



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Engenharia

Jefferson Viana Aguiar

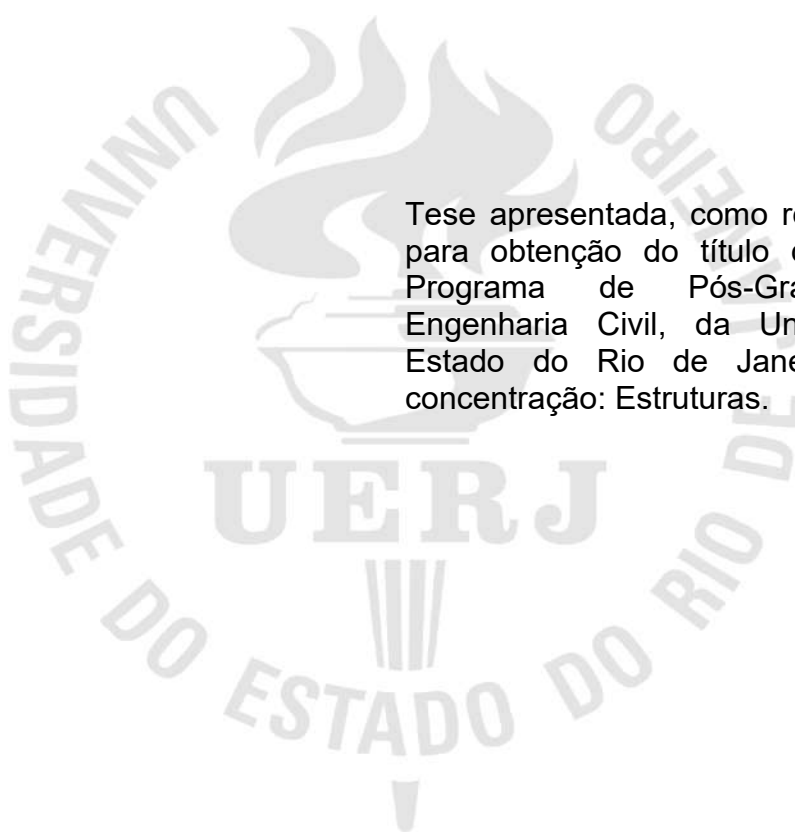
**Investigação experimental e numérica para avaliação do
comportamento estrutural dinâmico de pisos mistos (aço-concreto)
de edifícios submetidos ao caminhar de pessoas**

Rio de Janeiro

2021

Jefferson Viana Aguiar

Investigação experimental e numérica para avaliação do comportamento estrutural dinâmico de pisos mistos (aço-concreto) de edifícios submetidos ao caminhar de pessoas



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

Orientador: Prof. José Guilherme Santos da Silva, DSc.

Rio de Janeiro

2021

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

A282 Aguiar, Jefferson Viana.
Investigação experimental e numérica sobre o efeito da interação dinâmica pessoa-estrutura e análise de conforto humano de pisos de edifícios submetidos ao caminhar humano / Jefferson Viana Aguiar. – 2021.
304f.

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

1. Engenharia civil - Teses. 2. Pavimentos - Teses. 3. Análise estrutural (Engenharia) - Teses. 4. Vibração - Teses. 5. Conforto humano - Teses. 6. Método dos elementos finitos - Teses. I. Silva, José Guilherme Santos da. II. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia. III. Título.

CDU 624.016

Bibliotecária: Júlia Vieira – CRB7/6022

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

Assinatura

Data

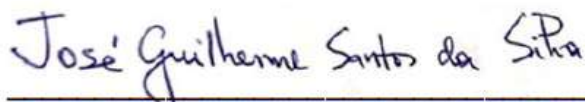
Jefferson Viana Aguiar

**Investigação experimental e numérica sobre o efeito da interação dinâmica
pessoa-estrutura e análise de conforto humano de pisos de edifícios
submetidos ao caminhar humano**

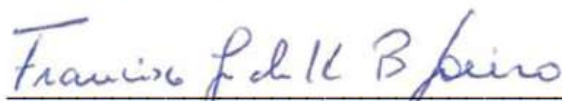
Tese apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Estruturas.

Aprovada em: 10 de dezembro de 2021.

Banca Examinadora:



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



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



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



Prof. Dr. Hermes Carvalho
Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG



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



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

Rio de Janeiro
2021

DEDICATÓRIA

A Deus e à minha família e amigos.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por me permitir chegar a este momento único.

À minha família que sempre me apoiou de todas as formas possíveis e me serviram de motivação para continuar.

Ao meu orientador, Professor José Guilherme, que prestou uma impecável orientação, sendo um amigo, motivando sempre e cobrando quando necessário. Mas, indiscutivelmente, sendo um profissional excepcional, o qual soube transmitir com leveza seu enorme conhecimento.

Aos companheiros de caserna da Marinha do Brasil que me auxiliaram e sempre me apoiaram.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PGECIV) da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), pelos ensinamentos e excelência na transmissão dos conhecimentos.

A UERJ, por toda infraestrutura e apoio fornecido, inclusive durante a Pandemia da COVID-19, sem esta Universidade não poderia ter realizado este sonho.

A todos aqueles, que embora não citados nominalmente, contribuíram direta e indiretamente para a execução deste trabalho.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ).

Se o dinheiro for a sua esperança de independência, você jamais a terá. A única segurança verdadeira consiste numa reserva de sabedoria, de experiência e de competência.

Henry Ford

RESUMO

AGUIAR, J.V. *Investigação experimental e numérica sobre o efeito da interação dinâmica pessoa-estrutura e análise de conforto humano de pisos de edifícios submetidos ao caminhar humano*. 2021. 304f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2021.

Este trabalho de pesquisa apresenta como objetivo principal o de avaliar qualitativamente e quantitativamente o efeito da interação pessoa-estrutura sobre o comportamento dinâmico de pisos, mediante o desenvolvimento de testes experimentais e modelagem numérica, considerando-se para tal o emprego de sistemas biodinâmicos associados a sistemas do tipo “massa-mola-amortecedor”, com um grau de liberdade (S1GL), objetivando representar o comportamento dinâmico das pessoas. Assim sendo, o estudo foi desenvolvido sobre o modelo estrutural de um piso misto (aço-concreto), pertencente ao projeto de um edifício composto por 12 pavimentos, existente e projetado para receber um hospital escola, localizado na cidade de Belo Horizonte/MG. O piso investigado apresenta um sistema de pilares e vigas mistas aço-concreto e lajes do tipo *steel deck*, com área total de 1300 m². Inicialmente, uma campanha de testes experimentais, correspondentes a ensaios de vibração livre e forçada, foi desenvolvida sobre o piso de interesse, referente às lajes de piso do 8º pavimento do edifício. Em paralelo, um modelo numérico em elementos finitos, via emprego do programa computacional ANSYS, foi desenvolvido levando-se em conta as características físicas e geométricas definidas em projeto, visando à calibração dos resultados das análises experimentais. Objetivando avaliar o comportamento dinâmico global do modelo estrutural, uma análise modal numérica foi realizada sobre as lajes de piso do 8º pavimento do sistema, e os resultados foram calibrados com base na resposta experimental obtida nos testes de vibração livre. Em seguida, testes experimentais de vibração forçada foram conduzidos sobre o piso misto, com base na utilização de frequências de passo distintas, além de inúmeras trajetórias adotadas para as pessoas caminhando sobre as lajes. Após a fase de calibração dos resultados experimentais, o nível de conforto humano do piso investigado foi avaliado através do desenvolvimento de um estudo paramétrico, mediante avaliação da influência das frequências de passo das pessoas, do número de pessoas caminhando e estacionárias sobre o piso, da taxa de amortecimento; e, ainda, de diferentes trajetórias das pessoas caminhando sobre a estrutura. A resposta dinâmica do piso misto foi avaliada em função dos valores dos deslocamentos e acelerações, e os resultados foram comparados com aqueles gerados via utilização de modelos matemáticos tradicionais de carregamento dinâmico (modelos de “força dura”); e, também, com os limites para vibrações excessivas recomendados em normas tradicionais de projeto visando um estudo do conforto humano da estrutura. Os resultados encontrados ao longo desta investigação apontam para reduções quantitativas importantes referentes à resposta dinâmica do piso em estudo, quando os sistemas biodinâmicos são considerados na análise dinâmica, em comparação com os resultados fornecidos pelos modelos matemáticos de “força dura”, demonstrando a relevância do efeito da interação dinâmica indivíduo-estrutura para avaliações de conforto humano.

Palavras-chave: Pisos de edifícios. Testes experimentais. Modelagem numérica. Interação dinâmica pessoa-estrutura. Vibrações excessivas. Conforto humano.

ABSTRACT

AGUIAR, Jefferson Viana. *Experimental and numerical investigation of the people-structure dynamic interaction effect and human comfort analysis of building floors subjected to human walking*. 2021. 304f. Thesis (Civil Engineering) - Faculty of Engineering, State University of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2021.

This research work aims to evaluate the effect of the people-structure interaction on the dynamic behaviour of floors, qualitatively and quantitatively, based on the development of experimental tests and numerical modelling, considering the use of biodynamic systems associated with “spring-mass-damper” systems with one degree of freedom (SDOF), in order to represent the people’s dynamic behaviour. Therefore, the study was developed considering the structural model of a steel-concrete composite floor, associated to the building project consisting of 12 floors, existing and designed to receive a teaching hospital, located in the city of Belo Horizonte/MG. The investigated floor presents a system of steel-concrete composite columns and beams, and steel deck slabs, with a total area of 1300m². Initially, experimental tests (free and forced vibration tests), were developed on the building 8th floor. On the other hand, a finite element model, developed based on the use of the ANSYS computer program, was developed taking into account the physical and geometric characteristics defined in the project, aiming to calibrating the experimental results. Aiming to evaluate the global dynamic behaviour of the structural model, a numerical modal analysis was performed on the 8th floor slabs of the system, and the results were calibrated based on the experimental response determined in the free vibration tests. Then, the experimental forced vibration tests were carried out on the composite floor, based on the use of different step frequencies, in addition to numerous trajectories adopted for the people walking on the slabs. After the experimental results calibration phase, the human comfort of the investigated floor was assessed through the development of a parametric study, by evaluating the influence of people’s step frequencies, number of people walking and stationary on the floor, structural damping, and also different trajectories of people walking on the structure. The composite floor dynamic response was evaluated based on the displacement and acceleration values, and the results were compared with those calculated using traditional dynamic loading mathematical models (“only-force models”); and with recommended limits for excessive vibrations related to the traditional design codes, aiming to study the human comfort of the structure. The results found throughout this investigation point out to relevant quantitative reductions regarding the floor dynamic response, when the biodynamic systems were considered in the dynamic analysis, when compared with the results provided by the “only-force” mathematical models, demonstrating the importance of the people-structure dynamic interaction effect for human comfort assessments.

Keywords: Building floors. Experimental tests. Numerical modelling. People-structure dynamic interaction. Excessive vibrations. Human comfort.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Coliseu, início da construção na década de 70, século I [2].	24
Figura 2 - Catedral de Milão, início da construção em 1386, arquitetura gótica [2].	25
Figura 3 - Desconforto humano devido a vibrações [7].	26
Figura 4 - Frequências naturais de partes do corpo humano (traduzido) [14].	27
Figura 5 - Tipologia básica de um sistema de piso misto de aço e concreto [15].	28
Figura 6 - Planta e seção da estrutura estudada por Setareh et al. [23].	35
Figura 7 - Capa do guia de projeto do AISC para vibrações de piso [39].	38
Figura 8 - Planta de um dos escritórios experimentados por Hanagan [4].	40
Figura 9 - Caminha humana representada no piso misto por Mello et al. [46].	41
Figura 10 - Mesa vibratória utilizada nos experimentos de sensibilidade da vibração de Han et al. [52].	43
Figura 11 - Comparação do sinal experimental com as funções semi-seno e Hanning [26].	49
Figura 12 - Comparação dos tipos de atividade SCI: força normalizada x tempo.	50
Figura 13 - Vista da plataforma de força (D), amplificadores (A) e sistema de aquisição de dados (B) / computador (C) [74].	52
Figura 14 - Modelo de interação biodinâmico para pessoas sentadas (esquerda) e para pessoas em pé (direita) [83].	54
Figura 15 - Sistema simplificado de um grau de liberdade (S1GL) de interação ser humano -estrutura [83].	54
Figura 16 - Modelo de interação pessoa-estrutura: três graus de liberdade [84].	55
Figura 17 - estrutura de teste desenvolvida por Da Silva et al. [87].	56
Figura 18 - Ilustração do modelo de carregamento proposto por Da Silva et al. [87].	57
Figura 19 - Modelo biodinâmico de um grau de liberdade (S1GL) [90].	58
Figura 20 - Modelo de um sistema acoplado pessoas-estrutura. Parâmetros do modelo das pessoas são apresentados genericamente com m_c , k_c e c_c [91].	59
Figura 21 - Ilustração do modelo numérico com a inclusão dos modelos biodinâmicos na situação de carregamento SC-5 proposta por Campista [93].	61
Figura 22 - Ilustração da instrumentação da plataforma utilizada para coleta dos dados experimentais [94].	62

Figura 23 - Modelo biodinâmico do caminhar humano sobre a passarela [95].	63
Figura 24 - Modelo massa-mola-amortecedor de uma pessoa (S1GL).	65
Figura 25 - Modelos (a e b) matemáticos representando o corpo humano utilizados por Nimenn et al. [115].	66
Figura 26 - Modelo biodinâmico de caminhada (θ_0 é o ângulo de ataque) [120].	69
Figura 27 - Modelo massa-mola, com pés em roletes [123].	70
Figura 28 - Modelo (S3GL) de Miyamori et al. [124] apud [125].	71
Figura 29 - Modelo de seis graus de liberdade (q1 a q6) investigado por Martin e Schmiedeler [126].	72
Figura 30 - Localização da edificação em construção. Google Maps [128] adaptado.	75
Figura 31 - Maquete digital da perspectiva final da fachada da edificação.	75
Figura 32 - Fotografia do estágio da obra no momento dos ensaios desta tese.	76
Figura 33 - Fotografia do estágio da obra no momento dos ensaios desta tese.	76
Figura 34 - Piso misto (aço-concreto) investigado: 8º pavimento (cotas em mm).	77
Figura 35 - Elevação corte eixos C/C1 do edifício investigado (cotas em mm).	78
Figura 36 - Dimensões e seções transversais dos perfis do Lado A (cotas em mm).	79
Figura 37 - Dimensões e seções transversais dos perfis do Lado B (cotas em mm).	80
Figura 38 - Fotografia do 8º pavimento da edificação investigada.	81
Figura 39 - Detalhe do contraventamento no 8º pavimento da edificação.	82
Figura 40 - Elemento BEAM44 [130].	85
Figura 41 - Excentricidade entre a laje e a viga.	85
Figura 42 - Elemento SHELL63 [130].	86
Figura 43 - Elemento COMBIN40 [130].	86
Figura 44 - Perspectiva 3D da malha do modelo numérico-computacional.	89
Figura 45 - Perspectiva 3D da malha do modelo numérico-computacional.	89
Figura 46 - Vista superior do modelo numérico-computacional.	90
Figura 47 - Vista 3D da malha do modelo numérico-computacional sem lajes.	91
Figura 48 - Método do decremento logarítmico [133].	93
Figura 49 - Acelerômetro PCB Piezotronics [134].	96
Figura 50 - Sistema de aquisição de dados Bruel e Kjaer.	97
Figura 51 - Pisos escolhidos para análise experimentais.	98

Figura 52 - Identificação dos pisos 1, 2 e 3.....	99
Figura 53 - Identificação dos pisos 4 e 5.....	99
Figura 54 - Pontos de instrumentação nos cinco pisos ensaiados.....	100
Figura 55 - Esquema de montagem dos ensaios típico para os pisos 1 a 3.	100
Figura 56 - Esquema de montagem dos ensaios típico para os pisos 5 e 6.	101
Figura 57 - Resposta em frequência de diferentes tipos de montagem de acelerômetros. Ferreira [127] <i>apud</i> PCB Piezotronics [134].	102
Figura 58 - Esquema de fixação dos acelerômetros.	103
Figura 59 - Etapa 1 da realização do ensaio de vibração livre: pessoa parada.	104
Figura 60 - Etapa 2 da realização do ensaio de vibração livre: salto.	104
Figura 61 - Etapa 3 da realização do ensaio de vibração livre: impacto no piso.	105
Figura 62 - Aceleração x tempo registrada pelo canal 2, exemplo de um ciclo de ensaio localizado no centro da laje - Piso 1.	106
Figura 63 - Aceleração x tempo registrada pelo canal 2, exemplo de um ciclo de ensaio localizado no centro da laje - Piso 2.	106
Figura 64 - Aceleração x tempo registrada pelo canal 2, exemplo de um ciclo de ensaio localizado no centro da laje - Piso 3.	107
Figura 65 - Aceleração x tempo registrada pelo canal 2, exemplo de um ciclo de ensaio localizado no centro da laje - Piso 4.	107
Figura 66 - Aceleração x tempo registrada pelo canal 2, exemplo de um ciclo de ensaio localizado no centro da laje - Piso 5.	108
Figura 67 - Espectros de frequências naturais da estrutura obtidos via medição experimental para impactos no centro do piso 1 - Canal 2 ($f_{01} = 5,9$ Hz; $f_{02} = 6,5$ Hz; $f_{03} = 6,9$ Hz; $f_{05} = 7,3$ Hz; $f_{09} = 9,7$ Hz).....	109
Figura 68 - Espectros de frequências naturais da estrutura obtidos via medição experimental para impactos no centro do piso 2 - Canal 2 ($f_{01} = 5,9$ Hz; $f_{02} = 6,5$ Hz; $f_{03} = 6,9$ Hz; $f_{08} = 8,0$ Hz).....	109
Figura 69 - Espectros de frequências naturais da estrutura obtidos via medição experimental para impactos no centro do piso 3 - Canal 2 ($f_{01} = 5,3$ Hz; $f_{03} = 7,1$ Hz; $f_{08} = 8,0$ Hz; $f_{07} = 8,8$ Hz).....	110
Figura 70 - Espectros de frequências naturais da estrutura obtidos via medição experimental para impactos no centro do piso 4 - Canal 2 ($f_{06} = 8,5$ Hz; $f_{11} = 11,0$ Hz).....	110

Figura 71 - Espectros de frequências naturais da estrutura obtidos via medição experimental para impactos no centro do piso 5 - Canal 2 ($f_{07} = 8,4$ Hz; $f_{09} = 10,6$ Hz; $f_{11} = 11,2$ Hz).....	111
Figura 72 - 1º modo de vibração do piso ($f_{01}=5,73$ Hz) [vista isométrica].....	115
Figura 73 - 1º modo de vibração do piso ($f_{01}=5,73$ Hz) [vista em planta].	115
Figura 74 - 2º modo de vibração do piso ($f_{02}=6,51$ Hz) [vista isométrica].....	116
Figura 75 - 2º modo de vibração do piso ($f_{02}=6,51$ Hz) [vista em planta].	116
Figura 76 - 3º modo de vibração do piso ($f_{03}=6,88$ Hz) [vista isométrica].....	116
Figura 77 - 3º modo de vibração do piso ($f_{03}=6,88$ Hz) [vista em planta].	117
Figura 78 - 4º modo de vibração do piso ($f_{04}=7,35$ Hz) [vista isométrica].....	117
Figura 79 - 4º modo de vibração do piso ($f_{04}=7,35$ Hz) [vista em planta].	117
Figura 80 - 5º modo de vibração do piso ($f_{05}=7,40$ Hz) [vista isométrica].....	118
Figura 81 - 5º modo de vibração do piso ($f_{05}=7,40$ Hz) [vista em planta].	118
Figura 82 - 6º modo de vibração do piso ($f_{06}=7,87$ Hz) [vista isométrica].....	118
Figura 83 - 6º modo de vibração do piso ($f_{06}=7,87$ Hz) [vista em planta].	119
Figura 84 - 7º modo de vibração do piso ($f_{07}=8,19$ Hz) [vista isométrica].....	119
Figura 85 - 7º modo de vibração do piso ($f_{07}=8,19$ Hz) [vista em planta].	119
Figura 86 - 8º modo de vibração do piso ($f_{08}=8,73$ Hz) [vista isométrica].....	120
Figura 87 - 8º modo de vibração do piso ($f_{08}=8,73$ Hz) [vista em planta].	120
Figura 88 - 9º modo de vibração do piso ($f_{09}=9,25$ Hz) [vista isométrica].....	120
Figura 89 - 9º modo de vibração do piso ($f_{09}=9,25$ Hz) [vista em planta].	121
Figura 90 - 10º modo de vibração do piso ($f_{10}=9,68$ Hz) [vista isométrica].....	121
Figura 91 - 10º modo de vibração do piso ($f_{10}=9,68$ Hz) [vista em planta].	121
Figura 92 - Vários modelos biodinâmicos (S1GL) acoplado ao piso.	123
Figura 93 - Frequência natural (2º Modo de Vibração) versus nº de pessoas.	125
Figura 94 - Taxa de amortecimento (2º Modo de Vibração) versus nº de pessoas.	126
Figura 95 - Massa modal (2º Modo de Vibração) versus nº de pessoas.	126
Figura 96 - Rigidez modal (2º Modo de Vibração) versus nº de pessoas.....	127
Figura 97 - Ilustração das trajetórias dos testes no Piso1 (cotas em mm).	132
Figura 98 - Ilustração da caminhada em trajetória paralela.	132
Figura 99 - Ilustração da caminhada em trajetória paralela.	133
Figura 100 - Ilustração da caminhada em trajetória diagonal.....	133
Figura 101 - Ilustração da caminhada em trajetória aleatória.....	134
Figura 102 - Acelerações do Piso 1: ritmo lento; trajetória aleatória [127].	135

Figura 103 - Acelerações do Piso 1: ritmo lento; trajetória diagonal [127].	135
Figura 104 - Acelerações do Piso 1: ritmo lento; trajetória paralela [127].	136
Figura 105 - Acelerações do Piso 1: ritmo lento; trajetória perpendicular [127].	136
Figura 106 - Acelerações do Piso 1: ritmo normal; trajetória aleatória [127].	137
Figura 107 - Acelerações do Piso 1: ritmo normal; trajetória diagonal [127].	137
Figura 108 - Acelerações do Piso 1: ritmo normal; trajetória paralela [127].	138
Figura 109 - Acelerações do Piso 1: ritmo lento; trajetória perpendicular [127].	138
Figura 110 - Acelerações do Piso 1: ritmo rápido; trajetória aleatória [127].	139
Figura 111 - Acelerações do Piso 1: ritmo rápido; trajetória diagonal [127].	139
Figura 112 - Acelerações do Piso 1: ritmo rápido; trajetória paralela [127].	140
Figura 113 - Acelerações do Piso 1: ritmo rápido; trajetória perpendicular [127]. ...	140
Figura 114 - Ilustração de indivíduo caminhando sobre uma estrutura plana [143]	144
Figura 115 - Interação entre superfície plana flexível e indivíduo caminhando.	146
Figura 116 - Esquema das trajetórias calibradas no Piso 1.	148
Figura 117 - Convergência das acelerações verticais de pico numéricas em função do número de modos de vibração nos testes de caminhada (1 pessoa andando)..	149
Figura 118 - Comparação das acelerações verticais numéricas e experimental no domínio do tempo ($f_p = 1,70$ Hz: caminhada lenta; e sentido: perpendicular).	151
Figura 119 - Comparação das acelerações verticais numéricas e experimental no domínio da frequência ($f_p = 1,70$ Hz: caminhada lenta; e sentido: perpendicular)...	151
Figura 120 - Comparação das acelerações verticais numéricas e experimental no domínio do tempo ($f_p = 1,70$ Hz: caminhada lenta; e sentido: paralela).	152
Figura 121 - Comparação das acelerações verticais numéricas e experimental no domínio da frequência ($f_p = 1,70$ Hz: caminhada lenta; e sentido: paralela).	152
Figura 122 - Comparação das acelerações verticais numéricas e experimental no domínio do tempo ($f_p = 1,70$ Hz: caminhada lenta; e sentido: diagonal).	153
Figura 123 - Comparação das acelerações verticais numéricas e experimental no domínio da frequência ($f_p = 1,70$ Hz: caminhada lenta; e sentido: diagonal).....	153
Figura 124 - Comparação das acelerações verticais numéricas e experimental no domínio do tempo ($f_p = 2,00$ Hz: caminhada normal; e sentido: perpendicular).	154
Figura 125 - Comparação das acelerações verticais numéricas e experimental no domínio da frequência ($f_p = 2,00$ Hz: caminhada normal; e sentido: perpendicular).	154

Figura 126 - Comparação das acelerações verticais numéricas e experimental no domínio do tempo ($f_p = 2,00$ Hz: caminhada normal; e sentido: paralela).	155
Figura 127 - Comparação das acelerações verticais numéricas e experimental no domínio da frequência ($f_p = 2,00$ Hz: caminhada normal; e sentido: paralela).	155
Figura 128 - Comparação das acelerações verticais numéricas e experimental no domínio do tempo ($f_p = 2,00$ Hz: caminhada normal; e sentido: diagonal).	156
Figura 129 - Comparação das acelerações verticais numéricas e experimental no domínio da frequência ($f_p = 2,00$ Hz: caminhada normal; e sentido: diagonal).	156
Figura 130 - Comparação das acelerações verticais numéricas e experimental no domínio do tempo ($f_p = 2,30$ Hz: caminhada rápida; e sentido: perpendicular).	157
Figura 131 - Comparação das acelerações verticais numéricas e experimental no domínio da frequência ($f_p = 2,30$ Hz: caminhada rápida; e sentido: perpendicular).	157
Figura 132 - Comparação das acelerações verticais numéricas e experimental no domínio do tempo ($f_p = 2,30$ Hz: caminhada rápida; e sentido: paralela).	158
Figura 133 - Comparação das acelerações verticais numéricas e experimental no domínio da frequência ($f_p = 2,30$ Hz: caminhada rápida; e sentido: paralela).	158
Figura 134 - Comparação das acelerações verticais numéricas e experimental no domínio do tempo ($f_p = 2,30$ Hz: caminhada rápida; e sentido: diagonal).	159
Figura 135 - Comparação das acelerações verticais numéricas e experimental no domínio da frequência ($f_p = 2,30$ Hz: caminhada rápida; e sentido: diagonal).	159
Figura 136 - Trajetória do estudo paramétrico no Piso 1: variação do passo.	164
Figura 137 - Influência da frequência do passo na resposta dinâmica do Piso 1: comparativo dos valores de aceleração de pico entre Exp, MC-K e MCE-K.....	165
Figura 138 - Influência da frequência do passo na resposta dinâmica do Piso 1: comparativo dos valores de aceleração RMS entre Exp, MC-K e MCE-K.	165
Figura 139 - Trajetórias do estudo paramétrico no Piso 1: variação da trajetória. ..	167
Figura 140 - Influência da trajetória da pessoa (perpendicular, paralela e aleatória) na resposta dinâmica do Piso 1: comparativo dos valores de aceleração RMS.	167
Figura 141 - Influência da trajetória da pessoa (perpendicular, paralela e aleatória) na resposta dinâmica do Piso 1: comparativo dos valores de aceleração de pico..	168
Figura 142 - Trajetórias do estudo paramétrico no Piso 1: variação nº pessoas.....	169
Figura 143 - Influência do número de pessoas (perpendicular) na resposta dinâmica do Piso 1: comparativo dos valores de aceleração de pico.....	170

Figura 144 - Influência do número de pessoas (perpendicular) na resposta dinâmica do Piso 1: comparativo dos valores de aceleração RMS.	170
Figura 145 - Influência do número de pessoas (paralela) na resposta dinâmica do Piso 1: comparativo dos valores de aceleração de pico.....	171
Figura 146 - Influência do número de pessoas (paralela) na resposta dinâmica do Piso 1: comparativo dos valores de aceleração RMS.	171
Figura 147 - Influência do número de pessoas (aleatória) na resposta dinâmica do Piso 1: comparativo dos valores de aceleração de pico.....	172
Figura 148 - Influência do número de pessoas (aleatória) na resposta dinâmica do Piso 1: comparativo dos valores de aceleração RMS.	172
Figura 149 - Trajetórias do estudo paramétrico no Piso 1: variação nº pessoas estacionárias.	174
Figura 150 - Influência de quatro pessoas estacionárias (uma pessoa andando) na resposta dinâmica do Piso 1: comparativo dos valores de aceleração de pico.....	174
Figura 151 - Influência de quatro pessoas estacionárias (uma pessoa andando) na resposta dinâmica do Piso 1: comparativo dos valores de aceleração RMS.	175
Figura 152 - Influência de quatro pessoas estacionárias (duas pessoas andando) na resposta dinâmica do Piso 1: comparativo dos valores de aceleração de pico.....	175
Figura 153 - Influência de quatro pessoas estacionárias (duas pessoas andando) na resposta dinâmica do Piso 1: comparativo dos valores de aceleração RMS.	176
Figura 154 - Influência de quatro pessoas estacionárias (três pessoas andando) na resposta dinâmica do Piso 1: comparativo dos valores de aceleração de pico.....	176
Figura 155 - Influência de quatro pessoas estacionárias (três pessoas andando) na resposta dinâmica do Piso 1: comparativo dos valores de aceleração RMS.	177
Figura 156 - Influência da taxa de amortecimento (ritmo em ressonância, direção horizontal e 3 pessoas andando) na resposta dinâmica do Piso 1: comparativo dos valores de aceleração de pico com e sem pessoas estacionárias.	178
Figura 157 - Influência da taxa de amortecimento (ritmo em ressonância, direção horizontal e 3 pessoas andando) na resposta dinâmica do Piso 1: comparativo dos valores de aceleração RMS com e sem pessoas estacionárias.....	179

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Faixa de frequência de excitação recomendada [12].	50
Tabela 2 - Valores das características dinâmicas do corpo humano: postura normal em pé sujeito a vibrações em todo o corpo. Adaptado de Nimenn et al. [115].	67
Tabela 3 - Resumo das propriedades dos materiais utilizados.	83
Tabela 4 - Resumo dos elementos do modelo numérico-computacional.	88
Tabela 5 - Características da caminhada humana [67].	88
Tabela 6 - Taxa de amortecimento e coeficientes das matrizes de massa e rigidez.	94
Tabela 7 - Especificações do acelerômetro PCB Piezotronics 393B04 [134].	96
Tabela 8 - Valores das frequências naturais experimentais do piso investigado.	112
Tabela 9 - Valores de amortecimento modais: três primeiros modos [127].	112
Tabela 10 - Classificação do índice de confiabilidade de experimentos (CV) [138].	113
Tabela 11 - Propriedades modais do piso do 8º pavimento da estrutura investigada.	115
Tabela 12 - Comparação frequências naturais numéricas versus experimentais.	122
Tabela 13 - Variação das propriedades modais do piso.	125
Tabela 14 - Total de ensaios realizados por piso.	131
Tabela 15 - Máximas acelerações encontradas para caminhada lenta no Piso 1.	135
Tabela 16 - Máximas acelerações encontradas para caminhada normal no Piso 1.	137
Tabela 17 - Máximas acelerações encontradas para caminhada rápida no Piso 1.	139
Tabela 18 - Coeficientes dinâmicos, na direção vertical, por harmônico da excitação para caminhada de pedestres.	145
Tabela 19 - Comparativo: acelerações de pico (modelo numérico) e experimentos.	150
Tabela 20 - Resumo das propriedades do biodinâmicos utilizados.	163
Tabela 21 - Comparação das acelerações no Piso 1 com limites normativos [127].	182
Tabela 22 - Comparação das acelerações numéricas no Piso 1 com limites normativos para direção perpendicular.	183
Tabela 23 - Comparação das acelerações numéricas no Piso 1 com limites normativos para direção paralela.	184

Tabela 24 - Comparação das acelerações numéricas no Piso 1 com limites normativos para direção aleatória.	185
Tabela 25 - Comparação das acelerações numéricas no Piso 1 com limites normativos para direção horizontal.	186

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISC	<i>American Institute of Steel Construction</i>
ANSYS	<i>Swanson Analysis Systems</i>
BSI	<i>British Standards Institution</i>
FFT	Transformada Rápida de Fourier (<i>Fast Fourier Transform</i>)
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
MC-AISC	Modelo biodinâmico com formulação de AISC
MC-K	Modelo biodinâmico com formulação de Kerr
MFD-AISC	Modelo de “força dura” com formulação de AISC
MFD-K	Modelo de “força dura” com formulação de Kerr
MEF	Método dos Elementos Finitos
NBR	Norma Brasileira
RMS	<i>Root Mean Square</i>
SCI	<i>The Steel Construction Institute</i>
SVGL	Sistema com Vários Graus de Liberdade
S1GL	Sistema com um Grau de Liberdade
S2GL	Sistema com dois Graus de Liberdade
S3GL	Sistema com três Graus de Liberdade

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área da seção transversal
a_p	Aceleração de pico
$a_{p,i}/g$	Razão entre a aceleração de pico e a aceleração da gravidade associada ao $i^{\text{ésimo}}$ o harmônico
CD	Coeficiente de defasagem
cm	Centímetro
E	Módulo de elasticidade
e	Excentricidade entre laje e viga
E_a	Módulo de elasticidade da alvenaria
E_c	Módulo de elasticidade do concreto
E_s	Módulo de elasticidade do aço
f_{oi}	Frequência natural correspondente ao $i^{\text{ésimo}}$ modo de vibração
f_{ck}	Resistência característica do concreto
f_n	Frequência natural da estrutura
f_p	Frequência do passo da atividade
f_y	Resistência característica de escoamento
F(t)	Força representativa da atividade humana ao longo do tempo
F(t)/Q	Força normalizada em relação ao peso de uma pessoa
g	Aceleração da gravidade
GPa	Gigapascal (10^9 Pascal)
h	Hora
Hz	Hertz
kg	Quilograma (10^3 gramas)
kN	Quilonewtons (10^3 Newtons)
m	Metro
m^3	Metro cúbico
mm	Milímetros
$m/s^{1,75}$	Metro por segundo elevado a 1,75 (um vírgula setenta e cinco)
m/s^2	Metro por segundo ao quadrado
MPa	Mega Pascal (10^6 Pascal)

N	Newton
P	Peso do indivíduo
psf	Libra força por pé ao quadrado (<i>pounds per square foot</i>)
RMS	Valor quadrático médio (<i>root mean square</i>)
rmq	<i>Root mean quad</i>
s	Segundo
t	Tempo
T	Período da atividade
VDV	Valor de dose de vibração (<i>vibration dose value</i>)
°C	Grau Celsius
α_i	$i^{\text{ésimo}}$ harmônico da força de excitação
γ_a	Peso específico da alvenaria
γ_c	Peso específico do concreto
γ_s	Peso específico do aço
ξ	Taxa de amortecimento estrutural
π	Pi: constante circular ($\approx 3,14$)
ν	Coeficiente de Poisson

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	24
1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	32
1.1 Considerações iniciais	32
1.2 Modelagem numérica de estruturas submetidos a vibrações	32
1.3 Avaliação dos níveis de vibração e do conforto humano	36
1.4 Métodos de mitigação de vibrações em sistemas estruturais	45
1.5 Modelo de carregamento dinâmico: força dura (only force)	47
1.6 Modelos de carregamento biodinâmico: interação ser humano-estrutura	52
1.7 Observações finais do capítulo	63
2 INTERAÇÃO DINÂMICA INDIVÍDUO-ESTRUTURA	64
2.1 Considerações iniciais	64
2.2 Sistemas com um grau de liberdade (S1GL)	66
2.3 Sistemas com dois graus de liberdade (S2GL)	68
2.4 Sistemas com mais de três graus de liberdade (SVGL)	71
2.5 Observações finais do capítulo	73
3 MODELO ESTRUTURAL INVESTIGADO	74
3.1 Considerações iniciais	74
3.2 Apresentação do modelo estrutural investigado	74
3.3 Propriedades físicas e geométricas dos elementos estruturais	81
3.4 Resumo das características relevantes	83
3.5 Observações finais do capítulo	83
4 MODELAGEM NUMÉRICA VIA MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	84
4.1 Considerações iniciais	84
4.2 Descrição dos elementos finitos utilizados	84
4.3 Hipóteses simplificadoras	87
4.4 Modelagem em elementos finitos	87
4.5 Modelagem do amortecimento da estrutura (Modelo de Rayleigh)	91
4.6 Observações finais do capítulo	94
5 METODOLOGIA EXPERIMENTAL E ENSAIO DE VIBRAÇÃO LIVRE	95
5.1 Considerações iniciais	95
5.2 Equipamentos utilizados nos testes experimentais	95

5.2.1 Acelerômetros PCB Piezotronics 393B04	95
5.2.2 Sistema de aquisição de dados.....	97
5.3 Projeto de monitoramento experimental.....	97
5.4 Fixação dos acelerômetros	101
5.5 Ensaio de vibração livre.....	103
5.5.1 Metodologia realizada	103
5.5.2 Determinação das frequências naturais e taxas de amortecimento	105
5.6 Considerações finais do capítulo.....	113
6 ANÁLISE MODAL NUMÉRICA	114
6.1 Considerações iniciais.....	114
6.2 Análise Modal: estrutura vazia e correlação com os resultados experimentais.....	114
6.3 Análise Modal: estrutura carregada com emprego de modelos biodinâmicos...	123
6.4 Observações finais do capítulo	128
7 TESTES EXPERIMENTAIS DE VIBRAÇÃO FORÇADA	130
7.1 Considerações iniciais.....	130
7.2 Metodologia de ensaio e testes de caminhada executados	130
7.3 Caminhada lenta ($f_p = 1,7$ Hz) - Piso 1	134
7.4 Caminhada normal ($f_p = 2,0$ Hz) - Piso 1	137
7.5 Caminhada rápida ($f_p = 2,3$ Hz) - Piso 1	139
7.6 Observações finais do capítulo	140
8 CALIBRAÇÃO DOS TESTES EXPERIMENTAIS DE VIBRAÇÃO FORÇADA...	142
8.1 Considerações iniciais.....	142
8.2 Modelagem do caminhar de pessoas sobre pisos	142
8.3 Calibração da resposta estrutural experimental	147
8.4 Observações finais do capítulo	161
9 ANÁLISE PARAMÉTRICA DA RESPOSTA DINÂMICA.....	162
9.1 Considerações iniciais.....	162
9.2 Descrição da metodologia do estudo paramétrico	162
9.3 Influência da frequência do passo.....	163
9.4 Avaliação da trajetória da caminhada	166
9.5 Efeito da variação do número de pessoas caminhando	168
9.6 Análise da influência de pessoas estacionárias	173
9.7 Influência da taxa de amortecimento.....	177
9.8 Observações finais do capítulo	180

10 AVALIAÇÃO DO CONFORTO HUMANO	181
10.1 Considerações iniciais.....	181
10.2 Análise das acelerações de pico experimentais e numéricas	182
10.3 Observações finais do capítulo	188
11 CONSIDERAÇÕES FINAIS	189
11.1 Considerações iniciais do capítulo	189
11.2 Calibração das frequências naturais e modos de vibração	190
11.3 Acelerações de pico experimentais.....	190
11.4 Calibração das acelerações de pico.....	191
11.5 Avaliação paramétrica da resposta dinâmica do piso investigado	192
11.6 Avaliação do conforto humano	194
11.7 Considerações gerais sobre o efeito da interação dinâmica pessoa-estrutura	196
11.8 Sugestões para trabalhos futuros.....	196
REFERÊNCIAS.....	198
ANEXO A - RESPOSTAS DINÂMICAS DE TODOS OS ENSAIOS EXPERIMENTAIS	
.....	211
A.1 - Ensaio de vibração livre [127].....	211
A.2 - Ensaio de vibração forçada [127].....	216
ANEXO B - PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS E MECÂNICAS DOS PERFIS DAS	
VIGAS E PILARES DO 8º PAVIMENTO	276
ANEXO C - INSTRUÇÕES NORMATIVAS E DE PROJETO	287
C.1 Introdução.....	287
C.2 Norma brasileira NBR 8.800 (2008).....	287
C.3 Norma brasileira NBR 6118 (2014).....	288
C.4 Norma ISO 10.137 (2007).....	290
C.5 Norma inglesa BS 6.472-1 (2008)	296
C.6 Guia do <i>The Steel Construction Institute</i> (SCI, 2009).....	300
C.7 Guia prático do <i>American Institute of Steel Construction</i> (AISC, 2016).....	300

INTRODUÇÃO

A formulação relativa aos princípios da teoria da vibração, que é aplicada até os dias atuais, foi publicada pelo Lord Rayleigh no seu tratado intitulado “Theory of Sound” em 1877. Notável, entre as muitas contribuições de Rayleigh, é o método de se encontrar a frequência fundamental de vibração em um sistema conservador por meio do uso do princípio da conservação de energia, agora conhecido como método de Rayleigh. Nesse trabalho também foi introduzido o conceito fundamental de oscilação de um sistema linear de uma configuração de equilíbrio e mostrou a existência de modos de vibração associados a frequências naturais para sistemas discretos e sistemas contínuos [1].

A concepção estrutural, antes da chegada e popularização dos computadores e de materiais mais eficientes, ficava limitada a pequenos vãos e elevada rigidez, pois eram utilizadas peças robustas de diferentes materiais (madeira, concreto, aço, entre outros) em seus projetos estruturais. Essa limitação na fase de projeto estrutural proporcionava estruturas com elevadas frequências naturais que, por sua vez, resultava em respostas dinâmicas extremamente baixas do sistema estrutural quando submetido a carregamentos dinâmicos. Logo, tal situação tornava desnecessário um estudo aprofundado sobre as vibrações das estruturas em geral. As Figuras 1 e 2 apresentam exemplos de estruturas da Idade Antiga e da Idade Média, respectivamente.



Figura 1 - Coliseu, início da construção na década de 70, século I [2].



Figura 2 - Catedral de Milão, início da construção em 1386, arquitetura gótica [2].

Entretanto, nos dias atuais, com o advento de materiais mais leves e de alta resistência, o aumento do conhecimento das propriedades dos materiais, o aprimoramento dos processos de projeto estrutural devido ao uso de computadores e softwares cada vez mais poderosos e a modernização de técnicas construtivas, tornou-se possível e comum a execução de projetos arrojados com estruturas mais esbeltas e a utilização de grandes vãos livres.

Em outras palavras, o recente avanço computacional e sua progressiva popularização tornou indispensável à análise de estruturas por meio da sua modelagem via Método dos Elementos Finitos (MEF). Dessa forma, utilizando-se dos recursos mais recentes para o projetista conciliar os anseios arquitetônicos e econômicos dos projetos atuais, os sistemas estruturais tornaram-se cada vez mais esbeltos e flexíveis.

Em relação aos pisos ou lajes de piso, esta flexibilidade ocorre devido ao uso de vãos livres maiores, além de menor rigidez e maior massa, tendo como consequência um menor amortecimento estrutural inerente [3]. Além disso, vãos maiores, aliados à tendência arquitetônica atual em edifícios de substituir as paredes internas por divisórias desmontáveis, têm contribuído significativamente para redução do amortecimento global presente em pisos segundo Hanagan [4].

Alia-se a essas questões a multifuncionalidade que o mercado tem exigido das edificações atualmente, no qual se tem construções destinadas a residências,

escritórios, academias, academias de “Crossfit” e, em muitos casos, todos esses tipos de ocupação reunidos em um mesmo edifício, especialmente nos grandes centros urbanos onde a disputa por espaço é assaz acirrada. Some-se a isto o fato que a recente Pandemia da COVID-19 impossibilitou as pessoas de frequentarem as academias de ginástica, devido as medidas de isolamento, sendo necessário a realização exercícios dentro de casa, tais como: caminhada, musculação, aeróbica, entre outras atividades. A prática de atividade física em casa no período da Pandemia foi estimulada pela mídia tradicional e por órgãos governamentais [5].

Diante de todo o exposto, a combinação de vãos maiores, baixo amortecimento, alta flexibilidade e carregamentos dinâmicos de alto impacto têm deixado os pisos das estruturas mais susceptíveis a vibrações excessivas oriundas, principalmente, de atividades humanas, principalmente pisos mistos aço-concreto, tais como: caminhada, saltos, dança, ginástica rítmica, entre outras, podendo gerar perturbações ao usuário no que tange ao conforto humano.

A norma ISO 10.137 [6] dispõe que vibrações perceptíveis e desconfortáveis têm sido observadas principalmente em pisos com vãos entre 3 a 20 metros. Um exemplo típico de desconforto humano em relação a vibrações ocorre quando a atividade de uma pessoa perturba outra em um cômodo próximo ou no mesmo cômodo da atividade, conforme exemplificado na Figura 3.

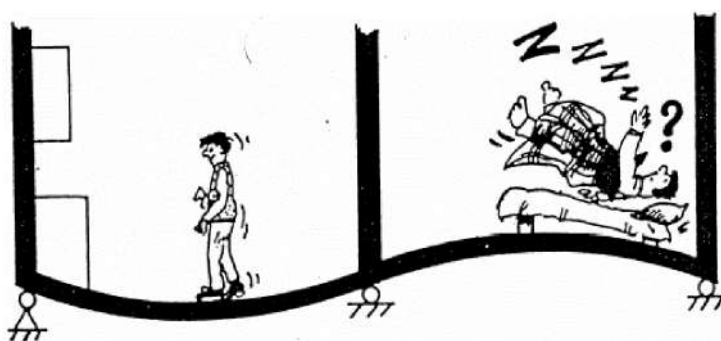


Figura 3 - Desconforto humano devido a vibrações [7].

As vibrações mais percebidas pelos humanos, segundo Murray et al. [8], encontram-se na entre as frequências de 4 e 8 Hz. Isso ocorre em virtude dos órgãos internos humanos (fígado, rins, bexiga, entre outros) da região pélvica possuírem frequências naturais neste intervalo, de acordo com Murray [9] e Varela [10], conforme ilustrado na Figura 4. Por outro lado, a maioria dos sistemas estruturais de pisos projetados atualmente se encontra nesta faixa de frequência, o que os tornam mais

susceptíveis ao fenômeno da ressonância e, no caso de pisos, principalmente proveniente de atividades humanas, que possuem harmônicos das frequências de excitações na nesta mesma faixa de frequência. Tal efeito potencializa os efeitos das vibrações nos pisos e, conseqüentemente, pode causar mal-estar e desconforto aos ocupantes do piso.

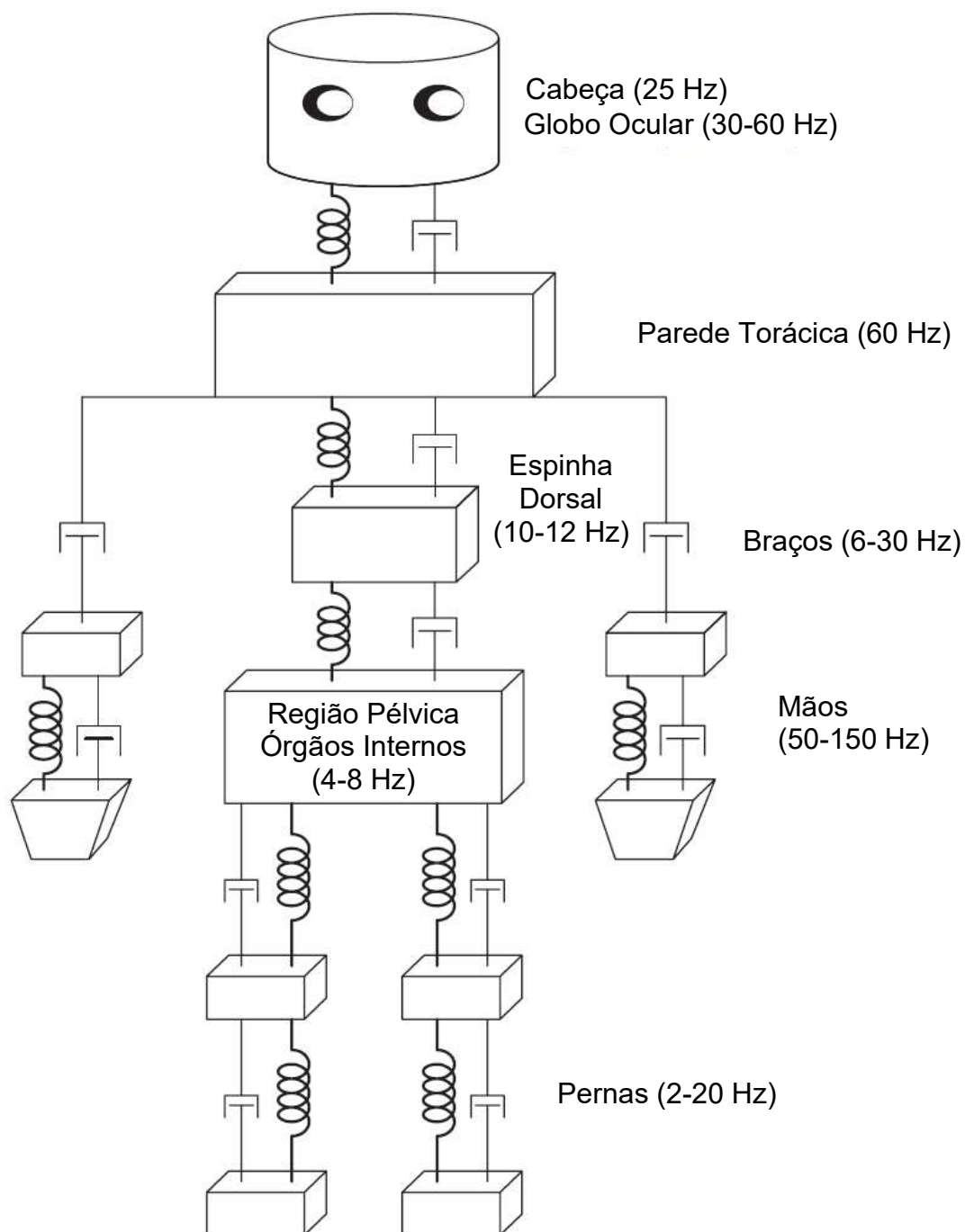


Figura 4 - Frequências naturais de partes do corpo humano (traduzido) [14].

