 11 ($m = 87\ kg$, $G = 853{,}47\ N$)

f_s	ΔG_{H1}	ΔG_{H2}	ΔG_{H3}	ΔG_{H4}	ΔG_{H5}	φ_{H2}	φ_{H3}	φ_{H4}	φ_{H5}	ΔG_{S1}	ΔG_{S2}	ΔG_{S3}	ΔG_{S4}	ΔG_{S5}	φ_{S1}	φ_{S2}	φ_{S3}	φ_{S4}	φ_{S5}
1,5112	147,15	67,69	50,67	72,33	40,57	4,35	10,63	19,30	2,99	23,35	2,33	5,15	2,79	5,29	4,32	0,68	1,93	1,72	2,92
1,5251	148,15	104,09	72,14	83,22	37,73	13,32	18,10	32,26	4,75	19,48	1,36	3,85	0,88	3,30	2,38	4,53	0,89	1,56	0,98
1,5467	170,74	31,29	23,07	17,63	0,18	0,45	4,40	11,37	11,90	5,34	1,80	4,81	2,55	6,24	3,36	6,00	0,79	4,76	1,21
1,5564	157,57	70,42	68,77	77,31	37,05	13,53	11,45	21,25	13,61	27,95	1,35	3,76	0,77	4,00	2,51	4,55	0,96	4,84	0,83
1,5775	205,64	26,21	54,67	39,34	16,56	12,20	11,43	7,82	5,41	7,40	0,89	3,99	1,99	5,10	5,18	1,87	1,37	1,54	5,60
1,5826	186,24	60,19	52,54	50,85	28,45	12,70	14,52	13,65	19,01	31,37	1,49	3,81	1,74	3,78	6,10	3,47	4,24	2,01	4,75
1,5862	193,59	64,60	58,62	59,45	32,08	6,66	3,98	1,87	14,48	19,87	2,06	4,57	2,98	5,39	3,08	1,02	0,18	2,64	0,20
1,5916	222,21	50,06	47,09	22,62	23,04	5,37	10,35	3,74	5,38	9,73	0,82	3,28	0,30	3,31	1,46	0,40	0,93	3,90	0,45
1,6006	195,20	44,56	49,32	38,83	12,99	6,24	11,68	10,10	4,81	23,70	1,11	3,62	1,65	5,14	2,07	1,29	0,28	0,61	1,76
1,6061	204,77	56,50	66,30	44,09	32,16	8,04	2,73	2,13	16,87	16,24	1,24	3,89	1,12	3,65	0,84	2,36	1,79	1,54	4,70
1,6208	220,18	57,41	57,04	29,77	7,27	5,70	7,16	16,36	20,59	6,29	1,15	3,79	1,92	4,82	0,89	0,98	5,47	1,19	4,99
1,6325	237,71	20,09	31,14	1,29	5,68	5,41	2,84	9,62	10,21	6,64	0,44	3,84	1,26	2,83	1,88	4,99	3,69	4,66	0,06
1,6465	243,80	32,05	43,83	21,37	11,78	22,10	8,19	4,63	7,82	10,98	0,18	3,48	1,55	4,11	0,61	2,14	4,43	1,88	4,57
1,6672	245,64	34,55	56,94	18,07	20,05	7,48	23,79	13,18	5,07	5,28	0,35	3,50	1,06	2,71	0,60	4,95	3,46	6,08	0,35
1,6679	280,40	52,62	35,09	10,49	4,50	11,74	7,44	22,48	6,48	6,42	5,71	3,09	6,13	0,61	2,76	2,30	3,03	4,96	3,72
1,7187	291,30	73,01	56,67	1,81	16,81	6,63	4,57	1,23	2,89	5,65	5,89	3,04	3,75	1,36	6,28	4,80	2,49	5,92	3,60
1,7231	279,32	74,69	66,48	21,92	7,67	14,19	17,83	17,20	10,09	21,40	6,09	3,42	2,06	4,66	5,85	2,76	2,25	5,85	4,80
1,7256	288,77	100,70	29,61	24,74	18,63	11,71	13,38	21,10	17,30	20,53	6,04	3,32	1,52	3,77	6,28	3,94	1,65	5,99	2,53
1,7322	302,87	108,89	40,29	9,41	2,34	11,93	19,09	25,77	1,84	1,43	6,22	3,07	1,53	3,68	0,47	2,57	2,54	5,05	1,96
1,7329	304,51	98,18	71,77	6,19	5,46	2,31	10,95	2,92	6,30	11,11	5,88	2,97	6,28	3,42	3,05	2,78	2,80	6,28	4,13
1,7569	309,88	96,64	59,76	7,38	9,62	23,85	19,26	0,45	5,08	10,55	0,01	3,34	0,36	3,19	0,60	3,06	2,92	0,63	5,07
1,7707	338,92	143,62	46,55	22,13	2,88	9,54	16,88	6,54	4,32	7,20	5,71	2,65	0,73	1,23	3,85	5,69	1,15	3,64	2,91
1,7791	322,60	115,24	53,51	0,94	1,56	9,62	8,54	2,74	3,44	8,70	6,11	3,19	1,81	4,29	6,28	4,02	3,46	6,28	5,20
1,7888	286,80	71,71	21,95	4,65	8,70	10,04	8,02	12,16	2,88	8,93	6,22	3,18	4,35	3,51	0,74	4,32	3,27	1,92	6,01

Tabela A.12 – Parâmetros ajustados pelo CIOA para o pedestre 12 ($m = 90\ kg$, $G = 882{,}90\ N$)

f_s	ΔG_{H1}	ΔG_{H2}	ΔG_{H3}	ΔG_{H4}	ΔG_{H5}	φ_{H2}	φ_{H3}	φ_{H4}	φ_{H5}	ΔG_{S1}	ΔG_{S2}	ΔG_{S3}	ΔG_{S4}	ΔG_{S5}	φ_{S1}	φ_{S2}	φ_{S3}	φ_{S4}	φ_{S5}
1,5912	158,92	53,85	79,48	35,34	7,85	10,48	19,64	11,81	15,05	0,22	0,90	2,97	5,75	6,04	5,34	2,23	6,15	3,83	1,68
1,5914	167,50	52,79	83,87	44,31	26,43	16,92	11,82	7,35	16,70	9,75	1,58	4,37	0,83	2,87	1,33	2,02	3,41	5,28	3,50
1,6444	164,88	50,11	54,77	20,29	3,35	1,08	26,37	10,99	2,09	2,43	1,50	4,39	0,17	4,54	6,28	1,88	3,77	1,77	4,84
1,6859	189,92	91,93	104,10	39,65	10,35	24,17	23,16	13,54	13,75	23,39	1,21	4,12	6,28	2,87	0,68	2,38	2,58	5,50	1,89
1,6906	192,62	67,07	84,21	50,91	37,61	20,20	25,29	2,68	1,23	4,57	1,14	3,65	0,05	1,53	0,99	2,67	4,08	1,97	6,28
1,6951	163,65	75,01	97,13	50,58	18,43	11,83	38,37	18,25	1,71	7,70	1,44	4,36	0,55	2,23	0,95	2,35	1,60	0,95	2,93
1,7880	171,42	82,13	89,04	33,07	17,36	8,08	13,29	22,73	11,65	1,71	1,48	4,50	0,49	2,79	2,38	1,24	3,08	1,05	2,32
1,7917	162,78	66,02	73,36	37,64	18,20	17,36	25,53	31,39	16,24	17,62	1,50	4,87	0,26	1,36	1,12	2,69	2,91	5,26	2,54
1,7953	189,89	99,88	82,22	36,67	33,36	1,16	22,23	16,27	1,91	3,04	0,73	3,73	5,76	1,06	1,61	1,56	1,53	1,72	0,63
1,8792	183,92	62,94	63,41	52,77	16,52	7,04	34,29	7,08	2,15	5,24	0,96	4,14	6,23	2,16	2,70	5,44	1,13	1,76	3,82
1,8978	208,51	95,34	67,36	50,08	17,51	5,00	24,01	16,44	3,26	15,27	1,36	4,40	6,01	2,23	5,92	2,22	1,61	5,00	4,42
1,9175	235,97	82,58	65,35	32,19	20,43	2,07	8,68	53,14	0,39	4,51	6,22	3,26	4,79	0,11	0,53	1,94	2,02	5,69	2,47
1,9238	215,10	93,83	64,17	11,45	6,07	14,08	31,98	26,86	13,96	4,74	6,18	3,63	5,10	5,22	0,60	2,26	2,50	2,97	0,61
1,9567	164,09	105,11	77,19	26,59	12,89	6,30	31,44	31,08	14,76	2,83	1,31	4,99	1,44	1,99	4,25	5,65	5,36	1,97	3,06
1,9836	191,87	102,40	71,22	40,64	27,11	20,45	26,63	23,49	13,96	1,97	0,77	4,49	6,06	2,05	3,80	4,75	5,70	1,62	4,36
1,9867	136,56	12,20	28,11	20,29	12,95	8,71	19,22	8,22	17,48	9,95	1,78	0,87	2,72	6,06	0,84	2,05	3,65	2,47	5,92
2,0121	244,14	123,08	42,17	43,69	16,51	3,85	21,87	40,63	3,69	1,18	0,15	3,73	5,15	0,39	0,88	2,33	2,81	2,52	4,23
2,0506	227,02	88,12	21,81	9,43	17,48	12,10	24,15	23,08	2,04	7,82	1,16	5,80	2,21	4,24	5,84	2,87	3,50	4,59	1,40
2,0543	248,22	105,33	37,49	26,21	17,50	9,97	35,75	17,41	2,90	28,39	0,15	3,43	4,63	0,33	1,03	2,36	1,88	2,67	3,11
2,0771	230,23	118,91	40,86	30,67	6,73	3,57	31,70	17,91	17,00	5,85	5,89	3,63	4,52	6,28	2,16	1,86	1,22	2,83	2,34
2,1298	230,88	137,02	20,29	33,44	6,97	17,81	39,65	31,91	18,94	8,98	0,39	4,42	0,04	0,52	0,61	2,72	1,70	4,50	2,51
2,1352	221,19	79,96	8,16	22,13	11,88	12,68	33,36	8,26	7,12	10,19	5,48	4,36	3,30	4,11	0,25	1,49	0,67	4,44	2,28
2,1928	250,71	148,01	16,11	14,30	5,68	18,45	40,52	37,41	23,63	3,27	6,24	3,55	4,80	6,28	6,28	0,70	3,32	5,57	5,63
2,2308	233,36	112,35	15,16	27,72	0,09	5,28	15,16	11,02	15,19	8,14	5,87	2,81	4,40	2,85	0,63	1,84	3,09	2,33	1,99

Tabela A.13 – Parâmetros ajustados pelo CIOA para o pedestre 13 ($m = 92\ kg$, $G = 902{,}52\ N$)