Este trabalho de pesquisa é desenvolvido em torno de pisos mistos de aço-concreto, com utilização de laje mista do tipo “*steel deck*”. Dentre as vantagens da utilização deste tipo de construção, pode-se citar, principalmente, o fato de cada um dos materiais, aço e concreto, trabalharem bem à tração e à compressão, respectivamente, situação em que se obtém o melhor desempenho de ambos os materiais estruturais. Tradicionalmente, pisos mistos de aço e concreto são compostos por vigas metálicas, laje de concreto (ou mista de aço e concreto) e conectores de cisalhamento que são inseridos entre a viga e a laje, objetivando transferir o fluxo de cisalhamento que se desenvolve na interface entre a laje e o perfil de aço, garantindo o trabalho em conjunto de ambos os materiais [15].

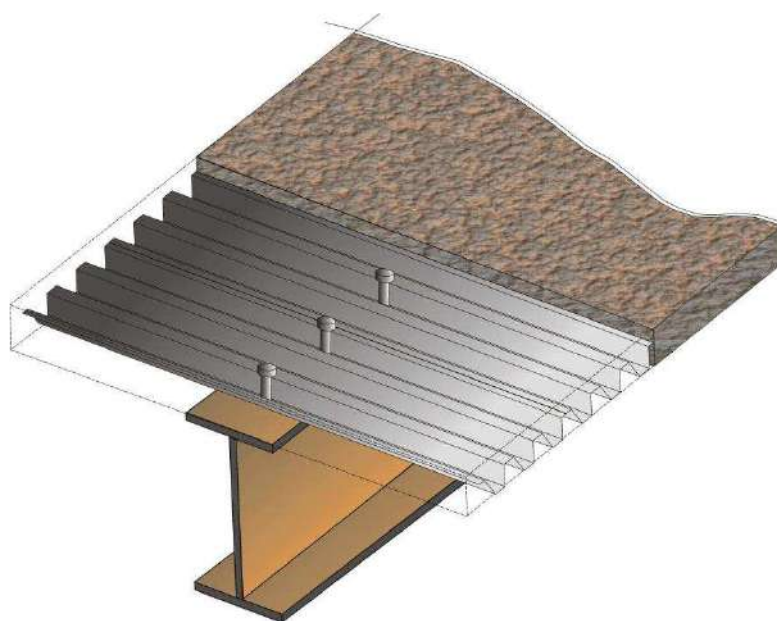


Figura 5 - Tipologia básica de um sistema de piso misto de aço e concreto [15].

Motivação

A tendência recente dos projetos arquitetônicos por maiores vãos livres e utilização de divisórias leves nas edificações, associada a um avanço tecnológico crescente da engenharia estrutural, dos processos construtivos e, ainda, do emprego de novos materiais, representam fatores relevantes que têm colaborado de maneira para que os sistemas estruturais de pisos tenham se tornado cada vez mais leves e esbeltos; e, portanto, com níveis de vibrações importantes que podem vir a ocasionar

o desconforto dos usuários e até mesmo riscos à segurança estrutural, em casos extremos. Diante do exposto, os projetistas de estruturas têm sido motivados ao estudo e desenvolvimento de avaliações estruturais mais apuradas e precisas, objetivando o atendimento dos estados limites de utilização, principalmente no que se refere ao conforto humano das pessoas, buscando evitar problemas estruturais decorrentes de vibrações excessivas, minimizando a sensação de desconforto dos usuários. Assim sendo, verifica-se a relevância e atualidade do tema de pesquisa em estudo e, inclusive, inúmeros trabalhos científicos têm sido desenvolvidos até então. Desta maneira, uma das principais motivações para o desenvolvimento desta tese de doutorado é a possibilidade de previsão da resposta estrutural dinâmica e, bem como, a avaliação do conforto humano de pisos mistos (aço-concreto), de maneira mais eficiente e realista, além de verificar a baixa taxa de amortecimento para pisos mistos por ocasião de pisos sem acabamentos e divisórias.

Objetivos

Este trabalho de pesquisa apresenta como objetivo principal o de avaliar o efeito da interação dinâmica indivíduo-estrutura, qualitativamente e quantitativamente, sobre o comportamento estrutural de pisos de edifícios, mediante o desenvolvimento de testes experimentais e modelagem numérica. Deste modo, ao longo do estudo serão empregados modelos biodinâmicos associados a sistemas do tipo “massa-mola-amortecedor”, com um grau de liberdade (S1GL), de maneira a representar o comportamento dinâmico das pessoas. Este trabalho de pesquisa contribui para o avanço científico referente ao desenvolvimento e implementação de estratégias para a monitoração experimental dinâmica de estruturas, além da modelagem numérica e avaliação do efeito da interação dinâmica pessoa-estrutura sobre a resposta estrutural de pisos de edificações. Assim sendo, o trabalho de pesquisa foi desenvolvido sobre o modelo estrutural de um piso misto (aço-concreto), pertencente ao projeto de um edifício composto por 12 pavimentos, existente e projetado para receber um hospital escola, localizado na cidade de Belo Horizonte/MG, Brasil. O piso apresenta um sistema de pilares e vigas mistas aço-concreto e lajes do tipo steel deck, com área total de 1300m². De acordo com os objetivos do trabalho, primeiramente, uma

campanha de testes experimentais (ensaios de vibração livre e forçada), foi desenvolvida sobre o piso de interesse, referente às lajes de piso do 8º pavimento do edifício. Paralelamente, um modelo numérico em elementos finitos, via emprego do programa computacional, foi desenvolvido levando-se em conta as características físicas e geométricas definidas em projeto, visando à calibração dos resultados das análises experimentais. Após a fase de calibração da resposta experimental (vibração livre e forçada), o comportamento dinâmico do piso foi analisado, via estudo paramétrico, contemplando grandezas relevantes para o projeto (interação dinâmica pessoa-estrutura; características dinâmicas dos indivíduos; modelagem matemática do caminhar; trajetórias das pessoas; frequências de passo; taxas de amortecimento). Finalmente, ressalta-se que um dos objetivos deste trabalho, também, é o de investigar os níveis de conforto humano do piso, de modo a comparar os valores da resposta dinâmica (deslocamentos e acelerações) com os limites propostos por normas de projeto.

Estruturação da Tese

O presente capítulo apresentou a motivação para o desenvolvimento deste trabalho, o seu objetivo e uma breve descrição do conteúdo do presente trabalho.

No primeiro capítulo, faz-se uma breve introdução dos temas relevantes abordados nesta Tese e apresenta fundamentos da metodologia utilizada para modelagem numérico-computacional de estruturas, avaliação dos níveis de desconforto humano devido a vibrações, métodos de mitigação de vibrações excessivas, metodologias e modelos matemáticos de carregamento considerando “força dura” (only force model), e a modelagem da interação dinâmica indivíduo-estrutura proveniente do caminhar de pessoas propostos por vários autores.

No segundo capítulo, é feito um aprofundamento no tema da interação dinâmica indivíduo-estrutura, onde é apresentado a modelagem do caminhar humano por meios das apresentações dos diversos modelos propostos na literatura.

No terceiro capítulo, apresenta-se o modelo estrutural investigado no presente trabalho para a realização das análises dinâmicas, descrevendo suas características físicas e geométricas.

No quarto capítulo, apresenta-se o modelo numérico-computacional tridimensional que representa da forma mais real possível, o comportamento do sistema estrutural estudado, baseado nas propriedades apresentadas no capítulo três. No modelo numérico desenvolvido são empregadas técnicas usuais de discretização, via método dos elementos finitos (MEF).

No quinto capítulo, são detalhados os equipamentos e softwares utilizados nos testes experimentais realizados do piso investigado por meio de vibrações livre e forçada e apresentados a metodologia utilizada nos experimentos e os resultados experimentais obtidos através dos ensaios de vibração livre nas lajes do 8º pavimento do edifício estudado, de modo a se determinar os autovalores (frequências naturais) e autovetores (modos de vibração) da estrutura.

O sexto capítulo apresenta os resultados das análises de vibração livre do modelo numérico-computacional desenvolvido via modelo em elementos finitos. Este modelo foi calibrado com base nos resultados experimentais apresentados no capítulo anterior. Além disso foi realizado um estudo, após verificada a calibração, das propriedades dinâmicas da estrutura quando carregada e quando vazia, por meio da adição de modelos biodinâmicos sobre o piso que representem as pessoas.

O sétimo capítulo se destina às análises de vibração forçada, apresentando a metodologia de ensaio executada e todos os resultados obtidos experimentalmente relativos ao caminhar de pedestres sobre o piso investigado.

O oitavo capítulo apresenta a calibração dos resultados das análises de vibração forçada do modelo numérico computacional com os testes experimentais de vibração apresentados no capítulo anterior.

O nono capítulo visa a realização do estudo paramétrico da resposta dinâmica da estrutura do piso investigado por meio da verificação da influência da variação de características do sistema indivíduo-estrutura.

No décimo capítulo, é realizada a avaliação do conforto humano devido às ações dinâmicas oriundas da caminhada de pessoas sobre o piso, a partir dos limites encontrados na literatura técnica e dos critérios de normas de projeto, comparados com resultados de acelerações de pico e *RMS* dos ensaios experimentais e do estudo paramétrico realizado nesta Tese.

No décimo primeiro capítulo, apresentam-se as conclusões alcançadas com este estudo, contendo as considerações e sugestões para continuação do trabalho aqui desenvolvido.

1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.1 Considerações iniciais

Esta seção tem o intuito de abordar os trabalhos mais relevantes e recente de diversos autores que escreveram sobre o tema de investigação experimental, modelagem numérica de estruturas, modelagem matemática do carregamento proveniente de atividades humanas, consideração das características biodinâmicas dos indivíduos na modelagem numérico-computacional de estruturas e avaliação do conforto humano em estruturas de concreto e de estruturas mistas (aço-concreto), com enfoque nos meios de obtenção e avaliação dos níveis de vibrações. Portanto, este trabalho de pesquisa objetiva aplicar o que foi exposto por estes autores visando o amadurecimento desta linha de pesquisa.

1.2 Modelagem numérica de estruturas submetidos a vibrações

El-Dardiry et al. [16] compararam as frequências naturais dos pisos de um edifício de concreto construído em laboratório com as de um modelo computacional calculadas utilizando-se do método dos elementos finitos. Os autores concluíram que o modelo numérico que considera a rigidez real das colunas foi o que mais se aproximou dos resultados experimentais.

Moreira [17] procurou entender a influência de parâmetros como a variação de vãos e da rigidez de vigas, utilizando-se da modelagem de painéis típicos por meio do programa computacional de elementos finitos ANSYS. Os resultados foram examinados e comparados com normas e recomendações internacionais considerando-se apenas a aceleração como parâmetro. O autor concluiu que o aumento da rigidez das vigas está associado a menores níveis de vibrações.

Mello [18] submeteu, numericamente, um piso misto (aço-concreto) a quatro tipos carregamentos que simulam o caminhar humano. O autor concluiu que a resposta dinâmica dos pisos mistos aço-concreto, obtida através do emprego do

modelo de carregamento composto por apenas um harmônico (harmônico ressonante), aplicado no ponto de maior amplitude modal da estrutura, conduz a níveis de aceleração menores do que aqueles obtidos por meio da aplicação do modelo de carregamento que considera quatro harmônicos na excitação. Com relação ao modelo do piso, o autor propôs quatro casos nos quais foram variadas as condições de contorno na posição dos pilares deste piso: apoios 2º gênero, engaste, colunas com apoios do 2º gênero e colunas com engaste. Além disso, o autor fez um estudo paramétrico de um dos modelos estruturais para os seguintes parâmetros: amortecimento, espessura da laje e rigidez da ligação viga-coluna. Com relação ao conforto humano, vale ressaltar que o autor considerou que a avaliação pelas acelerações filtradas RMS tende a ser mais racional e econômica quando comparada com a avaliação do conforto humano pelas acelerações de pico, proposta pelo AISC [19].

El-Dardiry e Ji [20] analisaram a influência de lajes mistas (aço-concreto) do tipo *steel deck* no comportamento dinâmico de um edifício em aço, de oito pavimentos, com dimensões em planta de 45 x 21 m, por meio da modelagem numérica via elementos finitos. Os autores perceberam que, ainda que os modos de vibração de um piso misto composto por vários painéis sejam diferentes e complexos, ficou evidenciado que cada painel vibra de maneira côncava ou convexa. Desse modo, os autores programaram a adoção de duas lajes equivalentes àquela mista: uma isotrópica e outra ortotrópica. Comparando as frequências fundamentais que foram obtidas por meios de modelagem numérica com as obtidas experimentalmente, foi observado que os resultados apresentaram razoável acurácia. A grande vantagem, de acordo com os autores, além da facilidade da modelagem de lajes equivalentes, está na redução do esforço computacional, gerando, desta forma, uma economia de tempo.

Davis [21], em seu estudo, expôs três métodos relativamente simples de previsão das baixas frequências de vibração em sistemas de pisos mistos devido ao caminhar humano, os quais se baseiam na análise pelo método dos elementos finitos, utilizando o programa SAP2000. Em paralelo, o autor realizou estudos experimentais com três modelos laboratoriais submetidos a ensaios dinâmicos utilizando um agitador eletrodinâmico e empregando técnicas de análise experimental modal. Como resultados, foram estimadas as seguintes propriedades modais: frequências naturais,

modos de vibração e taxas de amortecimento. Tais resultados, após comparação entre experimental e modelo numérico, validaram os métodos propostos pelo autor.

Zheng et al. [22] obtiveram respostas dinâmicas pela análise de autovalores e análise harmônica com o intuito de confrontar os resultados da modelagem numérica com os obtidos por meio de experimentos em um piso de uma edificação, reproduzido em laboratório, a fim de averiguar a importância da imperfeição da continuidade entre os painéis do piso. No modelo numérico, para fins de ajuste ao modelo real experimentado, as ligações semirrígidas entre os painéis foram simuladas como elementos de mola. Com esta metodologia, os autores conseguiram reduções significativas das diferenças observadas entre o modelo numérico e os resultados experimentais.

Setareh et al. [23] obtiveram as frequências naturais e modos de vibração de um escritório com estrutura em balanço, susceptível à vibração excessiva, por modelagem via elementos finitos, e compararam com medições experimentais. Os autores se depararam com uma defasagem no segundo e terceiro modo de vibração. Assim, os mesmos perceberam que o número insuficiente de pontos de medições e limitações dos testes pelo grande porte das estruturas poderia ser a principais causas de tal defasagem. A estrutura estudada pelo autor está ilustrada na Figura 6.

Crețu et al. [24] analisaram, no âmbito da frequência natural, o comportamento dinâmico de um piso misto através de uma análise experimental. Os autores fundamentaram seus estudos através da variação das condições de contorno, das intensidades do carregamento dinâmico e da rigidez da laje aplicada à modelagem via método dos elementos finitos. As respostas obtidas pela modelagem em elementos finitos e pelos experimentos apresentaram resultados próximos, validando deste modo a metodologia utilizada pelos autores.

Gonçalves [25] verificou, numericamente, a influência das ligações estruturais (ligações viga-viga) sobre a resposta dinâmica não linear de pisos mistos (aço-concreto) de edificações quando submetidos a cargas dinâmicas humanas rítmicas. O autor utilizou, para a simulação das atividades humanas, o carregamento dinâmico que foi proposto por Faisca [26], obtido através de testes experimentais com indivíduos praticando atividades rítmicas e não rítmicas. O modelo estrutural analisado tratou-se de um piso misto (aço-concreto) com uma área total de 1.600 m² onde são desenvolvidas atividades de ginástica aeróbica e saltos. O autor também variou o número e o posicionamento das pessoas no piso investigado. Uma de suas

contribuições é a verificação de que o tipo de ligação entre as vigas (ligações viga-viga), em algumas situações práticas de projeto, pode vir a alterar de forma significativa os valores finais das respostas dinâmicas de pisos.

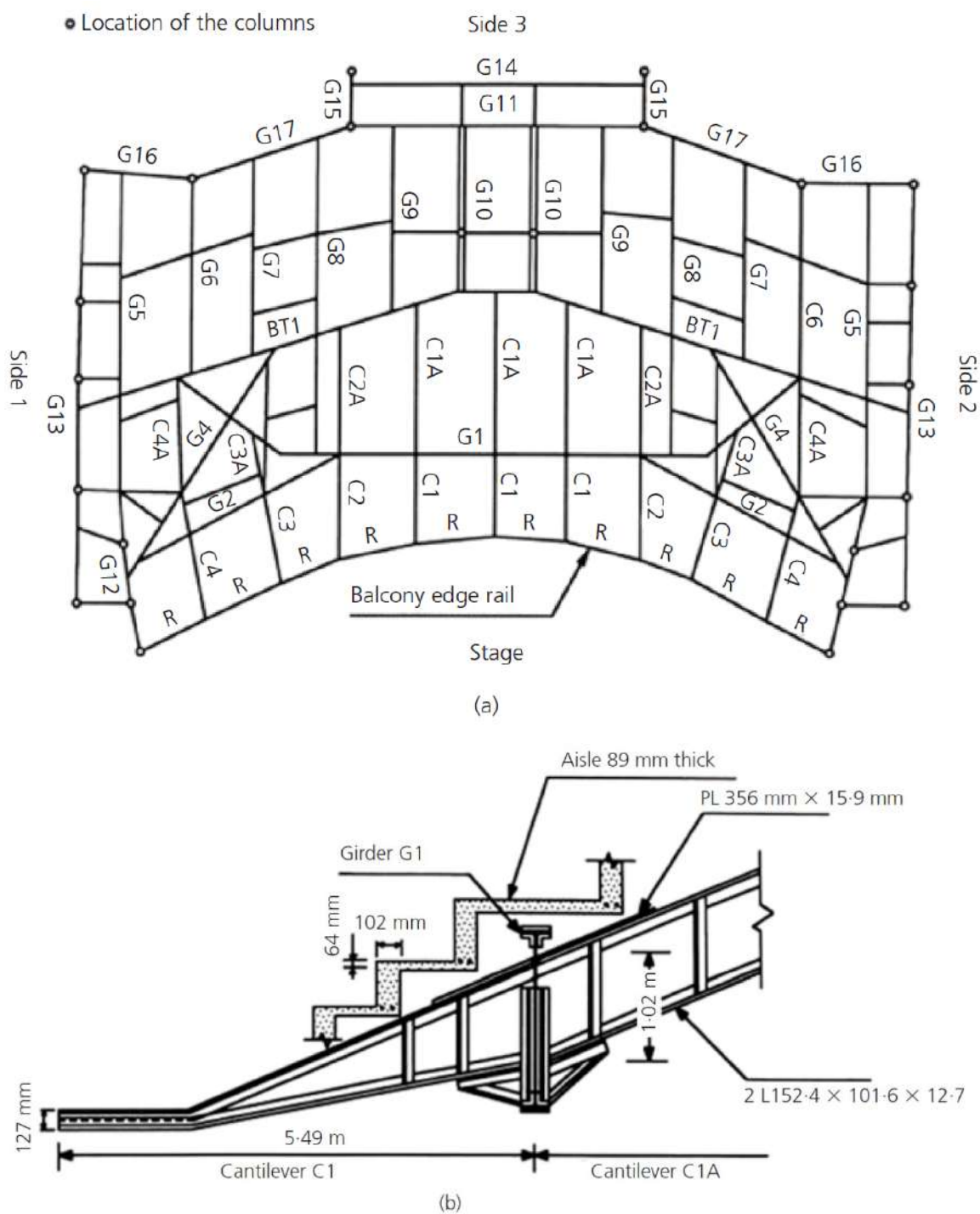


Figura 6 - Planta e seção da estrutura estudada por Setareh et al. [23].

1.3 Avaliação dos níveis de vibração e do conforto humano

Cargas dinâmicas podem produzir níveis de vibração de modo que pode provocar desconforto humano e, em casos extremos, até comprometer a segurança da própria estrutura. Casos de problemas ocorridos em sistemas estruturais com carregamento humano são bastante conhecidos mundialmente, como o caso da *Millennium Footbridge* [27].

Na década de 1920, por exemplo, segundo Pinto [28], várias arquibancadas de estádios ruíram devido a atividades humanas nos Estados Unidos da América. Desta forma, houve uma maior preocupação com a segurança dessas estruturas, sendo então solicitado à ASA (*American Standards Association*, atual ANSI, *American National Standards Institute*), que fosse criado um comitê para padronização dessas estruturas. Em 1950, ainda segundo Pinto [28], alguns anos após a criação desse comitê, houve uma revisão dessas recomendações, devido a vários acidentes que continuaram ocorrendo, porém, as cargas prescritas se mantiveram.

Reiher e Meister [29], nos anos 30, submeteram um grupo de pessoas em pé a vibrações permanentes com frequências de 5 a 100 Hz e amplitudes de 0,01 a 10 mm. As reações das pessoas foram observadas pelos autores, os quais classificaram as reações em faixas que vão desde “raramente perceptível” até “intolerável”.

Problemas com vibrações induzidas por pessoas caminhando nos pisos que satisfaziam o critério tradicional de rigidez ocorreram na década de 1960. Então, Lenzen [30] determinou, em seu estudo, que o amortecimento e a massa, e não mais a rigidez, são os fatores mais importantes na prevenção de vibrações de pisos causados por atividades humanas. Após estudar alguns sistemas de pisos compostos por vigas de aço e lajes de concreto, o autor entendeu que a escala original de Reiher e Meister [29] somente é aplicável a sistemas de pisos com amortecimento crítico menor que 5 % se a amplitude da escala for aumentada por um fator de 10. Todavia, o autor não sugeriu limites na frequência ou amplitude para assegurar a aprovação dos pisos.

Alguns testes, realizados por Smith [31] em uma plataforma móvel, geraram oscilações que ocorreram devido à passagem de pedestres cruzando a plataforma, a qual tinha largura suficiente para provocar certo desconforto ao pedestre.

Wiss e Parmalee [32] pesquisaram, utilizando algumas funções de carregamento, sobre a percepção humana de vibrações em pisos comuns de edificações. Nesse estudo, os autores utilizaram um grupo amostral de quarenta pessoas, as quais foram submetidas a vibrações que simulavam as normalmente encontradas em pisos comuns, com o intuito de observar experimentalmente a reação humana a vibrações transientes verticais em termos de deslocamento máximo, frequência e amortecimento.

Depois de testar e analisar vários sistemas de pisos com vigas de aço e lajes em concreto, Murray [33] aponta que sistemas com amortecimento crítico na faixa de 4 % a 10 % que estiverem situados acima da linha média da região “claramente perceptível”, na escala modificada de Reiher e Meister [29], motivaram reclamações de ocupantes, enquanto sistemas na faixa “fortemente perceptível” serão considerados inaceitáveis para ocupantes e proprietários.

Allen e Rainer [34] criaram um critério de projeto simples baseado na avaliação do conforto humano, o qual se fundamenta na resposta do impacto do calcanhar, para considerar o amortecimento e a massa. Tal critério foi adicionado em um dos apêndices do *Canadian Design Standard for Steel Structures* [35].

Em 1989, o código *International Organization for Standardization*, ISO 2.631/2 [36] foi escrito para abranger diversos ambientes vibracionais. Esta norma apresenta limites de aceleração para vibrações mecânicas em função do tempo de exposição e da frequência para as direções longitudinais e transversais de uma pessoa em pé, sentada ou deitada. Uma síntese dos pontos mais relevantes desta norma encontra-se no Anexo B deste volume.

Objetivando formar recomendações com o intuito de minimizar as vibrações excessivas de estruturas, Bachmann [37] realizou estudos de casos de passarelas, salas de esportes, salões de dança e shows submetidos a carregamentos dinâmicos provenientes de atividades humanas. Tais estudos nortearam o autor no sentido de que é recomendável afastar a frequência fundamental da estrutura do harmônico crítico da frequência de excitação, evitando, deste modo, o efeito da ressonância. No caso de construções existentes com problemas de vibrações excessiva, o autor recomenda o enrijecimento da estrutura, por exemplo, como uma das possíveis soluções de alguns casos. Já quando a estrutura se encontra na fase de concepção, significantes modificações de projetos devem ser realizadas.

Em seu trabalho, Laman [38] expôs uma breve revisão dos critérios de projetos, orientações e especificações de guias de projeto, exigências das normas para minimizar as vibrações de pisos e estudos relacionados às respostas humanas às vibrações. O autor, então, determinou critérios de aceitabilidade de vibrações de pisos baseado em frequência natural mínima para as estruturas, e considera que, futuramente, a avaliação destes critérios passará a ser rotina no processo de concepção de projetos.

Murray, Allen e Ungar [39] lançaram o guia AISC (*Floor Vibrations due to Human Activity, Steel Design Guide Series*), em 1997, conforme Figura 7, o qual apresenta limites com relação ao conforto humano em estruturas submetidas às atividades de caminhar e rítmicas. Procedimentos de cálculo, recomendações e exemplos são apresentados neste guia com o intuito de avaliar, minimizar e familiarizar engenheiros sobre os problemas de vibrações das estruturas.

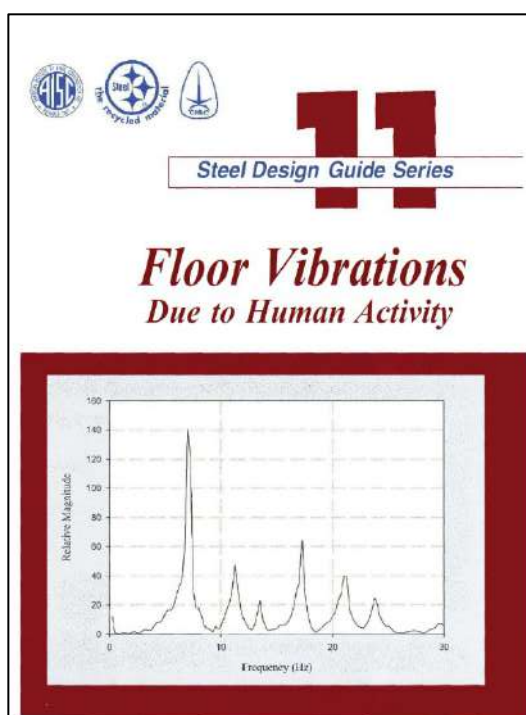


Figura 7 - Capa do guia de projeto do AISC para vibrações de piso [39].

Batista e Varela [40] constataram, através de investigações experimentais, que os distúrbios devidos às excitações dinâmicas produzidas por atividades humanas são mais agudos e frequentes em painéis contínuos que apresentam multimodos de

vibração, tais como os painéis contínuos de lajes mistas, lajes em grelha, lajes nervuradas e lajes pré-moldadas em concreto armado.

Da Silva et al. [41] descreveu que, como a competitividade do mercado forçou os projetistas a desenvolver estruturas com um peso cada vez menor e, conseqüentemente, mais flexíveis, houve um crescente aumento de estruturas com problemas de vibrações indesejáveis. Assim, foi investigado o comportamento estrutural de um piso de uma edificação sujeito às ações humanas rítmicas, utilizando-se, para tal, uma modelagem por meio de elementos finitos através do programa ANSYS. Os resultados obtidos foram comparados com os valores limites apresentados por diversos autores e padrões de projeto e, após essa comparação, os valores encontrados em relação ao deslocamento, velocidade e aceleração apontaram para a satisfação dos critérios e normas recomendados, garantindo assim o conforto dos usuários no piso estudado.

Reynolds e Pavic [42] investigaram o efeito de pisos falsos com relação aos níveis de vibração de pisos de concreto com vãos longos. Deste modo, as frequências naturais, modos de vibração e o amortecimento estrutural do piso foram calculados por meio de um modelo computacional, via elementos finitos, antes e depois da instalação dos pisos falsos. Os resultados da modelagem demonstraram que é eficiente a instalação dos pisos falsos, pois se notou o aumento em até 89 % do amortecimento estrutural dos pisos, e ainda a contribuição equivalente de tais pisos para o aumento da rigidez. Não obstante, as mudanças nas propriedades modais foram inconsistentes em alguns dos modos de vibração e, assim, não foi possível prever facilmente quais os modos seriam afetados benéficamente pela instalação de pisos falsos. Apesar disso, na maioria dos casos, tal medida implementada nos pisos de concreto resultaram em redução da resposta vibracional quando os pisos foram submetidos ao caminhar humano.

Araújo e da Costa [43] estudaram o comportamento dinâmico de lajes nervuradas de concreto. Tal análise foi realizada em três modelos estruturais de lajes, nas quais eram variados os vãos. Como carregamento dinâmico, considerou-se o modelo e os parâmetros indicados por Bachmann et al. [44] para gerar quatro carregamentos distintos. Apesar dos deslocamentos dos modelos respeitarem o preconizado na NBR 6.118: 2007 [45], as acelerações de pico, mesmo do modelo que tem primeira frequência natural superior a 10 Hz, violaram os valores de avaliação do conforto humano apontado pelas normas.

Tendo em vista que vibrações excessivas devido ao caminhar humano devem ter importância na concepção estrutural, Hanagan [4] estudou cinco casos reais incluindo escritórios, salas de aula e espaços comerciais e encontrou níveis de vibrações perturbadoras devido ao caminhar humano ao redor destes espaços. Verificou-se a influência de elementos arquitetônicos na contribuição ou não do amortecimento estrutural. Segundo o autor, há resistência relativa à avaliação das vibrações por parte dos proprietários das construções e projetistas e, em consequência disso, o custo de reparo do problema tem-se mostrado muito maior do que aquele na fase de projeto.

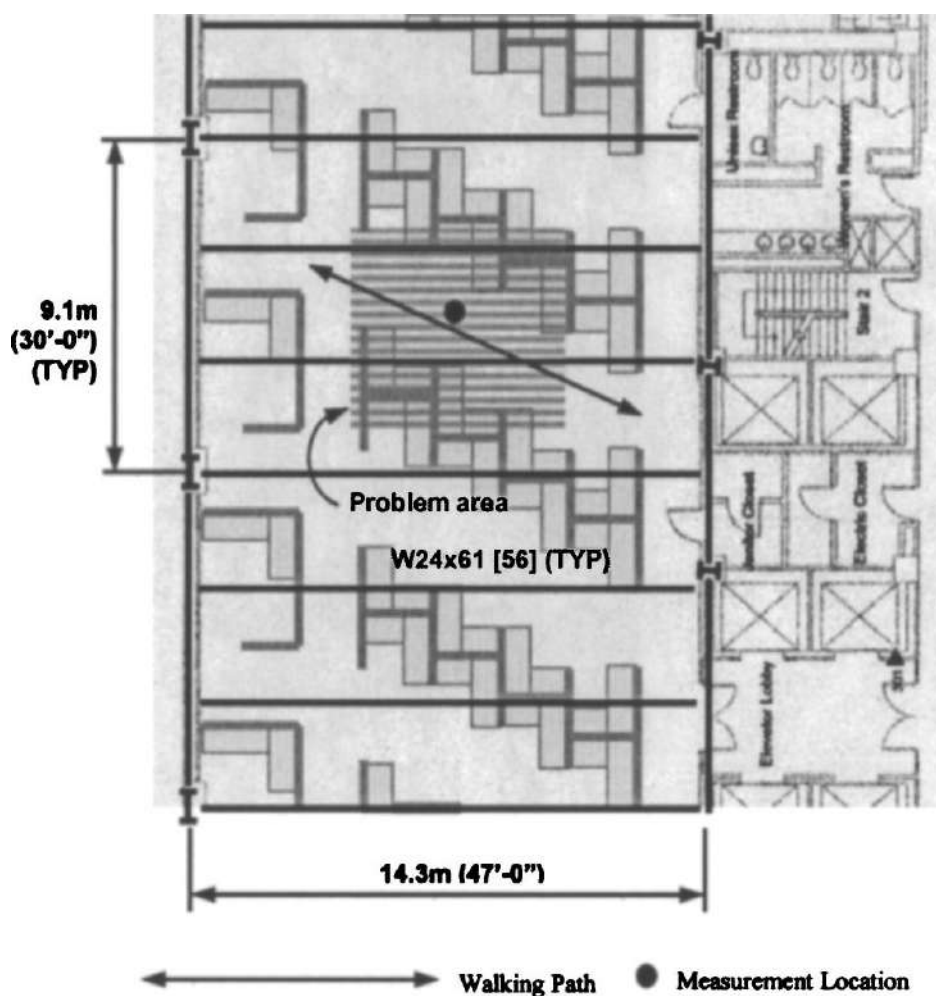


Figura 8 - Planta de um dos escritórios experimentados por Hanagan [4].

Mello et al. [46] expuseram uma nova abordagem na avaliação do conforto humano de pisos mistos com múltiplos pavimentos e vãos principais variando de 5 a 10 metros, aplicando quatro modelos de carregamento para simular o caminhar

humano. As acelerações de pico foram confrontadas com os limites propostos na literatura e os autores concluíram que, quando variada a posição do carregamento dinâmico, conforme ilustrado na Figura 9, de forma a simular a variação da posição das pessoas nos pisos, os níveis de vibração excedem os recomendados pela literatura.

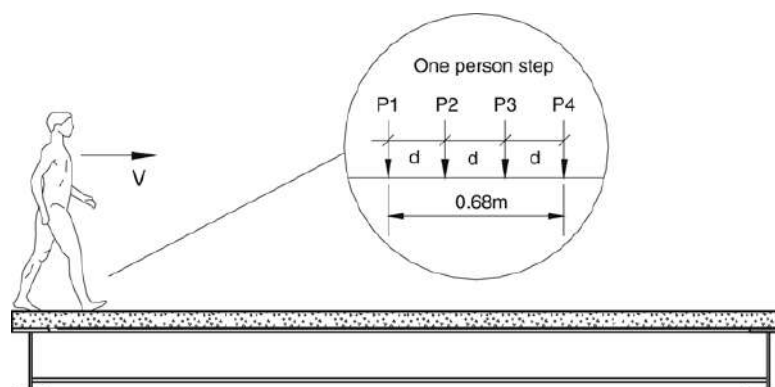


Figura 9 - Caminha humana representada no piso misto por Mello et al. [46].

No trabalho de Loose [47], foi investigada a resposta dinâmica de pisos mistos (aço-concreto) ao serem submetidos a excitações humanas pelas atividades rítmicas, tais como ginástica aeróbica e saltos à vontade. Tal investigação comparou, em termos de aceleração máxima de pico, os valores das respostas dos pisos com os limites das recomendações internacionais no que tange ao conforto humano em diferentes ocupações da estrutura e se verificou que as acelerações de pico obtidas no painel de aplicação são, em muitos casos, são superiores ao limite proposto por recomendações internacionais.

Brownjohn e Middleton [48] decidiram ir na contra mão do que a maioria dos autores aponta, visto que foram analisadas estruturas rígidas com frequência superiores a 10 Hz, enquanto a maioria dos autores relatam problemas de desconforto humano em estruturas com frequências naturais abaixo de 8 Hz. Contudo, mesmo estas estruturas mais rígidas apresentaram significativas respostas dinâmicas. Assim, os autores chegaram à conclusão de que há influência dos mais altos harmônicos do caminhar humano, não devendo ser subestimadas as respostas de frequências naturais de até 20 Hz no âmbito do conforto humano. Ainda foi observado pelos autores que outros harmônicos, além dos formulados, podem gerar influencia na resposta da estrutura devido ao caminhar humano.

Silva et al. [49] apontaram para o fato da tendência arquitetônica, da competitividade dos mercados internacionais e do avanço tecnológico proporcionarem o surgimento de estruturas cada vez mais esbeltas, logo mais flexíveis e, portanto, apresentando frequências naturais próximas das frequências de excitação de diversas atividades humanas rítmicas, o que pode gerar vibrações excessivas sensíveis ao conforto humano. Devido a tais apontamentos, os autores avaliaram as vibrações em pisos mistos ortotrópicos (aço-concreto) devido às atividades humanas rítmicas. Após os estudos, ficou evidenciada a violação dos limites de vibrações no estado limite de serviço em relação à velocidade máxima obtida; entretanto, o critério de conforto humano é satisfeito em relação às acelerações de pico encontrada.

Em seu trabalho, Almeida [50] investigou o comportamento dinâmico de pisos compostos (aço-concreto) sujeitos às atividades rítmicas provocadas pelas pessoas. Assim, o autor se baseou nos parâmetros experimentais alcançados por Faisca [26], para modelagem do carregamento. Para o modelo estrutural de piso investigado, o autor variou as barras que compõem as treliças de um piso de 22,5 x 14 m, além de variar também o travamento lateral destas treliças. O autor concluiu que, para o tipo de piso analisado em seu trabalho, as acelerações obtidas foram muito superiores aos valores limites recomendados pelas normas nacionais e internacionais. Além disso, observou também que atividade aeróbica apresenta respostas dinâmicas bem superiores à dança de salão.

Loose et al. [51] comparam as acelerações de pico, obtidas por meio de uma análise de um sistema estrutural composto por um piso misto (aço-concreto) com os limites indicados em recomendações de projeto no que tange ao conforto humano. A maioria dos casos analisados não atendeu aos limites de projeto, acarretando, desta forma, em desconfortos humanos devido a carregamentos dinâmicos, como ginástica aeróbica e saltos livres.

Han et al. [52] realizaram testes experimentais com 20 voluntários e, a partir das reações obtidas dessas pessoas em ensaios em uma mesa vibratória, conforme ilustrado na Figura 10, recomendaram limites de aceleração vertical para pisos submetidos ao caminhar e saltos humanos. Após trabalharem os dados, os autores dividiram a percepção humana quanto à aceleração vertical de pisos em residências em quatro níveis e perceberam a inferioridade de seus dados quando comparados aos de outros países, atribuindo tal fato ao tipo de utilização da estrutura e estilo de vida na Coreia.

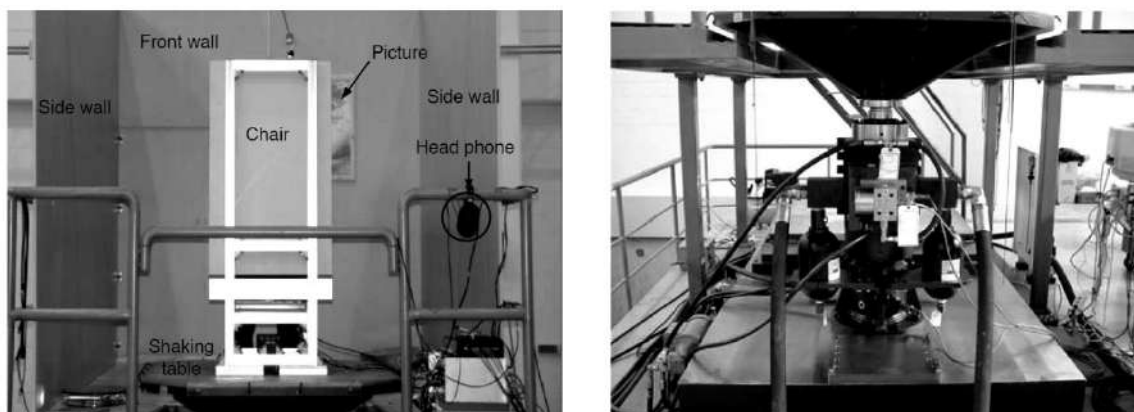


Figura 10 - Mesa vibratória utilizada nos experimentos de sensibilidade da vibração de Han et al. [52].

Com o intuito de avaliar o conforto humano, Langer [53] avaliou o comportamento dinâmico de pisos mistos (aço-concreto) em edificações de pavimentos múltiplos submetidos a atividades humanas rítmicas. As ações dinâmicas atuantes sobre os modelos estruturais foram feitas com base em resultados experimentais, em que os indivíduos praticaram atividades rítmicas e não rítmicas associadas à ginástica aeróbica e saltos à vontade. A análise se baseou na modelagem computacional dos sistemas estruturais por meio do método dos elementos finitos, utilizando o programa ANSYS. Uma análise paramétrica foi realizada sobre três modelos estruturais: com dois, três e quatro pavimentos. As acelerações máximas obtidas da modelagem foram comparadas com os limites propostos pelas recomendações internacionais, demonstrando que os limites recomendados em diversas normas de projeto foram excedidos. Tais resultados apontam que atividades rítmicas oriundas dos humanos podem gerar acelerações de pico elevadas, violando critérios de projeto no que tange ao conforto humano. Percebeu-se também que ações dinâmicas podem comprometer o conforto humano em pisos adjacentes.

Setareh [13] investigou as vibrações de um piso em balanço submetido às atividades humanas rítmicas por meio de um sistema de monitoramento e comparou os registros com as normas e guias de projetos. A partir dos dados observados, foram propostos novos parâmetros de avaliação da vibração percebida por humanos. Segundo o autor, o critério de avaliação utilizando a aceleração de pico é impreciso e

insuficiente e, por sua vez, a ISO 10.137 [6] apresenta uma melhor avaliação através dos Valores de Dose de Vibração (*VDV*) e da aceleração *RMS*.

Por meio de simulações de excitações humana rítmicas, Lee et al. [54] pesquisaram sobre vibrações excessivas nos pavimentos superiores de um edifício de 39 pavimentos na Coreia. A fim de comparar as frequências naturais e acelerações verticais, os estudos foram realizados na parte central do 12º pavimento tanto para os testes experimentais quanto para a análise numérica via elementos finitos. Os resultados obtidos, para ambas as análises, tenderam para uma frequência natural de 2,7 Hz e, para as acelerações verticais, obteve-se resultados próximos. Uma das conclusões dos autores foi que o fenômeno da ressonância entre a estrutura e a excitação humana gerou vibração atípica na estrutura.

Costa-Neves et al. [55] aferiram, utilizando-se de dois modelos de carregamento dinâmico para excitação humana rítmica, o comportamento dos pisos um edifício misto (aço-concreto) de três pavimentos, com os vãos das lajes variando de 4 a 10 metros. Os resultados obtidos, no que tange acelerações de pico e deslocamentos, foram avaliados e comparados conforme diversas normas e critérios de projeto. Os vãos onde eram realizadas as atividades e, inclusive, os vãos adjacentes, apresentaram valores que ultrapassavam os valores recomendados pelas normas.

Hicks e Peltonem [56] apresentaram uma metodologia simplificada para calcular a resposta às vibrações de pisos de pequena espessura e grandes vãos, feitos com vigas de aço. O método de avaliação, que é feito manualmente, é apropriado para vãos regularmente espaçados e para vibrações ocorridas devido ao caminhar humano. Foram realizados ensaios experimentais em seis pisos, obtendo-se respostas que satisfizeram a ISO 10.137 [6], para teatros e laboratórios, e os limites recomendados pela indústria, para estacionamentos de carros e centros comerciais. Com base nos resultados dos experimentos, as comparações apresentadas demonstraram que o método simplificado fornece resultados conservadores, podendo, portanto, ser usado com confiança na concepção estrutural.

Gajalakshmi et al. [57] realizaram uma análise dinâmica de um piso de aço submetido a atividades humanas rítmicas (saltos). O modelo estrutural do piso de aço corresponde a 3 x 24 m, similar aos pisos industriais, e um extenso estudo paramétrico foi realizado pelo autor na obtenção das acelerações de pico do piso devido a atividades humanas rítmicas. O autor utilizou o modelo de carregamento

proposto por Faisca [26] e concluiu que, mesmo para somente duas pessoas, os valores das acelerações de pico foram superiores ao das recomendações da norma de referência.

Murray et al. [8] lançaram a segunda edição do guia de projeto do AISC, intitulada de *Vibrations of Steel-Framed Structural Systems Due to Human Activity*, que reflete, inclusive no título, as atualizações em razão da primeira versão do guia que foi lançada em 1997 [39]. Segundo os autores, uma vasta literatura foi publicada desde 1997 sobre sistemas estruturais em *Steel-Frame*, inclusive pisos, escadas e varandas submetidas à atividade humana. Limites de percepção humana e sensores de equipamentos foram modificados, assim como novos métodos para sistemas estruturais com altas frequências foram propostos. O uso do método dos elementos finitos para analisar sistemas estruturais foi refinado, além de novos métodos simplificados para a solução de problemas em piso foram propostos. Assim, a segunda edição do guia de projeto veio para atualizar a prática de projeto em relação às atualizações citadas.

Da Silva et al. [58] investigou o comportamento dinâmico dos pisos de 20 x 20 m de um edifício de três pavimentos quando submetidos a atividades humanas rítmicas (aeróbica). Para tal, foram utilizados dois modelos de carregamentos e feito um estudo paramétrico destes dois modelos. Diversos critérios de avaliação do conforto humano foram considerados, como aceleração de pico, acelerações filtradas *RMS* e valores de dose de vibração (*VDV*). Níveis incômodos de vibração foram encontrados na investigação para os dois modelos de carregamentos, sendo observada, inclusive, a transmissão de tais níveis de vibração para os pavimentos superiores e inferiores.

1.4 Métodos de mitigação de vibrações em sistemas estruturais

Hanagan e Murray [59], através de um sistema de controle ativo baseado em um atenuador eletromagnético o qual transmite uma força de controle sobre o sistema estrutural, pesquisaram, experimentalmente e analiticamente, a redução das vibrações por este mecanismo. Os resultados obtidos apresentaram um aumento do amortecimento estrutural de 2,5 % a 40 % e, conforme o experimento realizado houve

uma redução de 12 % na excitação estrutural devido ao andar humano, em relação à amplitude do pico de velocidade, quando comparado a um sistema descontrolado.

Visando reduzir vibrações excessivas de pisos, Hanagan e Murray [60] pesquisaram sobre a relevância do amortecimento estrutural e da utilização de sistemas de controle ativo. Pensando nisso, os autores instalaram um sistema de controle ativo, um atenuador eletromagnético, em dois pisos destinados para escritório e laboratório de química, de forma a conseguir resultados experimentais objetivando avaliar a eficácia deste sistema de controle. Conclui-se que houve uma redução de 70 e 75 % da amplitude da velocidade dos pisos do escritório e laboratório de química, respectivamente.

Ebrahimpour e Sack [61] pesquisaram sobre o desenvolvimento ao longo da história dos modelos representativos das ações dinâmicas humanas, dos critérios de percepção humana às vibrações e de suas técnicas para atenuar tais vibrações. Além disso, técnicas de controle de vibrações por meio de um sistema ativo e semiativo foram apresentadas e explicadas, nas quais foram utilizados, respectivamente, materiais compósitos e visco elásticos.