f_s	ΔG_{H1}	ΔG_{H2}	ΔG_{H3}	ΔG_{H4}	ΔG_{H5}	φ_{H2}	φ_{H3}	φ_{H4}	φ_{H5}	ΔG_{S1}	ΔG_{S2}	ΔG_{S3}	ΔG_{S4}	ΔG_{S5}	φ_{S1}	φ_{S2}	φ_{S3}	φ_{S4}	φ_{S5}
1,6632	165,24	26,26	55,57	30,97	5,65	2,81	5,09	15,51	4,63	13,41	0,71	3,43	0,84	2,18	4,03	3,22	2,34	4,81	2,83
1,6675	170,99	26,45	79,97	46,84	18,26	6,12	7,54	32,57	23,16	7,65	1,25	3,30	0,30	2,17	4,42	2,09	4,45	1,08	1,85
1,7378	186,76	25,60	98,48	41,39	16,24	1,72	13,38	9,95	3,62	8,34	1,41	4,18	1,81	4,49	6,28	3,39	3,00	2,44	5,22
1,7407	187,51	32,57	8,99	1,59	9,77	0,38	32,20	41,06	23,27	4,12	1,14	4,06	4,10	5,93	3,23	4,21	1,27	4,72	6,16
1,7474	202,78	0,56	5,81	9,60	5,33	3,36	10,59	14,43	14,99	7,14	6,06	3,02	5,16	0,97	3,44	5,40	2,83	0,65	3,13
1,7957	237,89	21,84	36,89	19,97	14,87	14,48	10,96	28,77	6,55	4,61	6,28	3,22	0,24	1,39	6,20	3,08	3,62	6,28	6,28
1,7995	194,44	19,23	47,34	15,13	10,84	2,83	12,25	2,52	3,06	10,76	5,52	0,78	3,52	5,75	4,50	6,24	2,56	4,64	5,95
1,8866	293,99	48,21	34,17	0,92	0,98	19,17	4,45	43,95	9,27	9,10	4,95	3,23	1,64	5,35	6,08	4,15	2,57	6,19	2,52
1,9506	282,05	41,74	17,62	22,29	4,41	3,05	25,18	15,01	16,84	4,35	4,77	2,06	3,58	1,81	5,03	6,28	2,38	3,81	6,28
1,9597	266,45	48,00	45,09	16,34	1,91	10,53	24,28	51,80	42,17	7,99	5,13	2,92	5,50	6,03	5,18	1,11	3,47	6,03	3,94
1,9736	302,16	86,00	55,04	12,49	22,14	3,68	21,02	3,72	6,01	10,09	5,41	3,28	5,00	1,10	3,74	2,34	4,56	2,62	4,09
1,9815	286,14	31,93	8,38	21,33	9,64	10,25	33,70	8,03	3,70	3,32	5,53	4,33	3,25	1,52	1,06	4,42	2,93	2,12	0,98
1,9852	290,92	54,17	91,71	30,53	14,13	10,11	24,70	8,86	3,83	3,75	5,49	2,80	5,45	1,22	3,91	1,09	3,31	3,11	2,74
2,0242	325,33	73,73	53,19	41,49	26,07	7,35	13,39	34,98	14,76	9,45	5,61	4,09	5,81	1,90	6,28	1,66	2,69	5,11	2,94
2,0433	310,25	90,31	116,14	41,82	0,16	10,00	15,72	64,20	14,49	11,50	5,93	3,81	0,15	0,86	3,86	5,72	3,11	5,27	2,78
2,0594	323,12	57,28	26,44	14,98	13,47	10,31	36,31	48,99	7,74	3,89	5,96	3,50	5,75	6,28	1,03	6,28	2,99	6,28	0,32
2,0748	334,46	78,47	61,34	75,83	30,27	14,65	27,26	33,78	6,55	7,15	5,54	3,90	5,40	1,40	5,16	5,73	4,54	5,51	4,81
2,0902	356,54	91,94	86,86	28,99	6,75	21,30	29,06	58,07	27,90	4,61	5,35	3,67	5,54	0,71	1,25	2,95	5,44	1,30	2,80
2,0963	369,14	90,47	51,86	24,12	17,99	6,63	36,84	64,13	19,21	15,20	5,46	4,56	5,21	2,10	3,15	0,43	2,81	5,06	0,58
2,0965	314,62	89,89	16,32	1,40	6,12	6,91	10,79	3,53	9,08	4,92	6,17	3,69	3,44	5,64	3,32	2,27	1,85	3,49	1,41
2,1089	312,18	126,19	33,12	27,41	19,12	7,33	4,67	17,67	4,08	4,07	5,86	4,79	5,87	2,84	4,16	4,75	2,16	5,55	3,31
2,1236	349,85	134,44	37,91	43,21	31,04	2,18	24,24	44,39	26,13	9,32	5,98	5,23	0,13	3,03	3,62	0,87	3,23	6,26	2,77
2,1428	359,68	135,90	70,75	45,67	20,97	13,04	25,26	34,81	16,28	13,52	5,88	4,94	6,00	2,10	1,76	5,42	5,69	2,90	5,54
2,1466	374,60	133,33	50,56	33,91	13,74	4,29	21,32	21,91	12,93	3,71	5,78	4,41	6,02	2,07	4,75	3,37	6,28	2,35	6,28

Tabela A.14 – Parâmetros ajustados pelo CIOA para o pedestre 14 ($m = 104\ kg$, $G = 1020{,}24\ N$)

f_s	ΔG_{H1}	ΔG_{H2}	ΔG_{H3}	ΔG_{H4}	ΔG_{H5}	φ_{H2}	φ_{H3}	φ_{H4}	φ_{H5}	ΔG_{S1}	ΔG_{S2}	ΔG_{S3}	ΔG_{S4}	ΔG_{S5}	φ_{S1}	φ_{S2}	φ_{S3}	φ_{S4}	φ_{S5}
1,5035	148,95	11,37	79,09	49,48	39,12	24,20	29,89	16,29	55,48	26,48	2,08	1,43	3,53	5,60	1,47	5,87	3,14	1,34	2,35
1,5380	170,13	18,38	112,73	47,73	36,50	16,29	27,42	22,89	46,52	42,26	0,25	0,74	2,08	3,78	1,12	5,02	3,77	0,60	1,78
1,5976	254,86	31,38	125,23	45,62	12,96	24,85	25,91	40,71	25,32	33,20	5,63	2,76	4,23	0,91	4,43	2,25	0,89	5,02	0,75
1,6215	217,27	7,48	109,44	39,86	10,72	20,93	10,94	33,64	35,90	16,52	6,28	1,64	3,32	4,34	1,49	4,68	5,31	1,48	2,31
1,6436	275,67	43,22	145,13	75,29	17,50	35,22	11,35	32,90	2,54	13,81	5,42	3,19	5,49	2,08	4,44	3,94	1,80	2,54	2,72
1,6754	259,61	71,62	143,97	83,83	18,15	10,42	43,12	46,06	14,80	11,59	0,25	4,41	0,81	3,59	0,15	2,46	3,04	1,11	2,80
1,6765	160,94	15,07	72,68	26,02	7,90	19,67	34,27	24,50	15,46	19,57	4,97	1,27	2,52	0,55	1,03	5,72	1,94	4,83	2,38
1,6939	281,36	10,24	145,83	65,11	24,99	18,93	10,84	12,70	18,81	40,16	5,74	3,40	5,30	1,63	4,09	3,69	1,99	6,27	2,44
1,7305	285,37	43,76	153,81	75,40	17,74	19,58	33,83	45,44	18,92	35,17	5,50	3,01	5,11	1,16	3,60	2,31	2,26	4,80	0,67
1,7378	357,27	103,78	123,71	82,98	4,89	5,78	38,68	40,55	23,46	18,36	4,91	2,89	4,86	1,85	4,36	2,53	2,11	2,74	1,90
1,7494	381,53	139,00	82,52	58,92	23,39	3,17	8,78	86,50	21,88	6,62	5,96	3,93	0,53	2,93	3,86	6,28	6,28	3,20	4,66
1,7642	284,30	56,95	134,04	53,42	11,55	31,94	43,22	41,17	4,74	18,85	5,26	2,38	3,87	0,82	1,13	5,43	4,28	0,08	1,57
1,7649	302,92	81,18	121,02	95,12	35,68	17,28	52,00	61,53	18,27	8,77	0,36	4,18	6,28	2,28	3,18	3,14	3,24	3,84	2,40
1,7802	312,02	82,59	107,15	56,48	7,66	30,10	26,57	34,29	1,75	6,94	4,88	2,45	4,02	6,15	0,98	5,82	3,83	3,50	4,67
1,7911	365,54	105,10	126,41	90,97	1,93	26,51	11,49	66,17	29,94	25,98	0,03	4,94	1,10	5,44	2,33	2,41	6,01	2,74	0,17
1,8040	465,53	109,88	117,50	61,47	2,79	29,23	51,07	60,36	21,74	22,96	4,97	3,86	5,65	3,46	0,92	6,24	5,48	3,02	4,98
1,8054	355,27	89,94	157,86	81,35	14,72	35,28	33,52	38,95	46,65	22,37	5,03	3,30	5,04	5,42	1,70	6,19	5,22	1,47	4,15
1,8219	376,58	111,58	31,14	39,40	19,46	8,26	19,71	44,79	4,87	5,43	4,75	2,70	4,21	3,95	4,73	2,69	1,94	0,83	4,97
1,8352	428,67	158,33	112,97	98,66	18,99	17,20	19,77	75,16	23,59	6,93	5,82	4,87	0,49	3,68	1,24	1,73	0,01	1,43	0,48
1,8643	404,56	106,12	45,52	43,65	11,49	23,33	39,20	45,99	14,89	16,53	5,29	3,19	5,45	1,73	5,45	4,37	3,58	5,35	2,84
1,8662	470,86	175,31	98,03	109,76	37,28	1,10	48,51	87,05	27,29	45,01	0,11	5,01	1,25	3,29	2,62	4,10	3,71	6,15	4,07
1,8843	458,60	107,36	124,70	101,88	28,53	24,48	51,58	57,33	20,68	38,69	5,66	4,15	6,26	2,21	4,24	4,30	2,20	2,71	2,97
1,9600	565,35	190,00	72,23	114,46	45,03	2,50	19,55	76,07	3,68	30,00	5,92	4,64	0,03	2,01	3,69	4,85	3,27	0,06	3,37
1,9902	475,75	180,43	121,53	46,44	25,33	39,75	32,98	44,92	6,85	4,66	5,91	5,24	0,73	5,11	4,14	5,83	2,61	4,16	5,60

Tabela A.15 – Parâmetros ajustados pelo CIOA para o pedestre 15 ($m = 105\ kg$, $G = 1030{,}05\ N$)

f_s	ΔG_{H1}	ΔG_{H2}	ΔG_{H3}	ΔG_{H4}	ΔG_{H5}	φ_{H2}	φ_{H3}	φ_{H4}	φ_{H5}	ΔG_{S1}	ΔG_{S2}	ΔG_{S3}	ΔG_{S4}	ΔG_{S5}	φ_{S1}	φ_{S2}	φ_{S3}	φ_{S4}	φ_{S5}
1,5965	151,98	71,76	93,53	59,57	13,20	1,39	3,89	37,81	16,14	7,35	0,60	1,66	3,99	4,25	2,44	6,28	0,95	3,38	6,28
1,6288	185,28	61,36	121,76	83,91	19,56	2,54	11,15	21,17	1,03	4,19	1,08	2,38	5,07	0,50	3,85	0,62	1,93	2,82	0,73
1,6298	127,11	64,55	117,52	49,11	14,61	19,46	20,19	48,70	41,31	2,61	0,18	0,84	2,63	5,29	2,20	0,27	0,76	1,36	6,28
1,6990	213,09	55,22	128,70	73,74	27,42	3,65	4,99	17,62	2,92	21,67	0,71	2,22	4,41	0,17	1,74	6,28	1,16	4,01	5,53
1,7311	183,96	69,81	141,21	77,51	27,17	11,38	7,94	38,64	3,54	12,81	6,28	1,38	3,34	4,36	6,28	6,28	1,01	1,78	0,57
1,7445	206,25	42,32	94,26	44,27	14,25	0,84	9,19	20,28	5,54	17,79	0,62	2,26	4,11	4,98	3,15	2,31	1,40	0,81	6,06
1,7742	239,59	81,06	149,95	63,71	28,42	2,29	8,92	28,46	10,75	15,89	0,67	2,26	4,72	0,26	2,86	0,59	1,13	3,46	2,92
1,8222	198,66	12,03	62,61	46,29	21,23	16,93	11,65	12,39	12,50	2,69	1,28	1,58	3,29	5,42	1,46	1,30	1,59	2,45	5,29
1,8331	244,05	51,87	122,23	72,12	28,92	17,74	27,16	21,36	4,37	12,59	0,68	2,60	4,72	0,58	0,84	0,75	1,75	3,17	3,78
1,8791	166,36	54,67	82,49	64,40	24,16	3,62	9,73	38,35	22,37	17,12	0,90	3,10	5,38	2,05	3,63	0,36	2,13	4,77	1,91
1,8889	190,24	14,98	94,33	58,66	33,95	8,71	25,86	33,04	22,91	22,64	0,24	2,94	5,07	1,41	1,61	4,70	1,50	5,14	1,07
1,9982	104,41	36,50	95,44	55,62	24,33	8,49	28,18	23,42	6,74	38,00	5,48	0,66	1,94	3,51	2,12	0,93	3,06	1,92	1,03
2,0098	178,86	16,71	48,74	31,34	14,30	0,11	28,16	24,87	2,85	1,44	0,06	2,18	3,79	4,30	5,41	1,77	4,88	3,88	3,10
2,0101	173,78	18,65	74,85	27,71	24,44	2,67	26,19	46,25	17,98	1,76	0,55	2,66	4,77	1,48	3,43	1,97	4,78	1,80	4,97
2,0242	103,16	22,89	89,57	40,35	6,30	2,99	7,39	11,72	0,14	23,75	0,01	0,38	1,48	2,34	2,99	5,59	6,28	4,40	3,53
2,0852	142,25	37,27	104,21	56,19	27,86	2,77	40,42	48,01	15,91	13,25	0,18	1,08	2,21	3,97	5,38	0,45	3,35	5,94	1,73
2,0876	213,86	25,73	109,50	56,89	43,23	6,11	22,58	42,40	8,39	35,02	5,45	3,62	6,10	2,49	0,83	5,47	2,45	4,00	2,32
2,1922	184,23	15,65	58,68	32,91	17,15	9,73	43,55	11,16	11,29	1,14	2,38	3,70	0,30	3,10	3,38	1,82	5,48	2,04	4,40
2,2034	110,37	21,31	43,21	28,57	16,71	19,63	22,69	16,55	25,58	13,63	4,33	0,43	2,37	4,27	5,43	4,42	0,50	2,18	3,68
2,2255	148,82	16,16	3,70	18,37	27,39	13,16	21,95	17,81	3,80	10,48	3,70	2,94	1,09	3,07	3,88	1,27	4,62	5,88	1,22
2,2332	160,55	8,40	26,32	5,54	0,40	0,00	35,04	13,52	0,83	0,23	5,81	2,10	4,13	4,67	5,69	0,75	3,63	3,10	3,16
2,2937	161,08	14,13	32,72	39,42	22,45	0,54	37,63	39,82	8,87	8,25	4,54	4,21	0,51	2,40	6,02	1,94	5,00	1,20	6,01
2,2984	156,00	21,35	87,02	65,55	15,42	2,57	39,83	15,32	10,14	2,39	3,47	1,71	3,33	5,58	2,83	0,99	1,76	0,32	3,62
2,3000	143,02	51,45	38,56	63,32	26,93	11,45	53,18	24,18	15,00	4,79	1,90	1,19	2,60	3,72	4,10	0,80	2,92	4,67	1,33