De Silva e Thambiratnam ([62], [63]) pesquisaram os efeitos de um carregamento induzido por atividades humanas ligadas à dança sobre um piso composto por múltiplos painéis por meio de um modelo via elementos finitos. Nesse estudo, foram aplicados quatro tipos de carregamentos e foram observados os deslocamentos e acelerações do piso, concluindo que tais valores são influenciados pelo tipo de atividade exercida, amortecimento estrutural e densidade de ocupação. Ao mesmo tempo, os autores indicaram algumas medidas corretivas para reduzir os efeitos de vibrações excessivas e sugeriram complementos às normas e guias práticos de projeto em razão da complexidade da interação entre o carregamento dinâmico e a estrutura.

Tendo em vista reduzir vibrações excessivas de pisos, Saidi et al. [3] sugerem a utilização de um sistema de controle passivo por meio de um amortecedor visco elástico, o qual se ajusta facilmente as diversas frequências naturais e amortecimento estrutural. Os autores, então, desenvolveram dois protótipos de viga: uma de aço em um vão de três metros e outra de concreto, em formato de T, com um vão de 9,5 metros; as duas foram adicionadas de amortecedores visco elásticos e os resultados obtidos, tanto do modelo analítico quanto do experimental, foram

comparados. Nessa comparação, a frequência natural e amortecimento dos resultados experimentais e analíticos se correlacionaram bem.

Chen et al. [64] propuseram a utilização de um atenuador dinâmico sincronizado em estruturas reais em grandes vãos, tais como: *Beijing Olympic Park National Conference Center, Changsha New Railway Station e the Xi'an Northern Railway Station*. Assim, após apresentarem diversos modelos de carregamento dinâmico para vários tipos de atividades humanas, foi realizada uma análise numérica baseada no método dos elementos finitos. Os resultados obtidos na análise numérica foram, então, confrontados com os resultados experimentais, podendo ser observado uma redução considerável das vibrações através do modelo de controle proposto.

Gaspar [65] analisou numericamente um piso misto e outro em concreto armado submetidos a atividades humanas rítmicas, como atividades aeróbicas, no caso específico de seu estudo. Com o objetivo de mitigar as vibrações excessivas, o autor apresentou o desenvolvimento de um sistema de controle passivo através do uso de atenuadores dinâmicos sintonizados (ADSs), e analisou sua aplicação, numericamente, nos dois pisos de seu trabalho. Foram obtidos, então, resultados bastante satisfatórios para os atenuadores estudados de tal modo que autor indicou tal solução como sendo uma alternativa de baixo custo com a intenção de respeitar os critérios de conforto humano em pisos submetidos a atividades humanas rítmicas.

1.5 Modelo de carregamento dinâmico: força dura (only force)

Baseados nos resultados dos ensaios de plataformas instrumentadas, Ohlsson [7], Allen et al. [66], Bachmann e Ammann [67], entre outros autores, obtiveram uma função que representa o carregamento gerado por atividades humanas por meio de uma série de Fourier. Esta equação é composta por uma parcela estática, correspondente ao peso da pessoa, adicionada de uma parcela devida à carga dinâmica, associada à natureza da atividade.

Ji e Ellis [68] estudaram modelos de carregamentos gerados por alguns tipos de danças rítmicas e concluíram que, em certos casos, a multidão deve ser modelada como sistema massa-mola-amortecedor, pois constataram que, quando há um contato relativamente curto entre as pessoas e a estrutura, a massa do corpo das

peças não vibra juntamente com a estrutura. Essa consideração pode gerar diferenças relevantes em uma análise, uma vez que, quando se presume que um grupo de pessoas se encontra parado sobre uma estrutura, implica em um aumento da massa total da estrutura, o que resultaria em uma redução da frequência natural da mesma. Também foi verificado que a posição da pessoa sobre a estrutura influenciava significativamente o amortecimento da estrutura. A taxa de amortecimento de uma pequena estrutura, analisada por Ji e Ellis, aumentava expressivamente quando a pessoa se encontrava de pé ou sentada sobre a mesma; porém, trocando a pessoa por uma massa equivalente, a frequência natural diminuía e a taxa de amortecimento permanecia inalterada.

Alves [69] obteve os valores dos coeficientes de Fourier para os primeiros harmônicos da carga dinâmica por meio da análise experimental de atividades humanas em uma plataforma rígida. A partir destes valores, verificou-se a proximidade com os valores recomendados pelo CEB [70]. Também foi estudada a influência das características individuais e tipos de calçados utilizados na obtenção destes coeficientes de Fourier.

Faisca [26], continuando o trabalho de Alves [69], apresenta um modelo matemático, com base em resultados experimentais, para as cargas dinâmicas geradas por atividades humanas quando existe a perda de contato com a estrutura, como: saltos (com e sem estímulo), ginástica aeróbica, torcidas de futebol e plateias de show. Os ensaios experimentais foram realizados em uma estrutura mista (aço-concreto) de dimensões de 12,20 x 2,20 x 0,1 m e apoios em três posições diferentes, para variar a rigidez da estrutura, e, conseqüentemente, analisar as alterações sofridas pela carga devido à interação pessoa-estrutura. Foram propostas funções de carregamento associadas às atividades com e sem sincronismo, permitindo que estas funções possam ser aplicadas em projetos de estruturas que contemplem grandes multidões. A Figura 11 apresenta os gráficos sobrepostos da função semi-seno, a função proposta pela autora e a função representativa do experimento.

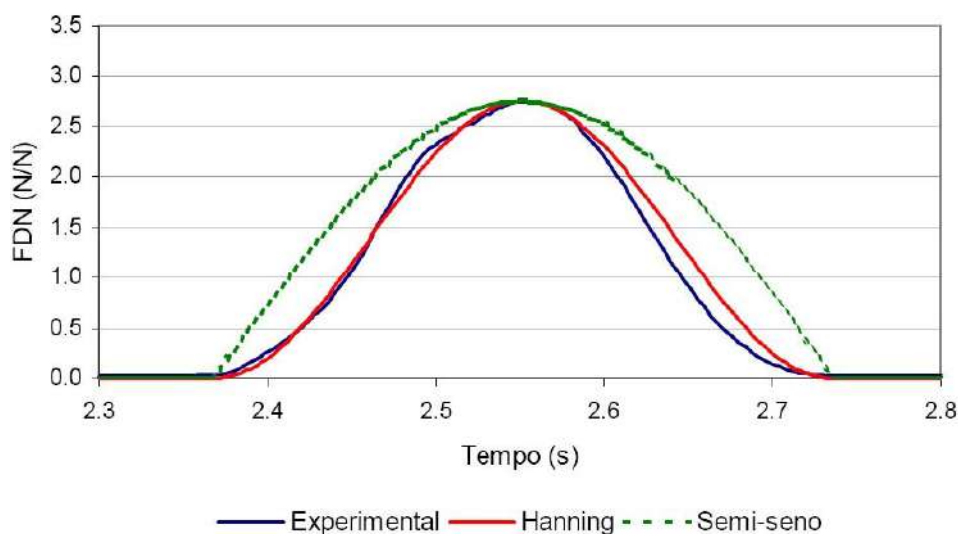


Figura 11 - Comparação do sinal experimental com as funções semi-seno e Hanning [26].

Ellis e Ji [71] propuseram um modelo de carregamento baseado em um grupo de pessoas (até 64 pessoas) pulando ritmicamente. O modelo de carregamento, que é baseado em uma série de Fourier, propõe coeficientes de Fourier reduzidos de acordo com o número de pessoas praticando a atividade, sendo as equações estimadas por meio de observações experimentais. Dentre as conclusões do trabalho, destaca-se que variações na frequência do carregamento e na razão de contato com a estrutura não afetam significativamente os coeficientes de Fourier para diferentes tamanhos de grupos de pessoas, embora expliquem algumas variações observadas nos experimentos realizados.

Varela [10], baseado em relatórios técnicos, sugeriu uma equação matemática que pudesse representar a magnitude da reação total do piso gerada durante uma caminhada sobre plataformas rígidas. A função desenvolvida por Varela [10] permitiu o avanço nas estratégias de modelagem da carga humana gerada durante a caminhada. A sua representação matemática era acompanhada de um fator importante e geralmente ignorado nas estratégias de modelagem de cargas humanas: o pico transiente representativo do impacto do calcanhar sobre o piso, o qual gera respostas bem significativas em temas de análise dinâmica.

O modelo de carregamento proposto de acordo com o guia de projeto do *The Steel Construction Institute* (SCI P354) [12] é baseado no trabalho de Ellis e Ji [71], o qual realizou um estudo experimental de carregamentos gerados por multidões em atividades humanas rítmicas. O trabalho também recomendou, como se pode ver na

Tabela 1, os limites da frequência de excitação para essas atividades. Segundo o guia de projeto, a faixa da frequência de excitação de grupos é menor devido à dificuldade de executar atividades rítmicas em grupos para frequências mais elevadas. Um exemplo deste modelo de carregamento pode ser observado na Figura 12.

Tabela 1 - Faixa de frequência de excitação recomendada [12].

Atividade	Frequência mínima (Hz)	Frequência máxima (Hz)
Individual	1,5	3,5
Em Grupo	1,5	2,8

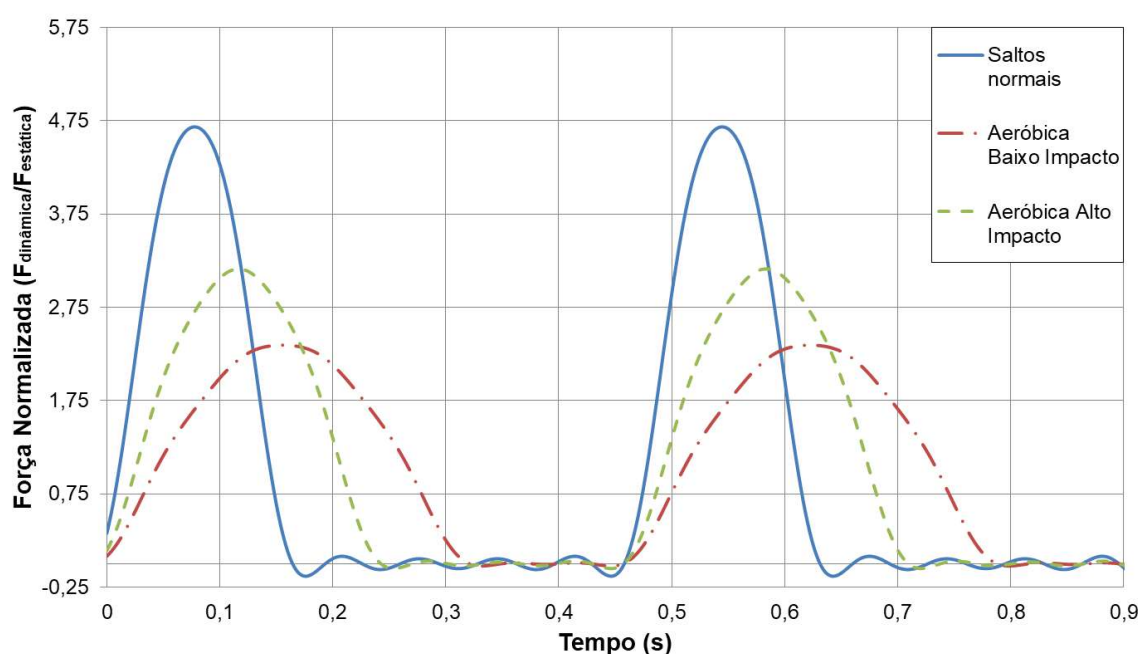


Figura 12 - Comparação dos tipos de atividade SCI: força normalizada x tempo.

Gaspar e da Silva [72] analisaram um piso misto (aço-concreto) submetido a atividades humanas rítmicas. O modelo estrutural tratava-se de um piso misto de 10 x 10 m de pavimento único. Os autores também realizaram uma vasta pesquisa sobre os modelos de carregamentos dinâmicos, sendo estudados quatro modelos. Foram observados altos níveis de vibração no piso devido a atividades rítmicas, superando as recomendações de norma. Como principal contribuição, os autores apontaram que o modelo proposto por Faisca [26] foi considerado o mais econômico do ponto de vista de projeto.

Campista [73] avaliou o comportamento dinâmico de pisos mistos (aço-concreto) sob a ação de cargas provenientes da prática de ginástica aeróbica, sob o

ponto de vista do conforto humano. O modelo estrutural investigado baseou-se em um piso misto (aço-concreto), que possui dimensões totais de 40 x 40 m (eixo a eixo de colunas), totalizando uma área de 1.600 m², submetido a aulas de ginástica aeróbica. A autora abordou os principais aspectos sob a ótica da vibração de pisos e conforto humano das diversas normas e guias de projetos nacionais e internacionais. Em seu estudo, a autora utilizou dois modelos de carregamentos para simular as pessoas praticando atividades aeróbicas, um proposto por Faisca [26] e o outro por Ellis e Ji [71]. A autora também variou o número e o posicionamento das pessoas no piso. Por fim, como principal contribuição, a autora concluiu que o modelo proposto por Faisca [26] é mais racional e econômico que o proposto por Ellis e Ji [71]; entretanto, em seu estudo, os dois ultrapassaram os limites de aceleração recomendados e indicaram com clareza níveis de vibrações extremamente desconfortáveis.

Em seu trabalho de pesquisa, Kerr [74] propôs uma nova metodologia de análise de projeto para escadas plissadas. Para tal, o autor elaborou uma quantidade extensa de ensaios experimentais a fim de prever a força desenvolvida pelo caminhar humano, utilizando-se de uma plataforma instrumentada, conforme verificado na Figura 13, de forma a coletar os dados experimentais da caminhada humana para diversas frequências de passo. A proposição de uma modelagem matemática de carregamento para o caminhar humano, baseada em extensos dados experimentais, foi, na verdade, uma das maiores contribuições de seu trabalho de pesquisa, sendo referenciado por inúmeros autores, como por exemplo Zivanovic [75], Racic, Pavic e Brownjohn [76], Sachse, Pavic e Reynolds [77], Pedersen e Frier [78] e Zivanovic [84]. O autor concluiu que os resultados de seu trabalho de pesquisa forneceram evidências claras de que a experiência adquirida com pisos e passarelas era altamente inadequada para uso em escadas. Além disso, concluiu que os aumentos substanciais no pico de carregamento, nas amplitudes harmônicas e nos efeitos de carga de grupo devem preocupar os engenheiros estruturais, uma vez que o impulso para estruturas esteticamente agradáveis continua a reduzir as frequências naturais fundamentais. O autor ainda inferiu que qualquer escada plissada com frequência natural inferior a 10 Hz pode ter respostas dinâmicas excessivas e produzir níveis de vibração inaceitáveis.



Figura 13 - Vista da plataforma de força (D), amplificadores (A) e sistema de aquisição de dados (B) / computador (C) [74].

O guia de projeto do AISC [8], por outro lado, além de apresentar e discorrer sobre os diversos modelagens matemáticas propostas na literatura para os diferentes tipos de atividade humana, recomenda, para o caminhar humano, que se utilize uma série de Fourier com quatro harmônicos propostas nos Rainer et al. [80] e Murray et al. [39] (versão anterior do guia de projeto). Além de propor um peso típico de 157 lbs (71,2 kgf) para utilização como carga permanente na formulação matemática do modelo de carregamento proposto no código.

1.6 Modelos de carregamento biodinâmico: interação ser humano-estrutura

De acordo com Jones et al. [81], a interação dinâmica entre o ser humano e sistemas estruturais é definida como o fenômeno pelo o qual a combinação de ambas as características dinâmicas – relacionadas à rigidez, massa e amortecimento do homem e da estrutura – sobre a qual ele se encontra resulta em um conjunto particular de novas propriedades dinâmicas. Porém, os autores afirmam que antes de se

compreender o efeito da interação ser humano-estrutura é necessário constituir o comportamento dinâmico do corpo humano propriamente dito. É evidente o desafio de caracterizá-lo fisicamente e matematicamente, tendo em vista sua complexidade natural. Nesse sentido, observa-se a interdisciplinaridade com a área de biomecânica. Por outro lado, diversos pesquisadores têm representado dinamicamente o corpo humano através de sistemas do tipo massa-mola-amortecedor com poucos graus de liberdade de tal modo que o corpo biodinâmico seja suficientemente bem representado para o uso em problemas de engenharia.

Sachse et al. [82], por meio de um vasto estudo paramétrico, propuseram um modelo de interação ser humano-estrutura com dois graus de liberdade, análogo a um TMD (*Tuned Mass Damper*) para prever o comportamento dinâmico do sistema. Os autores concluíram que o modelo de interação proposto era bom o suficiente para demonstrar o comportamento vibracional das estruturas, entretanto concordam que há uma dificuldade em determinar as propriedades dinâmicas como massa, rigidez e amortecimento das pessoas limitam sua aplicação para propósitos de projeto. Os autores ainda ressaltam que enquanto uma grande variedade de modelos dinâmicos para o corpo humano tem sido desenvolvida, poucos estudos foram feitos para a caracterização das propriedades dinâmicas de multidões em eventos reais. A maioria das publicações é baseada em dados limitados que são extrapolados de indivíduos e grupos pequenos para grandes multidões Além do mais, a determinação da frequência natural relacionada à parcela das pessoas no modelo é demasiada complexa, pois depende, dentre outras coisas, da postura das pessoas na multidão, assim como da direção e nível da vibração.

Sim et al. [83] avaliaram dois modelos de carregamento biodinâmico com dois graus de liberdade (S2GL) para simular o carregamento de pessoas sentadas e em pé em uma estrutura, conforme Figura 14. Os autores ainda realizaram um estudo comparativo entre o um modelo simplificado para simular uma multidão na estrutura de apenas um grau de liberdade (S1GL), vide Figura 15, com simulações utilizando os modelos propostos que resultam em um sistema de três graus de liberdade (S3GL). Os autores concluírem que o sistema simplificado de interação entre as pessoas e a estrutura geram resultados satisfatórios para estruturas que possuem, quando vazias, frequências naturais entre 1 e 4 Hz. Para estruturas com frequência natural, quando vazias, acima de 4 Hz, o modelo simplificado apresentou diferenças consideráveis quando comparado ao sistema mais complexo de três graus de liberdade (S3GL) que,

por outro lado, apresentou maior acurácia em todos os casos avaliados, porém, devido sua complexidade, e devido os erros de ambos os sistemas avaliados estarem na faixa de $\pm 4\%$, para aplicações de projeto, segundo os autores, o modelo simplificado é suficientemente ajustado.

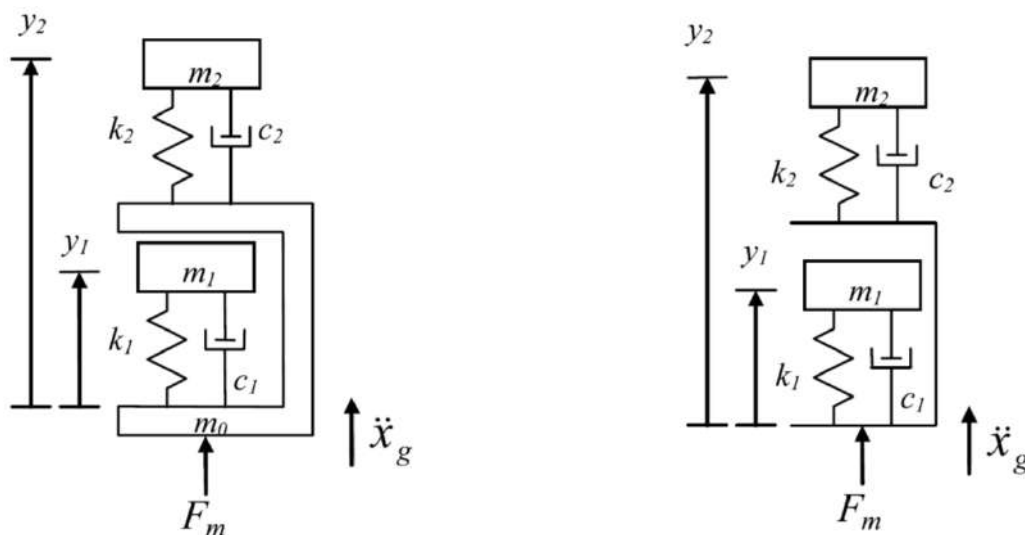


Figura 14 - Modelo de interação biodinâmica para pessoas sentadas (esquerda) e para pessoas em pé (direita) [83].

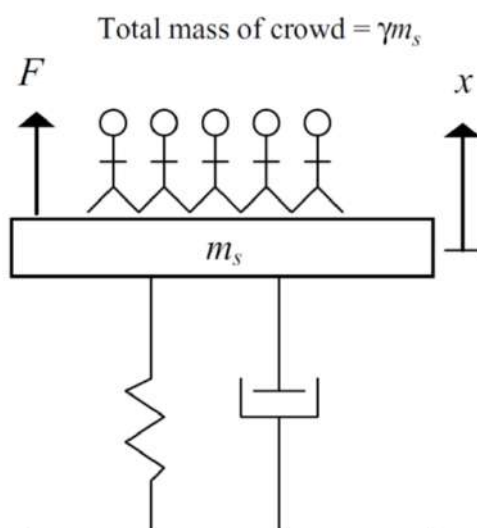


Figura 15 - Sistema simplificado de um grau de liberdade (S1GL) de interação ser humano -estrutura [83].

Pavic e Reynolds [84] analisaram a interação de pessoas ativas e passivas numa arquibancada e propuseram um modelo representativo de 3 graus de liberdade, como apresentado na Figura 16. Nota-se uma força associada ao grau de liberdade

relativo às pessoas ativas, chamada pelos autores de GLF (*Generated Load Factor*). Os autores fazem distinção entre essa força e aquela aplicada diretamente sobre a estrutura, conforme os modelos de carregamento associados à aplicação de uma força externa pura (*only force*). Eles comprovaram uma boa acurácia entre o modelo proposto e dados experimentais em arquibancadas com multidões reais. Contudo, a principal limitação deste modelo está relacionada às pessoas ativas, onde é somente considerado o efeito de pessoas balançando (*bobbing or bouncing*) sem perda de contato com a estrutura.

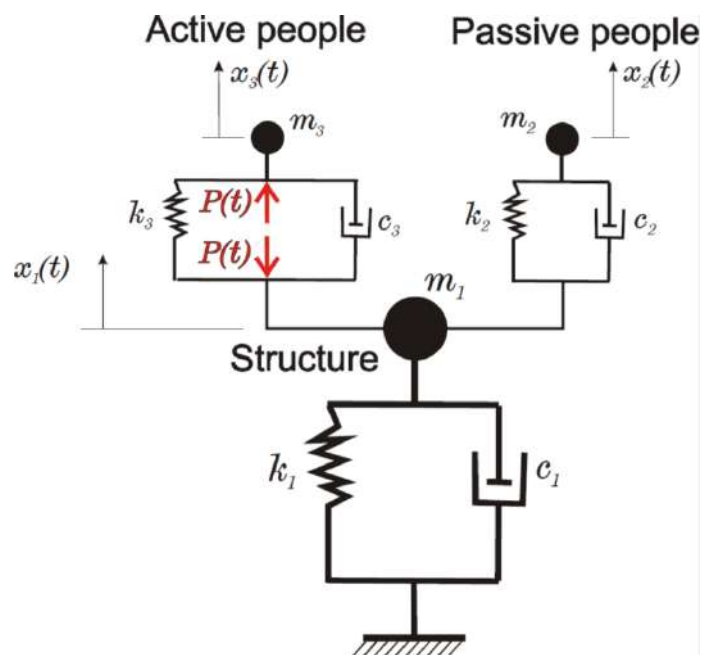


Figura 16 - Modelo de interação pessoa-estrutura: três graus de liberdade [84].

O guia de projeto *Dynamic performance requirements for permanent grandstands subject to crowd action: Recommendations for management, design and assessment* do *the Institution of Structural Engineers (IStructE)* [85] recomenda a utilização de um modelo massa-mola-amortecedor para representar o carregamento biodinâmicos das pessoas e preconiza algumas premissas propostas por Pavic e Reynolds [84].

Salyards e Hua [86] desenvolveram um estudo experimental de modo a melhor investigar os parâmetros dinâmicos de pessoas ativas e passivas fornecidos pelo guia de projeto do IStructE [85]. Constatou-se que os parâmetros para pessoas ativas (em pé) foram satisfatoriamente bem representados enquanto que o mesmo não ocorreu para os ocupantes passivos, estes estando em pé ou sentados.

Da Silva et al. [87], em sua pesquisa, desenvolveram uma série de experimentos em um protótipo instrumentado de forma a verificar a diferença da resposta dinâmica da estrutura quando utilizado modelo de carregamento de “força dura” e os modelos de carregamento considerando modelos biodinâmicos de um grau de liberdade (S1GL), representando as pessoas. Duas modelagens foram propostas, uma com biodinâmicos se movimentando e outra com os biodinâmicos estacionários na estrutura. Assim, os resultados foram analisados e, por meio de regressões lineares, quadráticas e cruzadas, foram propostas expressões para determinar os valores aproximados de massa, amortecimento e rigidez dos modelos biodinâmicos (S1GL) em função da massa total da pessoa e da frequência do passo. Os autores concluíram que a modelagem com os biodinâmicos estacionários, proporciona uma melhor mais simples e adequada. Além disso, concluíram que os modelos de carregamento de “força dura” se apresentaram bem mais conservadores em relação ao carregamento utilizando-se os biodinâmicos.

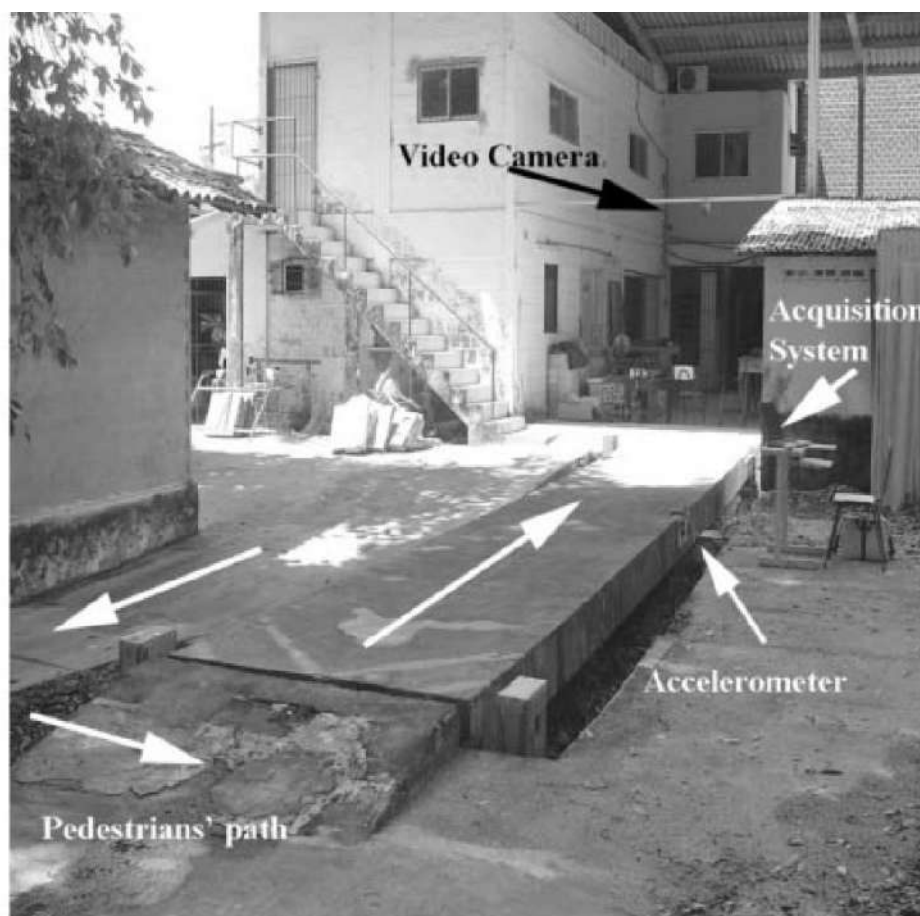


Figura 17 - estrutura de teste desenvolvida por Da Silva et al. [87].

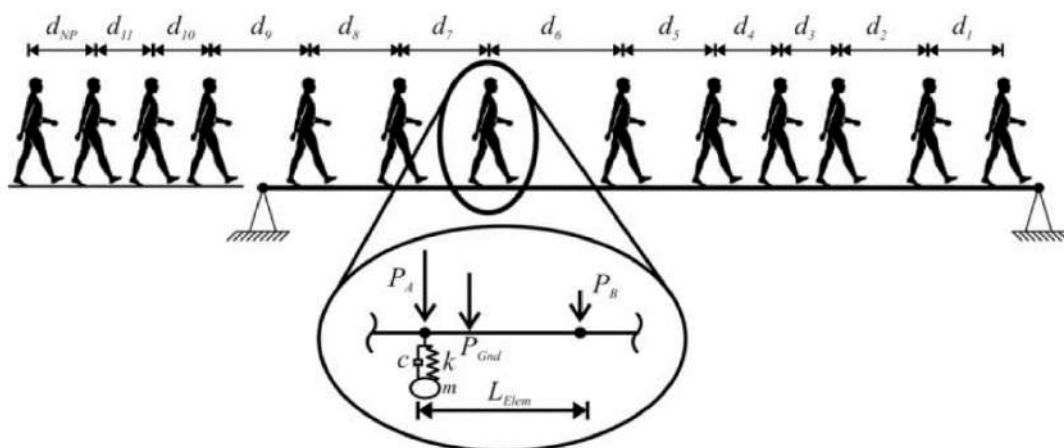


Figura 18 - Ilustração do modelo de carregamento proposto por Da Silva et al. [87].

Toso et al. [88] propuseram dois métodos para determinar os parâmetros de massa, rigidez e amortecimento de modelos de carregamento biodinâmicos de um grau de liberdade (S1GL). A fim de validar os métodos, os autores realizaram experimentos nos quais foram avaliadas a aceleração no domínio do tempo e da frequência. Como conclusão, os autores obtiveram uma melhor correlação com os dados experimentais no método de determinação dos parâmetros do modelo dinâmico que utiliza um método conhecido como Redes Neurais quando comparado ao outro método proposto por Da Silva et al. [87] que utiliza regressões lineares, quadráticas e cruzadas, além disso, os dois métodos obtiveram correlação melhor em comparação a aplicação de um carregamento dinâmico de força dura (*only force*).

Shahabpoor et al. [89] realizaram uma extensa revisão bibliográfica sobre a interação entre seres humanos e estruturas na direção vertical onde foram apresentados os principais modelos biodinâmicos desenvolvidos até então. Em seu trabalho, os autores citaram 108 trabalhos relacionados ao tema, comentando os principais avanços de cada trabalho e comparando os resultados de trabalhos similares. Pôde-se observar que os modelos biodinâmicos levantados nesta revisão são basicamente voltados para atividade do caminhar humano interagindo com estruturas de passarelas. Dentre as conclusões dos autores, destacam-se: a conclusão de que a identificação das propriedades dinâmicas do modelo de caminhar humano não tem sido estudado extensivamente no contexto do estado limite de serviço, que ainda não há uma evidencia conclusiva de qual seria o melhor e mais realista modelo biodinâmico de carregamento (S1GL, SVGL, pêndulo invertido, entre outros) para simular computacionalmente o caminhar humano na interação ser

humano-estrutura e que os modelos biodinâmicos existentes não obtêm uma correlação satisfatória com os resultados experimentais e, no caso dos modelos de Pêndulo Invertido (*IP*, sigla em inglês), apesar de teoricamente estarem revestido de uma maior realidade à atividade de caminhar, não são o bastante ajustados para uma implementação na prática. Os modelos de *IP* são propensos a produzir resultados que contradizem observações experimentais.

Debona [90] realizou experimentos e validou os resultados experimentais utilizando um modelo numérico-computacional que, dentre outras características, considerava um modelo biodinâmico de um grau de liberdade (S1GL) para simular o carregamento das pessoas sobre uma passarela situada no campus da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), no Pavilhão Reitor João Lyra Filho. Os modelos biodinâmicos acoplados sobre o modelo em elementos finitos da passarela, no que tange às análises de vibração forçada, conduziram a uma boa calibração da resposta estrutural dinâmica do modelo, gerando resultados satisfatórios em relação aos com os valores experimentais. Segundo o autor, a diferença existente entre os valores da resposta numérica e os valores experimentais é pequena, com diferenças da ordem de 5,5 e 9,7 %. O autor ainda destaca que as propriedades dinâmicas (massa, rigidez e amortecimento) da passarela e dos pedestres devem ser estabelecidas de maneira coerente, pois estas grandezas são bastante relevantes para uma correta definição da resposta estrutural dinâmica do modelo, no que diz respeito ao caminhar dos pedestres (caminhada lenta, normal e rápida).

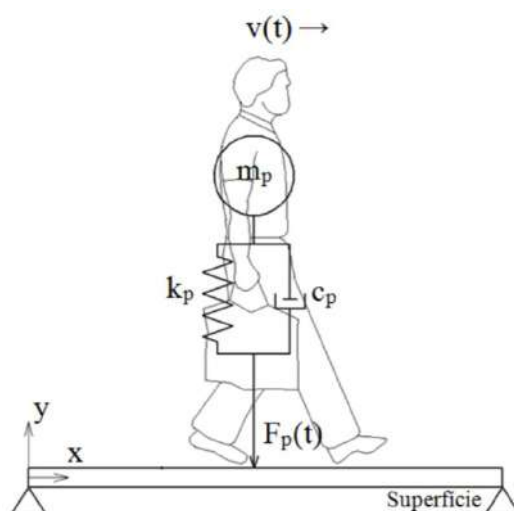


Figura 19 - Modelo biodinâmico de um grau de liberdade (S1GL) [90].

Shahabpoor et al. [91] realizaram estudos experimentais a fim de investigar o comportamento das propriedades dinâmicas de passarelas quando submetidas a esforços de pessoas simplesmente paradas em pé ou caminhando. Após coletar e comparar os dados experimentais de uma passarela experimental em três situações distintas (vazia, pessoas paradas e pessoas caminhando), os autores propuseram um modelo com graus de liberdade reduzidos que combinasse as propriedades dinâmicas de um modelo de um grau de liberdade dos pedestres (S1GL) com as propriedades dinâmicas do modelo de um grau de liberdade da estrutura vazia, resultando num modelo de dois graus de liberdade (S2GL), conforme Figura 20. Os autores concluíram que os efeitos do tráfego de múltiplas pessoas na direção vertical podem ser bem representados pelo modelo com graus de liberdade reduzidos proposto pelos autores. Os autores também chegaram à conclusão, na contramão de suas convicções iniciais, que frequência natural da estrutura ocupada submetida a múltiplas pessoas caminhando pode ser maior que a frequência natural da estrutura vazia, desde que a frequência natural do modelo dos pedestres seja menor que a frequência natural da estrutura vazia e que pessoas caminhando podem gerar um aumento do amortecimento da estrutura ocupada maior do que as pessoas simplesmente paradas e em pé na estrutura.

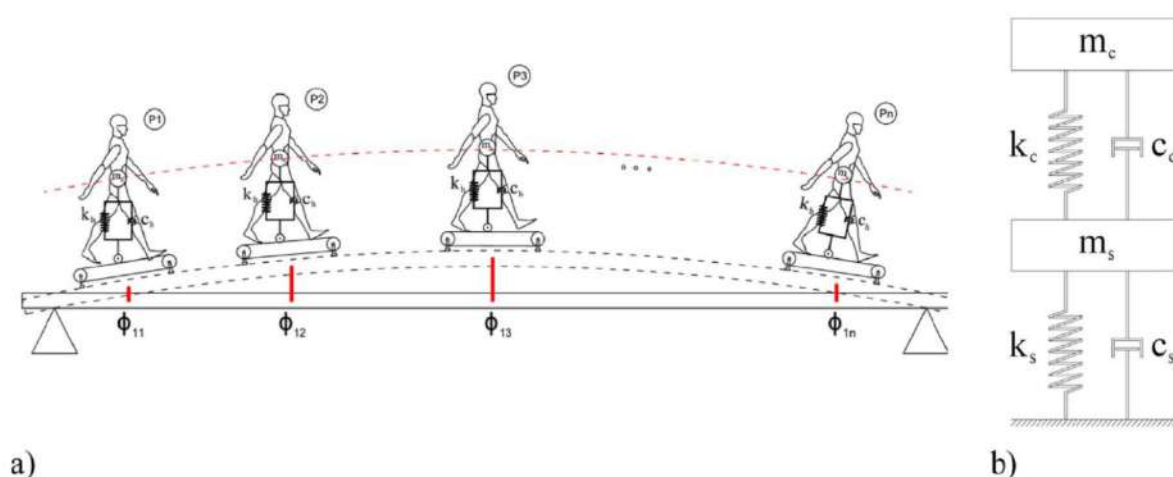


Figura 20 - Modelo de um sistema acoplado pessoas-estrutura. Parâmetros do modelo das pessoas são apresentados genericamente com m_c , k_c e c_c [91].

Kumar et al. [92] propuseram um modelo de oscilador autossustentado, basicamente um modelo de carregamento biodinâmico com um grau de liberdade (S1GL), submetido a uma força inercial para simular o caminhar humano. O modelo

proposto é uma fusão dos conhecidos osciladores de Rayleigh, Van der Pol and Duffing. Através de dados experimentais, os autores puderam calibrar os parâmetros do modelo e obtiveram uma boa correção. A principal vantagem da utilização do modelo proposto destacada pelos autores é, além de uma descrição mais realista da interação indivíduo-estrutura, a modificação causada pela utilização do modelo de oscilador nas propriedades dinâmicas da estrutura ocupada, principalmente em termos de adição de amortecimento. Por fim, os autores ressaltam que, para uma estrutura ocupada que é excitada de forma excessiva e perceptível, o modelo proposto de carregamento deve sofrer alterações significativas por meio da inclusão da aceleração vertical da estrutura na equação base da força inercial do modelo.

Campista [93], em seu trabalho, o estudo do comportamento estrutural dinâmico e avaliação do desempenho de arquibancadas de estádios de futebol, no que diz respeito à avaliação do conforto humano, com base no emprego de sistemas biodinâmicos representativos das pessoas. No que tange à modelagem das ações dinâmicas representativas das pessoas (torcidas), foram utilizados sistemas biodinâmicos acoplados ao sistema estrutural das arquibancadas. A investigação considera o efeito da interação dinâmica indivíduos-estrutura (torcidas-arquibancada), a partir do emprego de modelos biodinâmicos correspondentes a sistemas do tipo massa-mola-amortecedor, com um grau de liberdade (S1GL), de maneira a representar o comportamento dinâmico do corpo humano. As características dinâmicas dos sistemas biodinâmicos (massa, rigidez e amortecimento) foram determinadas mediante a realização de testes experimentais; e, também, com base na resolução matemática de um problema clássico de otimização, mediante a utilização de Algoritmos Genéticos (AG). A Figura 21 apresenta uma ilustração do modelo numérico computacional proposto pela autora com uma das distribuições de biodinâmicos sobre a arquibancada proposta. A autora cita como uma das principais contribuições de seu trabalho à obtenção das características dinâmicas dos sistemas biodinâmicos tendo em mente os resultados obtidos em ensaios experimentais que consideram as pessoas saltando, ou seja, durante a prática da atividade humana rítmica (torcida).

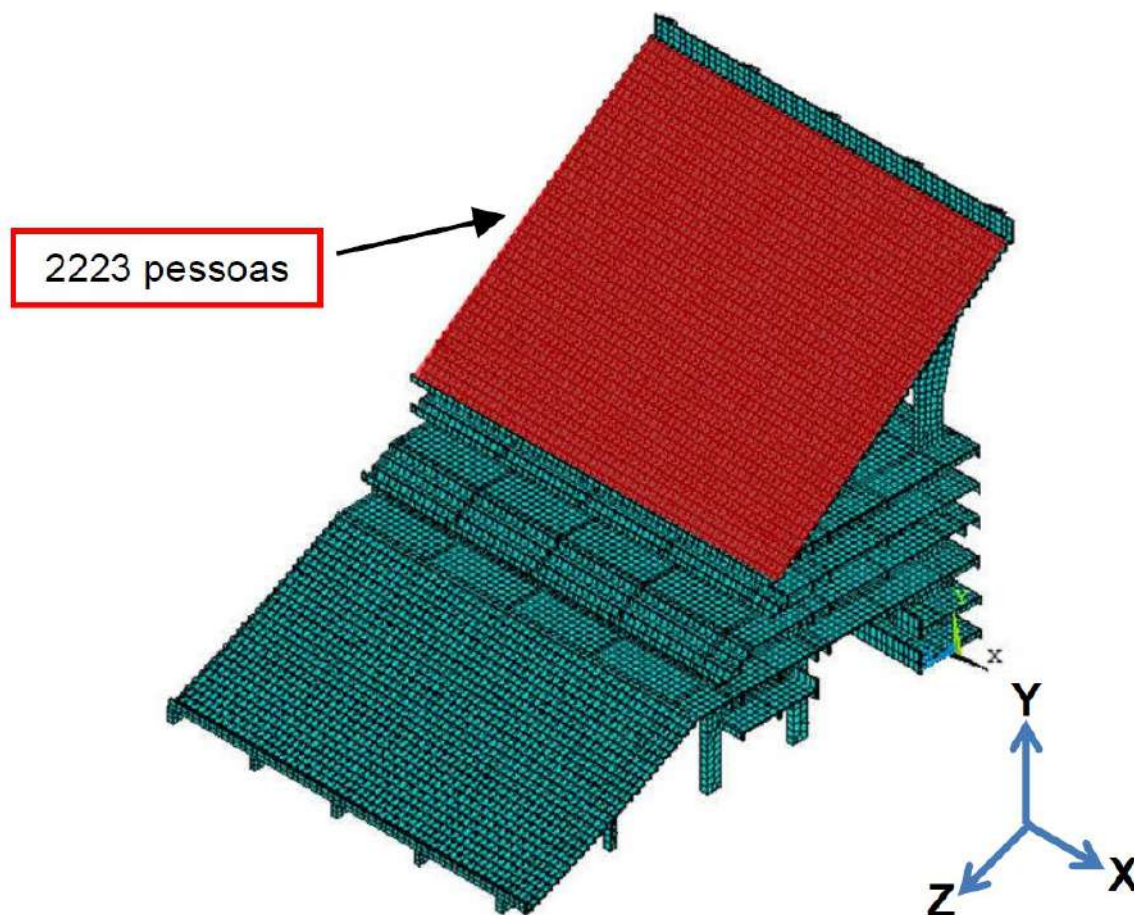


Figura 21 - Ilustração do modelo numérico com a inclusão dos modelos biodinâmicos na situação de carregamento SC-5 proposta por Campista [93].

Campista [94], em seu estudo, a fim de avaliar o comportamento estrutural dinâmico de pisos de edificações, quando submetidos a atividades humanas rítmicas (atividades aeróbicas), utilizou-se de modelos biodinâmicos cujas as características dinâmicas dos sistemas biodinâmicos (massa, rigidez e amortecimento) foram determinadas mediante a realização de testes experimentais; e, também, com base na resolução matemática de um problema clássico de otimização, mediante a utilização de Algoritmos Genéticos (AG). A Figura 22 a seguir ilustra como foi realizada a instrumentação da plataforma utilizada para coleta dos dados experimentais utilizados para determinação da carga propriedades características das pessoas. A autora cita como principal contribuição de seu trabalho de pesquisa a obtenção das características dinâmicas dos sistemas biodinâmicos para atividade aeróbica, tendo em mente os resultados obtidos em ensaios experimentais que consideram as pessoas saltando, ou seja, durante a prática da atividade humana rítmica.

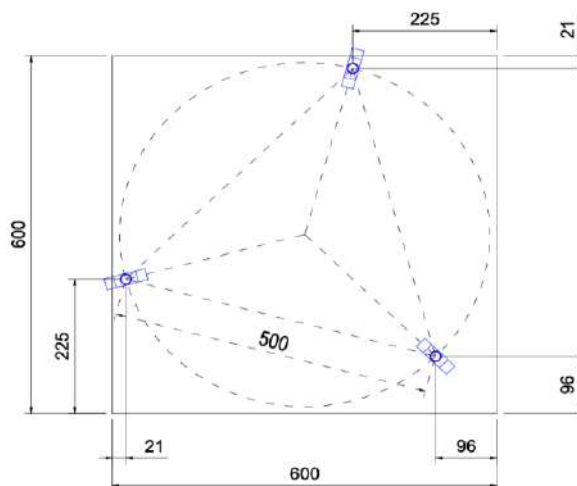


Figura 22 - Ilustração da instrumentação da plataforma utilizada para coleta dos dados experimentais [94].

Silva [95], por sua vez, a fim de avaliar o comportamento estrutural dinâmico de passarelas de pedestres, quando submetidas a atividade humana de caminhada, realizou diversas campanhas experimentais em uma passarela pública da cidade do Rio de Janeiro/RJ, localizada no bairro da Praça da Bandeira, que realiza uma importante ligação para os pedestres entre a Rua Ceará, Praça da Bandeira e Rua do Matoso. Em paralelo, o autor desenvolveu um modelo numérico da passarela investigada e uma modelagem do carregamento proveniente do caminhar humano, utilizando modelos biodinâmicos de um grau de liberdade (S1GL), conforme pode ser verificado na Figura 23. Utilizou-se aproximações da literatura (Da Silva et al. [87] e Toso et al. [88]) para consideração das características dinâmicas dos sistemas biodinâmicos (massa, rigidez e amortecimento). Após verificar a boa correlação entre os resultados experimentais e o modelo numérico, o autor ainda realizou um extenso estudo paramétrico da resposta dinâmica da passarela variando diversos parâmetros. Por fim, o autor realizou uma avaliação do conforto humano da passarela, entre os valores das acelerações de pico, obtidas via monitoramento experimental dinâmico e modelagem numérica, e as recomendações fornecidas por guias internacionais clássicos de projeto (HIVOSS e SÉTRA). Como principal contribuição, pode-se citar o enquadramento dos resultados da metodologia desenvolvida pelo autor, considerando-se a utilização de modelos biodinâmicos, com os observados nos ensaios experimentais, validando a atenuação das respostas numéricas e proporcionando resultados mais realistas.

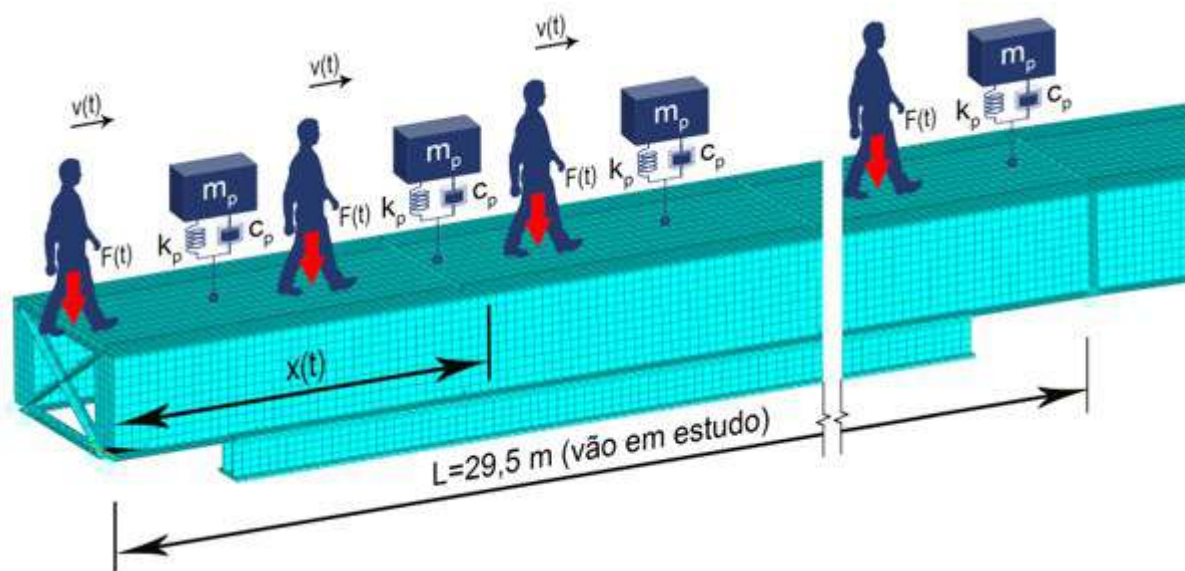


Figura 23 - Modelo biodinâmico do caminhar humano sobre a passarela [95].