Tabela A.16 – Parâmetros ajustados pelo CIOA para o pedestre 16 ($m = 112\ kg$, $G = 1098{,}72\ N$)

f_s	ΔG_{H1}	ΔG_{H2}	ΔG_{H3}	ΔG_{H4}	ΔG_{H5}	φ_{H2}	φ_{H3}	φ_{H4}	φ_{H5}	ΔG_{S1}	ΔG_{S2}	ΔG_{S3}	ΔG_{S4}	ΔG_{S5}	φ_{S1}	φ_{S2}	φ_{S3}	φ_{S4}	φ_{S5}
1,5939	220,79	116,40	185,86	46,38	17,67	18,13	5,86	32,12	29,99	34,53	1,47	3,02	5,42	0,06	3,67	0,61	4,88	0,38	2,33
1,6472	317,84	138,79	112,71	15,93	27,98	9,17	14,91	25,64	55,74	15,39	2,22	4,59	5,61	3,04	0,45	5,53	1,83	2,35	3,30
1,6703	282,31	72,92	116,90	64,69	37,22	17,10	31,37	18,96	14,68	27,10	1,25	4,29	5,99	2,35	1,01	3,03	3,76	5,91	3,51
1,6798	323,75	21,82	79,11	50,46	0,27	3,63	48,66	7,08	13,37	28,46	0,41	3,77	5,20	1,49	6,27	1,98	0,60	6,28	3,68
1,6824	302,41	125,94	65,35	34,80	1,60	9,85	46,89	37,46	3,37	5,82	1,78	4,26	6,22	5,09	0,49	2,18	1,28	3,47	3,99
1,6835	311,41	115,85	84,27	7,87	3,44	7,62	3,84	23,42	14,21	2,72	2,67	5,76	1,47	2,44	0,45	2,26	4,61	1,30	3,39
1,7281	197,13	60,43	122,99	60,02	18,81	5,68	16,69	71,24	17,72	25,61	0,19	1,68	2,29	5,58	2,18	2,93	3,14	4,57	0,60
1,7498	436,19	108,87	52,14	83,99	23,19	11,11	43,65	18,32	18,87	2,38	0,91	3,90	5,26	1,17	5,99	0,99	1,69	5,72	5,33
1,7726	348,31	105,17	49,30	57,47	11,06	2,99	1,55	9,40	24,48	1,27	1,28	3,78	5,45	1,68	5,81	4,44	5,39	2,88	5,11
1,7925	398,20	142,77	11,44	84,60	23,20	2,61	12,13	33,04	29,37	19,39	1,08	4,20	6,28	2,00	6,28	1,47	0,66	1,09	5,00
1,8112	428,03	134,14	21,17	32,96	4,90	7,43	10,03	19,57	6,35	37,91	0,83	2,01	0,25	3,71	2,02	2,70	3,46	6,28	4,68
1,8205	435,17	153,61	22,30	49,57	23,62	0,48	29,10	22,66	6,08	10,92	0,63	2,08	5,43	1,33	4,11	4,10	4,81	5,33	5,93
1,8228	393,78	194,25	17,15	78,05	34,37	4,66	23,24	36,65	23,41	8,27	0,67	1,28	0,07	2,01	3,40	0,38	0,33	6,28	4,42
1,8255	353,33	105,31	15,56	28,90	7,02	11,32	25,79	30,41	38,58	19,61	0,32	1,21	3,81	0,50	6,04	1,62	1,40	4,18	0,54
1,8392	447,07	192,67	95,05	27,23	33,00	16,14	44,30	26,10	36,35	27,26	0,22	1,32	4,73	0,61	3,45	3,30	6,28	2,03	5,54
1,8512	383,16	105,37	35,25	26,90	20,38	10,86	16,53	13,02	26,32	0,21	0,67	1,86	5,83	2,37	2,04	2,27	0,49	1,81	0,09
1,8536	440,30	191,52	81,19	21,33	39,49	3,62	37,26	7,60	20,98	9,95	0,45	2,01	5,28	0,92	2,42	3,35	1,98	1,52	0,94
1,8631	411,29	124,18	47,01	26,51	14,96	11,35	24,26	12,78	21,32	8,22	0,64	1,78	4,80	0,84	2,33	4,10	5,10	0,69	3,45
1,8825	416,95	188,67	54,85	14,60	26,17	27,21	50,44	8,15	11,22	18,90	0,31	2,18	6,28	0,74	6,14	6,28	6,28	6,28	1,85
1,8918	501,61	200,00	112,18	58,05	14,41	14,35	39,41	31,19	27,52	7,90	0,50	1,96	6,03	2,44	0,26	1,49	1,75	6,24	5,72
1,9096	424,70	177,73	69,00	29,06	16,68	22,53	24,13	26,45	34,02	21,02	1,34	2,60	6,28	1,45	5,28	6,28	2,78	6,28	3,66
1,9151	449,90	181,18	93,07	38,99	14,13	31,06	59,26	37,91	66,20	10,64	0,03	1,14	5,26	2,09	4,99	0,11	3,99	5,55	1,67
1,9177	468,36	183,42	64,07	32,41	21,30	13,87	42,95	0,77	25,49	11,39	0,76	2,02	5,75	2,02	3,90	5,81	6,28	2,31	3,66
1,9248	428,49	190,10	101,16	27,42	18,55	8,25	20,92	1,39	18,96	20,39	0,10	1,27	5,24	0,73	1,39	6,28	5,39	4,96	0,60

APÊNDICE B: RELAÇÃO DETALHADA ENTRE OS PARÂMETROS AJUSTADOS PELO CIOA E A FREQUÊNCIA DE CAMINHADA

Este apêndice apresenta os mapeamentos dos parâmetros Δ e φ, correspondentes, respectivamente, às amplitudes e ângulos de fase da caminhada humana, associados a harmônicos e sub-harmônicos, individualizados para cada pedestre e ajustados pelo algoritmo CIOA. Os mapeamentos relacionam o parâmetro em análise com a frequência da caminhada e podem ser observados nas Figuras B.1 a B.19.

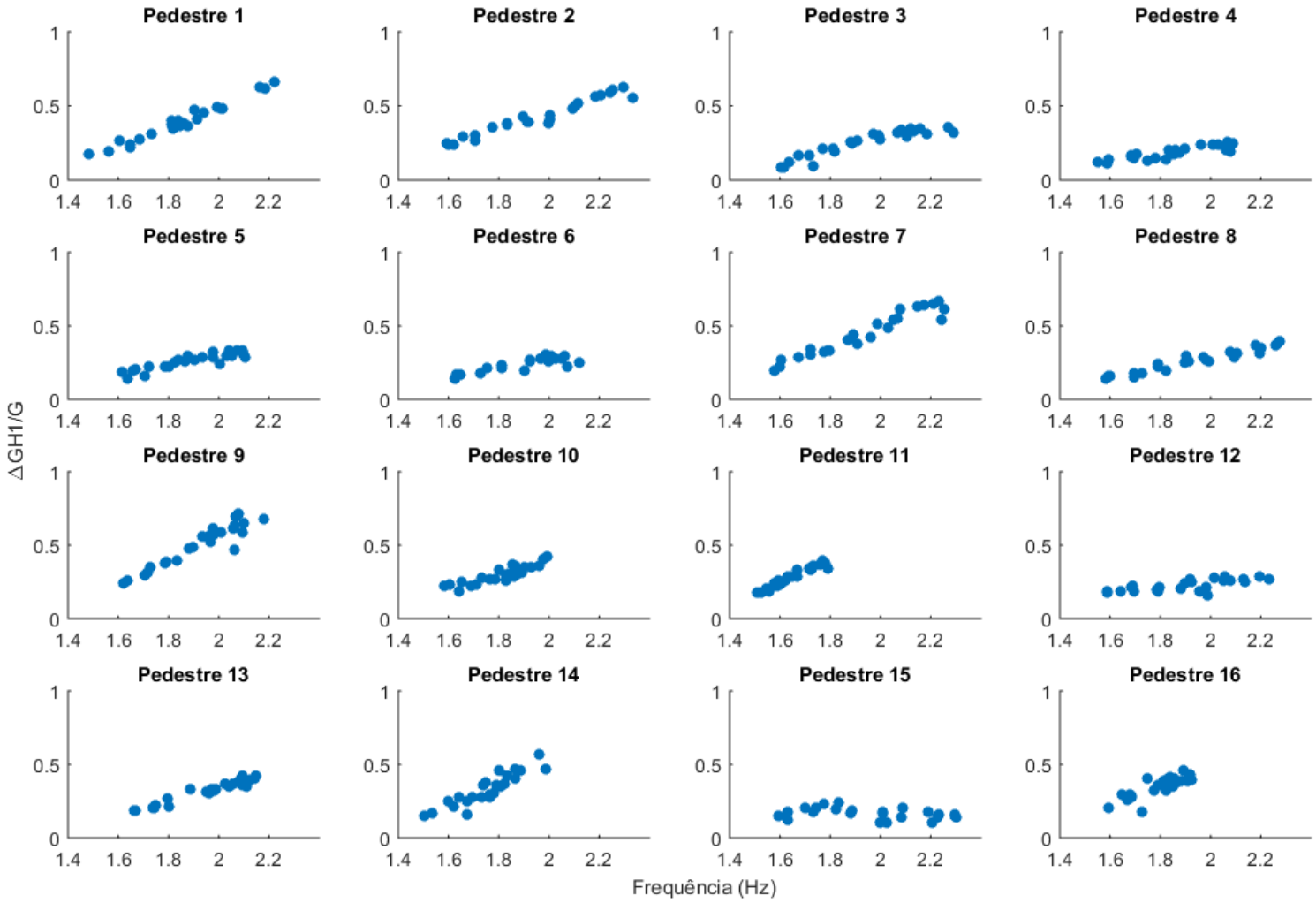


Figura B.1 – Relação entre f e $\Delta G_{H1}/G$ individualizada para cada pedestre

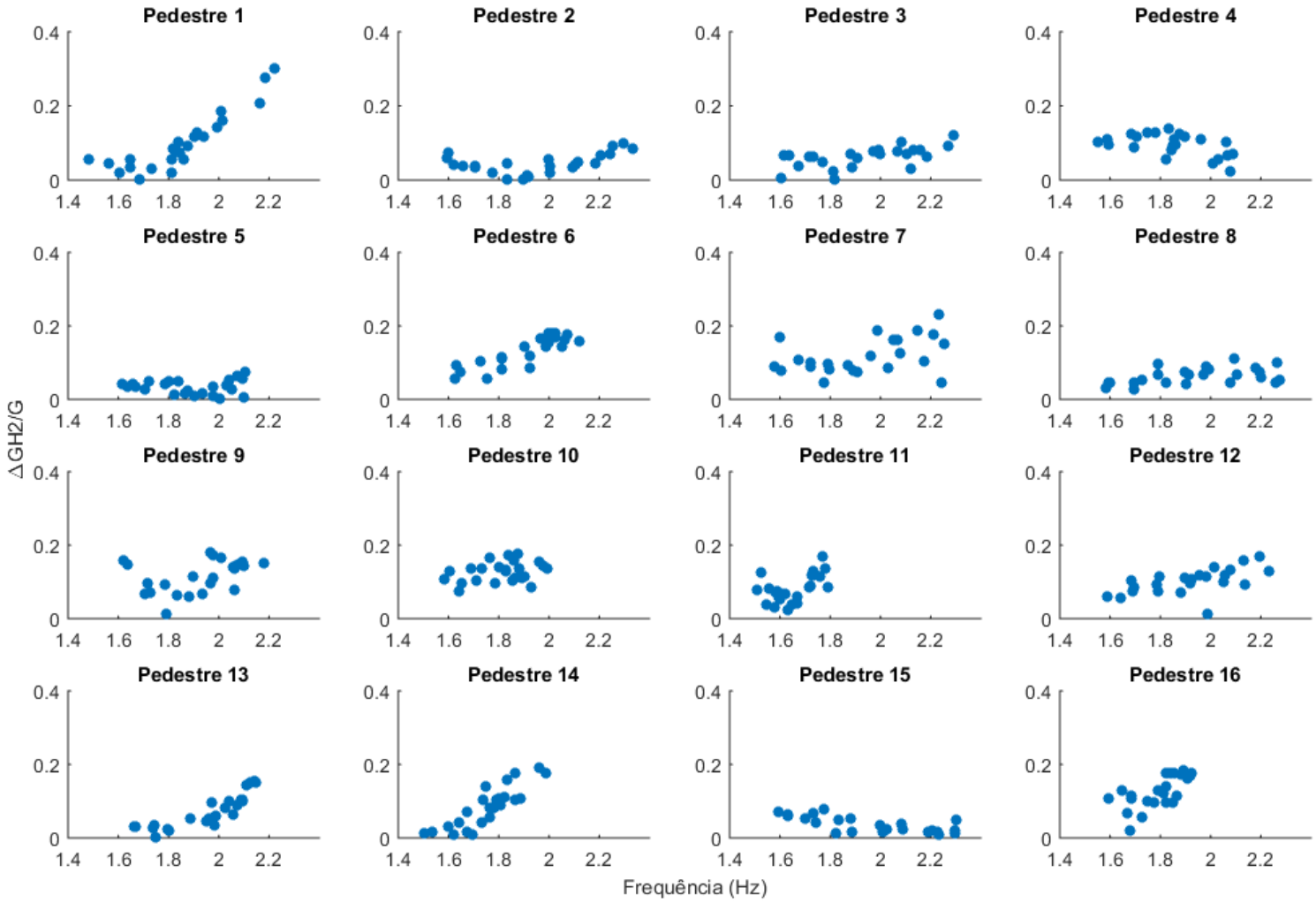


Figura B.2 – Relação entre f e $\Delta G_{H2}/G$ individualizada para cada pedestre