1.7 Observações finais do capítulo

Neste capítulo, foram apresentadas em ordem cronológica, diversas estudos que versam sobre os assuntos abordados nesta tese, citadas na literatura, referentes à modelagem numérico-computacional de sistemas estruturais, percepção e avaliação do conforto humano no que tange à vibrações em estruturas, modelagem matemática de carregamentos provenientes do atividade humana (caminhada, dança, atividades rítmicas, saltos, entre outros) e modelagem da interação indivíduo-estrutura com por meio de modelos biodinâmicos (massa, rigidez e amortecimento) de um a vários graus de liberdade, de forma a representar as pessoas ocupando e interagindo com as estruturas. Vale ressaltar a grande quantidade de publicações acerca da modelagem do caminhar humano presentes em jornais da área de biomecânica, além das encontradas em periódicos de engenharia e estruturas. No capítulo dois, será apresentada a descrição do mais aprofundada sobre a interação indivíduo-estrutura.

2 INTERAÇÃO DINÂMICA INDIVÍDUO-ESTRUTURA

2.1 Considerações iniciais

Neste capítulo pretende-se apresentar os modelos biodinâmicos utilizados na literatura com o intuito de representar a interação dinâmica indivíduo-estrutura. Sendo assim, sistema de modelos biodinâmicos com um grau de liberdade (S1GL), dois graus de liberdade (S2GL) e três ou mais graus de liberdade (SVGL) são descritos de modo a entender as peculiaridades de cada modelo. Porém, nota-se que é comum a prática de aplicar o carregamento dos indivíduos como cargas estaticamente equivalentes às cargas produzidas pelas atividades humanas, majorando-as de um coeficiente de impacto por recomendação de normas de projeto [96]. Apesar disso, pode ser destacada a ineficácia destes procedimentos de projetos estimarem com segurança e precisão a resposta dinâmica estrutural [97].

Percebia-se que, em relação ao movimento dos seres humanos, a importância interação indivíduo-estrutura era desprezada [98], entretanto, estudos mais recentes revelam efeitos significativos de tal interação modificando a resposta dinâmica da estrutura [99], através de diferentes mecanismos e direções, em função da postura do corpo humano e do tipo de atividade realizada [75]. Sachse [100], em seu trabalho de pesquisa, classificou, a partir de um sistema massa-mola-amortecedor, esta interação em duas categorias: a primeira contempla os efeitos do corpo humano sobre as propriedades da estrutura (massa, rigidez e amortecimento) e a segunda categoria inclui os efeitos das vibrações estruturais sobre as forças induzidas por seu comprimento e a velocidade da caminhada, considerando a frequência do passo.

Diante do exposto, há a necessidade do aperfeiçoamento da consideração da interação dinâmica indivíduo-estrutura, com modelos mais realistas de simulação dos seres humanos caminhando. Logo, o modelo biodinâmico reproduz, de modo simplificado, a dinâmica vertical deste movimento e sua representação provem da necessidade de adicionar ao modelo de “força dura” (“*only force model*”), largamente utilizado, um modelo constituído de massa, rigidez e amortecimento, de modo a considerar as contribuições dinâmicas que as pessoas adicionam às estruturas,

sobretudo em situação de multidão. A Figura 24 ilustra um modelo de uma pessoa com um grau de liberdade, modelo este que é utilizado nesta Tese.

Por outro lado, há modelos que podem ser caracterizados por um sistema de um (S1GL) ou vários graus de liberdade (S2GL, S3GL, SVGL). Existem diversas propostas modelos como estes, em relação à direção vertical, representando uma pessoa parada, em pé ou sentada (ISO 5982 [101]; Matsumoto e Griffin [102]; Sachse et al. [77, 100]; Reynolds et al. [104]; Salyards e Firman [105]), para pessoas pulando (Nhleko et al. [106]) e para pessoas correndo (Ferris et al. [107]; Nigg e Liu [108]). Para pessoas caminhando, existem algumas propostas mais atuais (Miyamori et al. [109]; Kim et al. [110]; Silva e Pimentel [111]; e Caprani et al. [112]), porém pouco exploradas, distintas em relação ao número de graus de liberdade e em como são estabelecidos as características de massa, amortecimento e rigidez. A seguir, serão apresentadas as pesquisas de modelos biodinâmicos, classificados de acordo com o grau de liberdade dos sistemas, tendo como consideração a atividade do caminhar do ser humano.

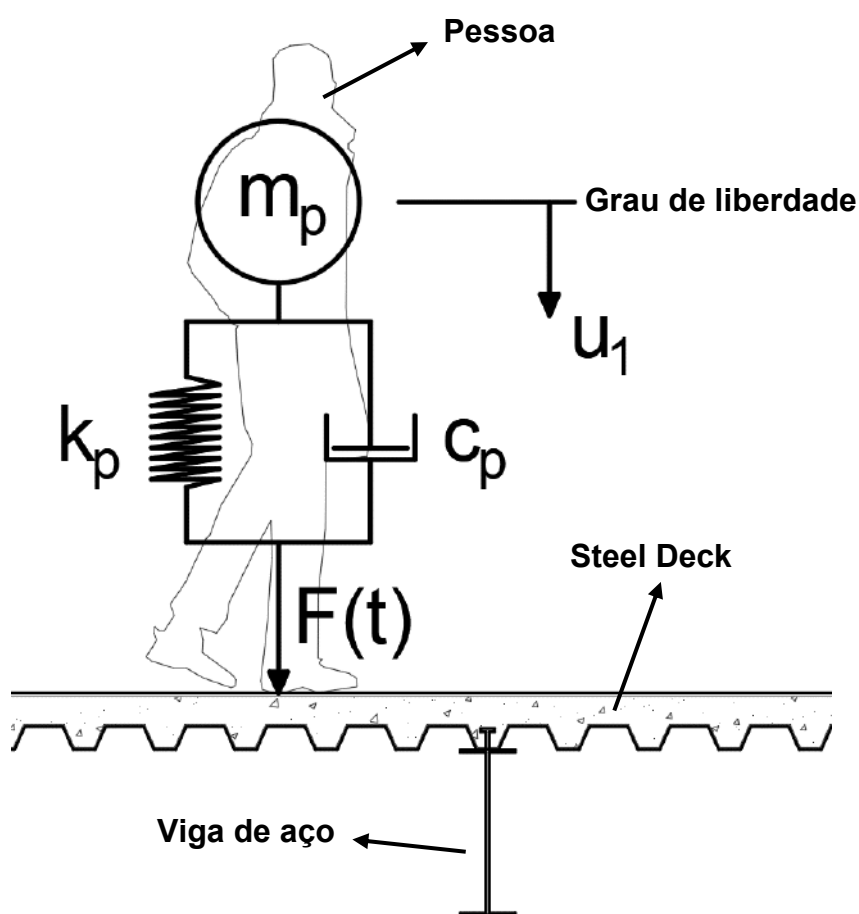


Figura 24 - Modelo massa-mola-amortecedor de uma pessoa (S1GL).

2.2 Sistemas com um grau de liberdade (S1GL)

Segundo Sachse [113], a modelagem de pessoas estacionárias em uma estrutura vibratória, consideradas como massas adicionais, por si só não poderia explicar as mudanças observadas nas propriedades dinâmicas do sistema de humano-estrutura. Assim, em uma tentativa de resolver tal problema e fornecer algum grau de interação entre a pessoa e a estrutura de teste, Fanning, Achbold e Pavic [114] modelaram o indivíduo como um sistema dinâmico que consiste em uma massa concentrada em contato com o piso da estrutura por meio de um elemento mola-amortecedor a fim de explicar a interação indivíduo-estrutura durante a caminhada.

Por outro lado, Nimmen et al. [115] averiguaram a influência da presença de pessoas nas características dinâmicas da estrutura por meio de um extenso estudo experimental em uma estrutura em condições de laboratório. A interação dinâmica foi considerada por meio de um modelo humano-estrutura acoplado, no qual os ocupantes humanos foram representados por modelos biomecânicos simples, massa-mola-amortecedor, conforme Figura 25.

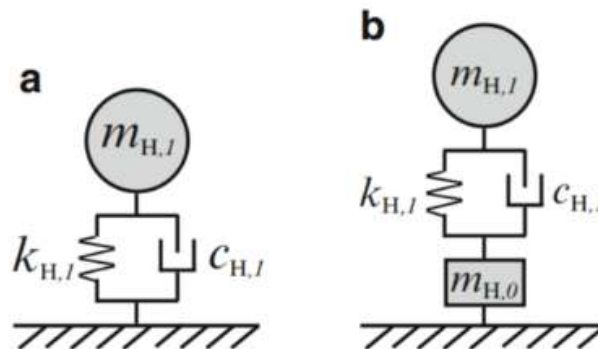


Figura 25 - Modelos (a e b) matemáticos representando o corpo humano utilizados por Nimenn et al. [115].

Griffin e Matsumoto et al. [102] demonstraram, por meio de inúmeros testes experimentais, que o comportamento de indivíduos em pé expostos a vibrações verticais do corpo inteiro na faixa de frequência entre 0,5 e 30 Hz se assemelhou ao de um sistema com um grau de liberdade (S1GL) ou com um de dois graus de liberdade (S2GL) sujeito a excitação de base. Verifica-se na Tabela 2 que na literatura

existe um consenso de que a principal frequência de ressonância do corpo humano, na postura normal de pé, encontra-se entre 5 e 6 Hz. Às vezes, uma massa rígida adicional é considerada no suporte, por exemplo tal que a massa total do sistema seja igual à massa nominal do sujeito ($m_H = m_{H,1} + m_{H,0}$) [115]. Esses modelos SDOF foram apresentados na Figura 25. Para o caso em que uma massa rígida é considerada no suporte, essa massa geralmente permanece limitada a 5% da massa nominal do corpo humano.

Tabela 2 - Valores das características dinâmicas do corpo humano: postura normal em pé sujeito a vibrações em todo o corpo. Adaptado de Nimenn et al. [115].

Tipo	Autor	Modelo	Frequência (Hz)	Amortecimento (%)
Vertical	Zheng e Brownjohn [116]	S1GL	$f_{H,1} = 5,24,$ $\sigma(f_{H,1}) = 0,40$	$\xi_{H,1} = 39,$ $\sigma(\xi_{H,1}) = 5$
Vertical	Matsumoto e Griffin [102]	S1GL	$f_{H,1} = 5,7,$ $\sigma(f_{H,1}) = 0,40$	$\xi_{H,1} = 69,$ $\sigma(\xi_{H,1}) = 7$
		S2GL	$f_{H,1} = 5,5$	$\xi_{H,1} = 40$
			$f_{H,2} = 13,9$ Hz	$\xi_{H,2} = 37$
Vertical	ISO 5982 [101]	S2GL	$f_{H,1} = 5,0$	$\xi_{H,1} = 36$
			$f_{H,2} = 12,5$ Hz	$\xi_{H,2} = 46$
Lateral	Matsumoto e Griffin [117]	–	$f_{H,1} = 0,4 - 0,8$	–

A partir da verificação do efeito que a presença do corpo humano presença exerce sobre as características dinâmicas da estrutura ocupada de Sachse [113], segundo Nimmen et al. [115], as características dinâmicas do corpo humano foram identificadas indiretamente. Os experimentos foram realizados em uma estrutura controlada no Laboratório de Estruturas da Universidade de Warwick (Conventry, Inglaterra), para a qual as características modais identificadas experimentalmente foram discutidas em Zivanovic et al. [118].

Por fim, Nimmen et al. [115] perceberam a influência considerável da presença de pessoas na estrutura acoplada. A análise mostrou que as frequências naturais diminuiram levemente devido à massa adicional, entretanto foi mais expressivo o aumento observado no amortecimento estrutural. Ressalta-se ainda a suscetibilidade de respostas superestimadas relativas à excitação das pessoas sobre o piso quando

se faz uso do modelo de “força dura”, desconsiderando-se a interação indivíduo-estrutura.

2.3 Sistemas com dois graus de liberdade (S2GL)

Dentre os sistemas representativos biodinâmicos de dois graus de liberdade (S2GL), pode-se cita o elaborado por Kim et al. [119], os quais adotaram um modelo simples de corpo humano, conforme recomendado pela ISO 5982 [101], com dois graus de liberdade (S2GL) verticais, considerando a interação dinâmica humano-estrutura. No entanto, este modelo representa apenas o deslocamento vertical do centro de massa, em vez de qualquer movimento físico da perna. Deste modo, A rigidez da perna correspondente ao deslocamento vertical do centro de massa não representa a rigidez real da perna. Dessarte, o modelo não pode reproduzir a dinâmica observada na fase de suporte duplo com duas pernas em contato com o piso. Portanto, não fica bem compreendido como a vibração estrutural influencia as forças induzidas pelo indivíduo e como este pode influenciar nas propriedades dinâmicas de uma estrutura, tais como a frequência natural e o amortecimento.

Qin et al. [119, 120], por sua vez, simularam uma pessoa como um modelo de caminhada bípede com dois graus de liberdade (S2GL), conforme ilustrado na Figura 26. Para tal, o corpo humano foi modelado como uma massa concentrada no centro de massa (COM) e as duas pernas foram representadas por duas molas lineares sem massa, de igual comprimento no repouso, com rigidez e um amortecedor variáveis no tempo. Uma mola passiva fornece um mecanismo para absorver impactos de colisão e gerar impulsos de empurrão, enquanto o amortecedor restringe movimentos excessivos do centro de massa [122]. Assim, tanto as molas, quanto os amortecedores, agem de forma independente e influenciam a dinâmica do modelo apenas durante o repouso, quando as forças de mola e amortecedor se opõem à força gravitacional do corpo humano.

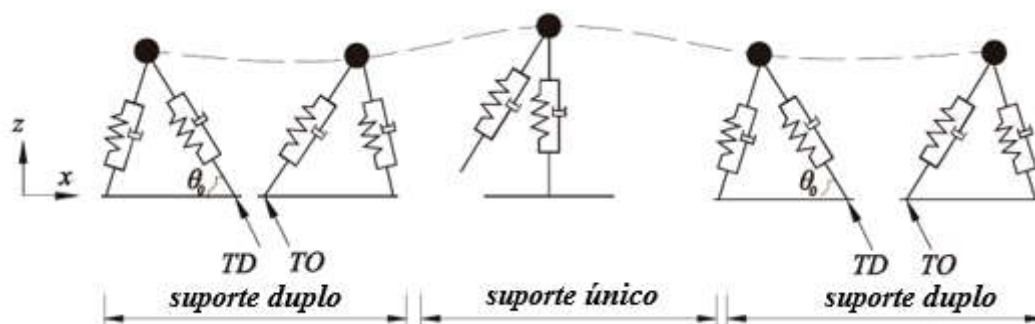


Figura 26 - Modelo biodinâmico de caminhada (θ_0 é o ângulo de ataque) [120].

Em análise da Figura 26, nota-se que uma etapa completa, definida como o intervalo entre o "golpe do calcanhar" de passos progressivos, foi dividida em dois períodos: fase de suporte único e fase de suporte duplo. Por exemplo, a fase de suporte duplo começa com o toque para baixo (TD, do inglês *touch down*) da perna principal e termina com o toque para fora (TO, do inglês, *touch off*) da perna traseira, conforme mostrado na, onde a fase de suporte único começa. Por conseguinte, a perna à direita é reposicionada à frente do centro de massa do corpo em um determinado ângulo de ataque e se torna a perna principal para o próximo passo. Quando a perna de trás atinge o chão, a fase de suporte único é concluída.

Após comparação do modelo de interação indivíduo-estrutura de Qin et al. [120] com os do modelo de "força dura" no domínio do tempo, os autores concluíram que o modelo proposto fornece um meio de entender como a vibração estrutural pode influenciar o comportamento de caminhar de uma pessoa e como esta pode responder ao nível de vibração da estrutura para manter uma caminhada estável, o que, por sua vez, afeta as respostas dinâmicas da estrutura.

Em um outro modelo de caminhada bípede com dois graus de liberdade (S2GL), Whittington e Thelen [123] agruparam pés em forma de rolete no modelo de massa-mola e avaliaram o efeito do raio do rolete, ângulo de impacto e rigidez do membro nas características espaço-temporais da caminhada, reações no solo e excursões ao centro de pressão. A Figura 27 a seguir ilustra o modelo proposto pelos autores para representar o caminhar humano.

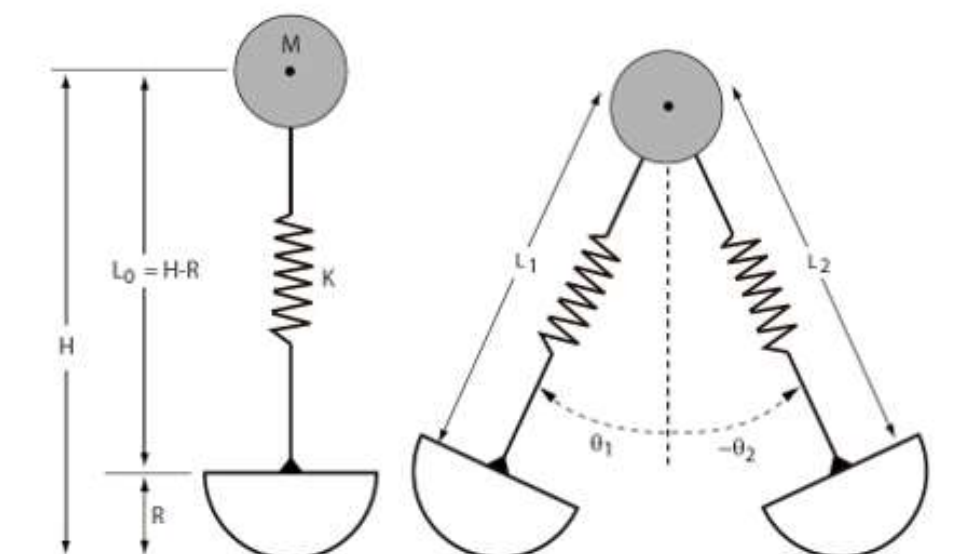


Figura 27 - Modelo massa-mola, com pés em roletes [123].

A Figura 27 ilustra que cada membro foi representado por uma mola de translação, com rigidez K e comprimento no repouso L_0 , que foi rigidamente acoplado a um rolete de raio R de um lado e preso a uma massa pontual M do outro lado. A massa pontual foi colocada na altura H do centro de massa do corpo, com a mola do membro em uma configuração vertical não esticada. As simulações foram realizadas pelos autores assumindo valores normativos de $H = 1$ m e $M = 80$ kg. Foram considerados roletes com os seguintes raios, em metros: 0,0, 0,1, 0,2, 0,3 e 0,4.

Por meio desse modelo, Whittington e Thelen [123] avaliaram a previsão de alterações, em função da velocidade, nas forças de reação do solo e excursões do centro de pressão observadas durante a caminhada normal do ser humano. Os autores conseguiram definir ciclos de movimento, semelhantes à caminhada em um amplo espectro de parâmetros do modelo. Foi observado que um rolete com 0,3 m de raio diminuiu a magnitude das forças de reação de pico do solo e permitiu a progressão do centro de pressão para frente, tornando o modelo mais consistente com a caminhada humana. A uma velocidade fixa, o aumento do ângulo de impacto do membro reduziu a cadência e prolongou a duração da postura. Aumentos na rigidez dos membros ou no ângulo de impacto tenderam a resultar em reações verticais no solo mais oscilatórias. Por fim, os autores concluíram que um modelo simples de mola de massa com pés de rolo pode bem descrever as forças de reação do solo e, portanto, o centro de movimento de massa, observado durante a caminhada humana normal.

Percebe-se que a utilização do modelo de pêndulo invertido é bastante comum na representação de sistemas de modelos biodinâmicos com dois graus de liberdade (S2GL), entretanto estes modelos são de complexa implementação numérica e de difícil determinação dos parâmetros massa-mola.

2.4 Sistemas com mais de três graus de liberdade (SVGL)

Como sistema de três graus de liberdade, pode ser citado o trabalho de Miyamori et al. [124] que modelaram a caminhada de uma pessoa através de um modelo com três graus de liberdade (S3GL) na direção vertical associado a um modelo de força, realizando o acoplamento das equações dinâmicas do corpo humano com as equações de movimento da estrutura. Além disso, a massa, a rigidez e o amortecimento representativos do pedestre foram combinados por meio de diversas travessias individuais. A Figura 28 ilustra o modelo utilizado pelos autores.

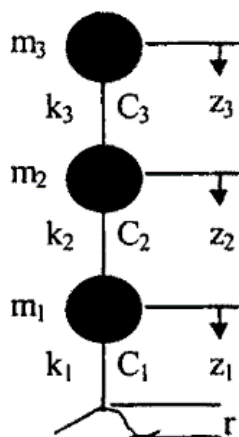


Figura 28 - Modelo (S3GL) de Miyamori et al. [124] apud [125].

Martin e Schmiebler [126], por sua vez, analisaram modelos bípedes planos de quatro e seis conexões, portanto, com quatro e seis graus de liberdade (GL) respectivamente, com joelhos e pés circulares rígidos, incluindo articulações do tornozelo. Caminhadas periódicas foram realizadas para, comparativamente, avaliar o desempenho dos modelos em relação a uma caminhada humana normal por meio de dados experimentais variando a velocidade, de muito lenta a muito rápida. A ilustração

do modelo proposto pelos autores pode ser verificado na Figura 29. O modelo com quatro graus de liberdade suprime os GL q_5 e q_6 .

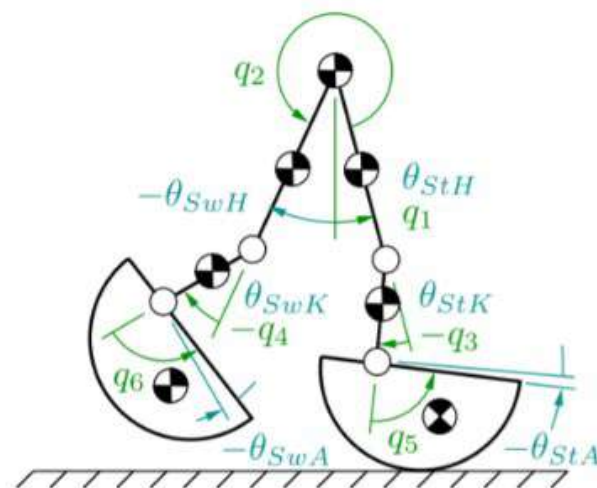


Figura 29 - Modelo de seis graus de liberdade (q_1 a q_6) investigado por Martin e Schmiedeler [126].

Conforme ilustrado na Figura 29, o modelo de seis conexões correspondeu bem ao comprimento do passo experimental, velocidade e potência absoluta média, indo de encontro ao modelo de quatro conexões, indicando que o trabalho no tornozelo é um elemento crítico em modelos de caminhada humana desse tipo. Além de simplesmente combinar dados humanos, o modelo de seis conexões pode ser usado como forma de otimização para prever a caminhada normal humana. Tal modelo também previu bem o comprimento do passo experimental, movimentos articulares e potência absoluta média em toda a gama de velocidades.

Por fim, nota-se que o grau de complexidade, por ocasião da utilização de sistemas de modelos biodinâmicos que possuem mais de dois graus de liberdade, aumenta indiscutivelmente, o que torna a modelagem numérica complexa, além de ser difícil a predição de todos os parâmetros biodinâmicos que envolve tais modelos. Assim, visando considerar a interação indivíduo-estrutura, este trabalho de pesquisa optou pela utilização de sistemas com um grau de liberdade (S1LG), tendo em vista a maior facilidade em modelagem via elementos finitos, além do maior número de trabalhos na literatura que estudam e propõem as características do sistema massa-mola-amortecedor.

2.5 Observações finais do capítulo

Neste capítulo, foram apresentadas algumas características, citadas na literatura, referentes à modelagem da interação indivíduo-estrutura com modelos biodinâmicos (massa, rigidez e amortecimento). Vale ressaltar a grande quantidade de publicações acerca da modelagem do caminhar humano presentes em jornais da área de biomecânica, além das encontradas em periódicos de engenharia e estruturas. No capítulo seguinte, será apresentada a descrição do modelo estrutural investigado e suas propriedades.

3 MODELO ESTRUTURAL INVESTIGADO

3.1 Considerações iniciais

Este capítulo tem por objetivo apresentar o modelo estrutural do piso a ser investigado nesta Tese, que se trata de uma estrutura real de uma obra que estava em construção, no momento da realização dos ensaios experimentais, na cidade de Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil. A edificação foi projetada inicialmente para ser um hospital escola de uma universidade particular daquela metrópole. Além disso, pretende-se identificar a estrutura, sua localização, geometria geral da edificação, geometria do piso investigado e as propriedades físicas e geométricas de todos os elementos estruturais do piso investigado. Ressalta-se que o desenvolvimento da campanha experimental deste trabalho de pesquisa foi realizado em parceria com Ferreira [127] Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas (PPGEE), da Escola de Engenharia de Estruturas, da Universidade federal de Minas Gerais, sendo utilizados os equipamentos do Laboratório de Análise Dinâmica e Acústica Estrutural da UFMG (LADAE). Registra-se ainda a relevância da empresa CODEME Engenharia S/A que, além de fornecer os projetos e memórias da edificação investigada, librou acesso ao canteiro de obra para que fosse realizado as campanhas experimentais.

3.2 Apresentação do modelo estrutural investigado

O modelo estrutural investigado corresponde ao piso do 8º pavimento de um edifício real e existente, o qual se encontrava em fase de construção, quando da realização dos ensaios experimentais em julho do ano de 2019. A edificação, conforme informado pela empresa, foi projetado para ser um hospital escola de uma universidade particular (FAMINAS), na cidade de Belo Horizonte/MG, Brasil. A obra está endereçada na Rua das Avelãs, nº 80, Vila Clóvis, Belo Horizonte/MG, CEP: 31.744-030; e sua localização por satélite pode ser verificada na Figura 30. O sistema estrutural da edificação é baseado em uma estrutura mista de aço-concreto, o qual é

composto por lajes mistas de “steel deck” com chapas autoportantes e capa de concreto apoiadas sobre vigas metálicas e pilares mistos aço-concreto, pilares em caixão metálico preenchido com concreto armado. O Edifício possui um total de doze pavimentos, incluindo casa de máquinas, barrilete, fundo da caixa d’água e topo da caixa d’água. A Figura 31 apresenta o que seria a perspectiva final da fachada da edificação em maquete digital, enquanto as Figuras 12 e 13 apresentam a fase na qual se encontrava a construção da edificação em julho de 2019, momento da realização dos ensaios que constam neste trabalho.



Figura 30 - Localização da edificação em construção. Google Maps [128] adaptado.

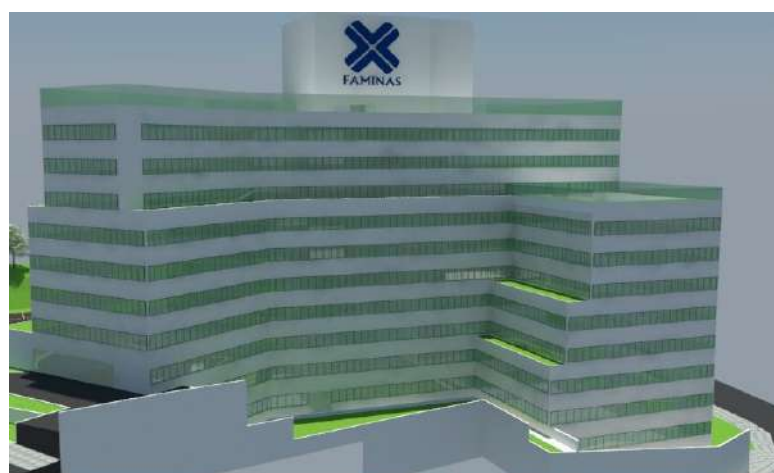


Figura 31 - Maquete digital da perspectiva final da fachada da edificação.



Figura 32 - Fotografia do estágio da obra no momento dos ensaios desta tese.



Figura 33 - Fotografia do estágio da obra no momento dos ensaios desta tese.

O pavimento tipo deste edifício possui uma área total aproximada de 1.300 m², com pé-direito padrão entre pavimentos ocupáveis de 3,40 metros. Foram estudados os pisos compreendidos entre os eixos A e C e entre os eixos B' e D,' correspondente ao piso do 8º pavimento da edificação, os quais encontram-se destacados em vermelho (Figura 34) e identificados, nesta Tese, como Lado A e Lado B, respectivamente. As propriedades geométricas e mecânicas dos perfis das vigas e pilares do 8º pavimento podem ser verificadas no Anexo B desta Tese.

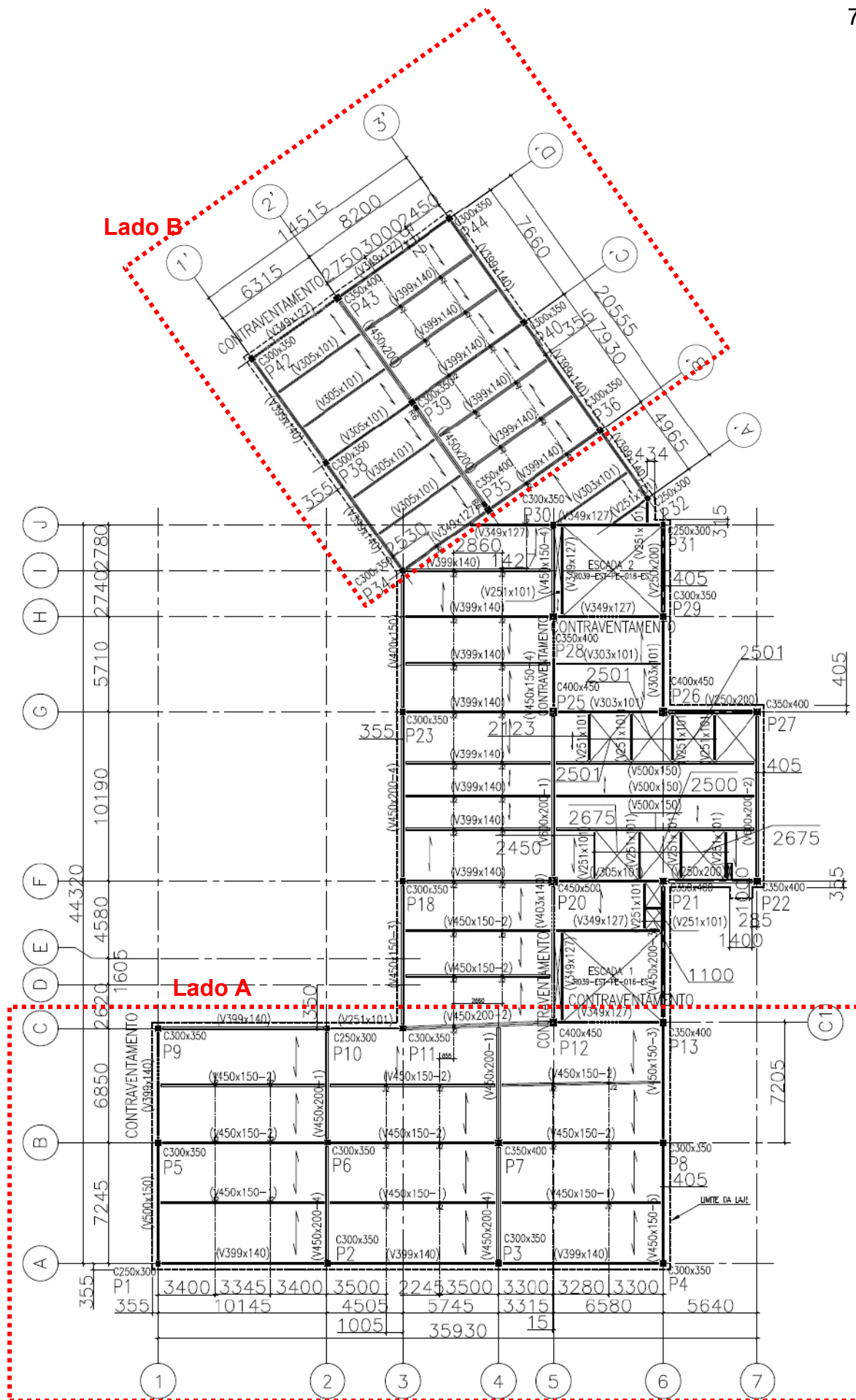


Figura 34 - Piso misto (aço-concreto) investigado: 8º pavimento (cotas em mm).

A Figura 35 tem a representação em corte da elevação corte eixos C/C1 do edifício investigado. As Figuras 34 e 35, por sua vez, trazem uma ampliação dos Lados A e B do 8º pavimento da edificação, respectivamente, região onde foi instrumentado e executado os testes experimentais constantes nesta Tese.

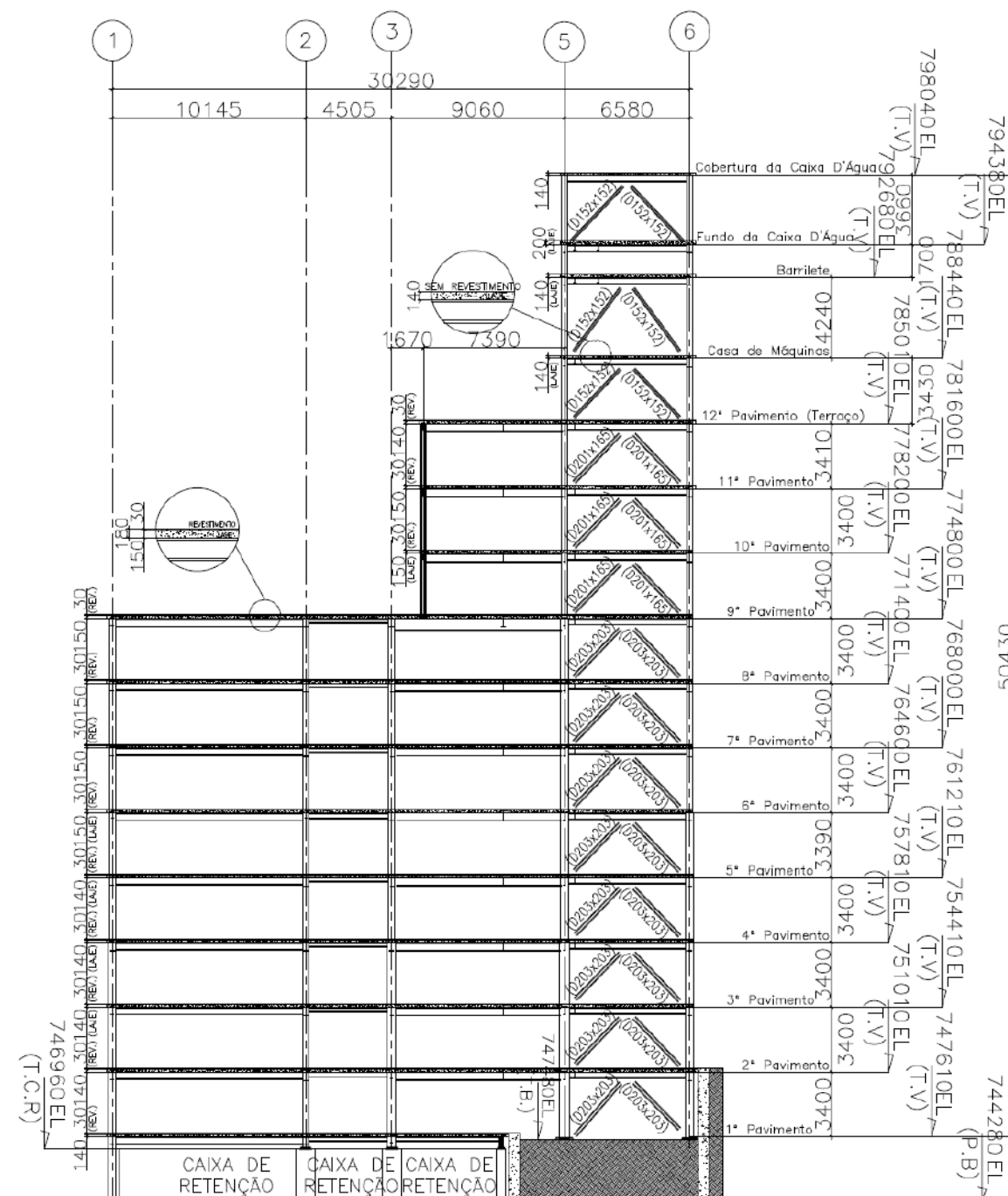


Figura 35 - Elevação corte eixos C/C1 do edifício investigado (cotas em mm).

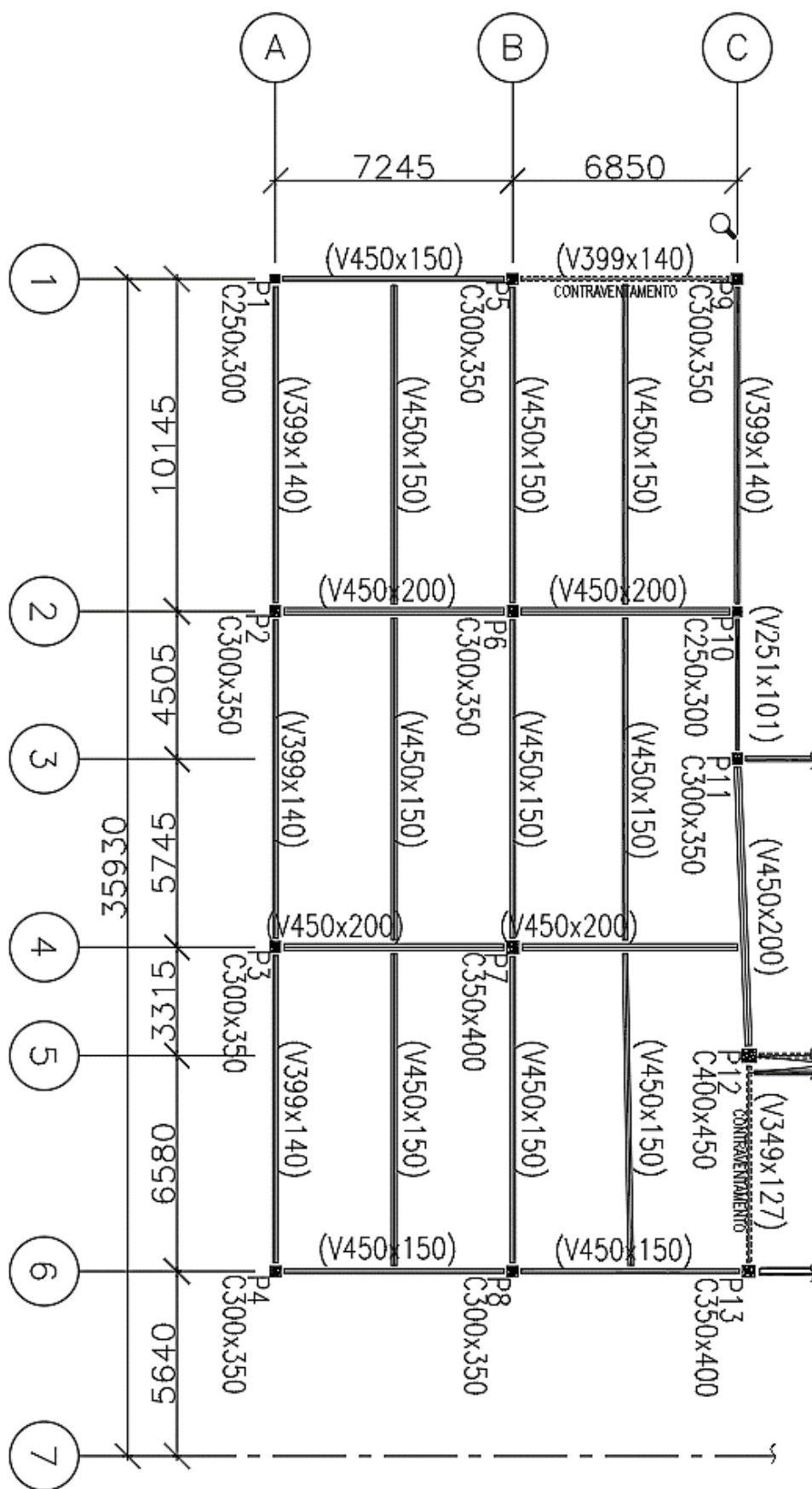


Figura 36 - Dimensões e seções transversais dos perfis do Lado A (cotas em mm).

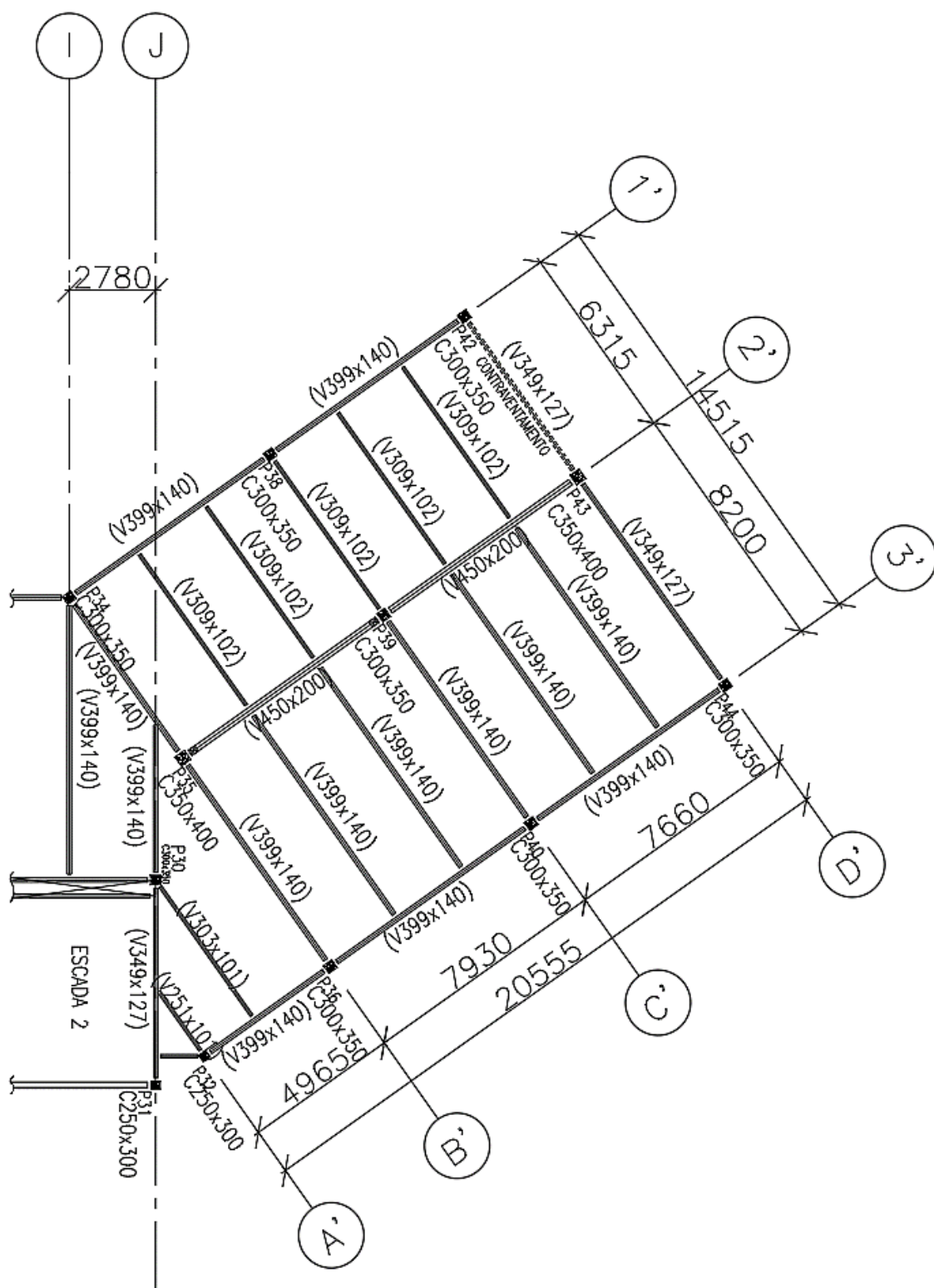


Figura 37 - Dimensões e seções transversais dos perfis do Lado B (cotas em mm).

3.3 Propriedades físicas e geométricas dos elementos estruturais

Os pilares e vigamento do edifício são constituídos por perfis metálicos soldados, com dimensões e propriedades geométricas de acordo com o projeto fornecido pela empresa executora da obra e apresentados no Anexo A, ressaltando-se que os pilares são feitos de perfis soldados em forma de caixão preenchidos de concreto e reforçados com barras de aço no seu interior. As lajes são do tipo “*steel deck*” com espessura total de 15 cm, incluindo a forma da Metform tipo MF75, com 7,50 cm de altura das nervuras das formas, e a espessura das chapas que, neste projeto, pode assumir valores de 0,85 ou 0,95 mm a depender da localização do piso no layout do pavimento. A Figura 38 abaixo apresenta o fundo do Steel Deck, o vigamento e pilares do teto do 8º pavimento a fim de ilustrar os componentes estruturais utilizados na estrutura do edifício em construção. O contraventamento da estrutura é realizado por meio de perfis diagonais, conforme verificado na Figura 33, em alguns pontos específicos da estrutura do edifício. Percebe-se que tal contraventamento, do modo que foi projetado, tem a capacidade de travar translacionalmente algumas vigas do pavimento investigado.



Figura 38 - Fotografia do 8º pavimento da edificação investigada.

Em relação às características físicas dos materiais empregados, o concreto possui resistência característica à compressão (f_{ck}) igual a 29,43 MPa (300 kgf/cm²), módulo de elasticidade (E_c) de $2,58 \times 10^4$ MPa ($2,53 \times 10^5$ kgf/cm²), coeficiente de

Poisson (ν_c) igual a 0,2 e peso específico (γ_c) de 2.500 kgf/m³; e o aço tem resistência característica de escoamento (f_y) de 258 MPa ($2,53 \times 10^3$ kgf/cm²), módulo de elasticidade (E_s) de $2,08 \times 10^5$ MPa ($2,04 \times 10^6$ kgf/cm²), coeficiente de Poisson (ν_s) igual a 0,3 e peso específico (γ_s) de 7.849 kgf/m³, sendo todas essas características extraídas dos projetos estruturais da edificação.



Figura 39 - Detalhe do contraventamento no 8º pavimento da edificação.

Conforme verificado na Figura 39, também há a necessidade de consideração uma alvenaria de 1,00 metro de altura em torno de todo o pavimento das caixas de escada e das caixas de elevadores, não considerada no modelo numérico que serviu de preparação para o planejamento dos ensaios, visando simular de forma mais realista as condições encontradas na obra no momento dos ensaios experimentais. Trata-se de uma alvenaria estrutural, construída com bloco cerâmico estrutural de 14x19x29 cm e reforçada com cintas e pilaretes compostos por graute, concreto e barras de aço. Adotou-se um módulo de elasticidade longitudinal da alvenaria (E_a) de $1,2 \times 10^4$ MPa ($1,17 \times 10^5$ kgf/cm²), coeficiente de Poisson da alvenaria (ν_a) igual a 0,15 e peso específico da alvenaria (γ_a) de 1.250 kgf/m³, conforme critérios estabelecidos pela norma ABNT NBR 15812-1: 2010 - Alvenaria Estrutural - Blocos cerâmicos Parte 1 [129], devido à ausência de ensaios ou informações precisas acerca das características do bloco utilizados na confecção dessa alvenaria.

3.4 Resumo das características relevantes

A Tabela 3 a seguir apresenta um resumo das características mais relevantes dos materiais utilizados no projeto da edificação investigada e neste trabalho de pesquisa

Tabela 3 - Resumo das propriedades dos materiais utilizados.

Material	Propriedades	Valor
Concreto	f_{ck}	29,43 MPa (300 kgf/cm ²)
	E_c	$2,58 \times 10^4$ MPa ($2,53 \times 10^5$ kgf/cm ²)
	γ_c	2.500 kgf/m ³
	ν_c	0,2
Aço	f_y	258 MPa ($2,53 \times 10^3$ kgf/cm ²)
	E_s	$2,08 \times 10^5$ MPa ($2,04 \times 10^6$ kgf/cm ²)
	γ_s	7.849 kgf/m ³
	ν_s	0,3
Alvenaria	E_a	$1,2 \times 10^4$ MPa ($1,17 \times 10^5$ kgf/cm ²)
	γ_a	1.250 kgf/m ³
	ν_a	0,15

3.5 Observações finais do capítulo

Neste capítulo, foram apresentadas as características físicas e geométricas do sistema estrutural do 8º pavimento do edifício investigado nesta tese, necessárias ao desenvolvimento da modelagem numérico-computacional da estrutura. No capítulo quatro, o modelo numérico-computacional adotado neste trabalho de pesquisa será apresentado, bem como suas respectivas características principais.