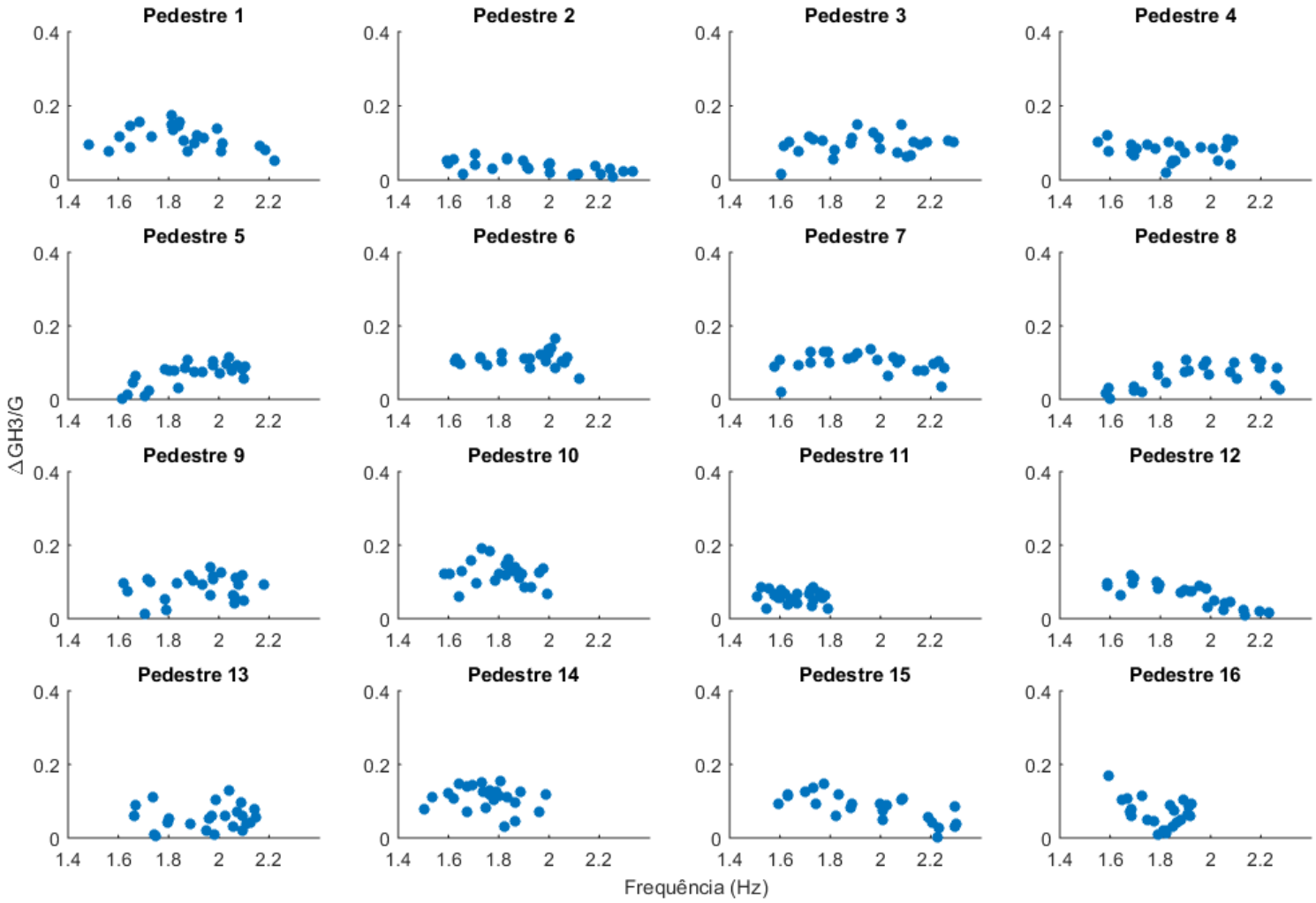


Figura B.3 – Relação entre f e $\Delta G_{H3}/G$ individualizada para cada pedestre

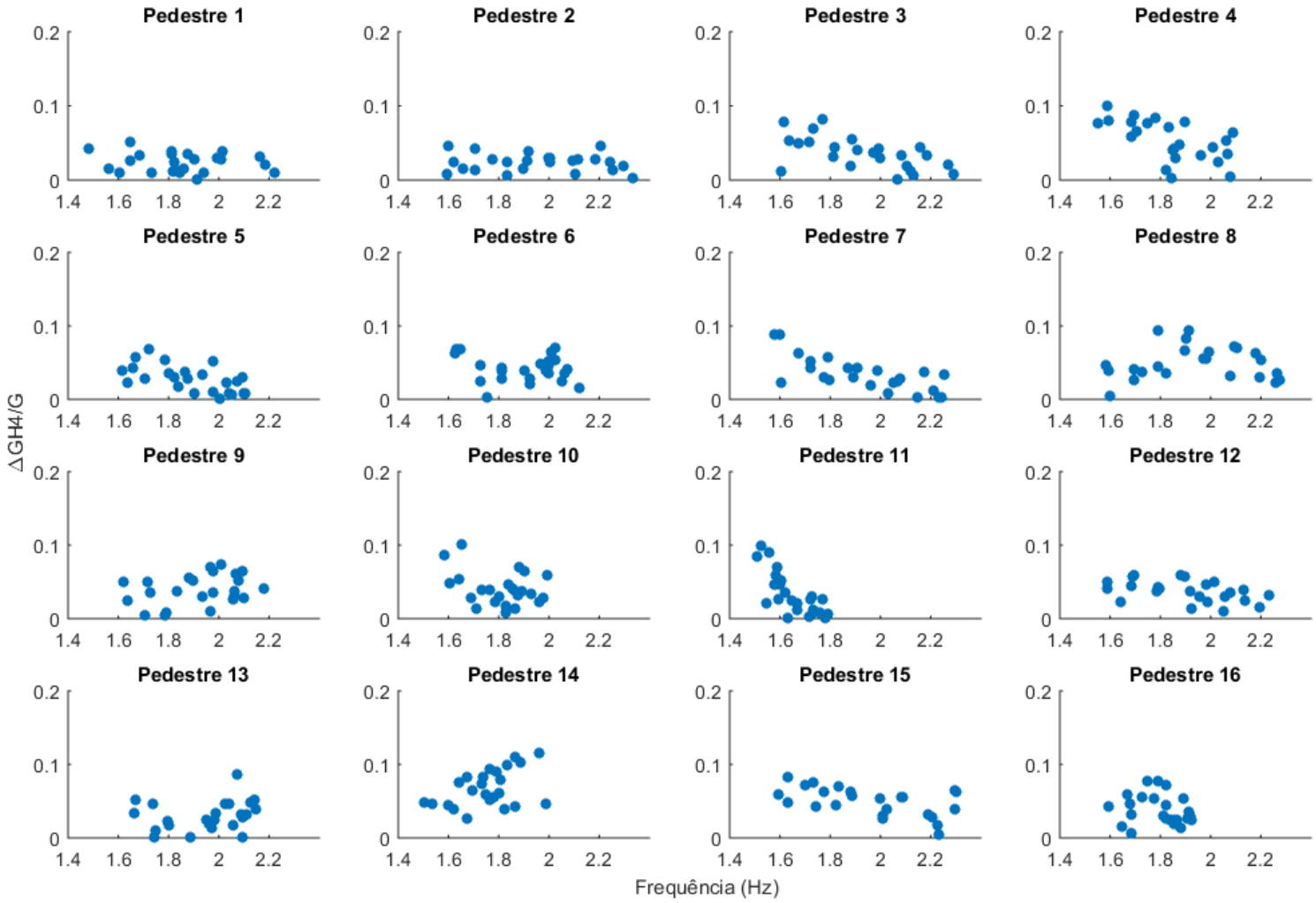


Figura B.4 – Relação entre f e $\Delta G_{H4}/G$ individualizada para cada pedestre

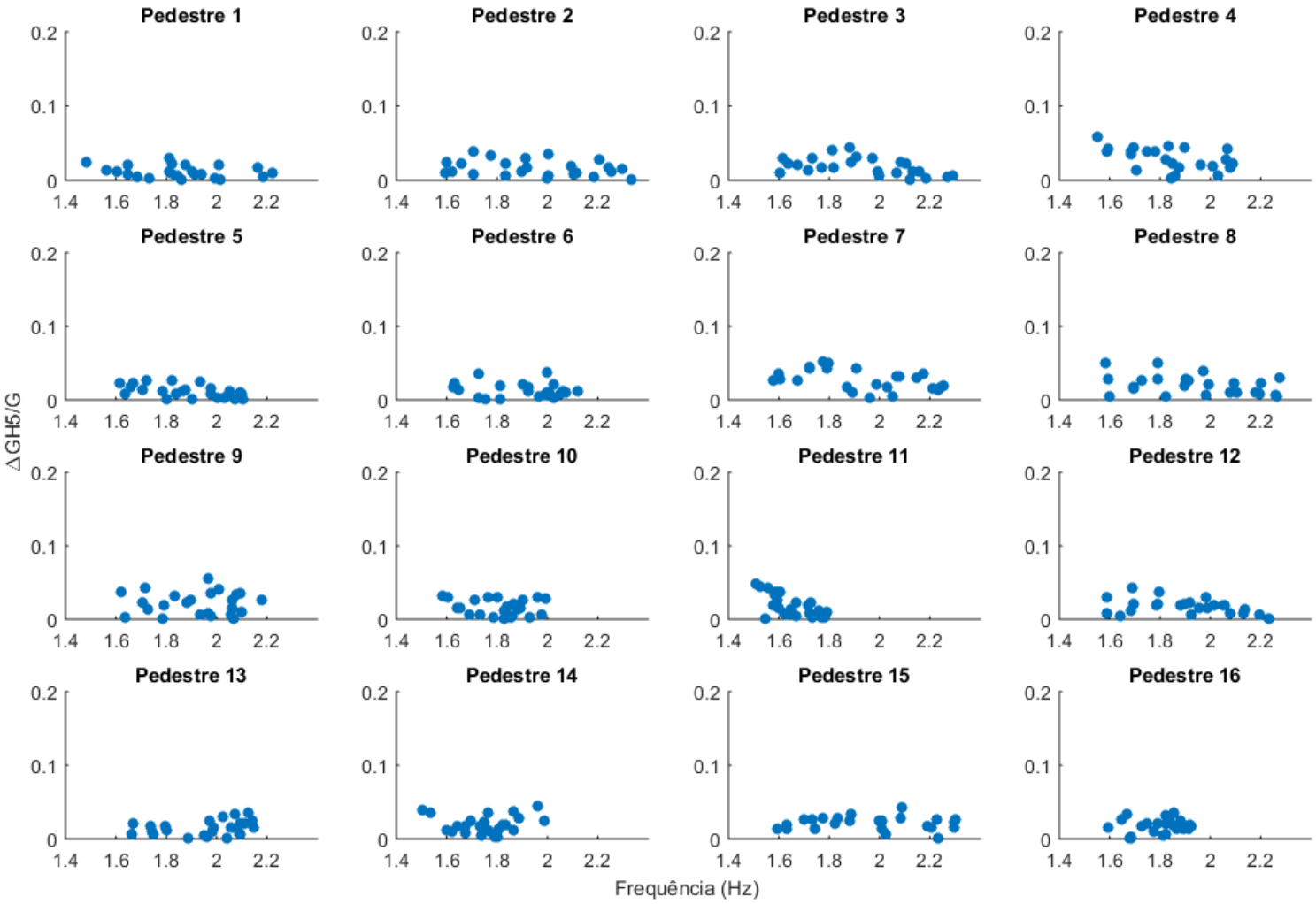


Figura B.5 – Relação entre f e $\Delta G_{H5}/G$ individualizada para cada pedestre

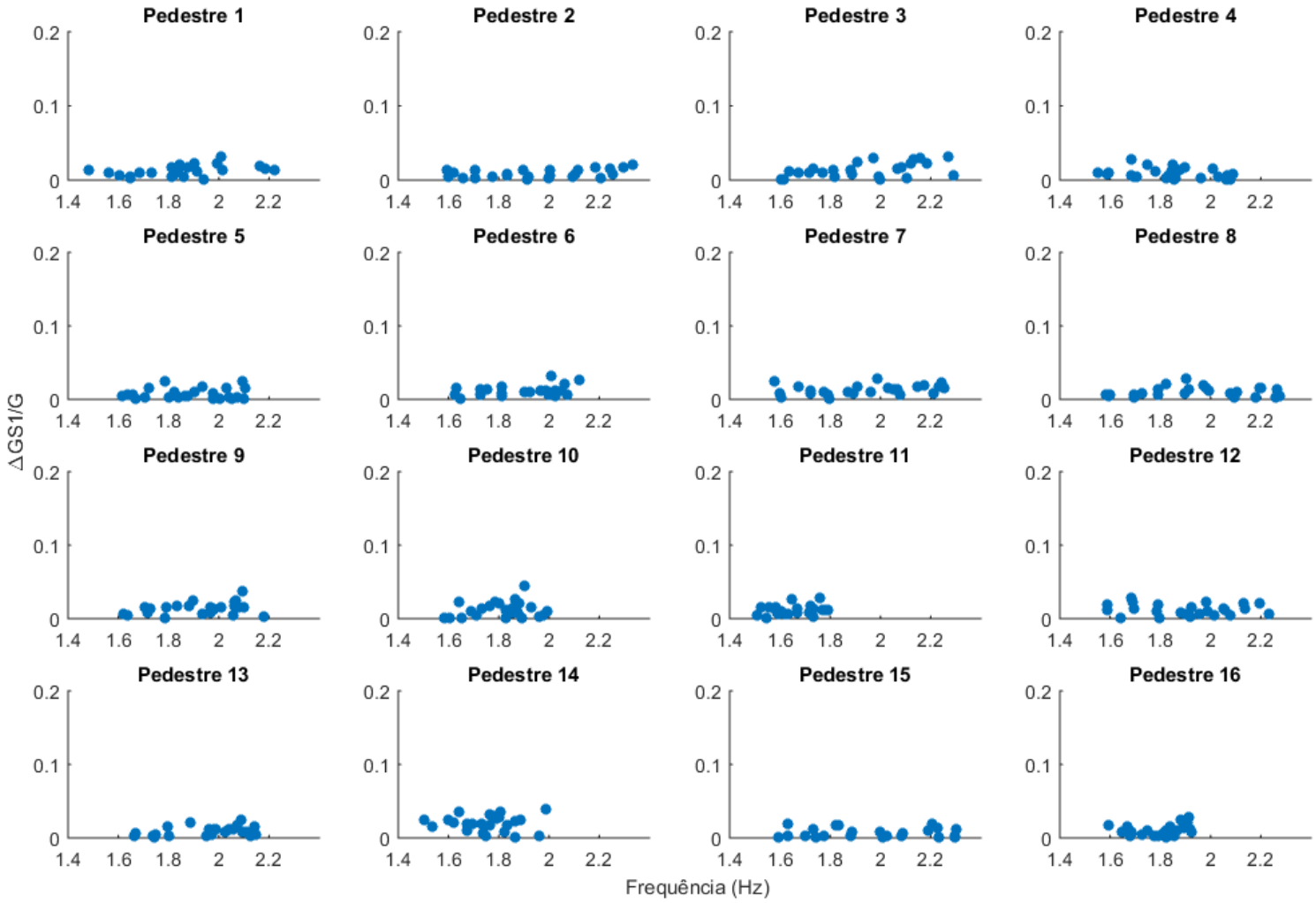


Figura B.6 – Relação entre f e $\Delta G_{S1}/G$ individualizada para cada pedestre

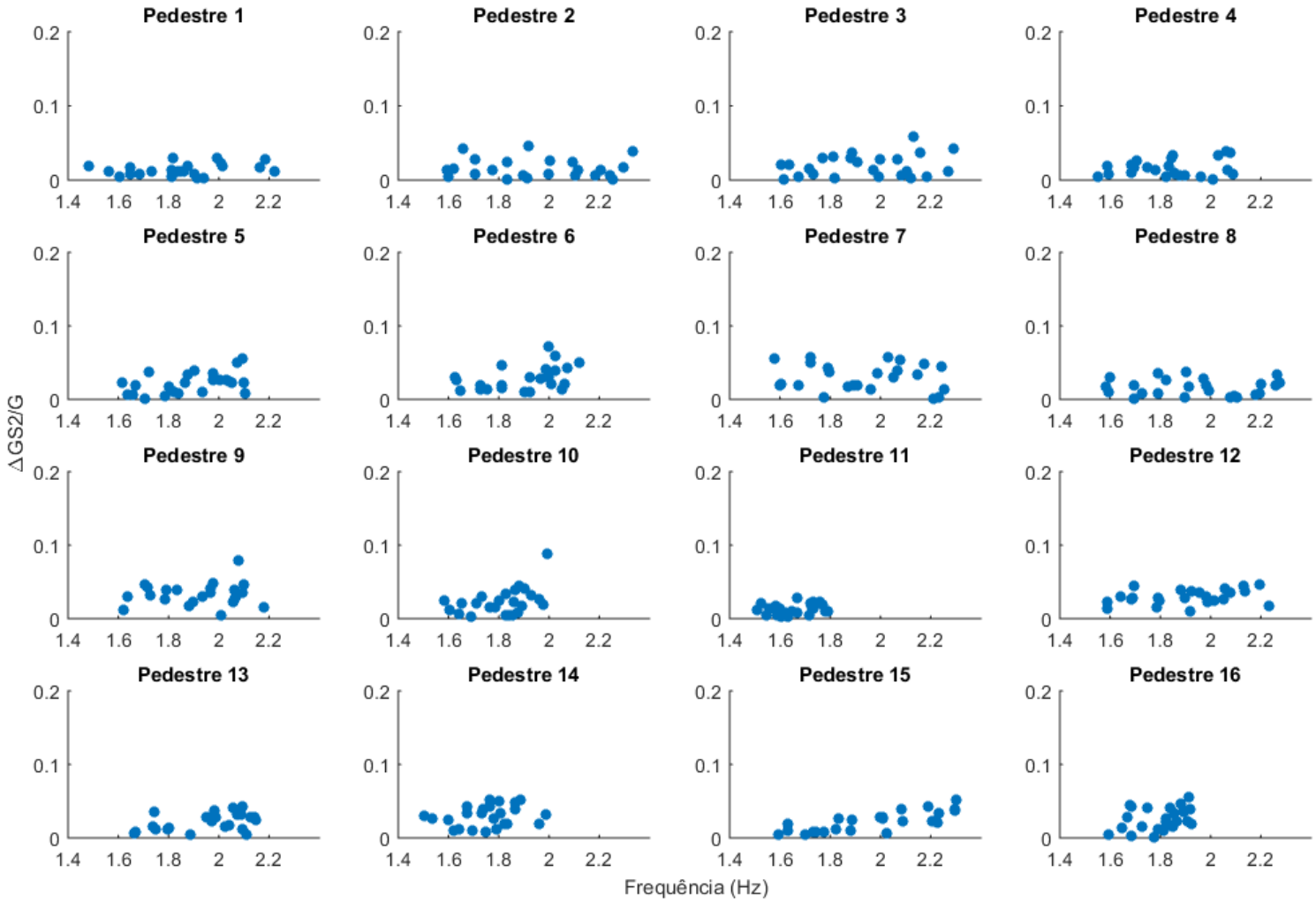


Figura B.7 – Relação entre f e $\Delta G_{S2}/G$ individualizada para cada pedestre

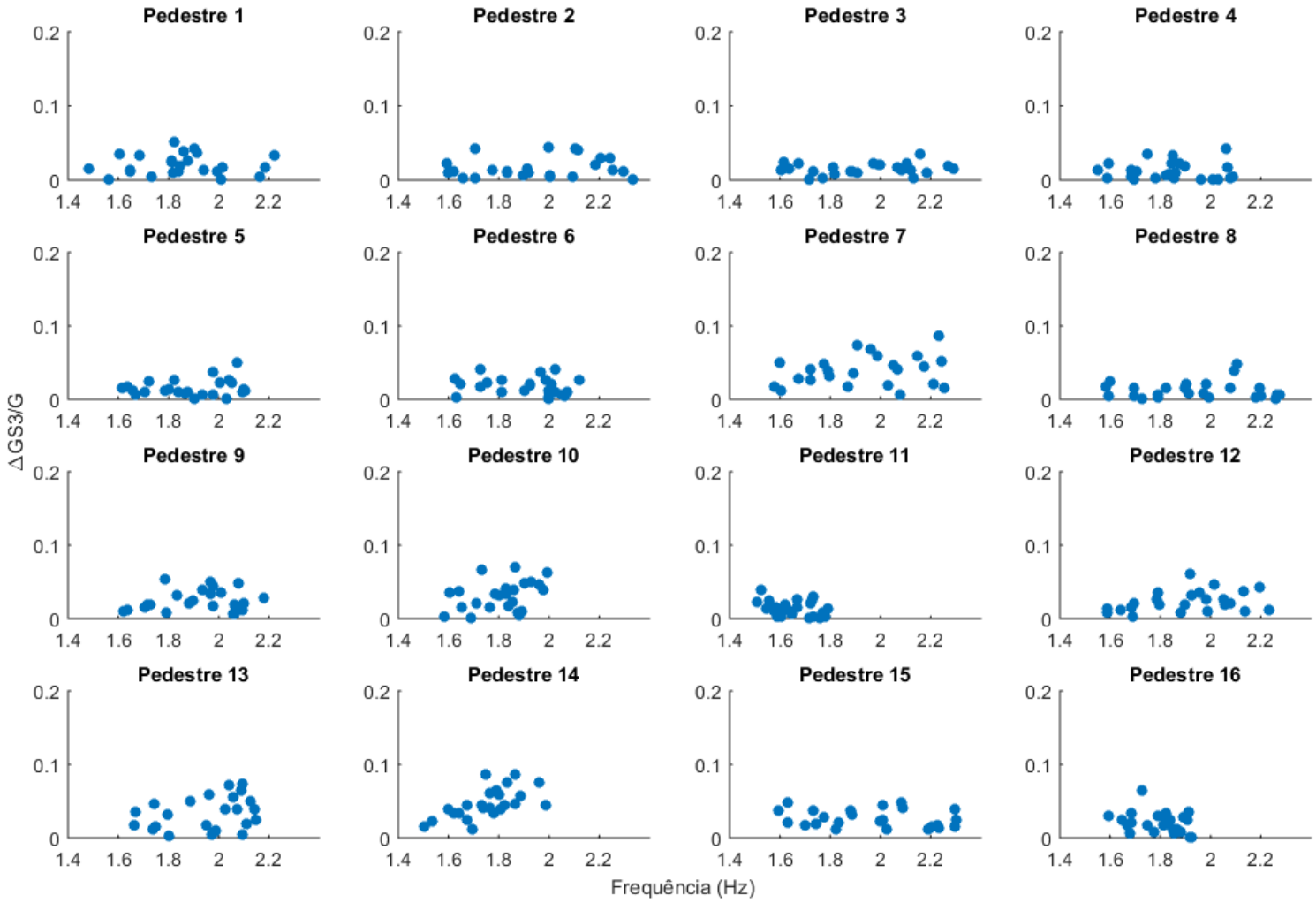


Figura B.8 – Relação entre f e $\Delta G_{S3}/G$ individualizada para cada pedestre

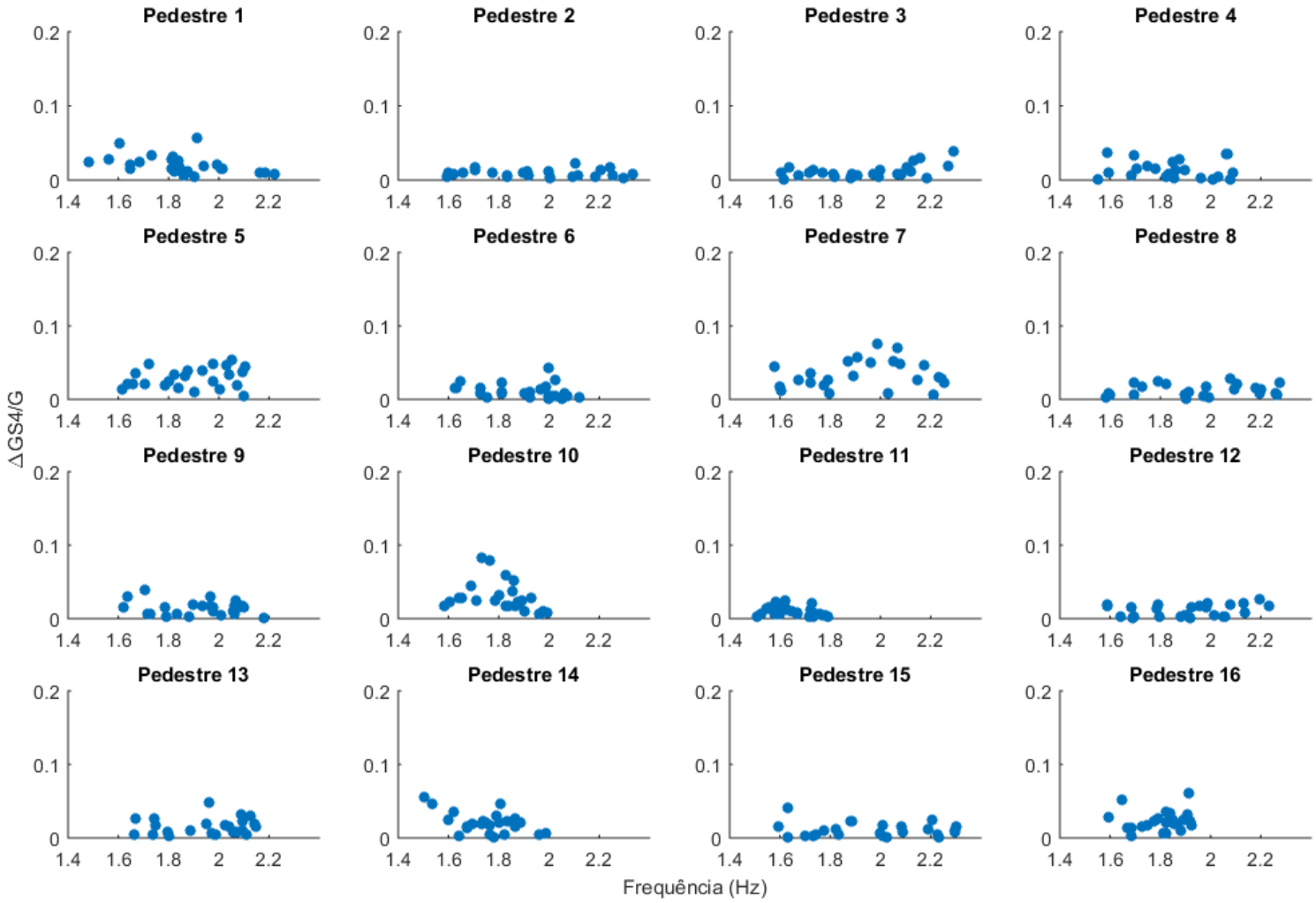


Figura B.9 – Relação entre f e $\Delta G_{S4}/G$ individualizada para cada pedestre