4 MODELAGEM NUMÉRICA VIA MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

4.1 Considerações iniciais

Este capítulo aborda o desenvolvimento do modelo numérico-computacional do sistema estrutural do piso do 8º pavimento do edifício abordado no Capítulo 3, de modo que, através do método dos elementos finitos (MEF), sejam delineados os componentes tridimensionais da estrutura, tais como: colunas mistas (aço-concreto) e vigas de aço, contraventamentos/travamentos e lajes. Também são abordadas as técnicas de discretização da malha de elementos finitos do modelo numérico estrutural, além das hipóteses simplificadoras e a consideração do amortecimento estrutural referente ao 8º pavimento do edifício.

4.2 Descrição dos elementos finitos utilizados

As vigas em aço e as colunas mistas são representadas por elementos finitos de pórtico espacial, onde são considerados os efeitos de flexão e de torção. Assim, a partir do banco de dados do ANSYS [130], usa-se o elemento finito BEAM44 que possui seis graus de liberdade por nó, sendo três translações e três rotações nas direções x , y e z , conforme observado na Figura 40.

Este elemento permite a utilização de diferentes geometrias nas extremidades opostas da barra. A orientação do elemento vai do nó I para o nó J, sendo esse eixo local o x . Os eixos locais y e z estão localizados na seção transversal. Uma das vantagens deste elemento é a possibilidade de permitir que seus nós sejam distanciados do eixo do centroide das vigas, visto que a laje e a viga não estão posicionadas no mesmo eixo (vide Figura 41). Essa excentricidade deve ser considerada na modelagem, pois afeta diretamente a inercia do conjunto laje-viga, aumentando a rigidez dos elementos e consequentemente os valores das frequências naturais da estrutura.

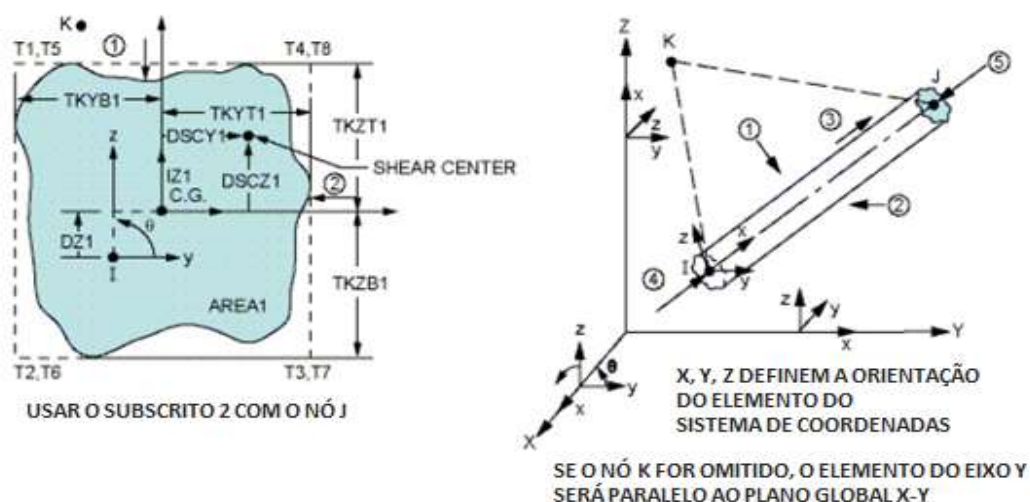


Figura 40 - Elemento BEAM44 [130].

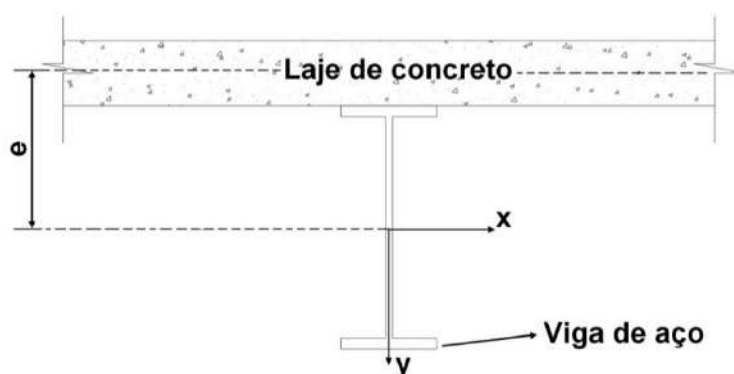


Figura 41 - Excentricidade entre a laje e a viga.

Ressalta-se que, para modelagem do piso, as colunas mistas foram consideradas restringidas a rotação e translação (engaste perfeito) meio pé direito para baixo do piso modelado e meio pé direito para cima, perfazendo apenas um andar do edifício, que neste estudo foi o 8º pavimento do edifício investigado.

As lajes do 8º pavimento do sistema estrutural do edifício, projetadas e construídas em “steel deck”, são modeladas por meio de elementos de casca fina. Para tal modelagem é utilizado o elemento finito SHELL63 [130] que é baseado na teoria de placa fina e definido por quatro nós. O elemento tem seis graus de liberdade por nó sendo três translações e três rotações nas direções locais x, y e z, conforme visto na Figura 42. As alvenarias estruturais de fechamento da periferia do pavimento foram consideradas como elemento de casca fina, pois este elemento, além de

modelagem prática, apresentou bons resultados em face aos resultados experimentais.

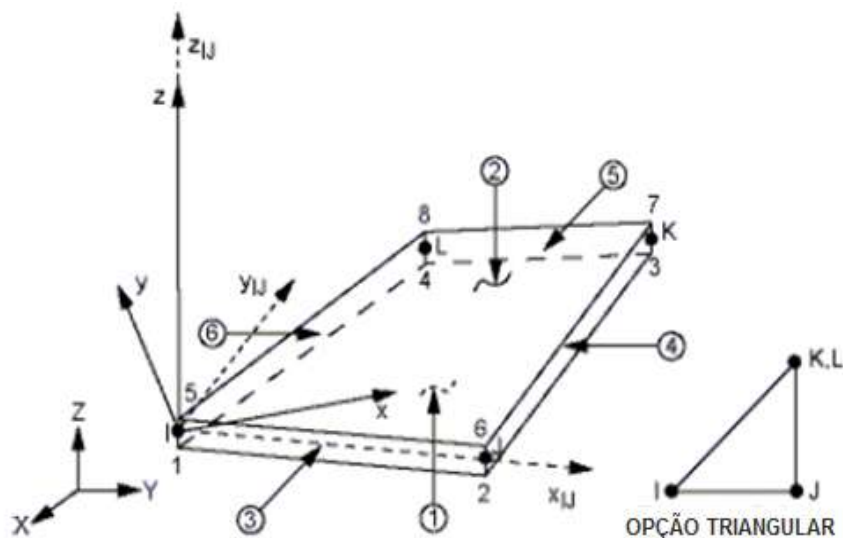


Figura 42 - Elemento SHELL63 [130].

As pessoas, na representação por meio do modelo biodinâmico, são consideradas como um elemento “massa-mola-amortecedor” e, neste estudo, o elemento finito escolhido para representar tal situação é o elemento COMBIN40 [130], pois é um elemento constituído por massa, mola e amortecedor, sendo composto por dois nós, possuindo apenas um grau de liberdade por nó, podendo ser uma translação ou uma rotação ou ainda a pressão ou a temperatura nodal. A Figura 43 ilustra o referido elemento conforme biblioteca do software ANSYS.

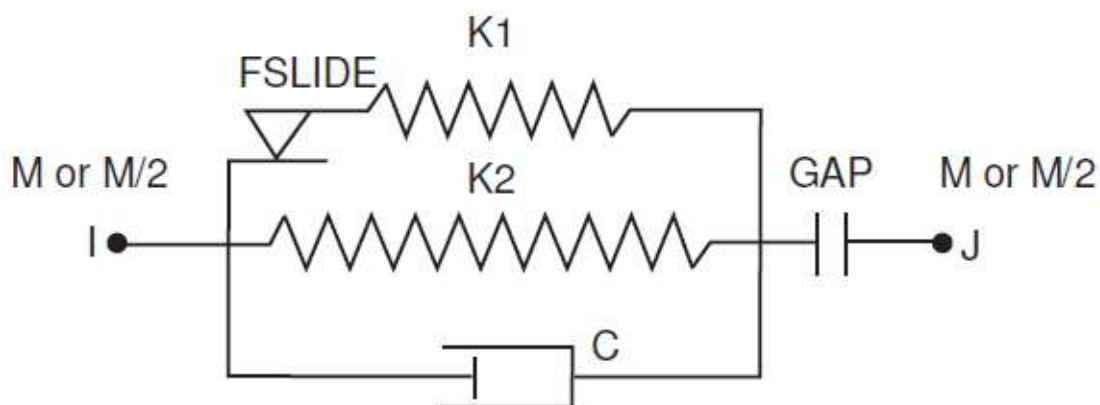


Figura 43 - Elemento COMBIN40 [130].

4.3 Hipóteses simplificadoras

Consideram-se, de modo a simplificar a modelagem do piso do 8º pavimento do edifício, as seguintes hipóteses:

- a estrutura trabalha no regime linear elástico (linearidade física);
- não consideração da geometria deformada (linearidade geométrica);
- os materiais (aço e concreto) são considerados homogêneos e isotrópicos;
- considera-se a hipótese clássica de Euler-Bernoulli;
- modelo de massa consistente com a massa distribuída nos elementos;
- forças de amortecimento representadas via uso do amortecimento viscoso;
- considera-se interação completa entre os materiais aço e concreto; e
- ligações viga-viga e viga-coluna: rotuladas e rígidas, respectivamente, conforme detalhes de projeto.

Em se tratando de ligações entre os elementos BEAM44 e SHELL63, são utilizadas, também, conexões rígidas do tipo “off-set”, onde pode ser considerado a excentricidade do plano central da laje em relação ao eixo central da viga, conforme configuração do elemento BEAM44.

Outra simplificação está na modelagem dos pilares, onde se considera um corte nos mesmos a meio pé direito superior e meio pé direito inferior ao 8º pavimento da edificação e os nós das extremidades superior e inferior de cada pilar são restringidos de modo que os mesmos são impedidos de se deslocarem translacionalmente e rotacionalmente, no plano horizontal e na vertical, nos três eixos globais X, Y e Z, configurando. Estas restrições impostas nas extremidades dos pilares são as condições de contorno do modelo numérico-computacional.

4.4 Modelagem em elementos finitos

O modelo em elementos finitos do pavimento investigado (8º pavimento) possui 27.512 nós, com um total de 29.851 elementos. A distribuição destes elementos está apresentada na Tabela 4. A vista superior, em planta, ilustrando o modelo numérico-

computacional e sua malha de elementos finitos do 8º pavimento tipo, com espaçamento de 0,25 metros, nas duas direções X e Z, está apresentada na Figura 46.

Tabela 4 - Resumo dos elementos do modelo numérico-computacional.

Tipo de elemento	Quantidade
BEAM44	3.345
SHELL63	26.506
COMBIN40	Variável (até 100) nesta Tese
Total	De 29.851 a 29.951

O espaçamento de 25 cm da malha de elementos finitos foi considerado de forma a conciliar, da melhor forma possível, a distância de passo das diferentes velocidades de caminhada, conforme apresentado na Tabela 5 proposta por Bachmann e Ammann [67]. Demais vistas e configurações, tais como do ponto de vista da perspectiva 3D, das vistas laterais e da vista 3D das vigas e pilares do modelo investigado, podem ser visualizados nas Figuras 44 a 47.

Tabela 5 - Características da caminhada humana [67].

Atividade	Velocidade (m/s)	Distância do passo (m)	Frequência do passo (Hz)
Caminhada lenta	1,1	0,60	1,7
Caminhada normal	1,5	0,75	2,0
Caminhada rápida	2,2	1,00	2,3

Ressalta-se que as vigas e colunas também possuem discretização de 0,25 metros em todo o modelo numérico. Esta discretização apresenta um elevado grau de refinamento na malha e, por este motivo, não foram realizados estudos de convergência da malha até então, assunto relevante que pode ser investigado em trabalhos futuros. Os contraventamentos observados no projeto e na obra têm a capacidade de travar translacionalmente o vigamento do piso em seu ponto de encontro, vide Figura 39. Assim, foi considerado o travamento translacional nos pontos de encontro do contraventamento com o vigamento do piso, de forma a simular este travamento.

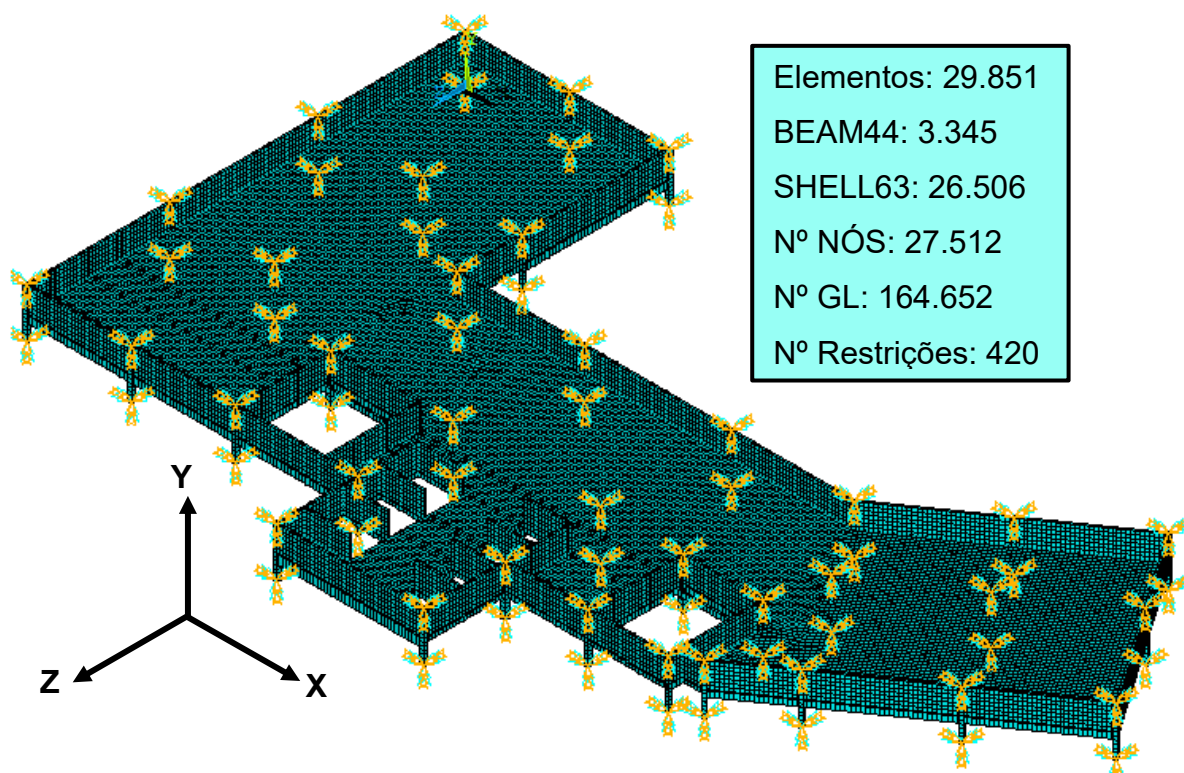
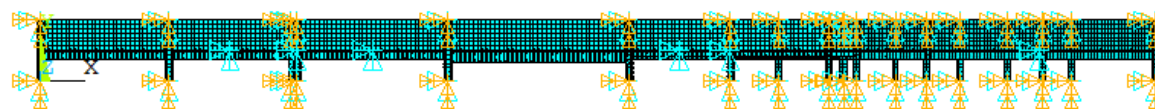
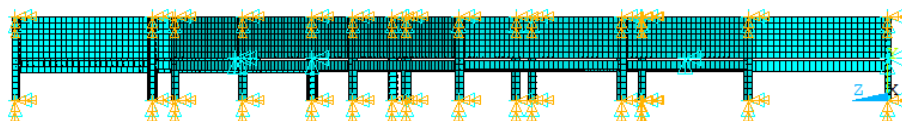


Figura 44 - Perspectiva 3D da malha do modelo numérico-computacional.



a) Vista lateral do modelo plano XY



b) Vista lateral do modelo plano ZY

Figura 45 - Perspectiva 3D da malha do modelo numérico-computacional.

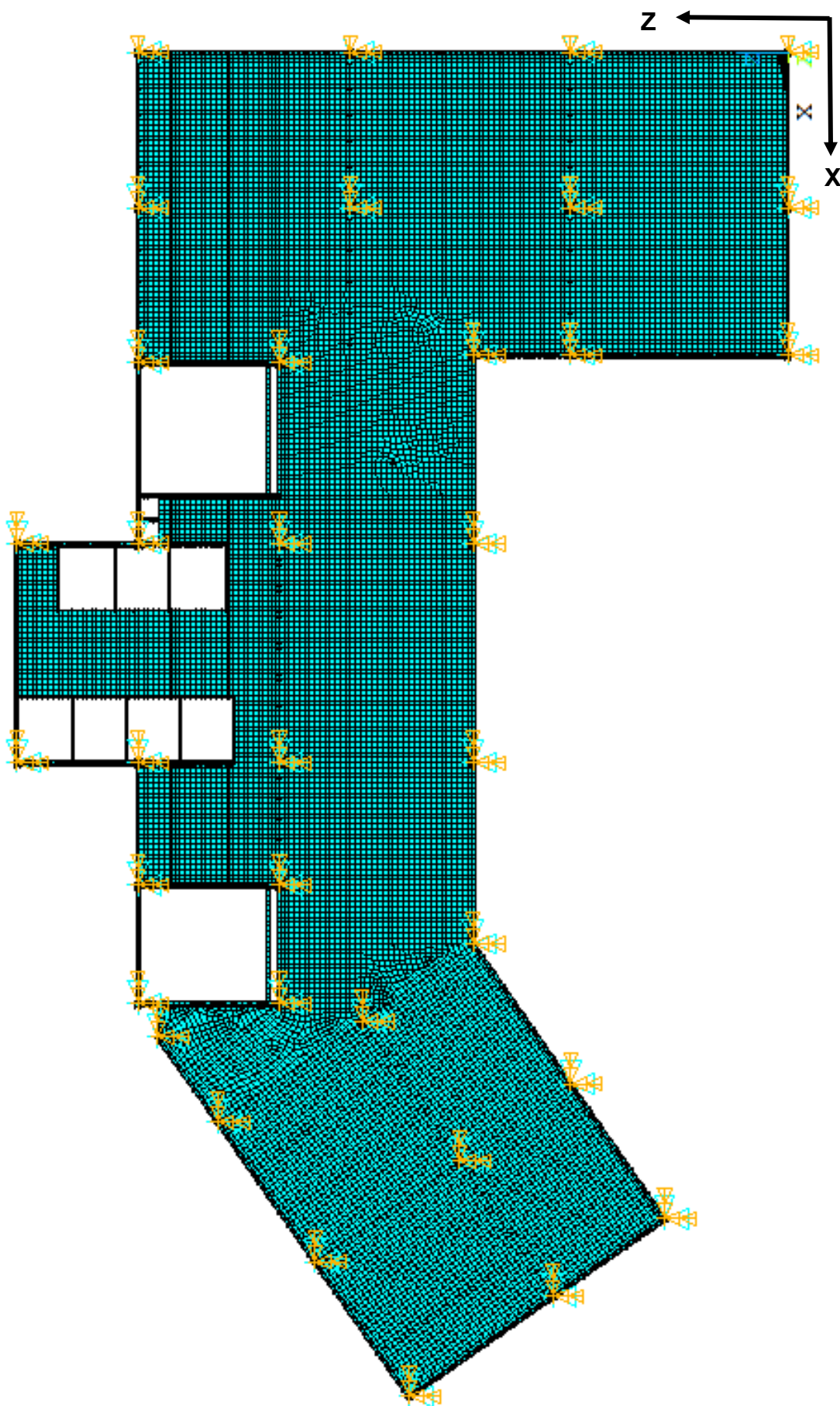


Figura 46 - Vista superior do modelo numérico-computacional.

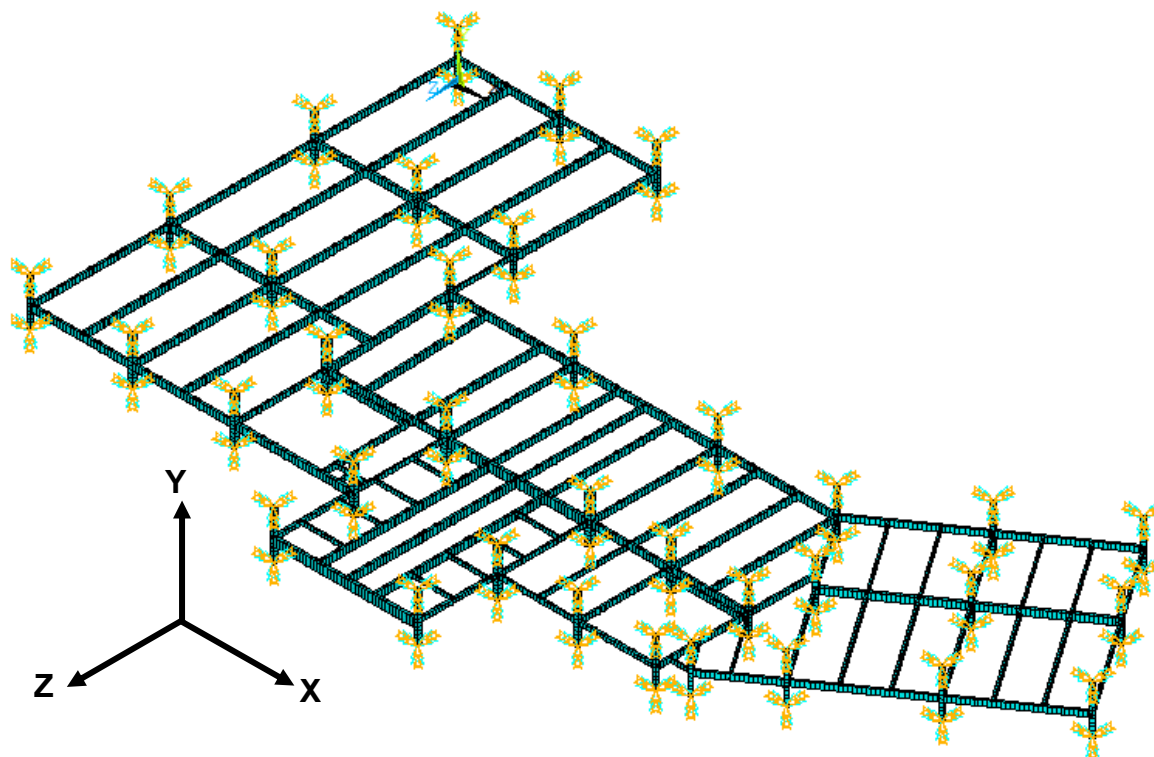


Figura 47 - Vista 3D da malha do modelo numérico-computacional sem lajes.

4.5 Modelagem do amortecimento da estrutura (Modelo de Rayleigh)

O amortecimento é definido como o processo pelo qual a energia proveniente do movimento vibratório de um determinado sistema estrutural é dissipada. Entretanto, a definição do amortecimento estrutural é uma tarefa de complexidade acentuada, pois o amortecimento não está amarrado apenas às propriedades inerentes dos materiais que compõem o sistema, mas também de materiais e elementos que estão acoplados à estrutura, tais como alvenaria, acabamentos, divisórias e mobiliários, conforme Clough e Penzien [131].

Segundo Gaspar [65], a resposta dinâmica de uma estrutura, em vários casos, pode ser determinada a partir da superposição modal e, para isso, não é necessário que a matriz de amortecimento da estrutura seja determinada explicitamente, sendo suficiente o conhecimento da taxa de amortecimento para cada modo de vibração. Entretanto, existem casos em que a matriz de amortecimento deve ser determinada explicitamente para a obtenção da resposta dinâmica, como é o caso onde na análise

dinâmica transiente é realizada através do método de integração numérica de Newmark, método este que também foi utilizado neste trabalho de pesquisa.

Assim, o amortecimento estrutural é usualmente obtido através da matriz de amortecimento de Rayleigh (**C**) [131], que considera uma contribuição da matriz de rigidez (**K**) e uma contribuição da matriz de massa (**M**), por meio da Equação (1):

$$\mathbf{C} = \alpha \mathbf{M} + \beta \mathbf{K} \quad (1)$$

Em termos de taxas de amortecimento modal (ξ_i) e frequência natural circular (ω_{0i}), dada em radianos por segundo, a Equação (1) pode ser reescrita como sendo:

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

De acordo com a Equação (2), ξ_i representa a taxa de amortecimento correspondente ao $i^{\text{ésimo}}$ modo de vibração do sistema e ω_{0i} é a frequência natural circular associada ao $i^{\text{ésimo}}$ modo de vibração ($\omega_{0i} = 2\pi f_{0i}$). Isolando-se os termos α e β da Equação (2) para duas frequências naturais do sistema (frequências naturais relevantes ao modo estudado), tem-se as Equações (3) e (4):

$$\alpha = 2\xi_1\omega_{01} - \beta\omega_{01}^2 \quad (3)$$

$$\beta = \frac{2(\xi_2\omega_{02} - \xi_1\omega_{01})}{\omega_{02}^2 - \omega_{01}^2} \quad (4)$$

Assim sendo, a partir das frequências naturais conhecidas e quais modos de vibração são mais relevantes para a resposta dinâmica do sistema estrutural investigado, de acordo com o carregamento aplicado, é possível determinar o valor dos parâmetros de α e β que estão associados a matriz de massa e a matriz de rigidez para cada modo de vibração relevante à análise deste trabalho.

Além de observar os limites recomendados pela literatura para a adoção da taxa de amortecimento, como, por exemplo, Murray [132] que recomenda para pisos sem divisórias taxas de amortecimento menores que 3,5 %, ou, de acordo com a ISO 10.137 [6], que indica que a taxa de amortecimento para pisos depende do tipo de construção, material, presença de elementos não estruturais, idade, qualidade da construção, amplitude e frequência da vibração. Utiliza-se, neste trabalho de

pesquisa, a taxa de amortecimento modal que é obtida através método do decremento logarítmico [131], que se baseia no decaimento da amplitude de vibração livre, uma vez que ocorre a transferência da energia para outras partes do sistema, ou o próprio sistema a absorve, conforme Figura 48.

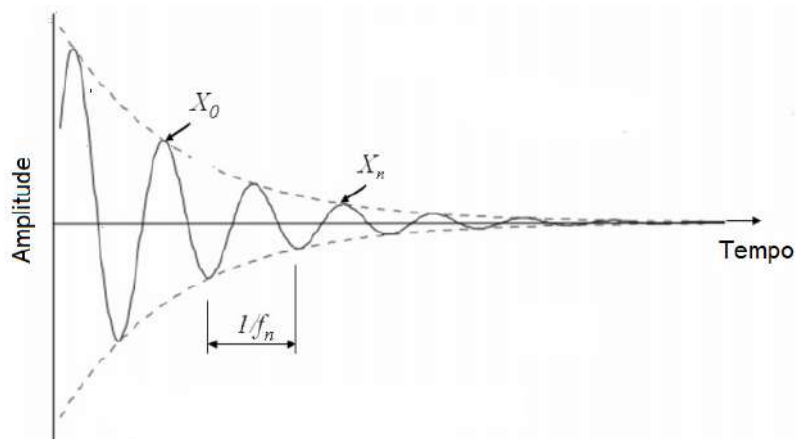


Figura 48 - Método do decremento logarítmico [133].

A norma a ISO 10.137 [6] aponta, inclusive, que a presença ou ausência de fissuras em estruturas de concreto é também significativa. A Tabela B.2 [6], apresenta os valores típicos da taxa de amortecimento para o modo fundamental de pisos mistos e de concreto armado.

Uma taxa de amortecimento da ordem de 1 %, segundo o guia de projeto do SCI [12], é considerada adequada para diversos sistemas estruturais. Essa taxa tem como base um sistema estrutural sem acabamento, no qual poucos elementos não estruturais contribuem para o amortecimento, o que condiz com o estágio da obra no momento da realização dos ensaios, visto que no 8º pavimento não tinha contrapiso, nem paredes internas, forro, esquadrias, entre outros acabamentos. No 8º pavimento da edificação havia apenas alvenaria estrutural de bloco cerâmico nas extremidades do piso (meia altura), nos fossos dos elevadores e nas escadas. A seguir, na Tabela 6, são apresentados os coeficientes das matrizes de massa e de rigidez para as taxas de amortecimentos utilizadas neste trabalho nos Capítulos 9 e 10, na calibração dos resultados e no estudo paramétrico realizado, bem como as frequências naturais consideradas relevantes para cada modo investigado do modelo estrutural.

Tabela 6 - Taxa de amortecimento e coeficientes das matrizes de massa e rigidez.

Taxa de amortecimento adotada	f_{01} (Hz)	f_{09} (Hz)	α (Massa)	β (Rigidez)
1,00 %	6,51	9,25	0,468330476	0,000208961
1,03 %	6,51	9,25	0,482380390	0,000215230
1,35 %	6,51	9,25	0,632246142	0,000282097
2,00 %	6,51	9,25	0,936660952	0,000417921
3,00 %	6,51	9,25	1,404991427	0,000626882
4,00 %	6,51	9,25	1,873321903	0,000835843
5,00 %	6,51	9,25	2,341652379	0,001044804

4.6 Observações finais do capítulo

No presente capítulo foi apresentada uma descrição completa do modelo numérico-computacional desenvolvido para este trabalho de pesquisa, indicando as características geométricas e físicas de tal modelo, além das hipóteses simplificadores, de forma a caracterizar com clareza a estratégia adotada no desenvolvimento do modelo via Método dos Elementos Finitos (MEF) por meio da ferramenta ANSYS [130]. No capítulo seguinte serão apresentados os equipamentos utilizados nos ensaios experimentais, assim com suas características e limitações.

5 METODOLOGIA EXPERIMENTAL E ENSAIO DE VIBRAÇÃO LIVRE

5.1 Considerações iniciais

Os ensaios experimentais do sistema estrutural do piso estudado só foram possíveis devido à utilização de equipamentos específicos para monitoração dinâmica disponíveis no mercado nacional e internacional. O desenvolvimento dos testes experimentais constantes nesta Tese foi realizado em parceria com Ferreira [127], tendo em vista os ensaios terem sido realizados na cidade de Belo Horizonte/MG. Em seguida, ao longo do texto, são apresentadas todas as características dos equipamentos empregados durante a realização dos ensaios e estudado o comportamento dinâmico do sistema estrutural, através da experimentação do piso investigado e de um ensaio de vibração livre da estrutura a fim de verificar as frequências naturais dos pisos do 8º pavimento do edifício investigado.

5.2 Equipamentos utilizados nos testes experimentais

5.2.1 Acelerômetros PCB Piezotronics 393B04

O monitoramento experimental dinâmico do piso estudado foi realizado por meio da utilização cinco acelerômetros sísmicos, uniaxiais da marca PCB Piezotronics, modelo 393B04, com faixa de frequência de 0,06 Hz a 450 Hz, faixa de medição de ± 5 g e sensibilidade de 1000 mV/g, conforme ilustrado na Figura 49.

As principais vantagens deste tipo de acelerômetro, segundo o fabricante [134], são a alta sensibilidade de saída, capacidade de medição de baixas frequências (ideal para estruturas de engenharia civil), resolução abaixo de 1 μ g RMS, que o mesmo é hermeticamente selado, durável e com conectores resistentes a água. As especificações técnicas completas do acelerômetro são apresentadas na Tabela 7.



Figura 49 - Acelerômetro PCB Piezotronics [134].

Tabela 7 - Especificações do acelerômetro PCB Piezotronics 393B04 [134].

	CARACTERÍSTICAS	S.I.
PERFORMANCE	Sensibilidade ($\pm 10\%$)	1,0 V/g ¹
	Faixa de medição	$\pm 5,0$ g ¹ pk
	Faixa de frequência ($\pm 5\%$)	0,06 a 450 Hz
	Frequência de ressonância	≥ 2500 Hz
	Resolução de banda larga	3 μ g ¹ RMS
	Não-linearidade	$\leq 1\%$
	Sensibilidade transversal	$\leq 5\%$
	Limite de sobrecarga (choque)	± 300 g ¹ pk
	Sensibilidade de deformação da base	$\leq 0,0005$ g/ $\mu\epsilon$
	Faixa de temperatura	-26,11 a 80 °C
ELÉTRICO	Tensão de excitação	18 a 30 VCC
	Excitação atual constante	2 a 10 mA
	Impedância de saída	<500 Ohm
	Tensão de polarização de saída	7 a 12 VCC
	Tempo de descarregamento	5 a 12 s
	Tempo de acomodação	< 100 s
	Ruído espectral (1 Hz) (Típico)	0,30 μ g ¹ / $\sqrt{\text{Hz}}$
	Ruído espectral (10 Hz) (Típico)	0,10 μ g ¹ / $\sqrt{\text{Hz}}$
	TEDS 1.0 Versão Disponível (TLD)	Sim
FÍSICO	Elemento de detecção	Cerâmica
	Geometria de detecção	Flexão/Articulação
	Material da carcaça	Titânio
	Tamanho - Diâmetro	2,51 cm
	Tamanho - Altura	3,10 cm
	Peso	50 g
	Conector elétrico	10-32 Coaxial Jack
	Rosca de Montagem	10-32 Fêmea
NOTA: 1 - g = 9,81 m/s ² .		

5.2.2 Sistema de aquisição de dados

Responsável por coletar e armazenar as respostas das acelerações obtidas nos ensaios experimentais, o sistema de aquisição de dados é responsável pelo fornecimento de energia aos acelerômetros e por ser elemento de ligação entre o computador/software e os acelerômetros. Neste trabalho de pesquisa foi utilizado um sistema de aquisição da marca Bruel Kjaer, modelo 3050-A-060, com seis canais de entrada, conforme apresentado na Figura 50. Este sistema de aquisição é baseado em condicionadores de sinais, que transformam o sinal da variação elétrica em valores de engenharia – deformação específica, aceleração, força, entre outros – controlados por um computador.

Segundo o fabricante do sistema [135], o modelo 3050 é projetado para cobrir o maior número de medições de som e vibração de aplicações possíveis. Ele vem em duas variantes básicas, oferecendo a escolha opção entre quatro e seis canais de entrada de alta precisão com uma faixa de entrada de 0 a 51,2 kHz.



Figura 50 - Sistema de aquisição de dados Bruel e Kjaer.

5.3 Projeto de monitoramento experimental

O programa experimental *in loco* foi dividido em duas etapas. Na primeira foram realizados ensaios de vibração livre visando obter os parâmetros modais da estrutura, tais como as três primeiras frequências naturais, os modos de vibração correspondentes e os respectivos amortecimentos modais. Na segunda fase foram

realizados testes de vibração forçada representados pelo caminhar de uma pessoa de maneira controlada, para obtenção das respostas dinâmicas dos pisos. Os ensaios foram realizados em pisos previamente definidos (Figura 51) e seus resultados proporcionaram parâmetros reais para avaliação do modelo desenvolvido em MEF em termos de suas características dinâmicas e do conforto dos usuários, através de critérios de normas nacionais, internacionais e guias práticos de projeto.

Nos ensaios foram determinados cinco pontos de interesse por piso, identificados nas Figuras 52 e 53, pelos Canais (C) 1 a 5, referente aos cinco acelerômetros utilizados nos ensaios, conforme instrumentação planejada e ilustrada na Figura 54. A quantidade de pontos foi definida em função da limitação dos equipamentos utilizados e suas localizações foram determinadas a partir dos resultados encontrados no modelo numérico preliminar, cujas premissas finais estão apresentadas no Capítulo 4. Os sensores foram instalados de forma a captar os modos fundamentais de vibração, em especial os três primeiros modos do pavimento investigado nesta Tese. As Figuras 55 e 56, por sua vez, apresentam exemplos da instrumentação dos testes experimentais realizadas “*in loco*” nos pisos escolhidos.

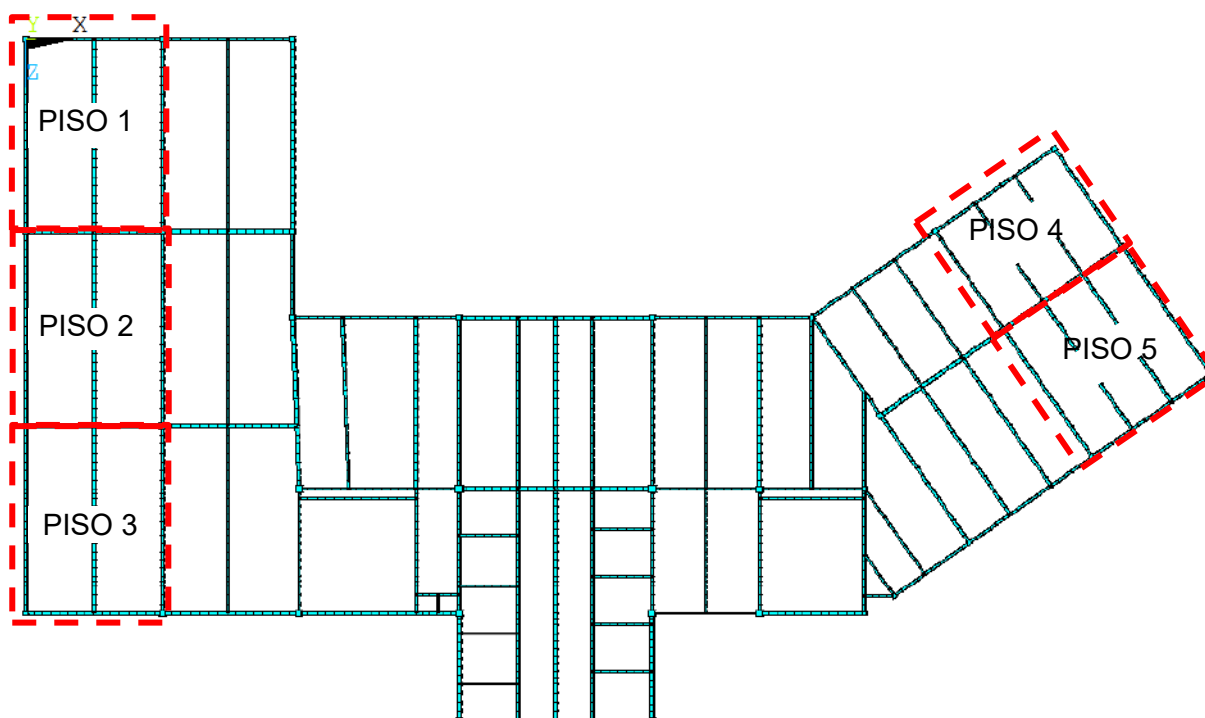


Figura 51 - Pisos escolhidos para análise experimentais.



Figura 52 - Identificação dos pisos 1, 2 e 3.



Figura 53 - Identificação dos pisos 4 e 5.

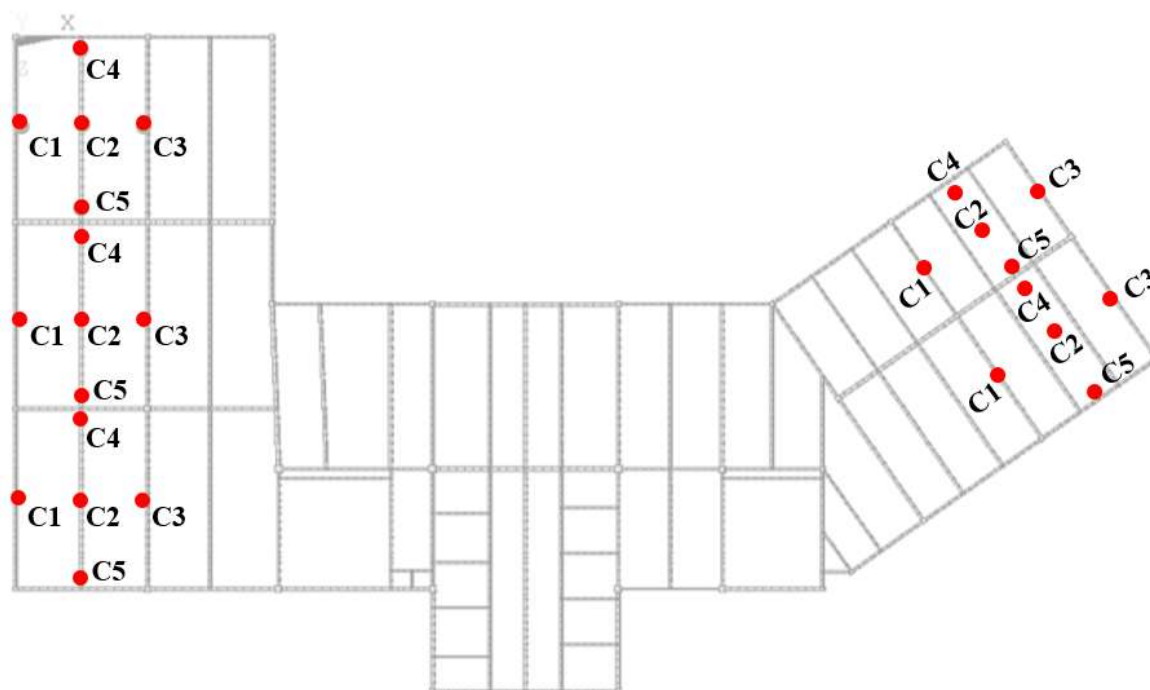


Figura 54 - Pontos de instrumentação nos cinco pisos ensaiados.

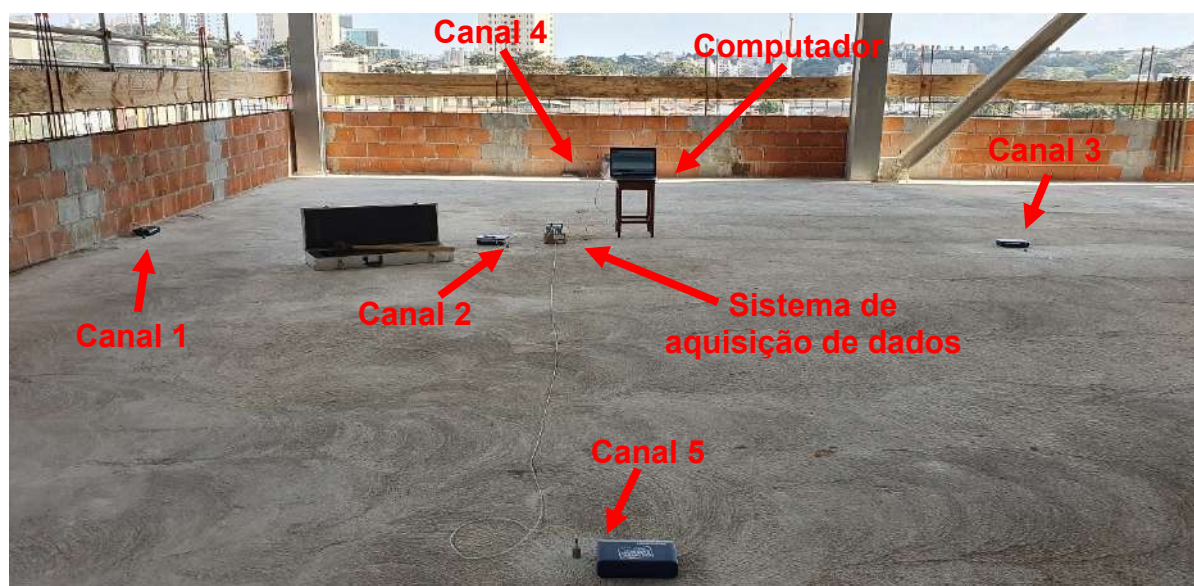


Figura 55 - Esquema de montagem dos ensaios típicos para os pisos 1 a 3.



Figura 56 - Esquema de montagem dos ensaios típicos para os pisos 5 e 6.

5.4 Fixação dos acelerômetros

A forma que os acelerômetros são instalados na estrutura ou equipamento tem influência direta na resposta em frequência, visto que o mesmo não constitui parte integrante do objeto que se pretende medir os níveis de vibração.

A norma ISO 5349-2 [137] recomenda que o método de montagem deve proporcionar uma resposta em frequência linear ao longo da gama de frequências a medir, ou seja, não deve amortecer ou ampliar a resposta dinâmica e, também, não deve gerar nenhuma ressonância nesta gama de frequências.

Há diversas formas de se fixar os acelerômetros na estrutura investigada e cada uma delas tem suas vantagens e limitações. A Figura 57, adaptada do manual da PCB Piezotronics [134], ilustra seis tipos de fixação e a alteração que cada uma delas exerce na resposta do acelerômetro.

Isto ocorre, pois a fixação do acelerômetro gera adição ao sistema com um grau de liberdade naquela ligação com a estrutura, ao qual está associada uma frequência natural, também conhecida como frequência de ressonância da montagem. Diante do exposto, percebe-se a importância da montagem do equipamento de forma a avaliar que se trabalhe na zona rígida desta função, garantindo acurácia no valor medido pelo sensor.

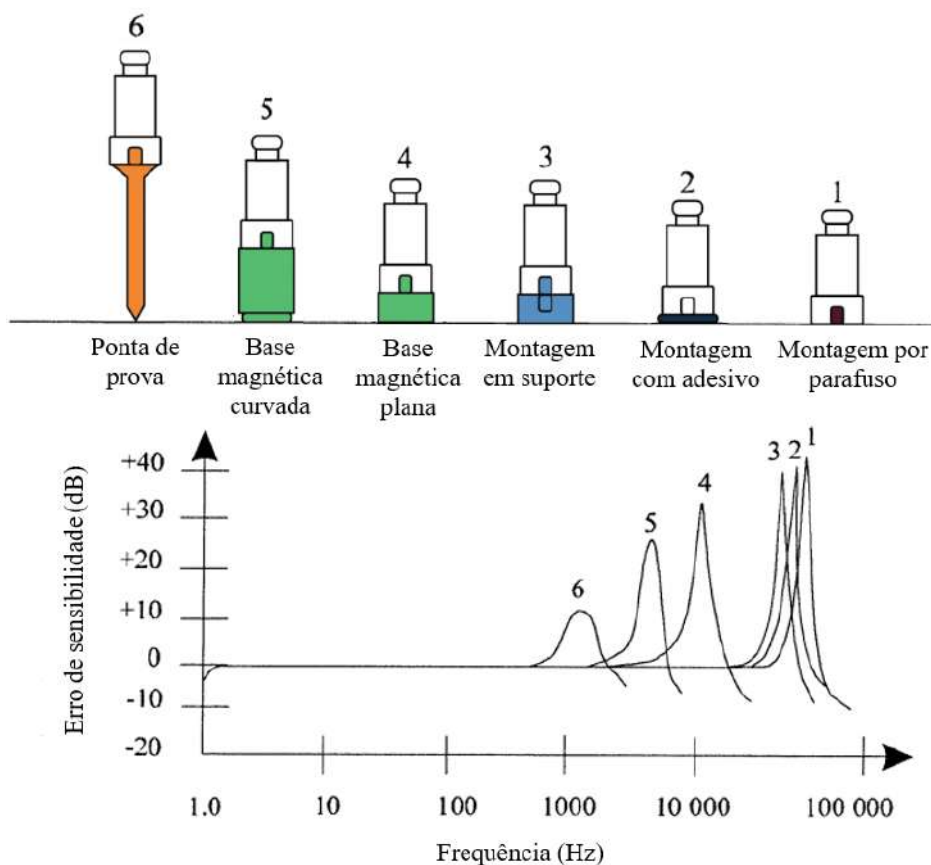


Figura 57 - Resposta em frequência de diferentes tipos de montagem de acelerômetros. Ferreira [127] *apud* PCB Piezotronics [134].

Deste modo, visando uma otimização no processo de remoção do sensor e sua realocação nos outros pontos de medida, escolheu-se por fixá-los através do procedimento de colagem por adesivo, conforme tipo 2 da Figura 58. Assim, seguiu-se o que o manual da PCB Piezotronics [134] especifica para instalações temporárias: cola quente ou cera são adesivos mais adequados. Durante os testes experimentais, utilizou-se cera para fixação dos acelerômetros e, conforme Figura 58 para o tipo 2 de fixação, considerando medições de baixas frequências, percebe-se que os seis tipos de montagem especificados pelo fabricante dos acelerômetros utilizados neste trabalho mostram-se adequados.

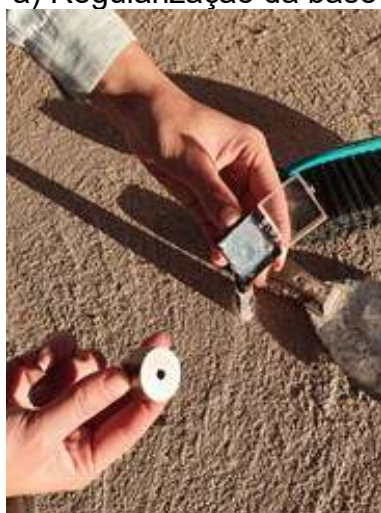
O manual da PCB Piezotronics [134] recomenda como a primeira etapa o preparo da superfície que receberá o acelerômetro que deve ser lisa e plana. Coloca-se então uma pequena porção do adesivo na parte inferior do sensor e pressiona-o firmemente no local de instalação. A Figura 61 ilustra o esquema de montagem.



a) Regularização da base



b) Limpeza da superfície



c) Aplicação da cera no sensor



d) Colagem do acelerômetro

Figura 58 - Esquema de fixação dos acelerômetros.

5.5 Ensaio de vibração livre

5.5.1 Metodologia realizada

O ensaio de vibração livre foi realizado de tal forma que os pisos em estudo fossem excitados através do impacto de uma pessoa com massa de 102,6 kg, altura de 1,78 metros, utilizando botas com solado macio, pulando próximo aos centros dos pisos escolhidos, de uma altura de 0,48 metros, que corresponde ao banco de madeira que foi utilizado. Cada piso foi excitado por três impactos, com intervalos de tempo regulares entre cada um a fim de aguardar o amortecimento das vibrações nos modos

dominantes. Cada procedimento de ensaio de vibração livre foi repetido três vezes em cada piso escolhido para realização dos testes experimentais, totalizando quinze ensaios em todo o pavimento. Assim, inicialmente a pessoa está parada sobre o banco de madeira, em seguida, a fim de manter a altura do salto, deixa o corpo cair próximo ao vão central do piso ensaiado e, por fim, aterrissa no piso com os joelhos flexionados, causando, deste modo, o impacto inicial que excita o piso. A pessoa então permanece imóvel por um determinado período de tempo a fim de permitir que a mesma vibre livremente. As Figuras 59, 60 e 61 ilustram a execução do impacto.



Figura 59 - Etapa 1 da realização do ensaio de vibração livre: pessoa parada.



Figura 60 - Etapa 2 da realização do ensaio de vibração livre: salto.



Figura 61 - Etapa 3 da realização do ensaio de vibração livre: impacto no piso.

O método utilizado neste ensaio foi o de dados de entrada única e de saída múltipla (SIMO – “Single Input Multiple Output”). Os resultados de vibração livre foram obtidos por meio dos cinco acelerômetros sísmicos localizados nos pontos indicados na Figura 54.

5.5.2 Determinação das frequências naturais e taxas de amortecimento

A partir da metodologia descritas para os ensaios experimentais de vibração livre, depois de compilado os resultados, foi possível a determinação dos parâmetros modais da estrutura - frequências naturais, modos de vibração e taxa de amortecimento modal - por meio do processamento dos sinais de aceleração vertical nos cinco pontos monitorados (Figura 54).

Conforme descrito no item 6.4.1, foram realizadas três baterias de ensaios de vibração livre por piso, com três impactos em cada ensaio, totalizando nove excitações por piso. Um ciclo com três respostas agrupadas pode foi escolhido e estão apresentadas, no domínio do tempo, nas Figuras 62 a 66, para os pisos 1 a 5, respectivamente.

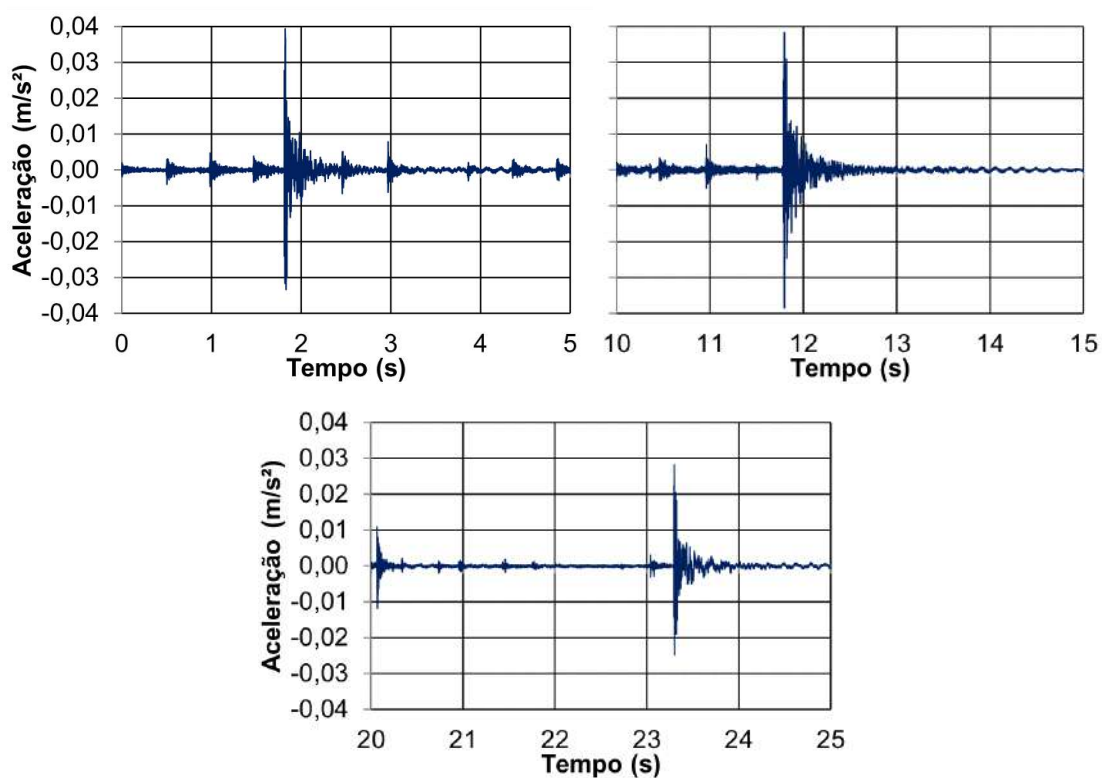


Figura 62 - Aceleração x tempo registrada pelo canal 2, exemplo de um ciclo de ensaio localizado no centro da laje - Piso 1.

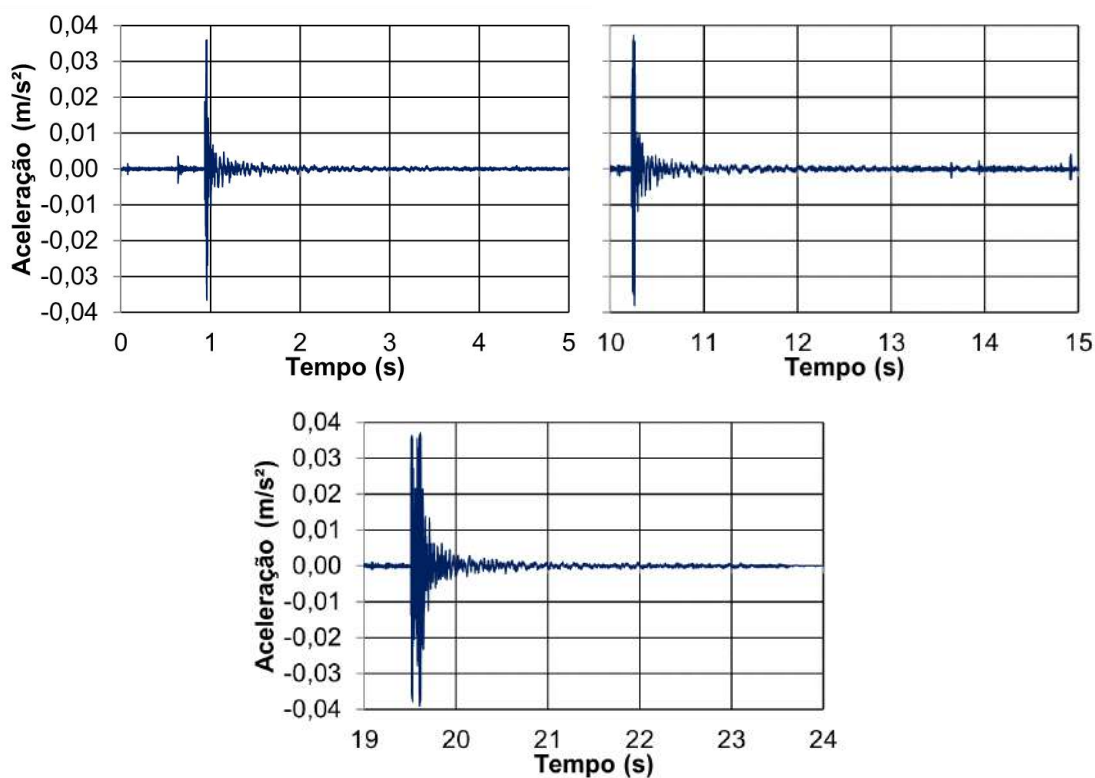


Figura 63 - Aceleração x tempo registrada pelo canal 2, exemplo de um ciclo de ensaio localizado no centro da laje - Piso 2.

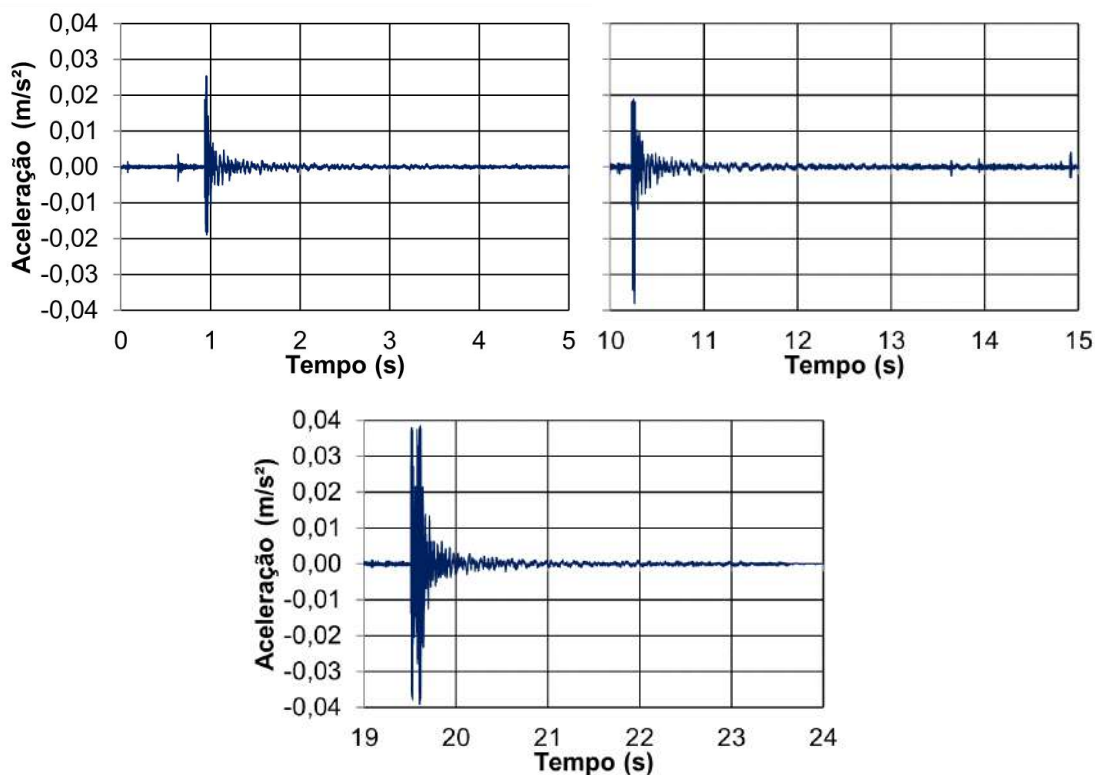


Figura 64 - Aceleração x tempo registrada pelo canal 2, exemplo de um ciclo de ensaio localizado no centro da laje - Piso 3.

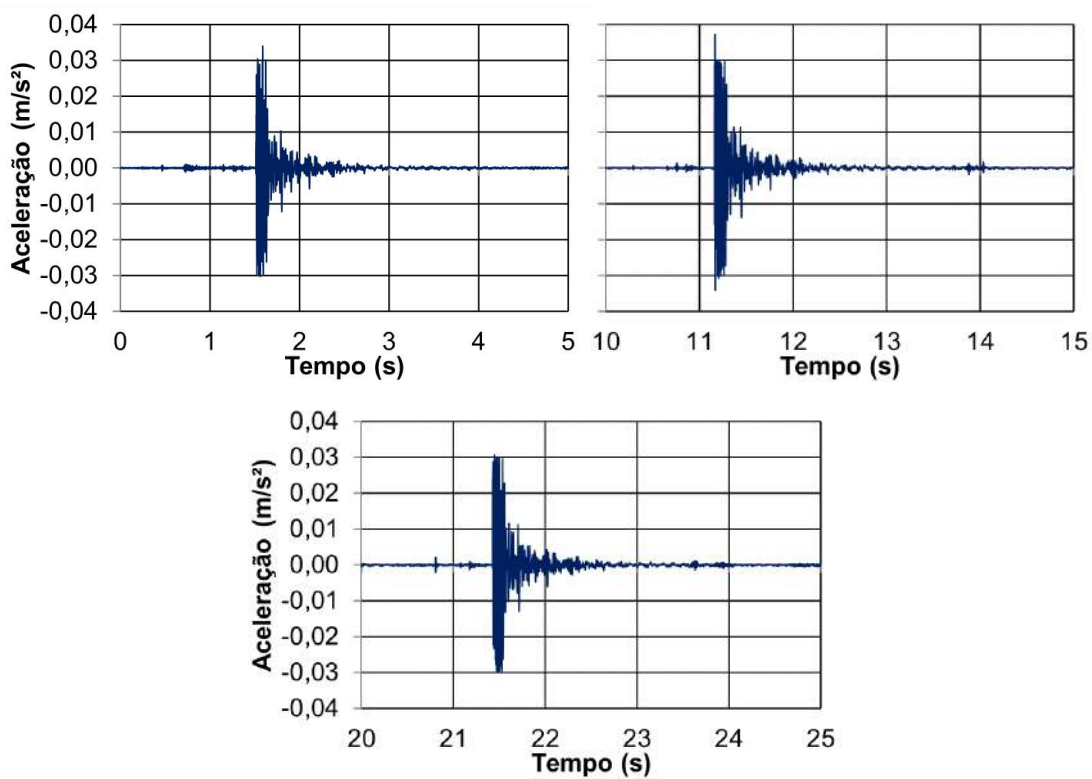


Figura 65 - Aceleração x tempo registrada pelo canal 2, exemplo de um ciclo de ensaio localizado no centro da laje - Piso 4.

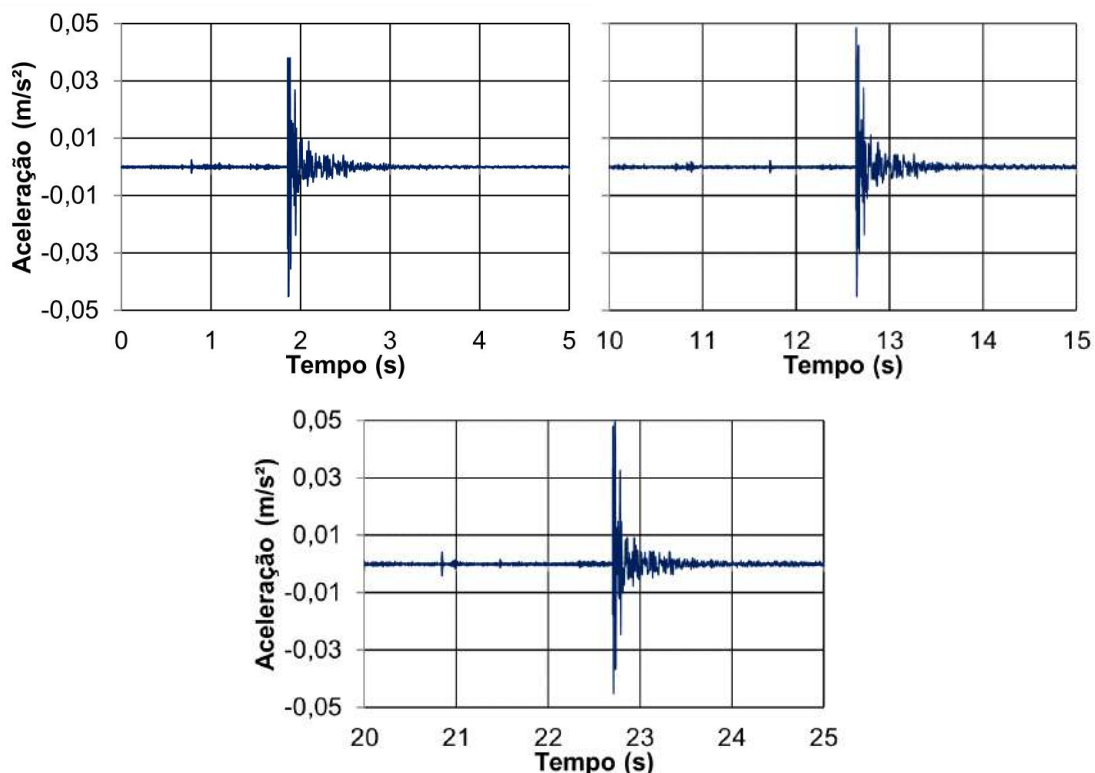


Figura 66 - Aceleração x tempo registrada pelo canal 2, exemplo de um ciclo de ensaio localizado no centro da laje - Piso 5.

Os resultados experimentais de todos os canais e todos os pisos ensaiados neste trabalho de pesquisa podem ser verificados no Anexo A. Ressalta-se que as séries de impactos foram realizadas em intervalos de tempo suficientes para amortecer as amplitudes dos modos dominantes. As maiores amplitudes de aceleração se deram no centro dos pisos, próximo ao ponto dos impactos, como já era esperado.

Os resultados experimentais obtidos para a vibração livre no domínio da frequência, com o objetivo de identificar os autovalores que mais colaboraram na vibração dos pisos sob análise, no que se refere à transferência de energia para a resposta dinâmica do sistema, podem ser verificados nas Figuras 66 a 70, para o canal nº 2. Uma vez que a força de impacto do pulo não foi mensurada, não foi possível obter-se a FRF (*Frequency Response Function*) de cada ponto para este ensaio, entretanto, as frequências naturais dos pisos podem ser identificadas através da FFT (*Fast Fourier Transform*) da resposta dinâmica no domínio do tempo. Os valores das frequências naturais encontradas são descritos nas legendas das imagens, onde o número subscrito indica o respectivo modo de vibração. Além disso, todos os

resultados foram filtrados com filtro passa faixa de 0,5 a 10 Hz, a fim de limitar o espectro da resposta às frequências de interesse do piso, que estão nesta faixa de valores.

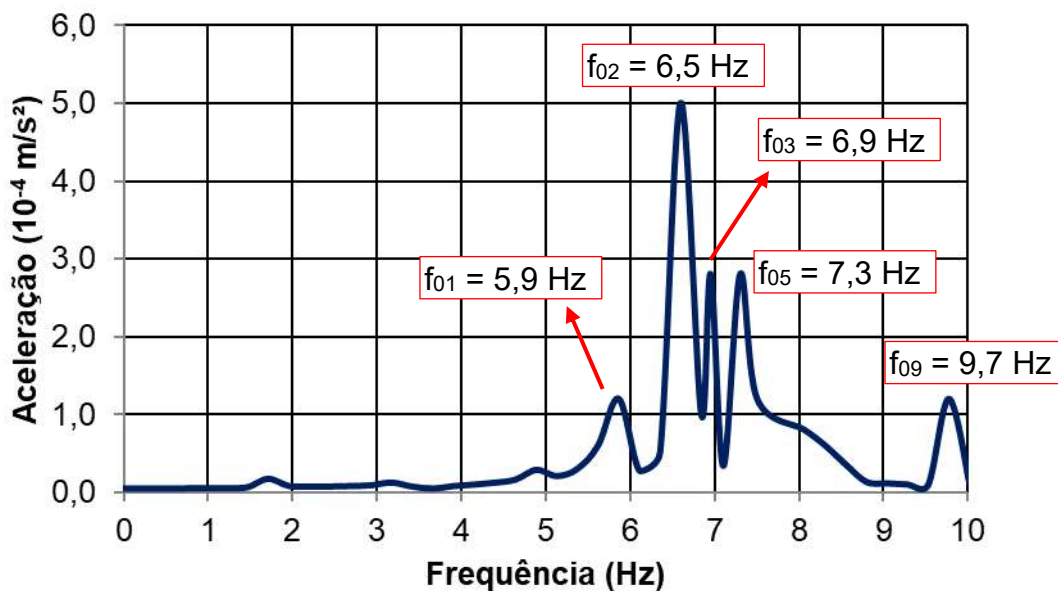


Figura 67 - Espectros de frequências naturais da estrutura obtidos via medição experimental para impactos no centro do piso 1 - Canal 2 ($f_{01} = 5,9 \text{ Hz}$; $f_{02} = 6,5 \text{ Hz}$; $f_{03} = 6,9 \text{ Hz}$; $f_{05} = 7,3 \text{ Hz}$; $f_{09} = 9,7 \text{ Hz}$).

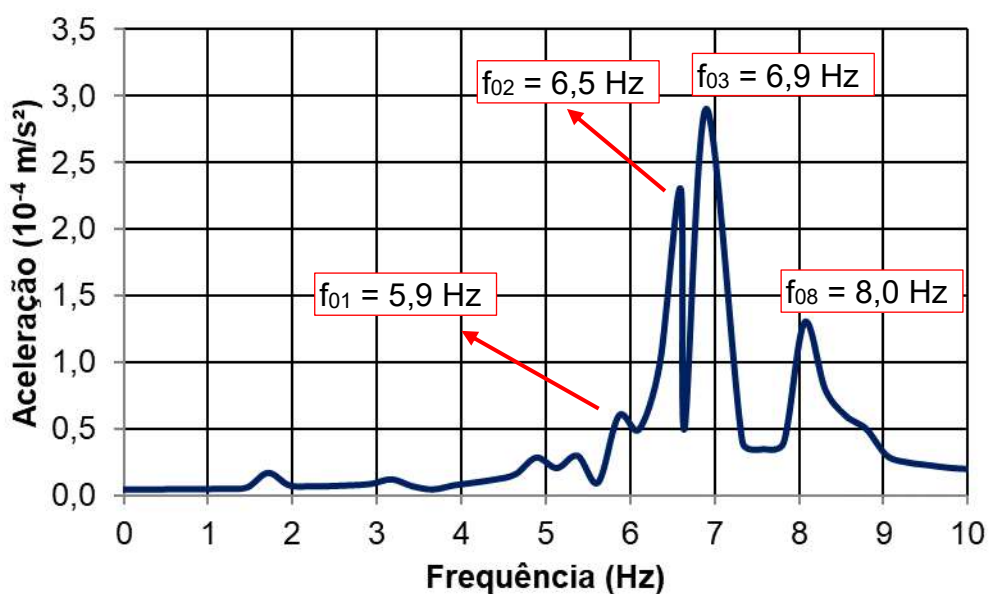


Figura 68 - Espectros de frequências naturais da estrutura obtidos via medição experimental para impactos no centro do piso 2 - Canal 2 ($f_{01} = 5,9 \text{ Hz}$; $f_{02} = 6,5 \text{ Hz}$; $f_{03} = 6,9 \text{ Hz}$; $f_{08} = 8,0 \text{ Hz}$).

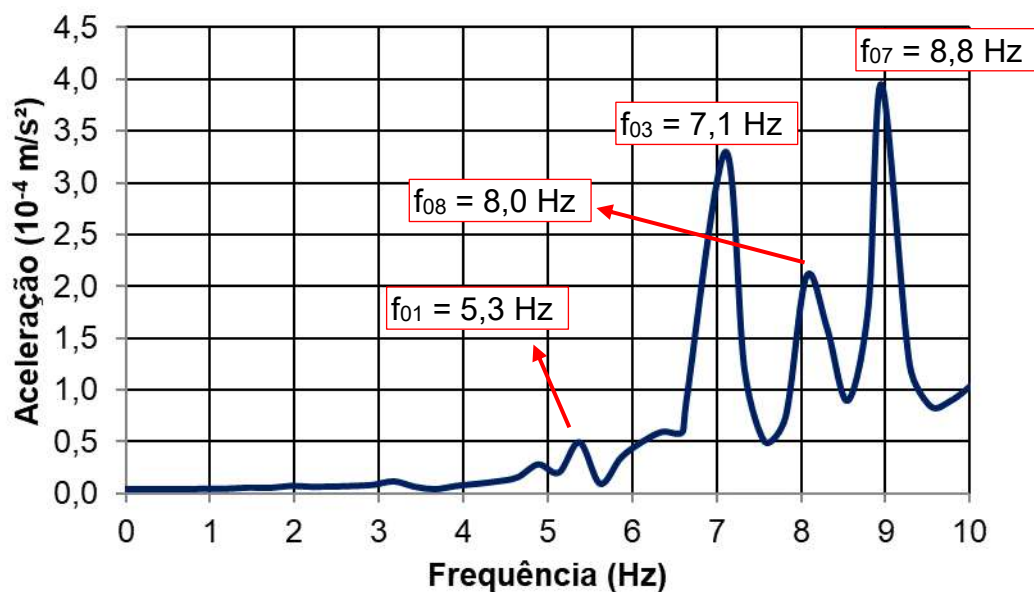


Figura 69 - Espectros de frequências naturais da estrutura obtidos via medição experimental para impactos no centro do piso 3 - Canal 2 ($f_{01} = 5,3 \text{ Hz}$; $f_{03} = 7,1 \text{ Hz}$; $f_{08} = 8,0 \text{ Hz}$; $f_{07} = 8,8 \text{ Hz}$).

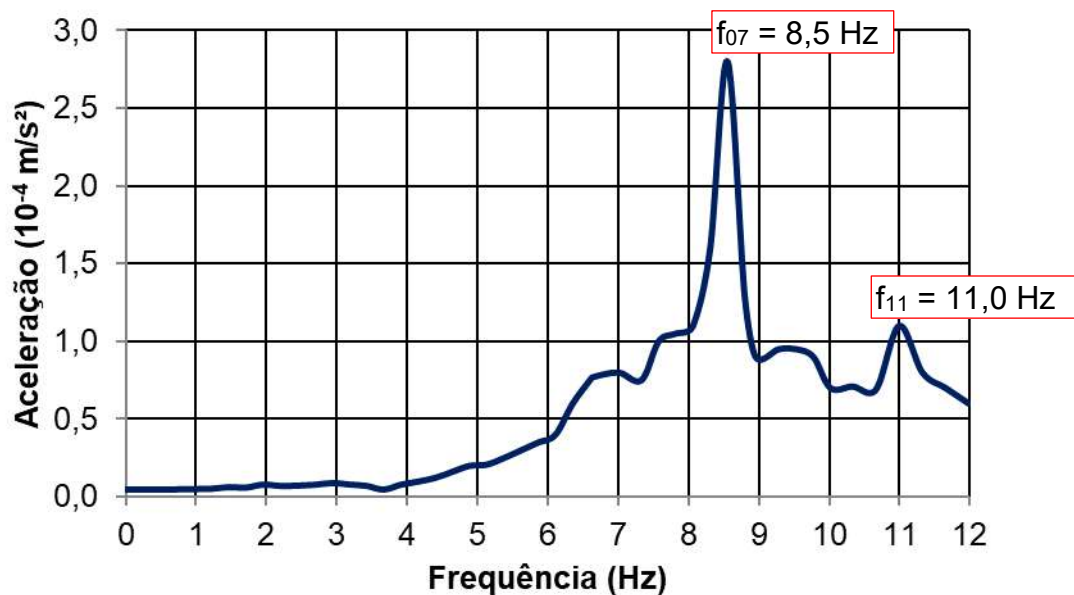


Figura 70 - Espectros de frequências naturais da estrutura obtidos via medição experimental para impactos no centro do piso 4 - Canal 2 ($f_{06} = 8,5 \text{ Hz}$; $f_{11} = 11,0 \text{ Hz}$).

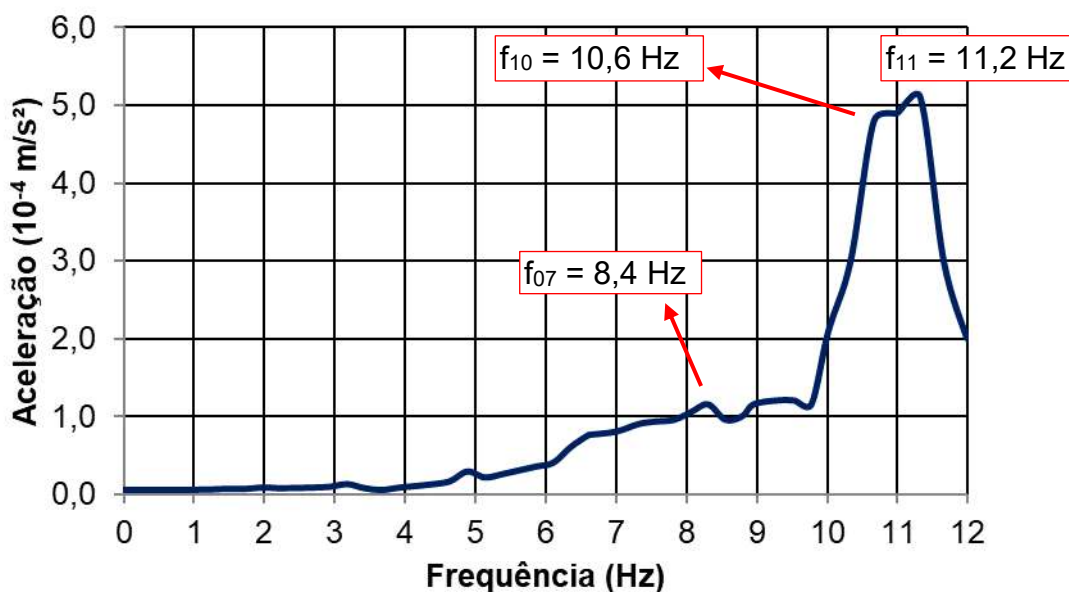


Figura 71 - Espectros de frequências naturais da estrutura obtidos via medição experimental para impactos no centro do piso 5 - Canal 2 ($f_{07} = 8,4$ Hz; $f_{09} = 10,6$ Hz; $f_{11} = 11,2$ Hz).

Com base nos resultados apresentados nos gráficos das Figuras 67 a 71, verifica-se que as três primeiras frequências naturais do pavimento investigado, correspondentes ao primeiro, segundo e terceiros modos verticais de vibração da estrutura, são, respectivamente, 5,9 Hz, 6,5 Hz e 6,9 Hz. Nota-se, então, que as três primeiras frequências naturais do pavimento se encontram dentro da faixa de 5 Hz a 8 Hz que, conforme estudos experimentais relacionados a sensibilidade humana é o intervalo que as pessoas reagem de forma especialmente adversa às vibrações [8]. Alia-se a isto o fato que a faixa de frequências fundamentais do caminhar humano apresenta valores entre 1,7 Hz e 2,3 Hz [67], portanto o terceiro ou quarto harmônicos do caminhar poderiam coincidir ou ficar bastante próximos das três primeiras frequências naturais do piso ($f_{3^{\circ}h_mín.} = 5,1$ Hz e $f_{3^{\circ}h_máx.} = 6,9$ Hz), podendo haver amplificação dos níveis de vibração em virtude do possível efeito de ressonância.

Desse modo, é assaz importante se realizar ensaios de vibração forçada para avaliação das acelerações decorrentes das condições de uso do pavimento na análise do conforto humano dos futuros usuários. A Tabela 8 a seguir apresenta o resumo dos valores das frequências naturais do pavimento obtido a partir dos testes experimentais. Ressalta-se que a coluna da esquerda da Tabela 8 está alinhada com os modos de vibração (autovetores) observados no modelo numérico.

Tabela 8 - Valores das frequências naturais experimentais do piso investigado.

Ordem observada no ensaio	Frequência (Hz)
1º	5,90
2º	6,50
3º	6,97 (\pm 0,12)
5º	7,67 (\pm 0,35)
8º	8,17 (\pm 0,57)
7º	8,40 (\pm 0,21)
9º	9,75 (\pm 0,07)
10º	10,40 (\pm 0,28)
11º	11,10 (\pm 0,14)

A partir dos resultados de vibração livre, que foram exemplificados nas Figuras 61 a 65, são obtidas as acelerações no domínio do tempo filtradas para os três primeiros modos de vibração, respectivamente, as quais foram utilizadas para a determinação dos amortecimentos modais, conforme valores apresentados na Tabela 9, a partir do método do decremento logarítmico.

Tabela 9 - Valores de amortecimento modais: três primeiros modos [127].

Modo	Média	Desvio padrão	Coefficiente de Variação (CV)
1º	1,26%	0,13%	10%
2º	1,03%	0,19%	19%
3º	1,19%	0,21%	18%

A avaliação da confiabilidade dos resultados encontrados foi realizada através da comparação dos valores obtidos de CV com as faixas de precisão postas por Gomes [138], apresentadas na Tabela 10. De acordo com Varela [10] e Brito et. al. [139], resultados obtidos para taxa de amortecimento modal com CV de 10 a 20 %, podem ser considerados como de boa precisão.

A partir dos valores encontrados para o CV para taxa de amortecimento modal, pode-se inferir que as estimativas apresentam boa confiabilidade, de acordo com o apresentado na Tabela 10. Por outro lado, a maioria das normas, guias de projeto e

trabalhos relevantes da literatura estimam que a taxa de amortecimento de pisos mistos (aço-concreto) seja da ordem de 2 % a 5 % [8, 10 e 139].

Tabela 10 - Classificação do índice de confiabilidade de experimentos (CV) [138].

CV	Precisão
maior que 30%	Muito Baixa
de 20 a 30%	Baixa
de 10 a 20%	Média
menor que 10%	Alta

Porém, nota-se que as taxas de amortecimento estimadas para o pavimento em estudo foram encontradas abaixo desta faixa, o que pode ser justificado pela fase de construção em que a edificação se encontrava no momento da realização dos ensaios experimentais, com a ausência de elementos não estruturais que contribuem para o aumento do amortecimento do piso, tais como: janelas, divisórias, móveis, revestimentos, entre outros.

5.6 Considerações finais do capítulo

Neste capítulo, foram apresentados a metodologia e os resultados das análises de vibração livre experimentais desenvolvido. No capítulo seguinte, serão apresentados os valores numéricos para as frequências naturais (autovalores) e modos de vibração (autovetores) do pavimento investigado, que será comparado e verificado a calibração com os valores apresentados neste capítulo. Em seguida, será feito um estudo a influência da adição de pessoas na estrutura (estrutura carregado), por meio da utilização de modelos biodinâmicos a fim de representar as pessoas sobre o piso.

6 ANÁLISE MODAL NUMÉRICA

6.1 Considerações iniciais

Este capítulo objetiva estudar o comportamento dinâmico do sistema estrutural, através da análise de vibração livre. Tal análise é realizada pelo emprego do programa computacional ANSYS [130], onde são obtidas as frequências naturais (autovalores) e seus respectivos modos de vibração (autovetores). Ainda neste capítulo, o sistema estrutural é investigado em várias configurações distintas nas quais se considera a estrutura vazia e carregada com pessoas (componentes biodinâmicos) em diversos níveis de carregamento, além de correlacionar os resultados numéricos obtidos com os resultados experimentais para a análise de vibração livre.

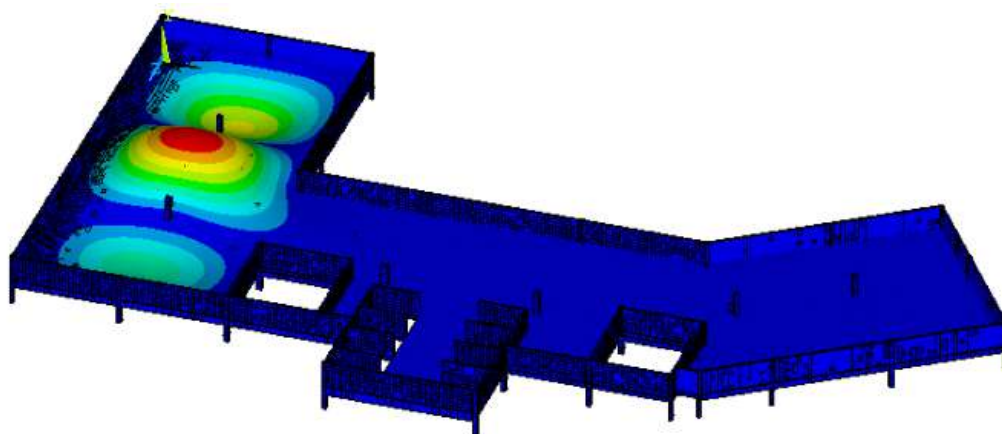
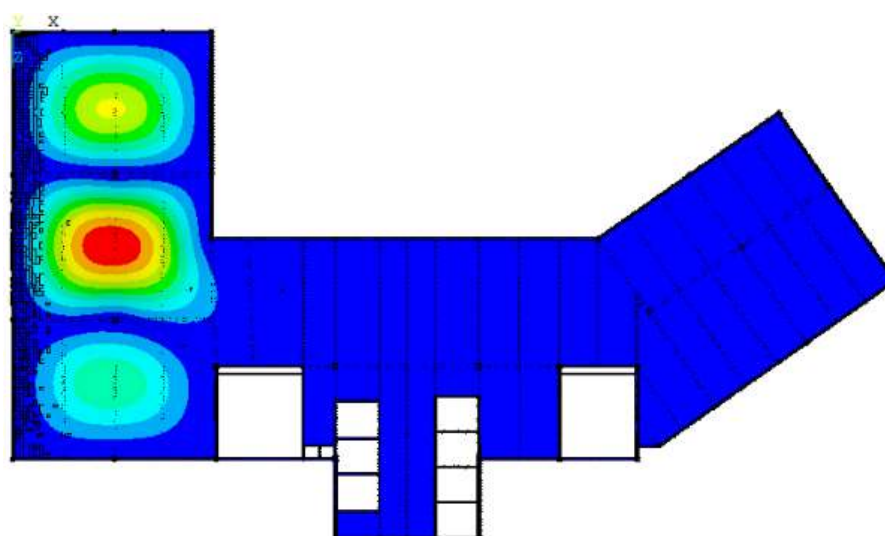
6.2 Análise Modal: estrutura vazia e correlação com os resultados experimentais

As frequências naturais dos dez primeiros modos de vibração para o modelo estrutural estudado foram obtidas, considerando que a estrutura não está ocupada. Também foram obtidos os valores de massa modal, rigidez modal e amortecimento modal associados a cada modo de vibração. A Tabela 11 apresenta estes valores das frequências naturais e propriedades modais do piso do edifício em estudo.

Observa-se ainda que a frequência fundamental do piso da estrutura ($f_{01} = 5,73$ Hz) não está em consonância aos valores mínimos recomendados por normas e recomendações de projeto ($f_{\min} = 8$ Hz [45] e $f_{\min} = 9,2$ Hz) [8]. Logo, a estrutura pode apresentar uma maior suscetibilidade ao fenômeno da ressonância quando as forças de excitações provenientes de atividade humana sobre os pisos se igualarem, possivelmente em seu terceiro harmônico, a uma destas frequências naturais, podendo ocasionar vibrações excessivas e desconforto humano. As Figuras 72 a 91 ilustram os dez primeiros modos de vibração do piso da estrutura. Todos os modos de vibração ilustrados apresentam o fenômeno de flexão de placa no plano XZ.

Tabela 11 - Propriedades modais do piso do 8º pavimento da estrutura investigada.

Modo de Vibração do Piso	Amortecimento (%)	Massa Modal (kg)	Rigidez Modal (N/m)	Amortecimento Modal (Ns/m)	Frequência (Hz)
1	1,15	18640	24129103	15425	5,73
2	1,12	20335	34041781	18637	6,51
3	2,10	24992	46715059	45381	6,88
4	1,15	9472	20205052	10062	7,35
5	2,23	26367	56956707	54656	7,40
6	2,18	15403	37703836	33226	7,87
7	1,15	9447	25023689	11183	8,19
8	2,34	22721	68393448	58340	8,73
9	2,59	23661	79915534	71230	9,25
10	1,57	13958	51657727	26663	9,68

Figura 72 - 1º modo de vibração do piso ($f_{01}=5,73$ Hz) [vista isométrica].Figura 73 - 1º modo de vibração do piso ($f_{01}=5,73$ Hz) [vista em planta].

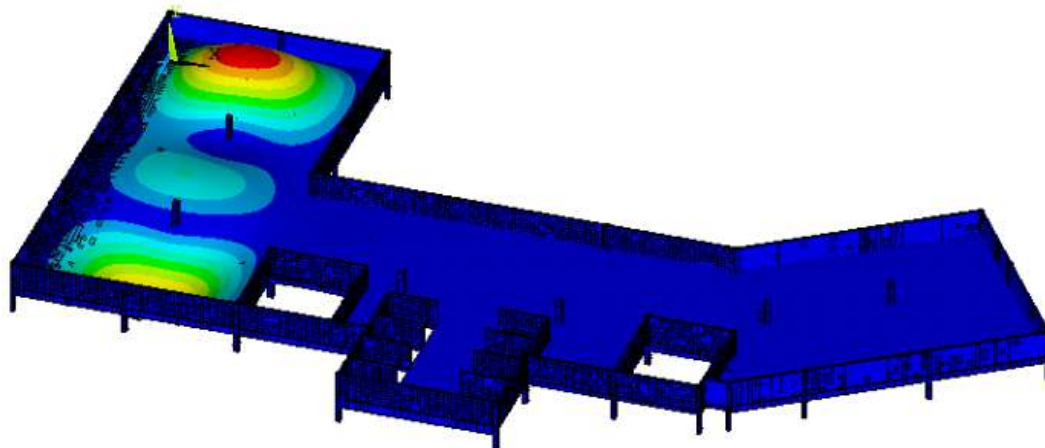


Figura 74 - 2º modo de vibração do piso ($f_{02}=6,51$ Hz) [vista isométrica].

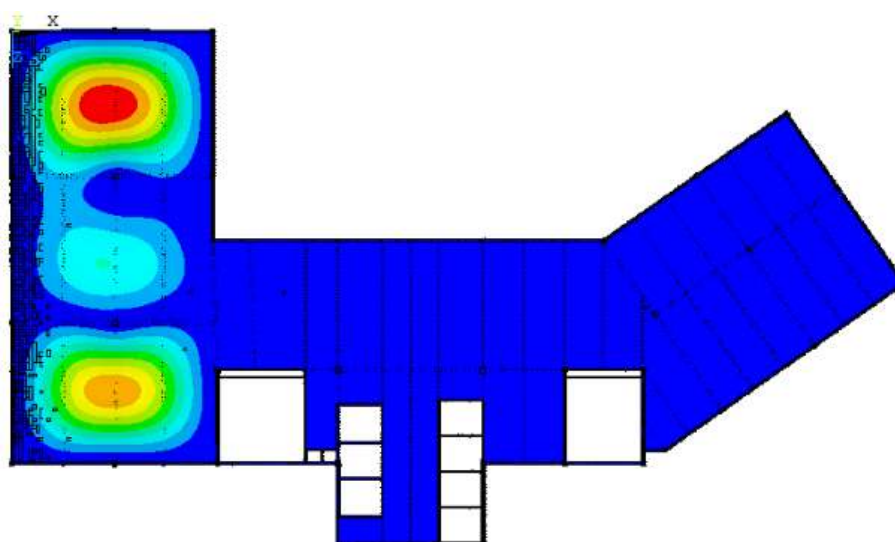


Figura 75 - 2º modo de vibração do piso ($f_{02}=6,51$ Hz) [vista em planta].

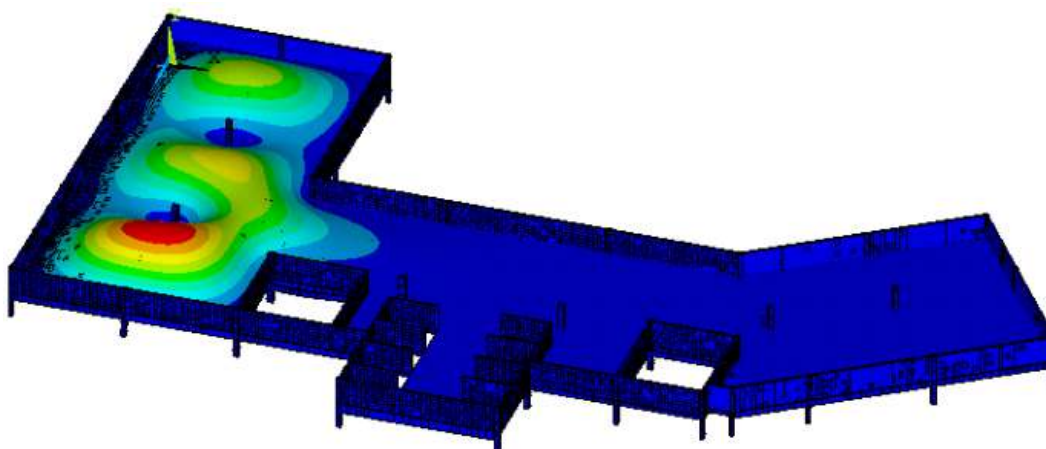


Figura 76 - 3º modo de vibração do piso ($f_{03}=6,88$ Hz) [vista isométrica].

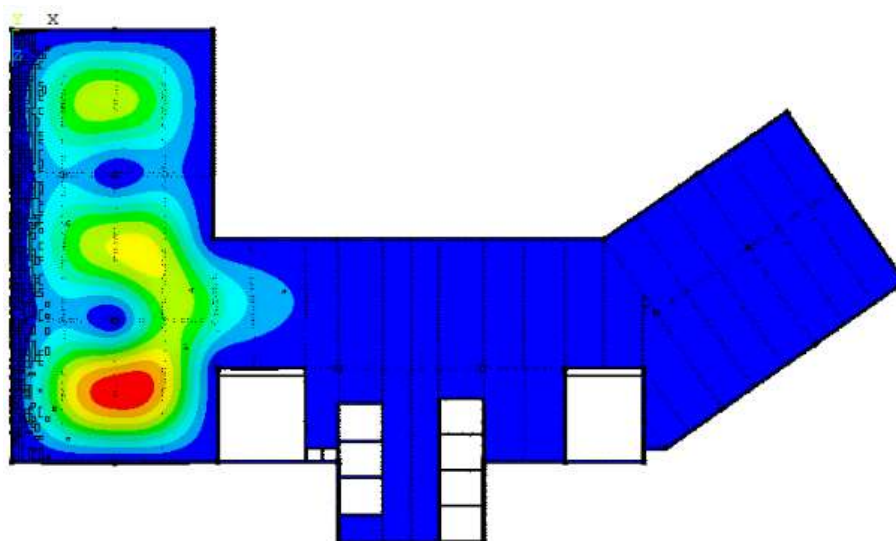


Figura 77 - 3º modo de vibração do piso ($f_{03}=6,88$ Hz) [vista em planta].