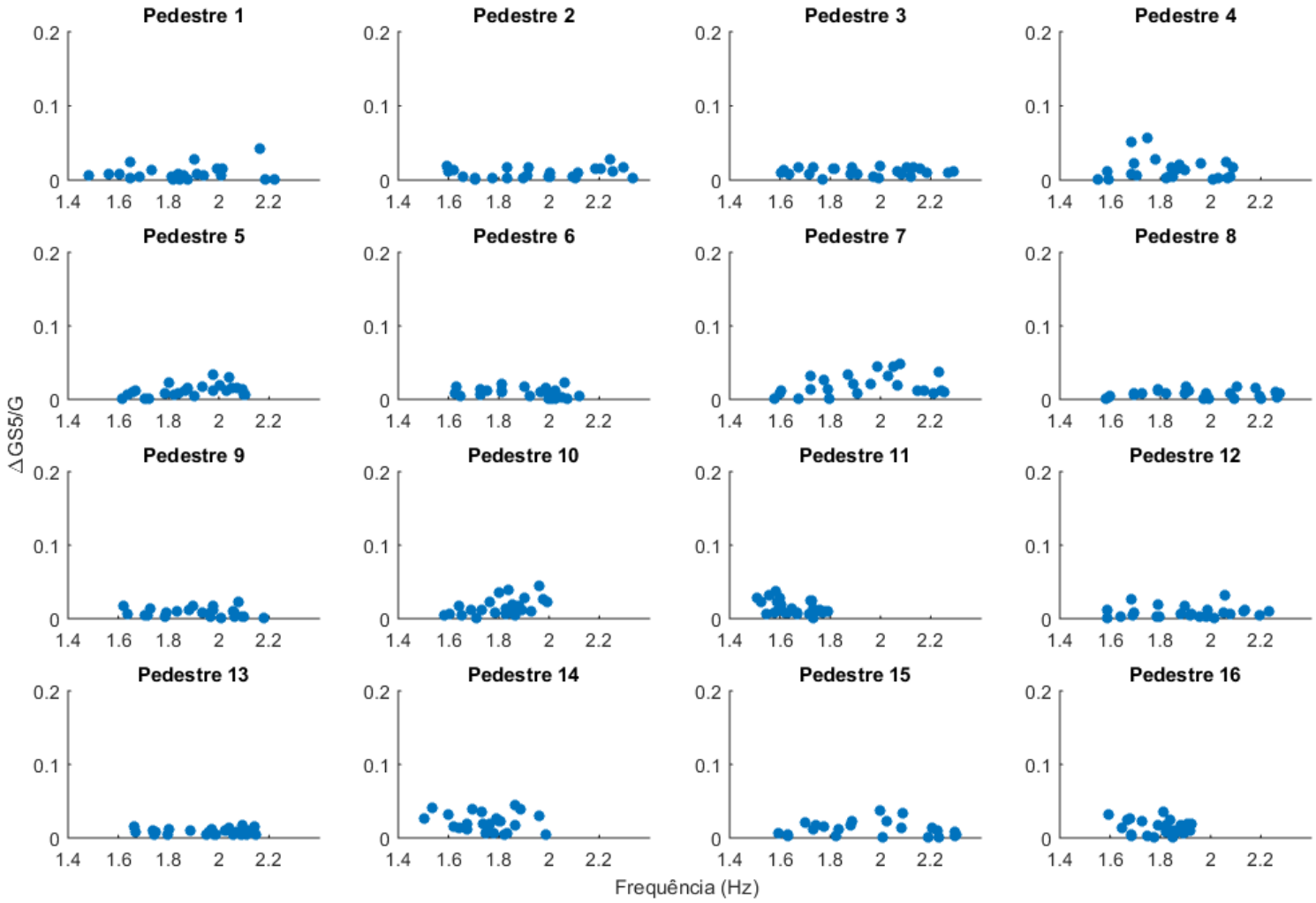


Figura B.10 – Relação entre f e $\Delta G_{S5}/G$ individualizada para cada pedestre