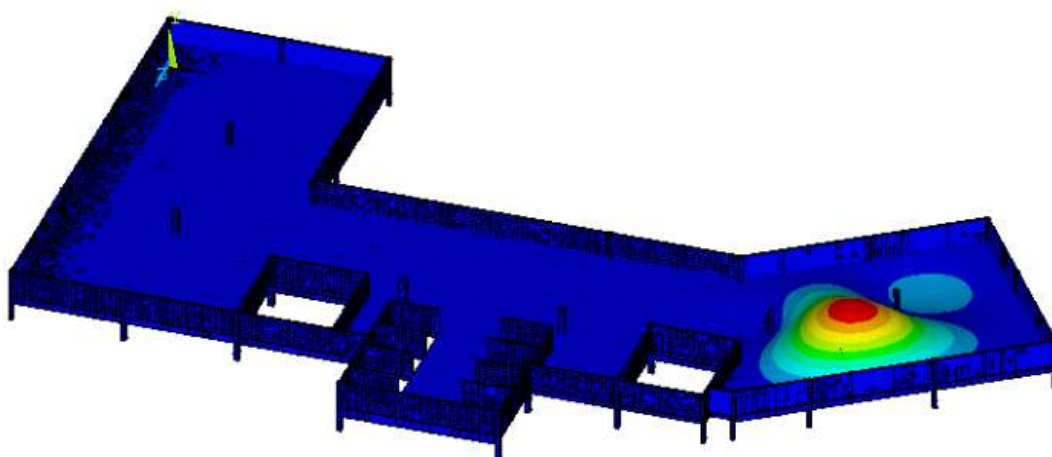


Figura 78 - 4º modo de vibração do piso ($f_{04}=7,35$ Hz) [vista isométrica].

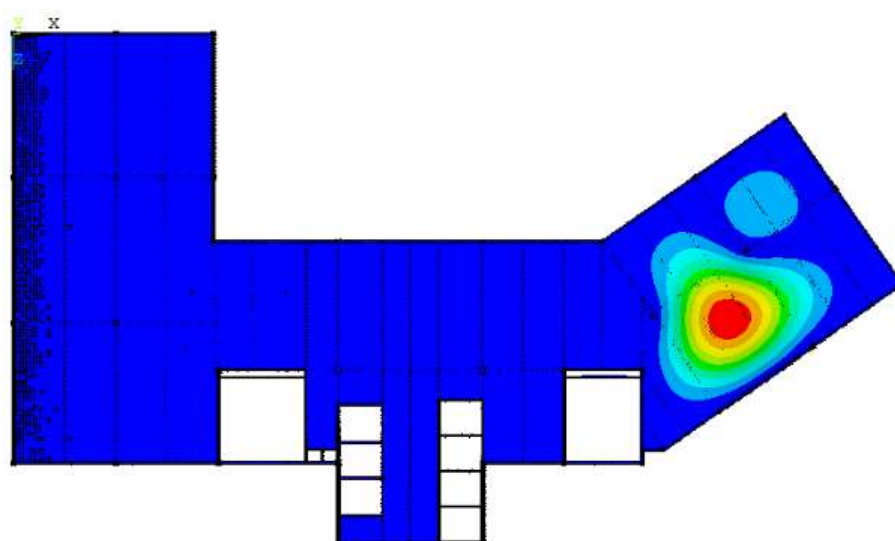


Figura 79 - 4º modo de vibração do piso ($f_{04}=7,35$ Hz) [vista em planta].

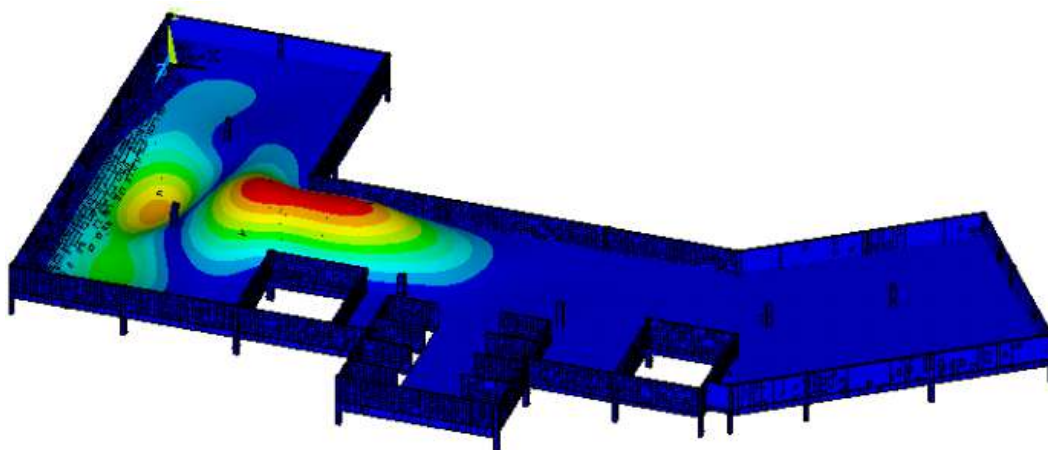


Figura 80 - 5º modo de vibração do piso ($f_{05}=7,40$ Hz) [vista isométrica].

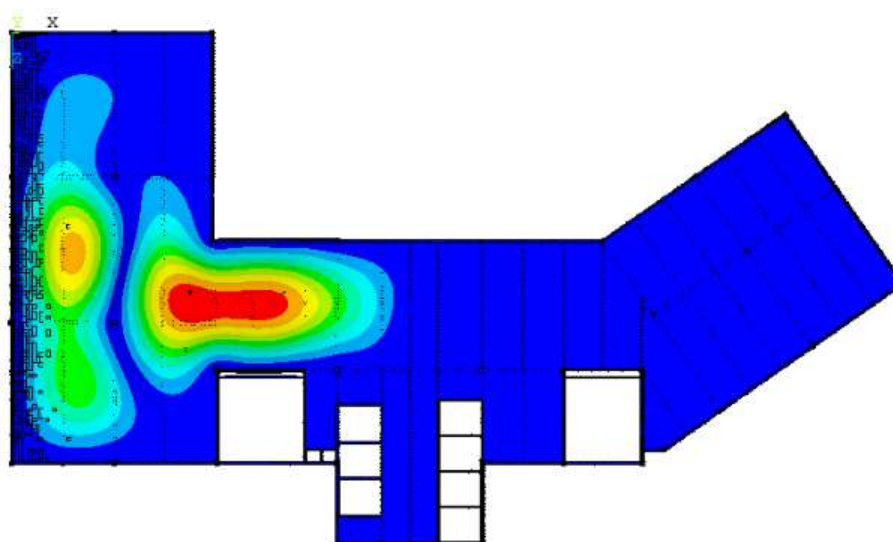


Figura 81 - 5º modo de vibração do piso ($f_{05}=7,40$ Hz) [vista em planta].

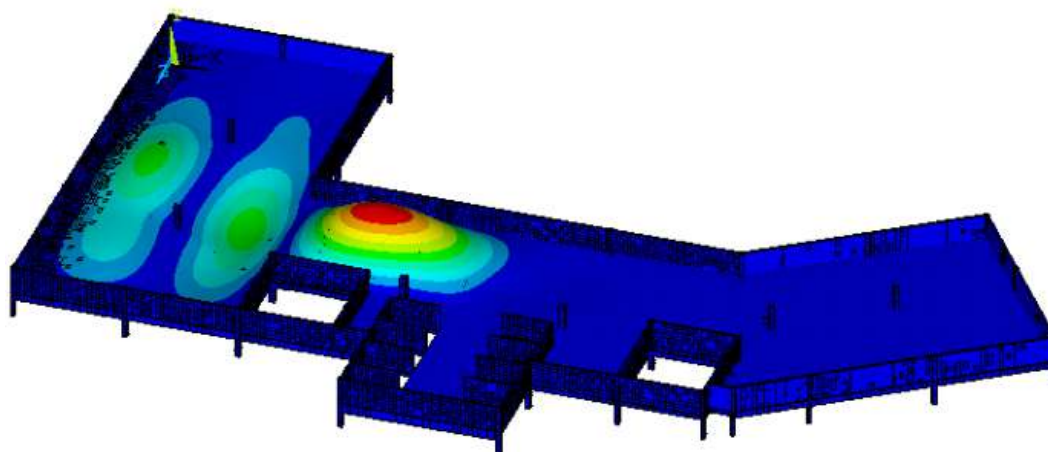


Figura 82 - 6º modo de vibração do piso ($f_{06}=7,87$ Hz) [vista isométrica].

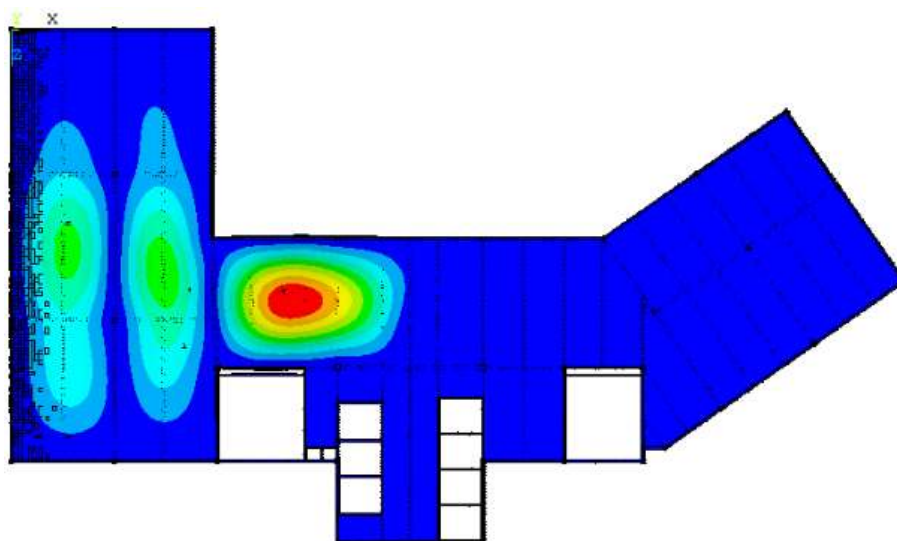


Figura 83 - 6º modo de vibração do piso ($f_{06}=7,87$ Hz) [vista em planta].

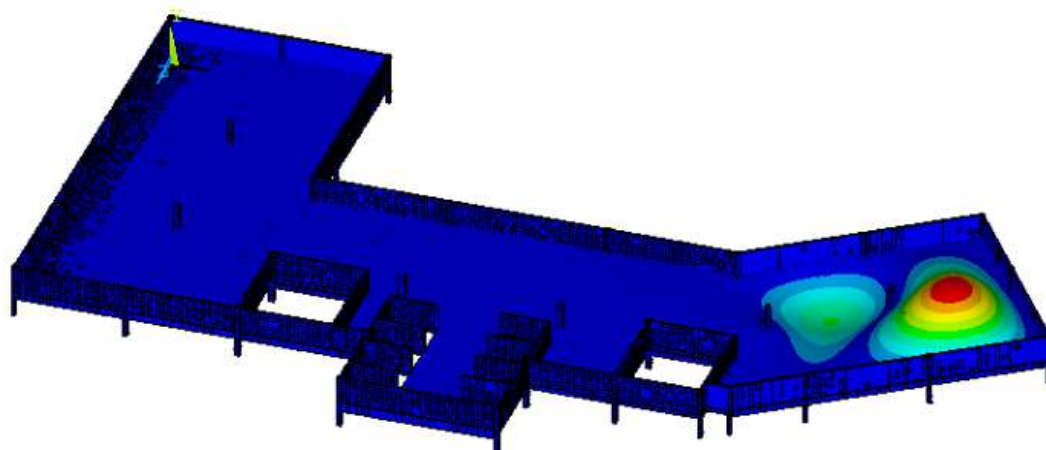


Figura 84 - 7º modo de vibração do piso ($f_{07}=8,19$ Hz) [vista isométrica].

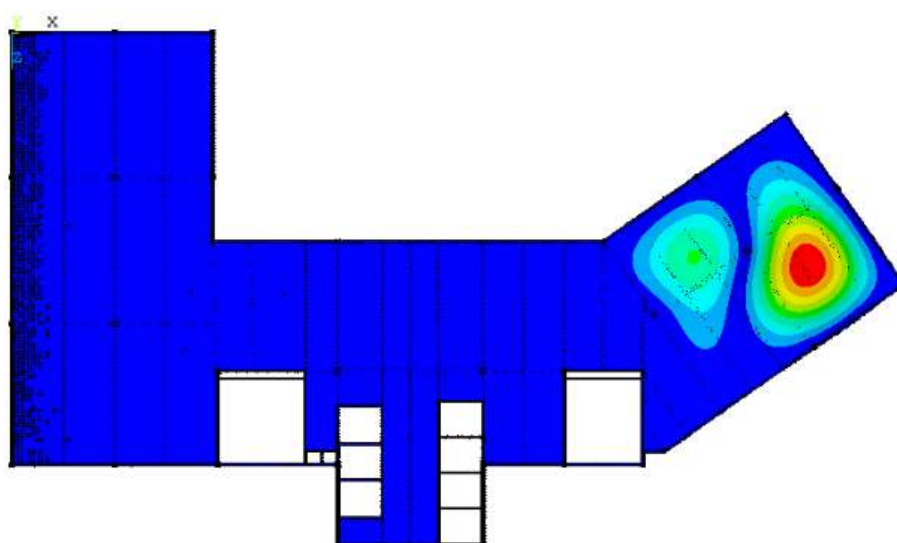


Figura 85 - 7º modo de vibração do piso ($f_{07}=8,19$ Hz) [vista em planta].

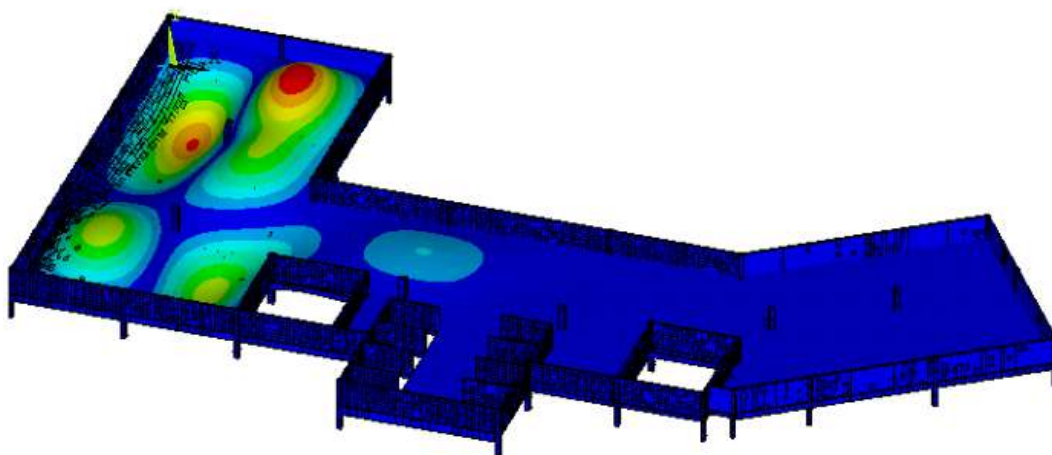


Figura 86 - 8º modo de vibração do piso ($f_{08}=8,73$ Hz) [vista isométrica].

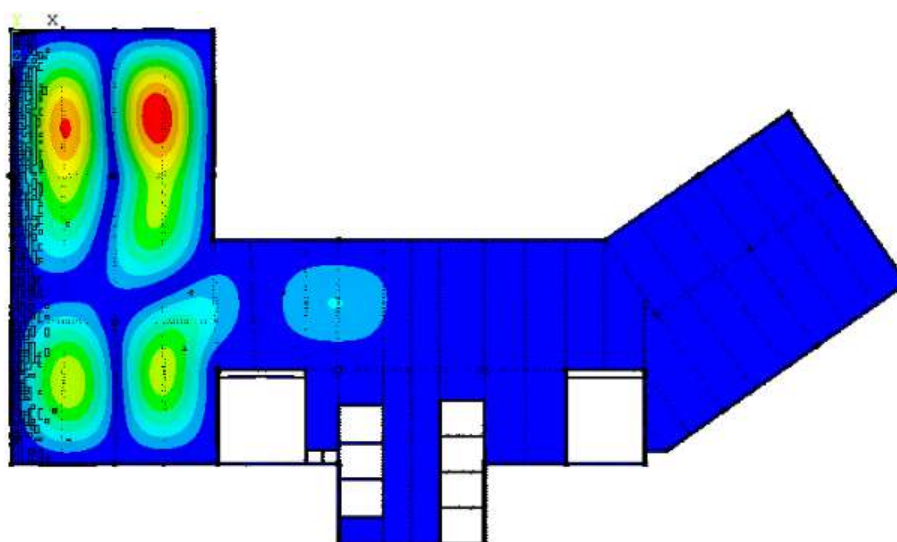


Figura 87 - 8º modo de vibração do piso ($f_{08}=8,73$ Hz) [vista em planta].

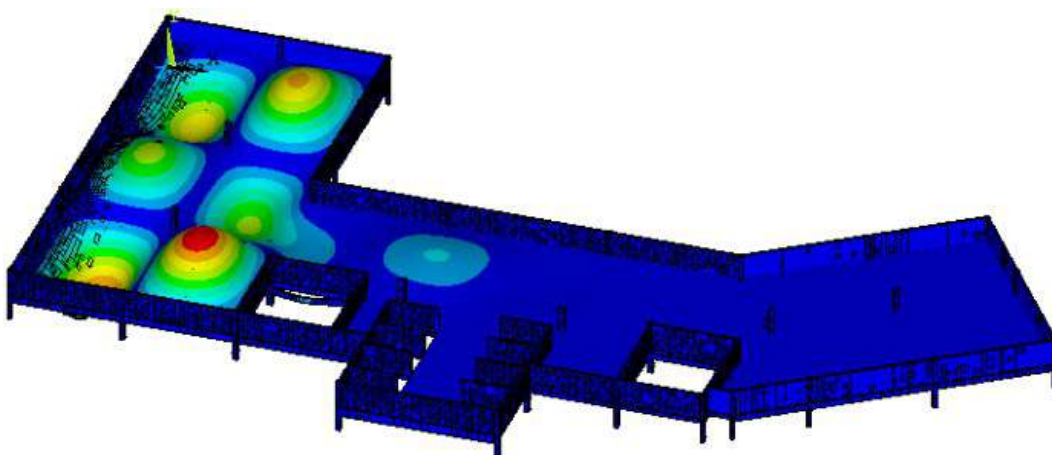


Figura 88 - 9º modo de vibração do piso ($f_{09}=9,25$ Hz) [vista isométrica].

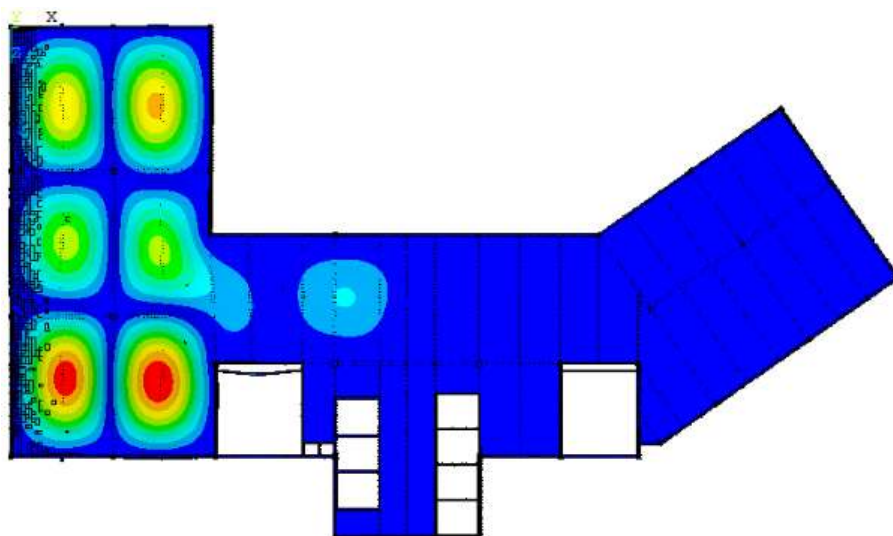


Figura 89 - 9º modo de vibração do piso ($f_{09}=9,25$ Hz) [vista em planta].

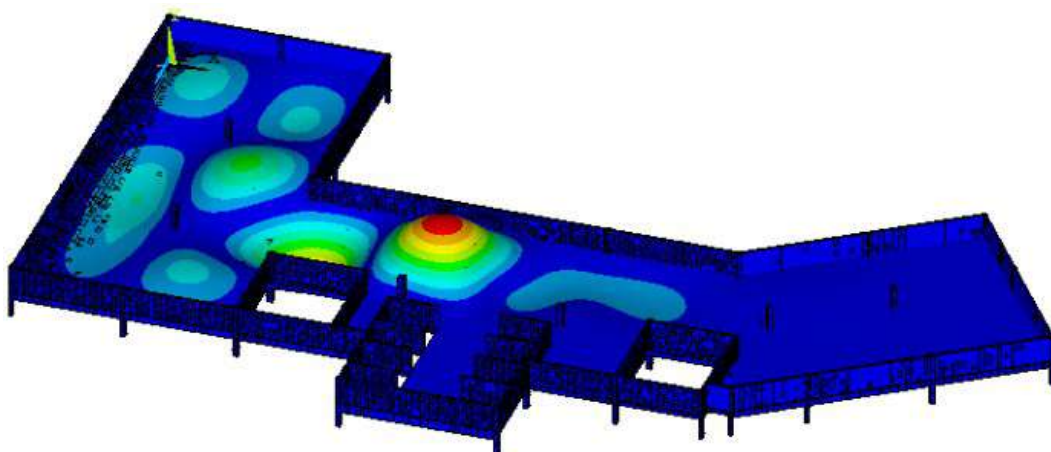


Figura 90 - 10º modo de vibração do piso ($f_{10}=9,68$ Hz) [vista isométrica].

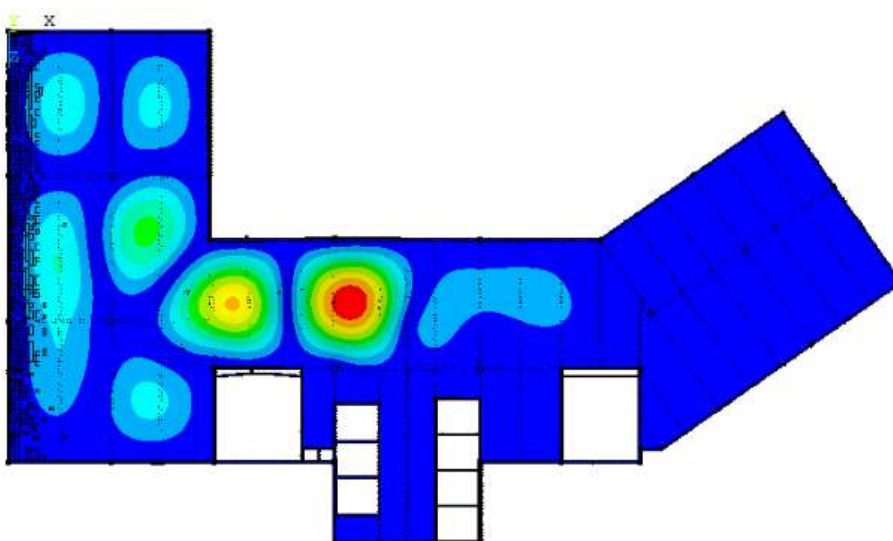


Figura 91 - 10º modo de vibração do piso ($f_{10}=9,68$ Hz) [vista em planta].

As frequências naturais dos dez primeiros modos de vibração para o modelo numérico-computacional são comparadas com as frequências naturais obtidas por meio dos ensaios experimentais, conforme apresentado na Tabela 12, considerando que a estrutura não está ocupada.

Tabela 12 - Comparação frequências naturais numéricas versus experimentais.

Modo de Vibração	Frequência (Hz)		Diferença (%)
	Modelo numérico	Testes	
1º	5,73	5,9	-2,9
2º	6,51	6,5	0,2
3º	6,88	6,97	-1,3
4º	7,35	Sem relação	Não identificado
5º	7,4	7,61	-2,8
6º	7,87	Sem relação	Não identificado
7º	8,19	8,4	-2,5
8º	8,73	8,17	6,9
9º	9,25	9,75	-5,1

Assim, obteve-se uma boa correlação entre os ensaios experimentais e resultados do modelo numérico-computacional, tendo diferenças menores que 3 % até o 7º modo de vibração do modelo numérico. Cumpre ressaltar que o 4º e o 6º modo de vibração não são constatados nos ensaios experimentais, em virtude destes modos não apresentarem amplitudes modais relevantes na região instrumentada dos Pisos 1 ao 5, conforme Figura 51. Ressalta-se ainda que a verificação “in loco”, durante os ensaios, e adição da alvenaria nas bordas do pavimento no modelo numérico foi fundamental para boa correlação dos resultados.

Após esta breve comparação entre os valores das frequências naturais do piso investigado, obtidos com base no monitoramento dinâmico experimental e também na modelagem numérica, conforme apresentado pela Tabela 12, pode-se verificar uma excelente concordância entre esses resultados (numéricos e experimentais). Esse fato indica uma modelagem apropriada em elementos finitos do modelo estrutural investigado, demonstrando que modelo refinado em elementos finitos produziu valores numéricos muito próximos dos resultados experimentais. Dessa forma, pode-se inferir que o modelo em elementos finitos do sistema estrutural do piso do 8º pavimento do edifício investigado, conforme descrito no Capítulo 4 desta tese, está calibrado, tendo sido então a validação dos resultados em relação aos experimentais.

6.3 Análise Modal: estrutura carregada com emprego de modelos biodinâmicos

Vários autores ([89], [142], [143], [144], [145], [146], [147], [148] e [149]) investigaram a influência da presença do ser humano (efeito da interação dinâmica indivíduo-estrutura) sobre os parâmetros dinâmicos (parâmetros modais) dos sistemas estruturais (massa, rigidez e amortecimento). Os parâmetros dinâmicos dos sistemas biodinâmicos, neste trabalho de pesquisa, são calculados por meio das expressões constantes nas Equações (5) e (6).

Nesta análise, foi utilizado o modelo biodinâmico de um grau de liberdade (S1GL) [150] para simular as pessoas sobre as lajes do piso. Logo, os sistemas massa-mola-amortecedor são distribuídos sobre o modelo estrutural do piso em estudo, aumentando o número de pessoas a fim de avaliar a influência das características modais das pessoas no piso, conforme Figura 92. É importante ressaltar que a interação ser humano-estrutura encontra-se representadas pelo modelo biodinâmico 1E desenvolvido por Campista et al. [150].

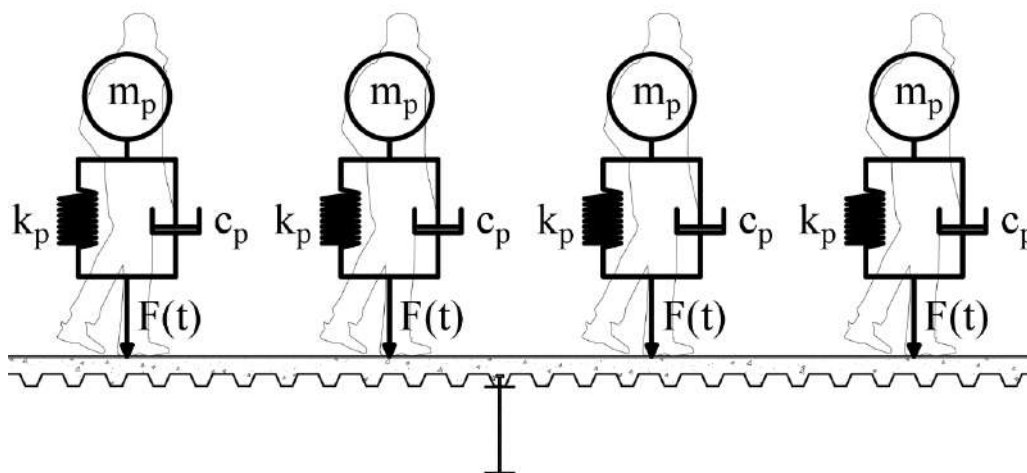


Figura 92 - Vários modelos biodinâmicos (S1GL) acoplado ao piso.

$$\begin{cases} m(f_p, M) = 97,082 + 0,275M - 37,52f_p \\ c(m) = 107,455 + 16,208m \\ k(c) = 5758,441 + 11,103c \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} m(f_p, M) = -231,34 + 3,69M + 154,06f_p - 1,97Mf_p + 0,005M^2 - 15,25f_p^2 \\ c(M, m) = -1115,69 + 92,56M - 108,94m + 2,91Mm - 1,33M^2 - 1,30m^2 \\ k(M, f_p) = 75601,45 - 1295,32M - 33786,95f_p + 506,44Mf_p + 3,59M^2 + 539,39f_p^2 \end{cases} \quad (6)$$

A avaliação da variação das propriedades modais do piso do 8º pavimento deste edifício de acordo com o aumento do número de modelos biodinâmicos representantes das pessoas sobre o piso ocorre preferencialmente em torno do máximo modal do 2º modo de vibração do piso (Piso 1), pois esta foi a posição e frequência na qual se obteve as maiores respostas dinâmicas, sendo a região com maior percepção pelos ocupantes durante os experimentos após as excitações. Logo, os modelos biodinâmicos são distribuídos próximos a resposta modal máxima do 2º modo de vibração, sendo variados de dez em dez, de 0 a 100 pessoas, a fim de evidenciar as influências dos modelos biodinâmicos nas propriedades modais do piso, em uma situação hipotética de extrapolação do carregamento do piso.

A partir de uma série de análises numéricas, obteve-se a Tabela 13 que apresenta a variação das propriedades modais do piso investigado em relação ao 2º modo de vibração e considerando ambos ensaios experimentais de Silva et al. [87] e Toso et al. [88] para a atribuição das propriedades modais das pessoas. Importante ressaltar que os dados iniciais inseridos no modelo biodinâmico são condizentes com os dados da pessoa que foi voluntária para realizar os experimentos no piso investigado. Vale ressaltar que em todos os casos se observou o fenômeno de flexão de placa no plano XZ.

A fim de visualizar melhor o que ocorre numericamente quando se aumenta o número de modelos biodinâmicos sobre o piso investigado, de modo a sintetizar os dados da Tabela 13, foram elaborados os gráficos constantes nas Figuras 92 a 95 considerando a variação da frequência natural do piso, a taxa de amortecimento modal, a massa modal e rigidez modal, respectivamente, com o acréscimo de modelos biodinâmicos representativo das pessoas ocupando a na região próxima a resposta modal máxima do 2º modo de vibração do piso.

A variação dos componentes biodinâmicos que representa a pessoa de zero a 100 causou uma variação nas propriedades modais do piso, do caso com nenhum componente biodinâmico até o caso com 100 componentes. Em relação a frequência natural do piso, há um decréscimo de aproximadamente 4 % quando considerado as propriedades dos componentes propostas pelas equações de Silva et al. [87] e de Toso et al. [88]. Em números absolutos se obteve uma variação das frequências naturais do pavimento investigado de 6,51 Hz para 6,25 Hz e 6,27 Hz, respectivamente.

Tabela 13 - Variação das propriedades modais do piso.

Modo de Vibração	Nº de Pessoas	Equação dos Atributos	Amortecimento (%)	Massa Modal (t)	Rigidez Modal (10^6N/m)	Amortecimento Modal (kNs/m)	Frequência (Hz)
2	0	-	1,12	20,34	34,04	18,64	6,51
2	10	Silva et al.	1,77	20,28	33,51	29,19	6,47
		Toso et al.	1,75	20,26	33,52	28,84	6,47
2	20	Silva et al.	1,85	20,69	33,77	30,93	6,43
		Toso et al.	1,81	20,56	33,65	30,11	6,44
2	30	Silva et al.	1,89	21,61	34,85	32,80	6,39
		Toso et al.	1,83	21,26	34,44	31,32	6,41
2	40	Silva et al.	1,93	22,56	36,05	34,81	6,36
		Toso et al.	1,90	22,01	35,35	33,52	6,38
2	50	Silva et al.	1,92	23,92	37,89	36,55	6,33
		Toso et al.	1,92	23,09	36,78	35,39	6,35
2	60	Silva et al.	1,92	25,64	40,36	39,06	6,31
		Toso et al.	1,90	24,49	38,78	37,04	6,33
2	70	Silva et al.	1,95	27,46	42,96	42,36	6,29
		Toso et al.	1,92	25,96	40,86	39,55	6,31
2	80	Silva et al.	2,01	29,58	46,03	46,91	6,28
		Toso et al.	1,95	27,67	43,33	42,70	6,30
2	90	Silva et al.	2,07	31,53	48,82	51,36	6,26
		Toso et al.	2,03	29,19	45,50	46,79	6,28
2	100	Silva et al.	2,10	33,63	51,88	55,48	6,25
		Toso et al.	2,02	30,87	47,94	49,15	6,27

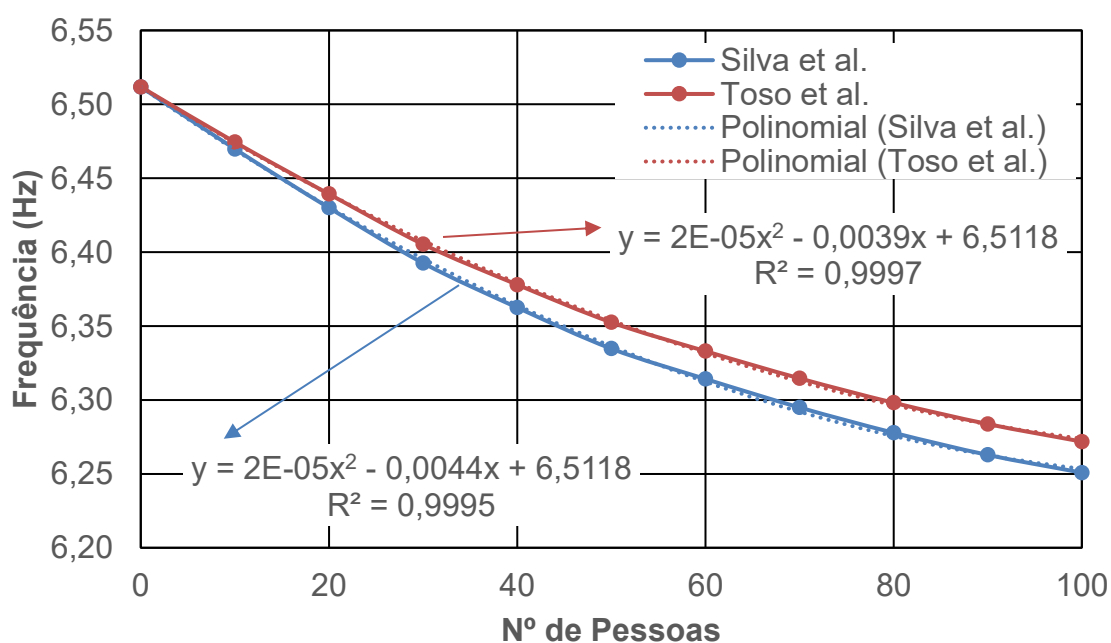


Figura 93 - Frequência natural (2º Modo de Vibração) versus nº de pessoas.

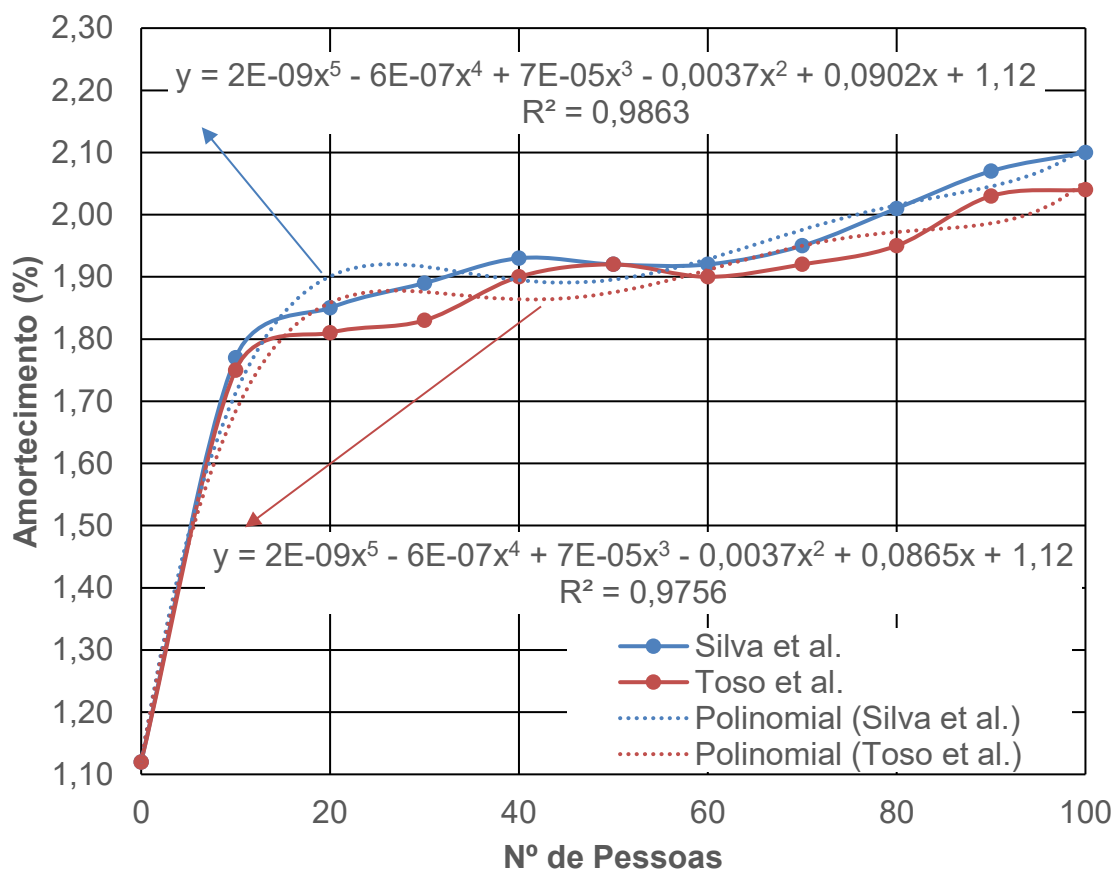


Figura 94 - Taxa de amortecimento (2º Modo de Vibração) versus nº de pessoas.

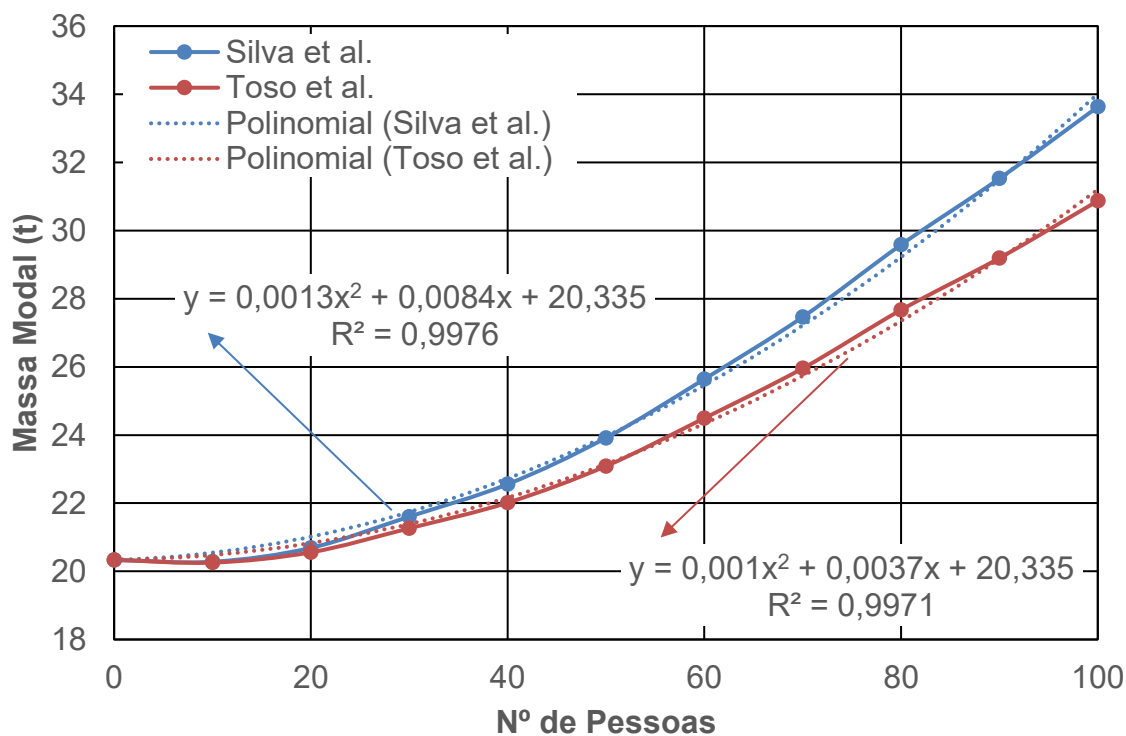


Figura 95 - Massa modal (2º Modo de Vibração) versus nº de pessoas.

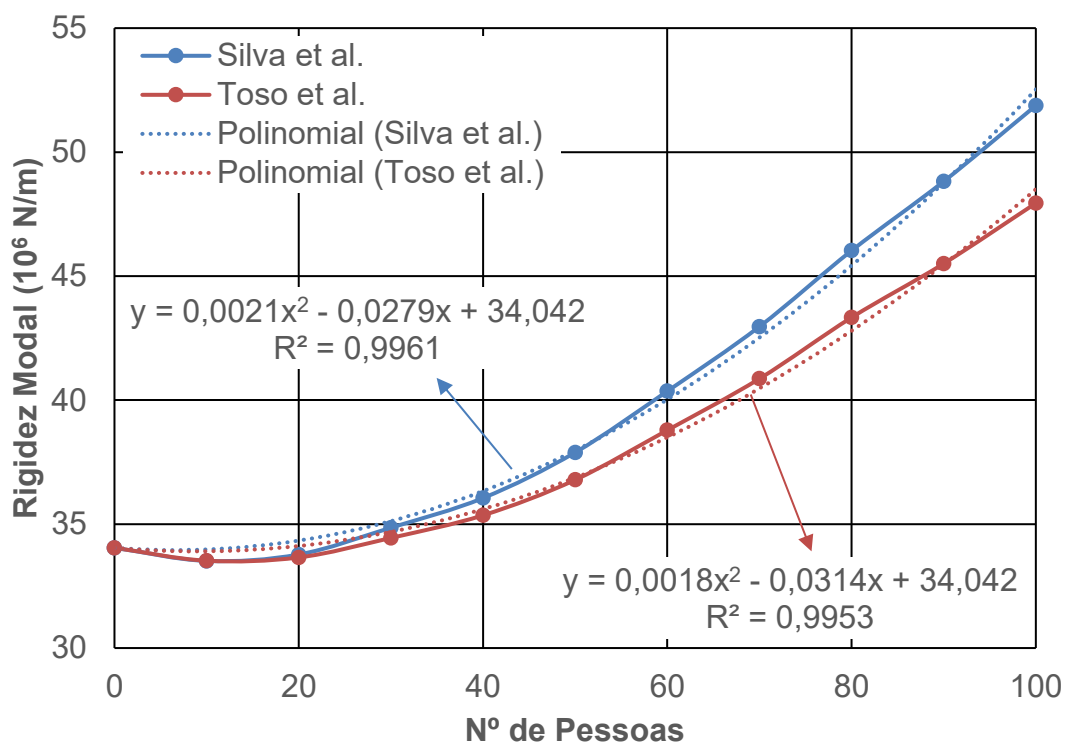


Figura 96 - Rigidez modal (2º Modo de Vibração) versus nº de pessoas.

Em relação à taxa de amortecimento modal, obteve-se um acréscimo relativo de 88 e 80 % quando considerado as equações de Silva et al. [87] e de Toso et al. [88], respectivamente. Em números absolutos se obteve uma variação de 1,1 % para 2,1 e 2,0 %, respectivamente. Ressalta-se que a taxa de amortecimento é adimensional e apresentada em percentagem e que esta foi a propriedade que apresentou maior dispersão dos dados.

Em relação a massa modal, obteve-se um acréscimo relativo de 65 e 52 % quando considerado as equações de Silva et al. [87] e de Toso et al. [88], respectivamente. Em números absolutos se obteve uma variação de 20,34 para 33,63 e 30,87 toneladas, respectivamente.

Por fim, em relação a rigidez modal, obteve-se um acréscimo relativo de 52 e 41 % quando considerado as equações de Silva et al. [87] e de Toso et al. [88], respectivamente. Em números absolutos se obteve uma variação de 34,04 para 51,88 e 47,94 MN/m, respectivamente.

As linhas de tendência por regressão polinomial para a variação frequência natural (Figura 93) e da taxa de amortecimento modal (Figura 94) versus a variação de componentes biodinâmicos (pessoas) no piso foram traçadas, obtendo-se as

equações (7) e (8), respectivamente. Ressalta-se que estas curvas foram traçadas para a variação de zero a 100 componentes biodinâmicos neste estudo.

$$\begin{cases} f_n = 2 \times 10^{-5} n^2 - 4,4 \times 10^{-3} n + 6,5118; R^2 = 0,9995 \text{ (Silva et al.)} \\ f_n = 2 \times 10^{-5} n^2 - 3,9 \times 10^{-3} n + 6,5118; R^2 = 0,9997 \text{ (Toso et al.)} \end{cases} \quad (7)$$

Onde n é o número de componentes biodinâmicos e f_n é a frequência natural em Hertz.

$$\begin{cases} \xi_n = 2 \times 10^{-9} n^5 - 6 \times 10^{-7} n^4 + 7 \times 10^{-5} n^3 - 3,7 \times 10^{-3} n^2 + 0,0902 n + 1,12; \\ R^2 = 0,9860 \text{ (Silva et al.)} \\ \xi_n = 2 \times 10^{-9} n^5 - 6 \times 10^{-7} n^4 + 7 \times 10^{-5} n^3 - 3,7 \times 10^{-3} n^2 + 0,0865 n + 1,12; \\ R^2 = 0,9750 \text{ (Toso et al.)} \end{cases} \quad (8)$$

Onde n é o número de componentes biodinâmicos e ξ_n é a taxa de amortecimento modal em %.

A variação da frequência natural em decorrência da variação de componentes biodinâmicos (pessoas) sobre o piso pôde ser relacionada praticamente com perfeição com uma curva polinomial quadrática, onde se obteve coeficientes de determinação (R^2) praticamente iguais a um, o que demonstra boa consistência dos dados, enquanto o gráfico da variação da taxa de amortecimento modal versus a variação de componentes biodinâmicos (pessoas) sobre o piso somente se observe boa correlação entre os dados com uma regressão polinomial do 5º grau, com coeficientes de determinação (R^2) iguais a 0,986 e 0,975 quando considerada as equações de Silva et al. [87] e de Toso et al. [88], respectivamente.

6.4 Observações finais do capítulo

Neste capítulo, foram apresentados os resultados das análises de vibração livre do modelo numérico desenvolvido e se notou que estão calibrados com os resultados experimentais. Posteriormente, realizou-se uma análise modal considerando a presença de até 100 pessoas no piso investigado (estrutura carregada). Estes resultados permitiram conhecer o comportamento do modelo diante de carregamentos

dinâmicos e a influência da presença dos indivíduos (representados pelos biodinâmicos) sobre as propriedades modais do piso investigado. No capítulo seguinte, serão apresentados o programa de ensaio e os resultados obtidos através dos ensaios experimentais de vibração forçada no piso investigado, de forma a avaliar se o conforto humano e as comparações com os limites relativos das normas de projeto.

7 TESTES EXPERIMENTAIS DE VIBRAÇÃO FORÇADA

7.1 Considerações iniciais

Este capítulo apresenta a metodologia e os resultados das análises dinâmicas de vibração forçada, obtidos através da monitoração experimental do piso do 8º pavimento do edifício investigado que foi realizada com a instalação “in loco” de acelerômetros ligados a um sistema de aquisição de dados, conforme sensores e equipamentos descritos no Capítulo 5. O desenvolvimento dos testes experimentais constantes neste capítulo foi realizado em parceria com Ferreira [127]. Tais análises procuraram avaliar o comportamento dinâmico da estrutura mediante análises de vibração forçada sobre as lajes do piso, ocasionado pelo caminhar de pessoas com diferentes frequências de passo e diferentes trajetórias.