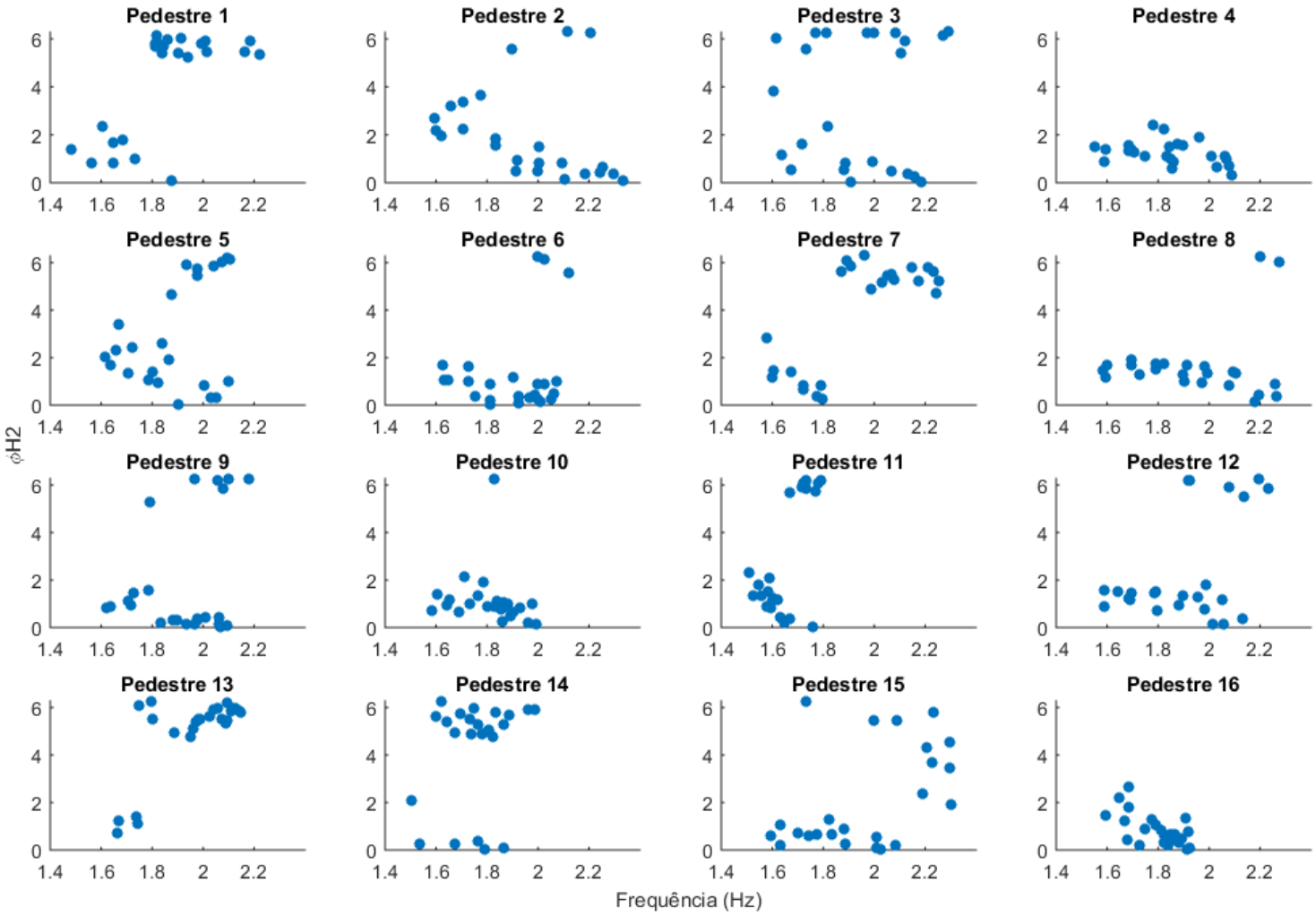


Figura B.11 – Relação entre f e φ_{H2} individualizada para cada pedestre

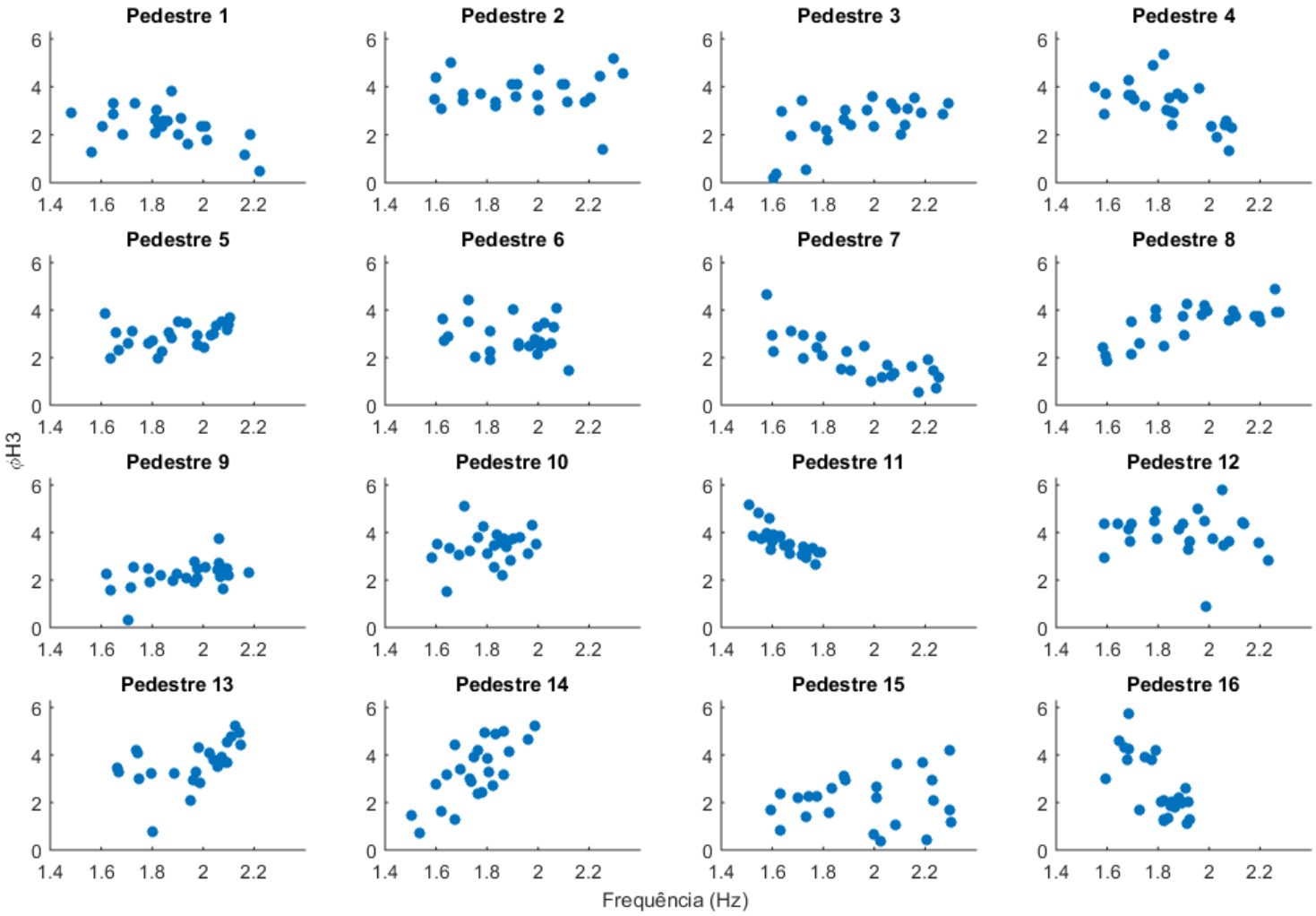


Figura B.12 – Relação entre f e φ_{H3} individualizada para cada pedestre

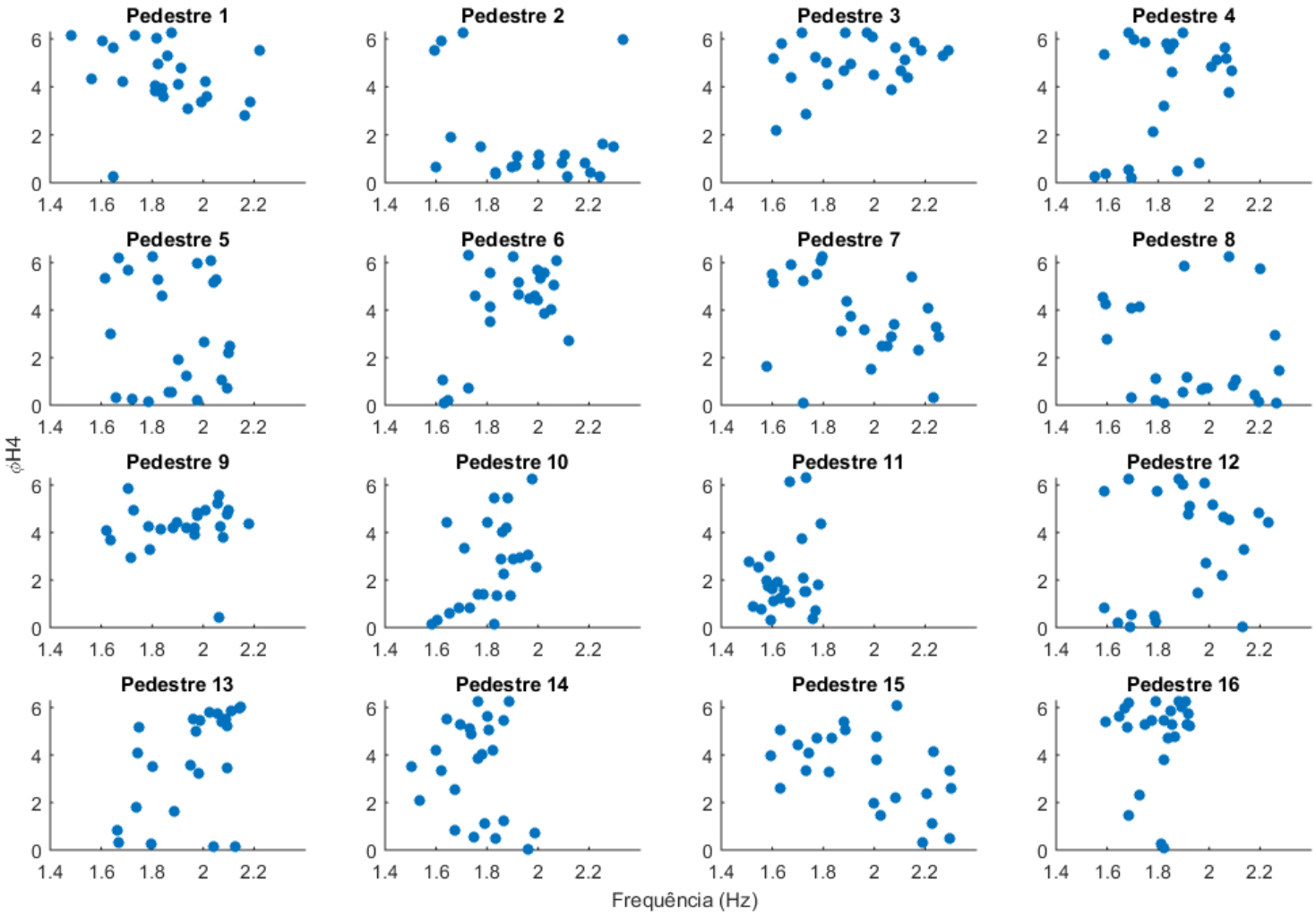


Figura B.13 – Relação entre f e φ_{H4} individualizada para cada pedestre

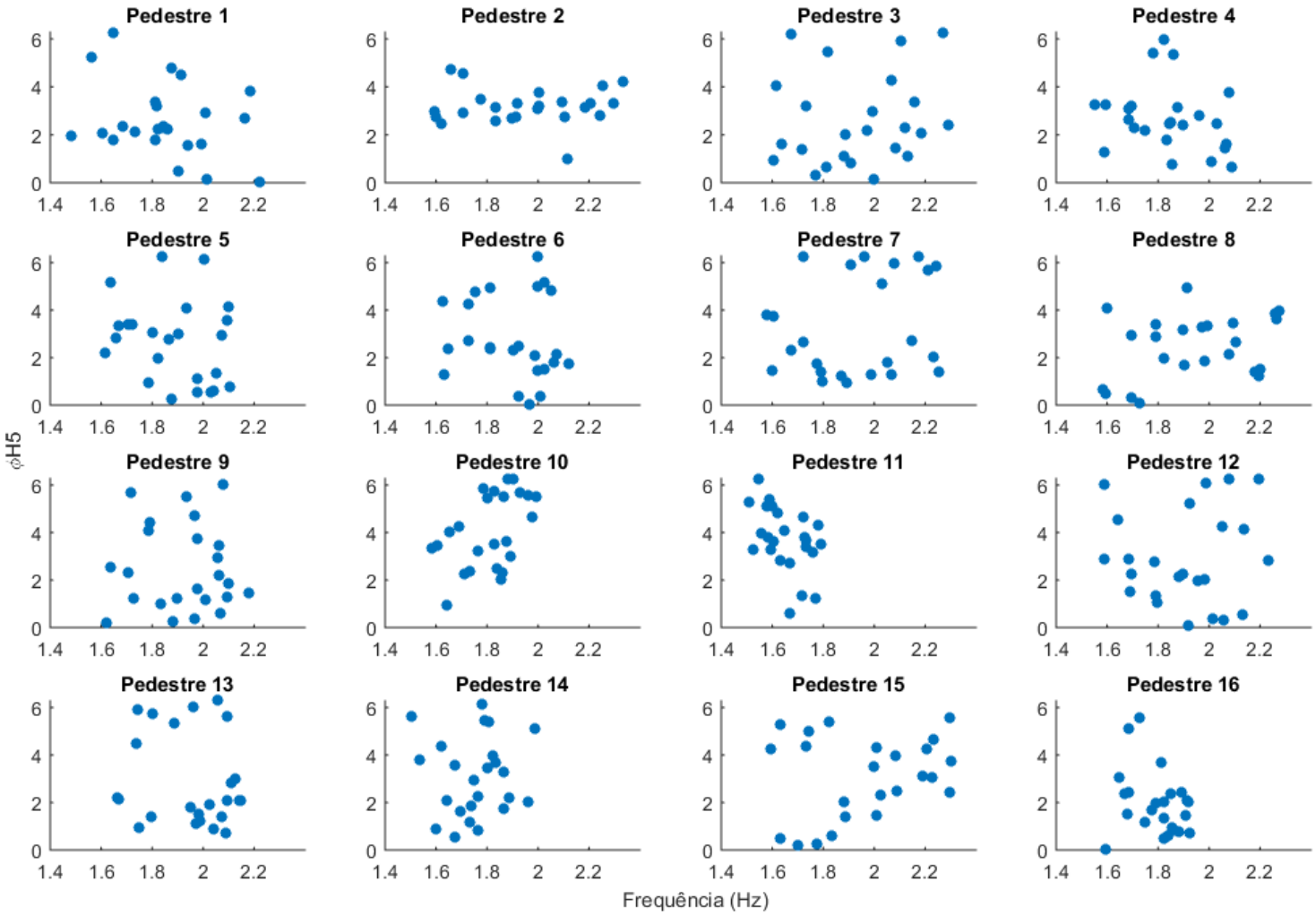


Figura B.14 – Relação entre f e φ_{H5} individualizada para cada pedestre

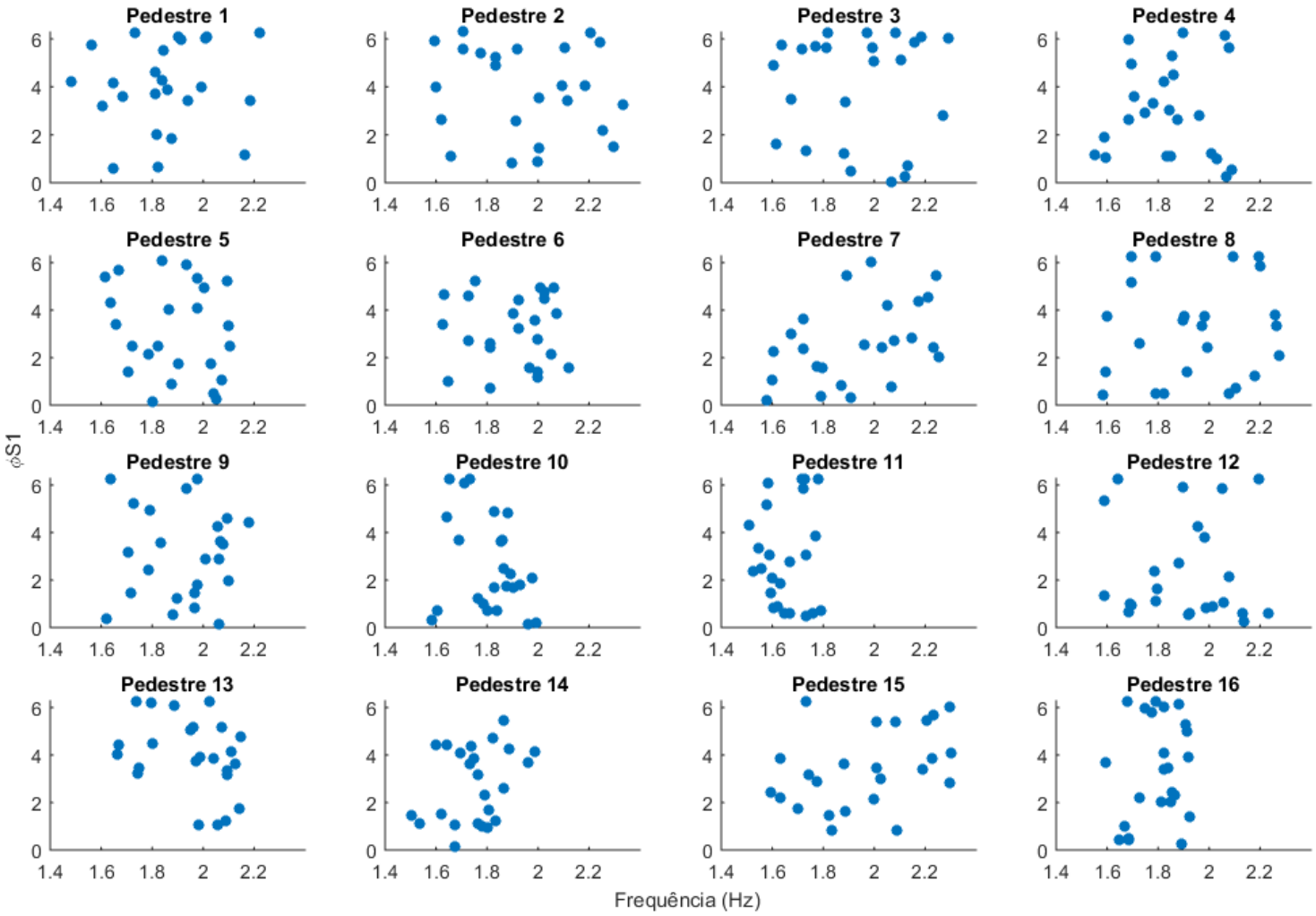


Figura B.15 – Relação entre f e φ_{S1} individualizada para cada pedestre

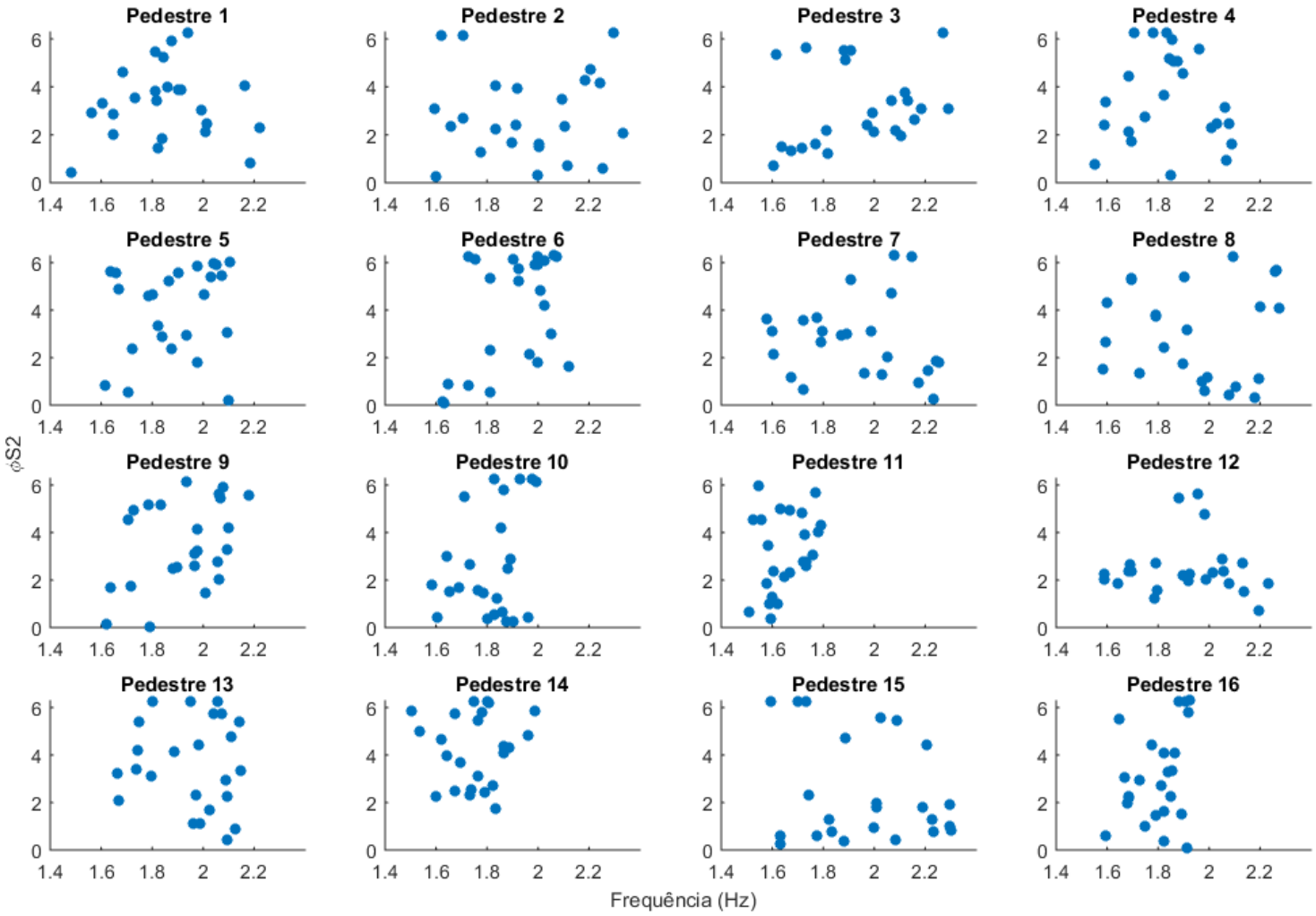


Figura B.16 – Relação entre f e φ_{S2} individualizada para cada pedestre

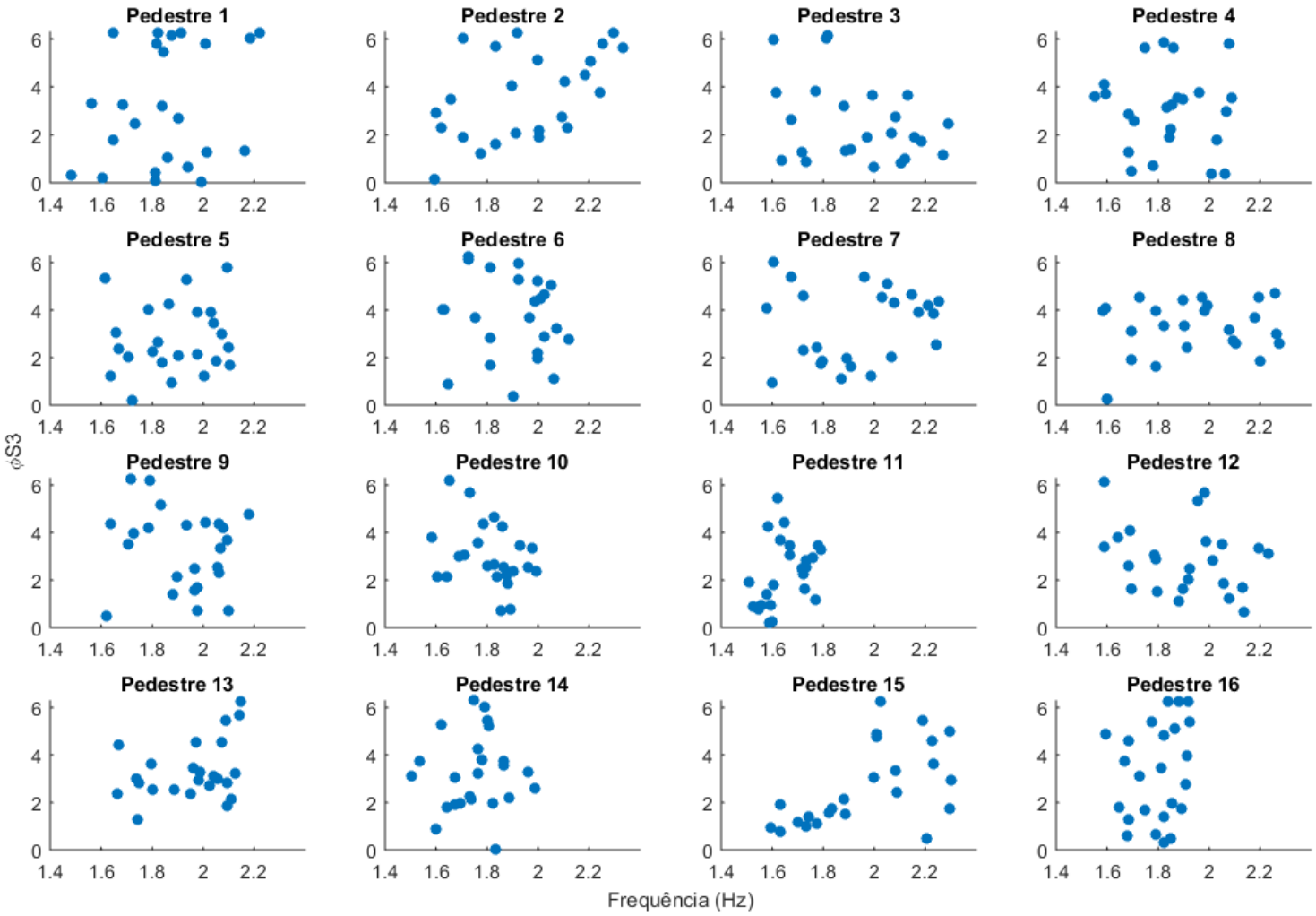


Figura B.17 – Relação entre f e φ_{S3} individualizada para cada pedestre

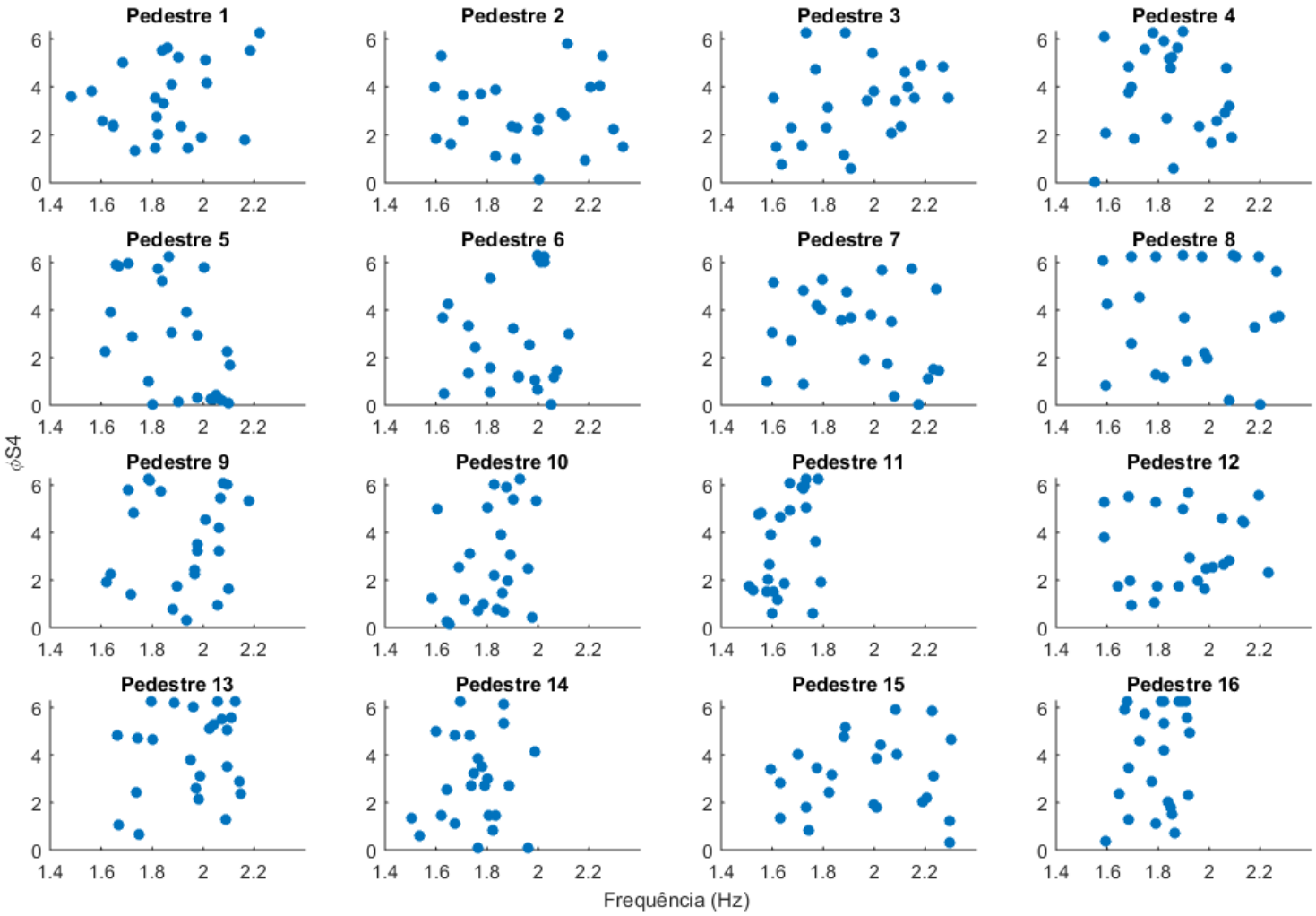


Figura B.18 – Relação entre f e φ_{S4} individualizada para cada pedestre

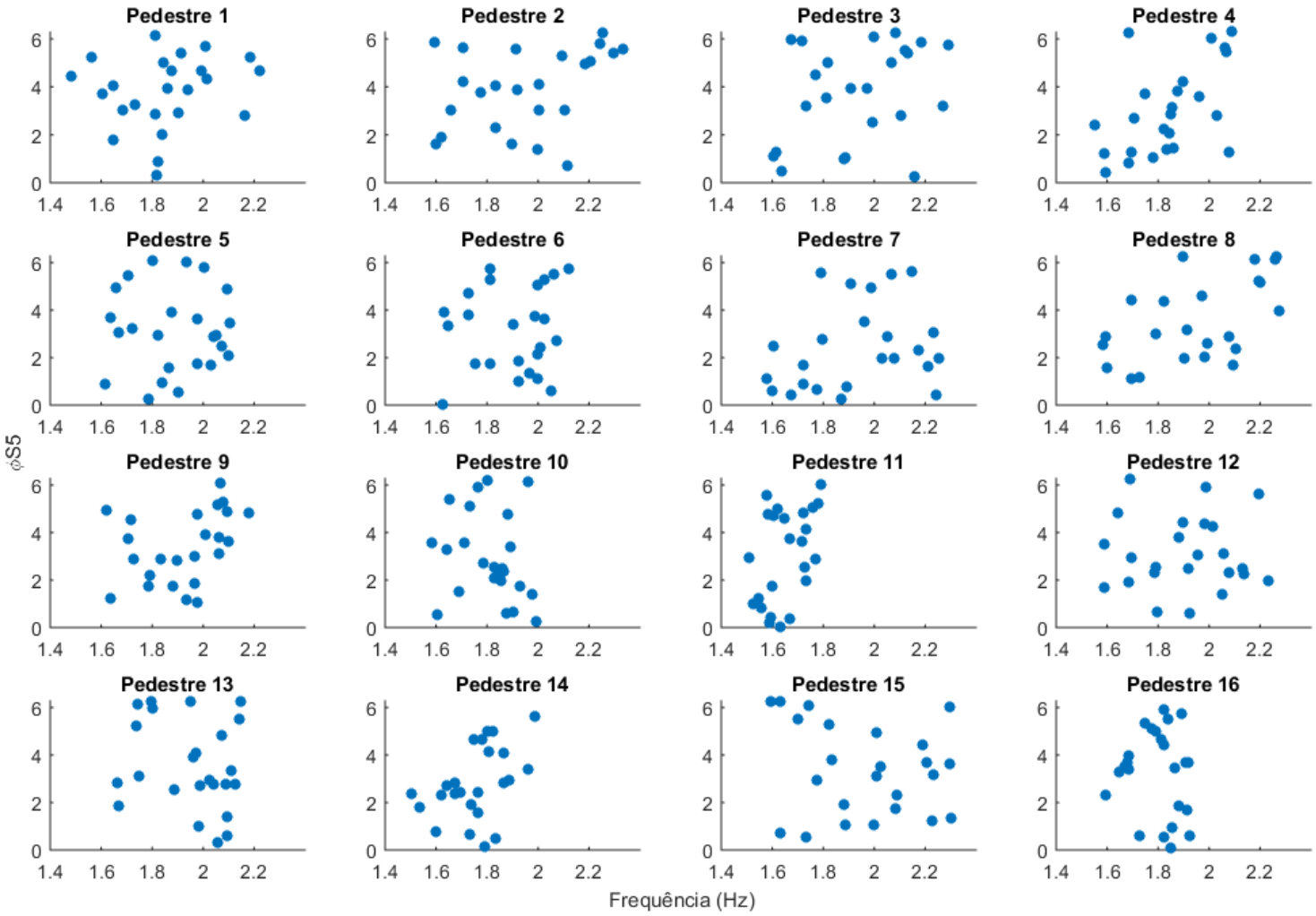


Figura B.19 – Relação entre f e φ_{S5} individualizada para cada pedestre