7.2 Metodologia de ensaio e testes de caminhada executados

Segundo Silva [95], a sincronização da frequência de passo quando mais de uma pessoa realiza ensaios dinâmicos de vibração é uma tarefa complexa e de difícil controle, porém o controle e sincronização da frequência de passo reflete diretamente na resposta dinâmica da estrutura. Diante do exposto, neste trabalho de pesquisa, optou-se por realizar todos os ensaios com apenas uma pessoa excitando os pisos de interesse, de modo a se obter resultados mais controlados. Dessarte, as respostas dinâmicas dos pavimentos foram obtidas devido ao caminhar de uma pessoa sobre os Pisos 1 a 5, com frequências de passo controladas nas direções perpendicular, paralela, diagonal ou aleatórias, conforme ilustrado na Figura 97.

O principal objetivo desses ensaios foi simular o caminhar de usuários sobre a estrutura estudada, visando obter respostas de aceleração para calibração com um modelo biodinâmico proposto nesta Tese e avaliação dos níveis de vibração com critérios normativos de percepção e conforto de usuários. Para excitar o piso foi

utilizado uma pessoa do sexo masculino, com uma altura de 1,78 metros, massa de 102,6 kg que calçava sapato de solado macio no momento dos ensaios.

Com o intuito de controlar a frequência do passo da caminhada, foi utilizado um metrônomo. Assim, o dispositivo foi configurado de acordo com o ritmo do caminhar humano sobre a estrutura. A unidade representativa do metrônomo é o “bpm” (batidas por minuto), então, cada “batida” sonora corresponderia ao contato de cada passo da pessoa sobre a estrutura. O metrônomo foi fixado em 102 bpm ($f_p = 1,7$ Hz) de forma a induzir uma caminhada lenta, 120 bpm ($f_p = 2,0$ Hz) induzindo uma caminhada normal e 138 bpm ($f_p = 2,3$ Hz) levando a uma caminhada rápida. Ressalta-se que a estimativa do primeiro modo de vibração vertical do pavimento ($f_p = 5,9$ Hz) foi excitada em quase ressonância com o terceiro harmônico do caminhar humano em ritmo normal ($f_{p(3^{\text{th}})} = 3 \times 2,0$ Hz = 6,0 Hz).

Para cada frequência de passo, foi executado testes experimentais de vibração forçada nas seguintes direções: paralela, perpendicular, diagonal e de maneira aleatória, de forma a descrever os usuários finais na utilização do dos pisos. Para cada trajetória, por sua vez, foi executado três ensaios em cada piso (Piso 1 a 5). O teste de vibração foi caracterizado como uma execução completa ao termino de três idas e voltas, para cada trajetória estipulada. A Tabela 14 resume o número de ensaios realizados, tendo sido executados 36 ensaios por piso, ou nove para cada direção ensaiada, sendo totalizado 180 ensaios no pavimento. As Figuras 97 a 101 ilustram um exemplo de cada uma das trajetórias descritas na Tabela 14 realizadas nos pisos em estudo, para o Piso 1. Ressalta-se que a denominação para direção Paralela diz respeito a caminhada no sentido paralelo ao vigamento do piso misto. Esta mesma analogia pode ser observada para a denominação da direção Perpendicular.

Tabela 14 - Total de ensaios realizados por piso.

Direção	Lenta 1,7 Hz	Normal 2,0 Hz	Rápida 2,3 Hz	Total por direção
Paralela	3	3	3	9
Perpendicular	3	3	3	9
Diagonal	3	3	3	9
Aleatória	3	3	3	9
Total por frequência	12	12	12	36

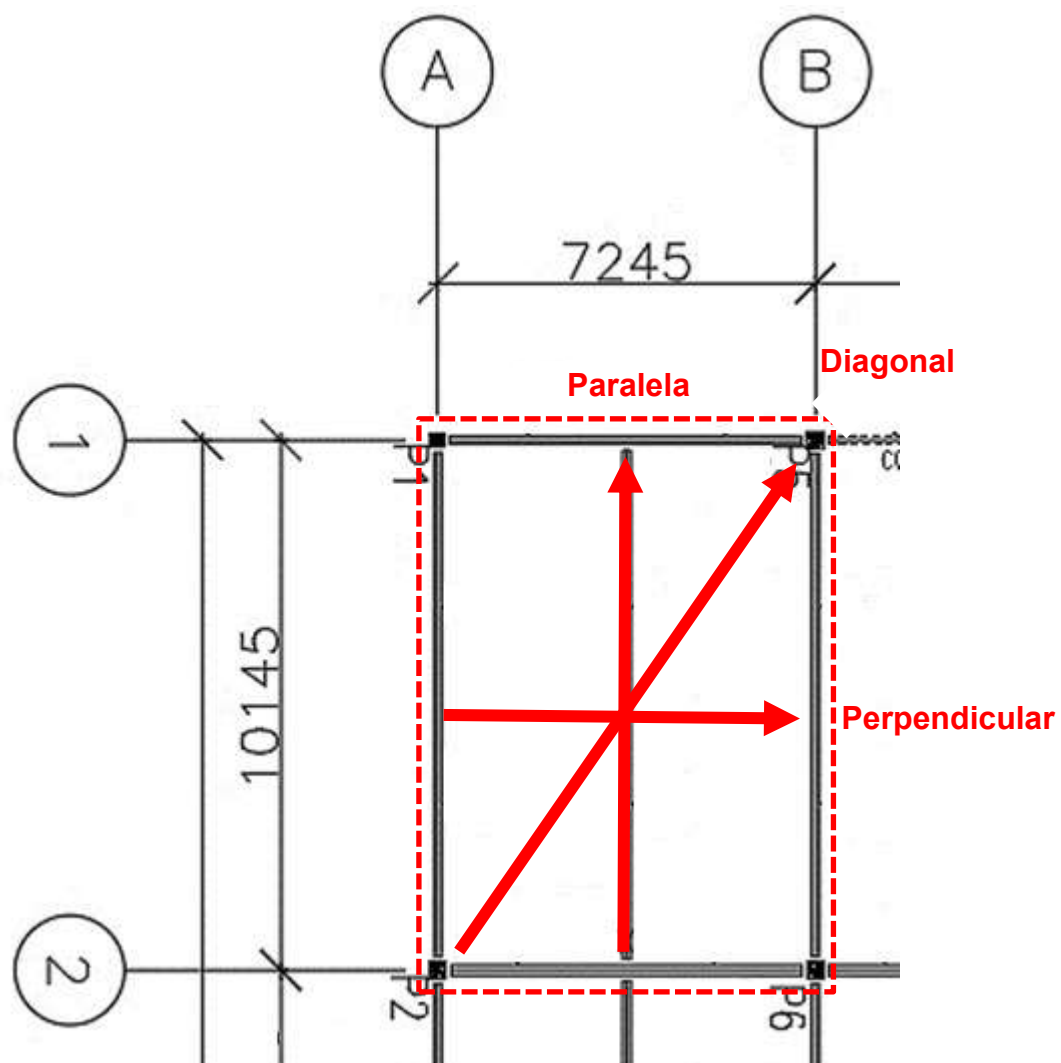


Figura 97 - Ilustração das trajetórias dos testes no Piso1 (cotas em mm).



Figura 98 - Ilustração da caminhada em trajetória paralela.



Figura 99 - Ilustração da caminhada em trajetória paralela.



Figura 100 - Ilustração da caminhada em trajetória diagonal.

Vale lembrar que, além dos ensaios de vibração forçada, foram realizados nove ensaios de vibração livre em cada piso, o que representa mais 45 ensaios. Assim, ao todo foram realizados 225 ensaios, entre ensaios de vibração livre e forçada. O objetivo foi obter as repostas em termos de amplitudes de aceleração dos pisos (pico e *RMS*), através da simulação real do caminhar dos usuários sobre a estrutura para avaliar a calibração do modelo numérico computacional desenvolvido nesta Tese e, também, o nível de conforto estipulados por normas e guias de projeto. Ressalta-se ainda que a aceleração de pico é válida para indicação de impactos de curta duração, não levando em consideração o histórico do tempo na onda e que a aceleração *RMS*

considera esse histórico, retornando um valor diretamente relacionado à média de energia contida no movimento vibratório.

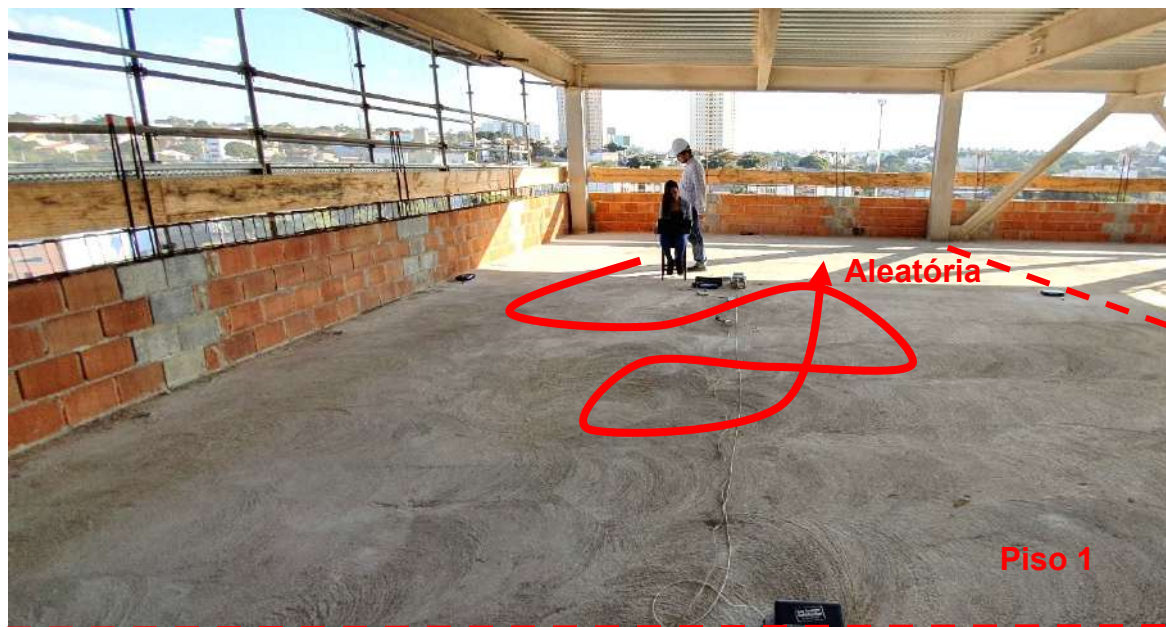


Figura 101 - Ilustração da caminhada em trajetória aleatória.

Em resumo da metodologia, os Pisos 1 a 5 foram excitados através do caminhar de uma pessoa com frequência de passo lenta ($f_p = 1,7$ Hz), normal ($f_p = 2,0$ Hz) e rápida ($f_p = 2,3$ Hz) [67], nas direções paralela, perpendicular, diagonal e aleatória, conforme demonstrado na Figura 97. Cada frequência de passo foi repetida três vezes em cada direção, totalizando trinta e seis ensaios para cada um dos cinco pisos escolhidos, totalizando 180 (cento e oitenta) ensaios de vibração forçada. Os resultados obtidos no domínio do tempo e da frequência são apresentados a seguir, para o Piso 1, piso que se observou, durante os testes, as maiores respostas dinâmicas. Os gráficos dos demais pisos ensaiados neste Trabalho de Pesquisa podem ser verificados no Anexo A.2.

7.3 Caminhada lenta ($f_p = 1,7$ Hz) - Piso 1

As Figuras 102 a 105 apresentam as respostas dinâmicas típicas, em termos da aceleração vertical, registradas na região central do Piso 1, para a estrutura do piso

sendo excitada pelo caminhar de uma pessoa com frequência de passo igual a 1,7 Hz. As respostas registradas pelos demais canais podem ser vistas no Anexo A. As acelerações máximas encontradas nesse ensaio são apresentadas na Tabela 15 em valores de pico e *RMS*. A máxima aceleração de pico foi de 0,0019 m/s² e a máxima aceleração *RMS* foi de 0,002 m/s², obtidas através da caminhada na direção diagonal.

Tabela 15 - Máximas acelerações encontradas para caminhada lenta no Piso 1.

Direção	Aceleração de pico (m/s ²)	Aceleração <i>RMS</i> (m/s ²)
Aleatória	0,012	0,002
Diagonal	0,019	0,002
Paralela	0,011	0,002
Perpendicular	0,012	0,002

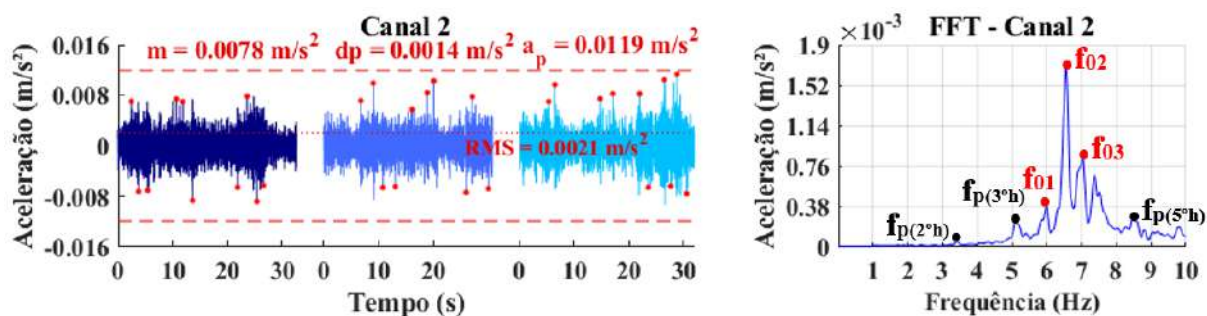


Figura 102 - Acelerações do Piso 1: ritmo lento; trajetória aleatória [127].

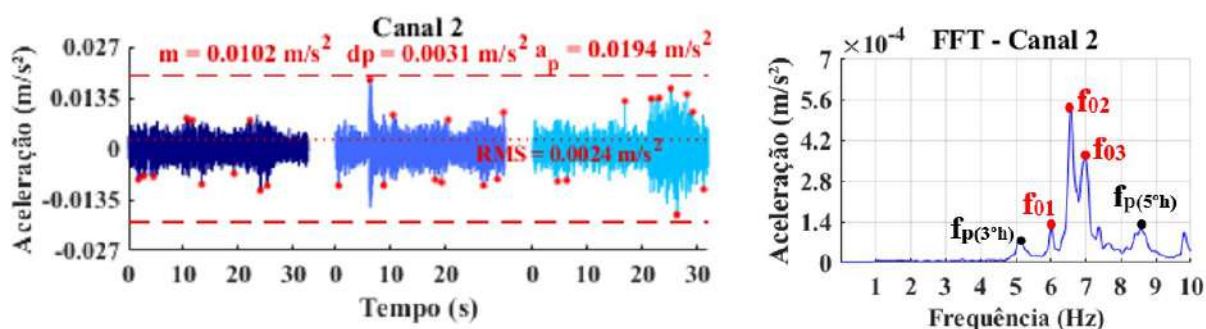


Figura 103 - Acelerações do Piso 1: ritmo lento; trajetória diagonal [127].

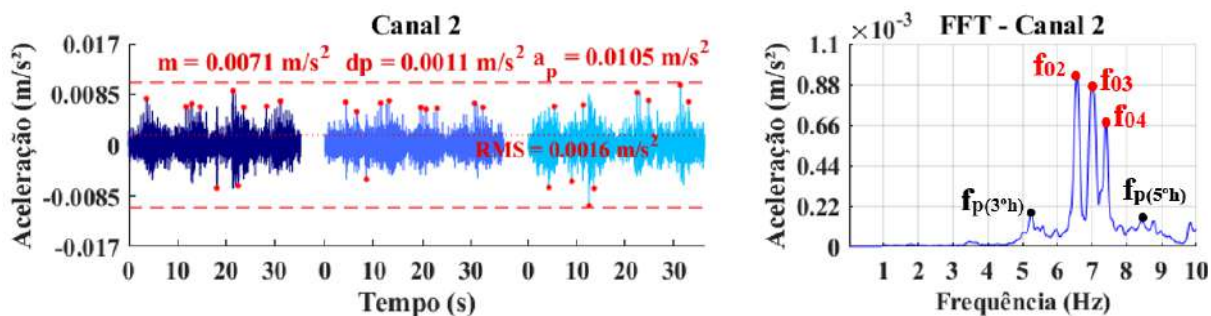


Figura 104 - Acelerações do Piso 1: ritmo lento; trajetória paralela [127].

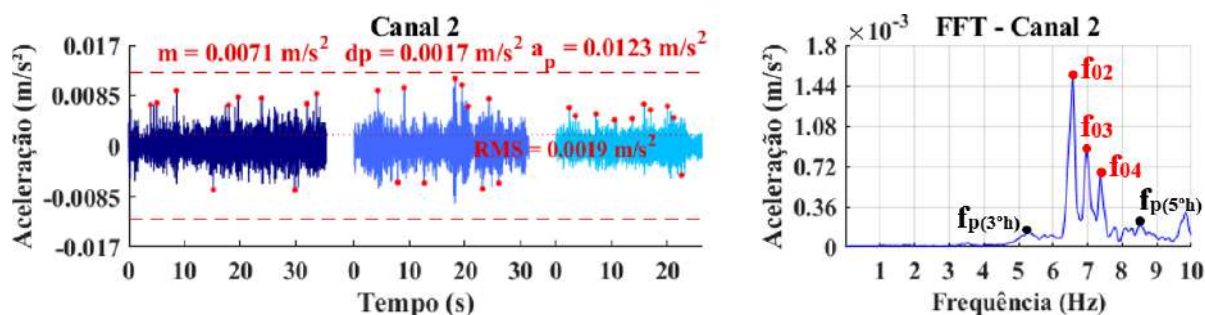


Figura 105 - Acelerações do Piso 1: ritmo lento; trajetória perpendicular [127].

Com base nas respostas dinâmicas obtidas, é observado que a parcela mais significativa de transferência de energia, conforme gráficos no domínio do tempo, refere-se à contribuição da segunda frequência natural do pavimento, associada ao segundo modo de vibração de flexão do pavimento ($f_{02} = 6,5$ Hz). Ressalta-se ainda que, na trajetória de caminhada paralela, houve também grande contribuição do terceiro e quarto modo de vibração de flexão vertical ($f_{03} = 6,97$ Hz e $f_{04} = 7,3$ Hz). Nas direções aleatória e diagonal, por sua vez, é possível observar também um pequeno pico de vibração em 5,90 Hz, que está associado ao primeiro modo de vibração do pavimento. Por fim, pode-se concluir que a estrutura está sendo fortemente excitada pelo quarto harmônico do caminhar ($f_{p(4^h)} = 4 \times 1,7$ Hz = 6,8 Hz).

Os picos provenientes do segundo, terceiro e quinto harmônicos do caminhar ($f_{p(2^h)} = 3,4$ Hz, $f_{p(3^h)} = 3,4$ Hz e $f_{p(5^h)} = 8,5$ Hz) estão presentes na resposta dinâmica do pavimento, apesar de apresentarem baixas transferências de energia quando comparados aos picos associados aos modos naturais de vibração do pavimento.

7.4 Caminhada normal ($f_p = 2,0$ Hz) - Piso 1

As Figuras 106 a 109 apresentam as respostas dinâmicas típicas, em termos da aceleração vertical, registradas na região central do Piso 1, para a estrutura do piso sendo excitada pelo caminhar de uma pessoa com frequência de passo igual a 2,0 Hz. As respostas registradas pelos demais canais podem ser vistas no Anexo A. As acelerações máximas encontradas nesse ensaio são apresentadas na Tabela 16 em valores de pico e *RMS*. A máxima aceleração de pico foi de $0,022 \text{ m/s}^2$ e a máxima aceleração *RMS* foi de $0,003 \text{ m/s}^2$, obtidas através da caminhada na direção aleatória.

Tabela 16 - Máximas acelerações encontradas para caminhada normal no Piso 1.

Direção	Aceleração de pico (m/s^2)	Aceleração <i>RMS</i> (m/s^2)
Aleatória	0,022	0,003
Diagonal	0,011	0,002
Paralela	0,011	0,002
Perpendicular	0,011	0,002

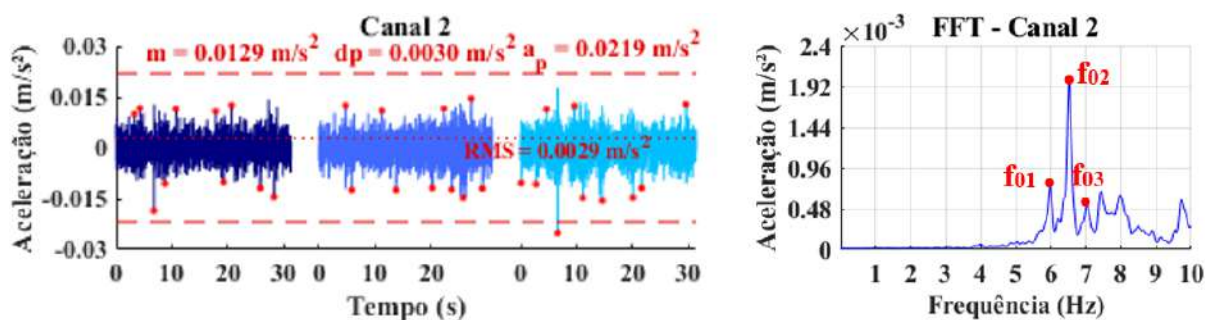


Figura 106 - Acelerações do Piso 1: ritmo normal; trajetória aleatória [127].

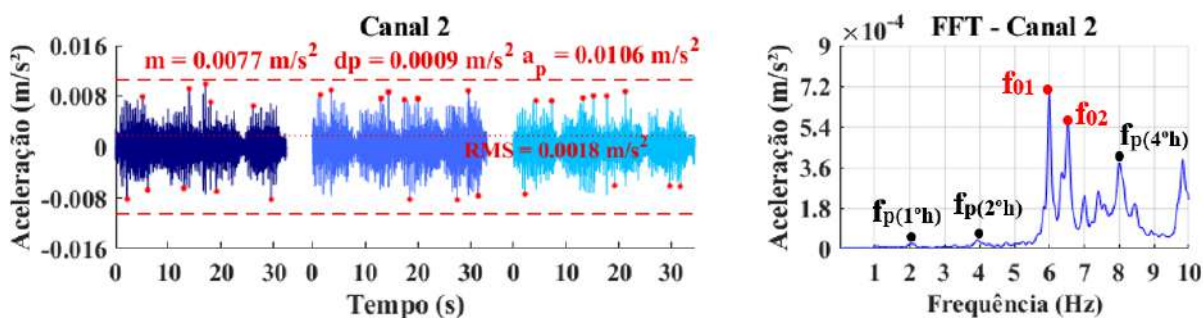


Figura 107 - Acelerações do Piso 1: ritmo normal; trajetória diagonal [127].

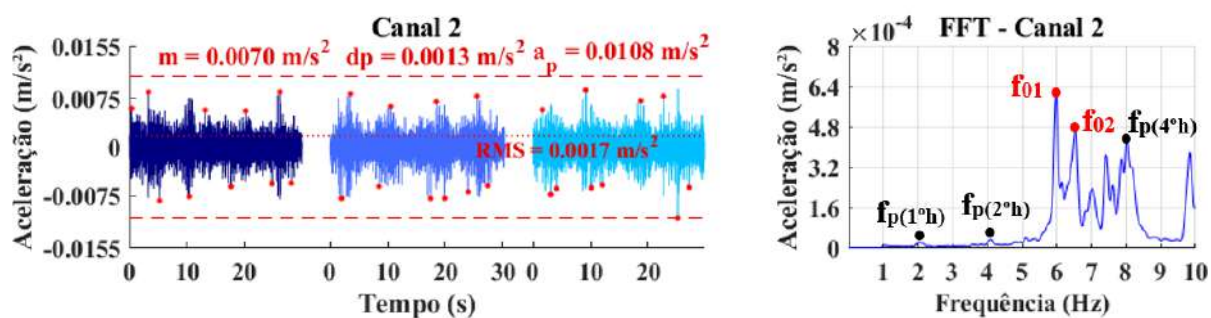


Figura 108 - Acelerações do Piso 1: ritmo normal; trajetória paralela [127].

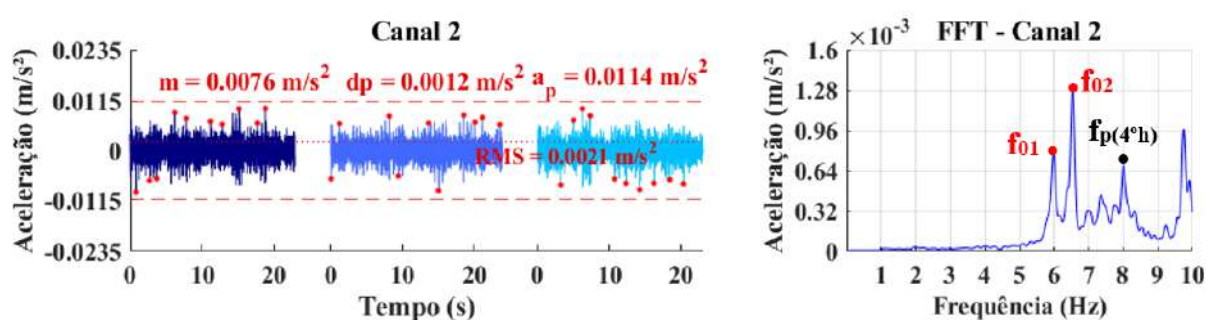


Figura 109 - Acelerações do Piso 1: ritmo lento; trajetória perpendicular [127].

Com base nas respostas dinâmicas obtidas, é observado que a parcela mais significativa de transferência de energia, conforme gráficos no domínio do tempo, refere-se à contribuição da primeira e segunda frequência natural do pavimento, associada ao primeiro e segundo modos de vibração do pavimento ($f_{01} = 5,9$ Hz e $f_{02} = 6,5$ Hz), correspondentes a ressonância da estrutura com a frequência do terceiro harmônico de excitação ($f_{p(3^h)} = 3 \times 2,0 = 6,0$ Hz). Observa-se também uma pequena contribuição do sexto modo de vibração de flexão vertical ($f_{06} = 8,0$ Hz) devido ao quarto harmônico de excitação ($f_{p(4^h)} = 4 \times 2,0 = 8,0$ Hz).

Os picos provenientes do segundo, terceiro e quinto harmônicos do caminhar ($f_{p(1^h)} = 2,0$ Hz, $f_{p(2^h)} = 4,0$ Hz e $f_{p(4^h)} = 8,0$ Hz) estão presentes na resposta dinâmica do pavimento, apesar de apresentarem baixas transferências de energia quando comparados aos picos associados aos modos naturais de vibração do pavimento.

7.5 Caminhada rápida ($f_p = 2,3$ Hz) - Piso 1

As Figuras 110 a 113 apresentam as respostas dinâmicas típicas, em termos da aceleração vertical, registradas na região central do Piso 1, para a estrutura do piso sendo excitada pelo caminhar de uma pessoa com frequência de passo igual a 2,3 Hz. As respostas registradas pelos demais canais podem ser vistas no Anexo A. As acelerações máximas encontradas nesse ensaio são apresentadas na Tabela 17 em valores de pico e *RMS*. A máxima aceleração de pico foi de $0,028$ m/s^2 e a máxima aceleração *RMS* foi de $0,003$ m/s^2 , obtidas através da caminhada na direção aleatória.

Tabela 17 - Máximas acelerações encontradas para caminhada rápida no Piso 1.

Direção	Aceleração de pico (m/s^2)	Aceleração <i>RMS</i> (m/s^2)
Aleatória	0,028	0,003
Diagonal	0,025	0,003
Paralela	0,023	0,002
Perpendicular	0,016	0,003

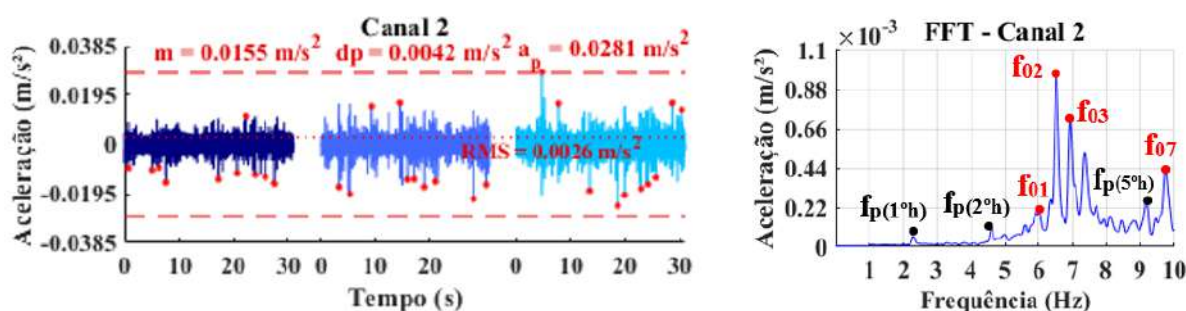


Figura 110 - Acelerações do Piso 1: ritmo rápido; trajetória aleatória [127].

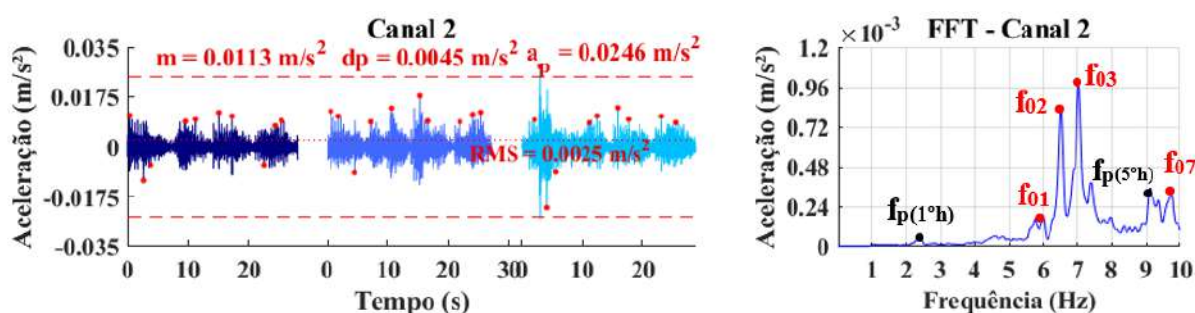


Figura 111 - Acelerações do Piso 1: ritmo rápido; trajetória diagonal [127].

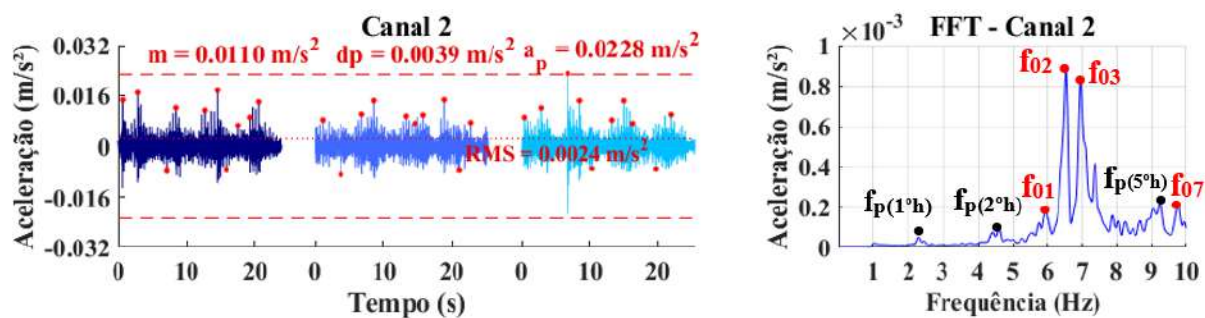


Figura 112 - Acelerações do Piso 1: ritmo rápido; trajetória paralela [127].

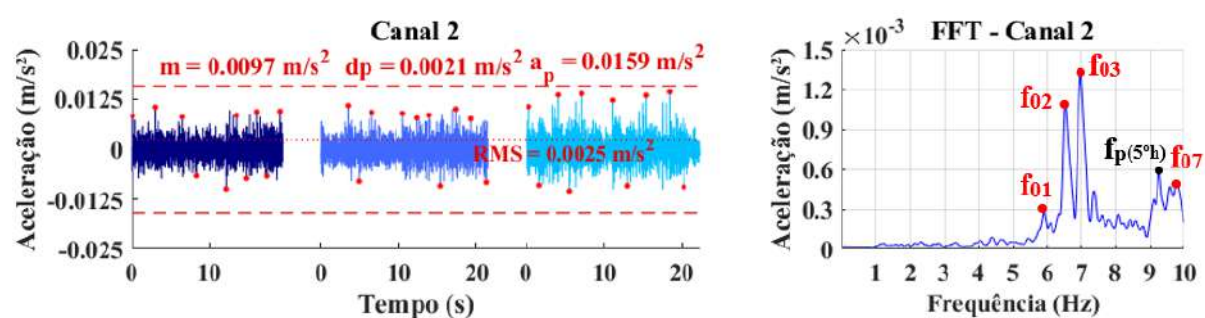


Figura 113 - Acelerações do Piso 1: ritmo rápido; trajetória perpendicular [127].

Com base nas respostas dinâmicas observadas nos gráficos, nota-se que as respostas do pavimento, no domínio da frequência, que o segundo, terceiro e sétimo modos de vibração da estrutura são os mais excitados ($f_{02} = 6,5$ Hz, $f_{03} = 6,97$ Hz e $f_{07} = 9,75$ Hz). Tal ocorrência pode ser explicada devido à proximidade desses modos de vibração com o terceiro e quarto harmônico do caminhar ($f_{p(3^{\text{h}})} = 3 \times 2,3 = 6,9$ Hz e $f_{p(4^{\text{h}})} = 4 \times 2,3 = 9,2$ Hz), resultando em valores elevados das acelerações.

7.6 Observações finais do capítulo

No presente capítulo, foram apresentados os resultados obtidos através dos ensaios de vibração forçada no Piso 1 para uma pessoa caminhando em ritmo lento, normal, rápido e em ressonância, variando-se a trajetória em aleatória, diagonal, perpendicular e paralela, visando avaliar comportamento dinâmico da estrutura. Ressalta-se que o Piso 1 foi escolhido para realização da calibração e do estudo

paramétrico deste trabalho de pesquisa, tendo em vista que a consideração de todos os pisos escolhidos para realização dos ensaios demandaria uma quantidade demasiada alta de análises e modelagens do caminhar humano, que é complexa e demanda um tempo razoável. No capítulo seguinte, será apresentada a calibração destes testes experimentais de vibração forçado com modelos de elementos finitos para o Piso 1.

8 CALIBRAÇÃO DOS TESTES EXPERIMENTAIS DE VIBRAÇÃO FORÇADA

8.1 Considerações iniciais

Neste capítulo, a calibração do modelo numérico-computacional em elementos finitos, implementado a partir do emprego da solução dinâmica de superposição modal, via utilização do programa computacional ANSYS [130], é concretizada a partir dos resultados experimentais de vibração forçada, que foram apresentados no capítulo anterior. O objetivo principal desta seção é verificar os comportamentos das curvas de aceleração e seus respectivos picos máximos referentes aos modelos computacionais, comparando com as respostas dinâmicas reais da estrutura.

8.2 Modelagem do caminhar de pessoas sobre pisos

A modelagem numérica acerca do efeito interação dinâmica indivíduo-estrutura, com o objetivo de utilizar modelos matemáticos mais realistas para a simulação das pessoas, é feita por meio da utilização de modelos biodinâmicos representativos das pessoas caminhando, simulando de maneira simplificada a dinâmica vertical deste movimento, conforme Debona [90], porém neste trabalho de pesquisa para pisos. Os modelos biodinâmicos complementam o modelo de “força dura” (*only force model*), pois há a incorporação das características dinâmicas dos ocupantes na análise dinâmica da estrutura, as quais influenciam a resposta dinâmica do sistema, principalmente em situações de carregamentos de multidão ou com muitas pessoas ocupando a estrutura. Deste modo, o caminhar dos pedestres foi simulado numericamente com base na utilização de sistemas biodinâmicos, com base no emprego de um modelo constituído por massa, amortecimento e rigidez, conforme elemento finito descrito no Capítulo 4, com um grau de liberdade (S1GL), combinado ao modelo tradicional de “força dura” (*only force model*).

Em relação aos modelos de carregamento utilizados que representam a ação do caminhar humano, a força aplicada foi considerada como carga pontual harmônica

em movimento ao longo da estrutura, com velocidade proporcional à respectiva frequência do passo praticada pelo pedestre. Neste trabalho de pesquisa foram utilizados dois modelos de carregamento, difundidos na literatura técnica, propostos por Kerr [74] e pelo guia de projeto do AISC [8].

Durante a caminhada, são assumidas as hipóteses de que a força vertical induzida por cada pé tem a mesma magnitude e é periódica. Essas considerações foram usadas por alguns outros autores, como por exemplo, Ohlsson [7], Caprani et al. [112], Kala et al. [154] e Allen et al. [155], onde a força dos sucessivos passos, incluindo a parcela estática e válida para ambos os modelos, pode ser representada por uma série de Fourier, conforme na equação (9).

$$F(t)=P \left[1+ \sum \alpha_i \cos(2 \pi f_p t-\phi_i) \right] \quad (9)$$

Onde:

$F(t)$: função de carregamento dinâmico;

P : peso de uma pessoa;

α_i : coeficiente dinâmico para a força harmônica (fator de carga dinâmica);

i : múltiplo do harmônico (1, 2, 3, etc.);

f_p : frequência do passo humano;

ϕ_i : ângulo de fase para o harmônico i ;

t : tempo.

Por outro lado, a velocidade do caminhar do indivíduo (v) tem relação direta com a frequência do passo (f_p) e comprimento da passada (l_p) e, naturalmente, velocidade de caminhada diferente apresentam comprimentos de passada e ritmos diferentes, além das diferenças individuais de cada pessoa. Bachmann e Ammann [67] citam diversos testes realizados por Wheeler [141], fornecendo valores médios para esta inter-relação, que são apresentados de forma compilada na Tabela 5.

Diante do exposto, considerando os dados apresentados na Tabela 5 e as características de cada um dos testes experimentais de caminhada (item 7.2), adotou-se a simplificação de dividir a carga $F(t)$ contínua e variável no tempo, apresentada na Equação (9), em cargas nodais representativas de cada passo individualmente. A unção representativa do carregamento foi discretizadas e espaçadas o equivalente ao

comprimento do passo (l_p), aplicadas durante um intervalo de tempo (Δt), calculado em função da frequência do passo e com uma configuração compatível com o tamanho da malha em elementos finitos utilizada no modelo do presente estudo. A Figura 114, mostrada a seguir, ilustra o procedimento.

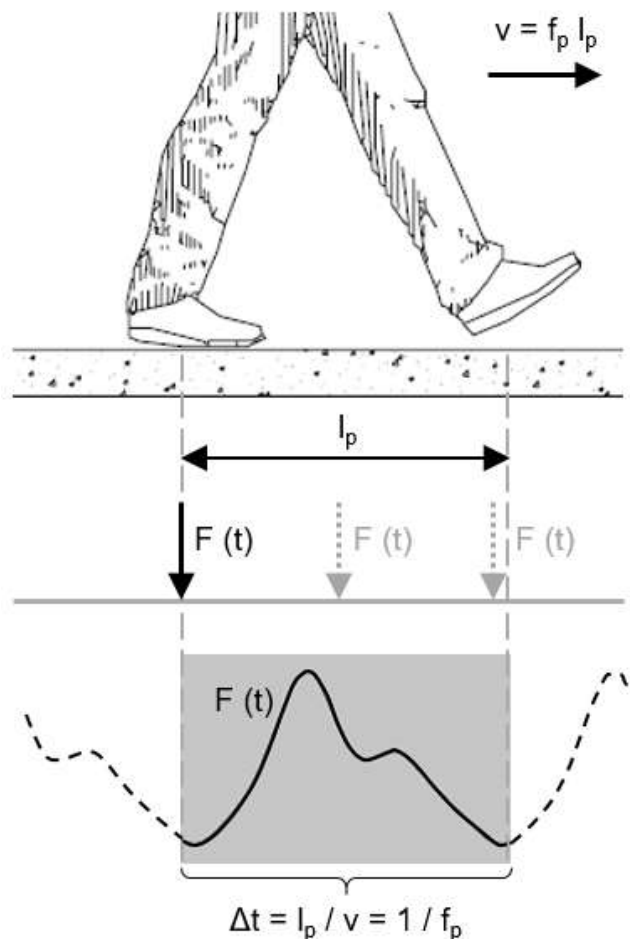


Figura 114 - Ilustração de indivíduo caminhando sobre uma estrutura plana [143]

Ressalta-se que cada nó de contato para aplicação de carga recebeu valores da função $F(t)$ correspondente ao intervalo de tempo Δt , assinalado em cinza e igual ao período da função (inverso da frequência do passo), segundo os parâmetros de cada caminhada. Ressalta-se ainda que neste trabalho foram considerados as diferenças de distância de passo de cada ritmo de caminhada, de acordo com a Tabela 5. Para o caso de caminhada em ressonância ($f_p = 2,17$ Hz), foi considerado a distância de cada passo idêntico ao da caminhada normal ($f_p = 2,00$ Hz), ou seja, 75 cm.

Os coeficientes dinâmicos (α) por harmônico (i) da excitação dinâmica [Equação (9)] representativa da ação do indivíduo sobre a estrutura para os modelos de carregamento considerados nesta Tese estão apresentados na Tabela 18 e a Equação (10). Neste trabalho de pesquisa, tanto para o modelo de carregamento de Kerr [74] quanto para o modelo proposto pelo guia de projeto do AISC [8], foi adotado o valor zero para o ângulo de fase correspondente ao primeiro harmônico da excitação enquanto que, para os demais, utilizou-se o valor indicado na Tabela abaixo.

Tabela 18 - Coeficientes dinâmicos, na direção vertical, por harmônico da excitação para caminhada de pedestres

Referência	Coeficiente Dinâmico (α) por harmônico (i)							
	α_1	ϕ_1	α_2	ϕ_2	α_3	ϕ_3	α_4	ϕ_4
Kerr [74]	Ver Eq. (10)	0	0,07	$\pi/2$	0,05	$\pi/2$	-	-
AISC [8]	0,04	0	0,07	$-\pi/2$	0,06	π	0,05	$\pi/2$

$$\alpha(f_p) = -0,27f_p^3 + 1,32f_p^2 - 1,76f_p + 0,76 \quad (10)$$

Diante do exposto, considerando-se o movimento oscilatório vertical do centro de gravidade do corpo do pedestre, causado por uma série cíclica da flexão dos membros inferiores e os deslocamentos resultantes da estrutura deformada, é aceitável expressar a força de interação entre o pedestre e a superfície de caminhada. Logo, a força de interação devida ao caminhar de um indivíduo, a uma velocidade constante (v), ao longo de uma superfície rígida ($F_{INT,SR}$) e de uma superfície flexível ($F_{INT,SF}$) podem, respectivamente, ser representadas pelas Equações (11) e (12), a saber expressões de equilíbrio dinâmico (ver Figura 115).

$$m_p \ddot{u}_t + c_p \dot{u}_t + k_p u_t = F_{INT, SF} \quad (11)$$

$$m_p \ddot{u}_t + c_p (\dot{u}_t - \dot{u}_g) + k_p (u_t - u_g) = F_{INT, SF} \quad (12)$$

Onde:

m_p : massa modal do pedestre;

c_p : amortecimento do pedestre;

k_p : rigidez do pedestre;

- u_t : deslocamento do grau de liberdade em relação a um referencial fixo;
 \dot{u}_t : velocidade do grau de liberdade em relação a um referencial fixo;
 \ddot{u}_t : aceleração do grau de liberdade em relação a um referencial fixo;
 u_g : deslocamento nodal da estrutura deformada;
 \dot{u}_g : velocidade nodal da estrutura deformada;
 $F_{INT,SR}$: força de interação dinâmica entre o pedestre e uma superfície rígida;
 $F_{INT,SF}$: força de interação dinâmica entre o pedestre e uma superfície flexível.

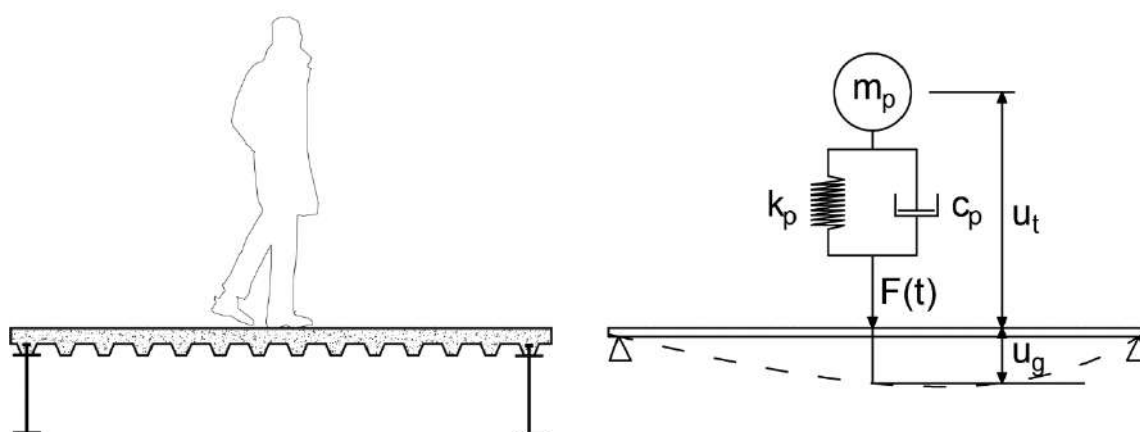


Figura 115 - Interação entre superfície plana flexível e indivíduo caminhando.

As modelagens numéricas do caminhar humano realizadas neste estudo, por meio da utilização de sistemas biodinâmicos que foram distribuídos uniformemente espaçados ao longo do Piso 1 investigado, de acordo com a trajetória escolhida para a caminhada (perpendicular, paralela e aleatória). As pessoas, então, são modeladas como um sistema massa-mola-amortecedor com um grau de liberdade (S1GL) acopladas a estrutura, e utilizados em combinação com os modelos matemáticos de força pura do Kerr [74] e AISC [8]. A força dinâmica $F(t)$ [Equação (9)], exercida sobre o piso se move com velocidade $v(t)$, em função da frequência do passo f_p .

Assim, considerando o emprego de modelos biodinâmicos, a função representativa do caminhar humano foi, então, constituída por um sistema massa-mola-amortecedor com um grau de liberdade (S1GL), utilizados para representar as características dinâmicas das pessoas em conjunto com a força móvel $F(t)$, correspondente à parcela estática mais a parcela dinâmica, relativa aos modelos de “força dura” de Kerr [74] e AISC [8], convencionados nesta tese como MC-K e MC-AISC, respectivamente. A força móvel $F(t)$ desloca-se concomitantemente ao longo

do Piso 1 investigado, conforme trajetória escolhida, com velocidade $v(t)$, proporcional à frequência do passo f_p , ao mesmo tempo que sistemas massa-mola-amortecedor são distribuídos no mesmo trecho com igual espaçamento e de forma fixa sobre a estrutura, sobre um modelo tridimensional em elementos finitos. Assim, as equações de equilíbrio dinâmico do sistema indivíduo-estrutura são resolvidas, via utilização do método da superposição modal, com base no emprego de análise numérica via Método dos Elementos Finitos (MEF) por meio da utilização software computacional ANSYS [130].

As características biodinâmicas dos indivíduos utilizadas neste trabalho de pesquisa foram extraídas dos estudos de Silva et al. [87], os quais desenvolveram equações utilizando regressão linear e quadrática com base em ensaios experimentais. As características obtidas por meio das expressões contidas na Equação (5), serão aplicadas nos modelos biodinâmicos representados na Figura 115.

Por fim, considerando características físicas e os parâmetros representativos de cada pessoa, obtidos via testes experimentais e formulações matemáticas, o modelo numérico-computacional desenvolvido nesta Tese é utilizado para a simulação e calibração da resposta estrutural dinâmica do Piso 1, de acordo com os ensaios experimentais (ver Capítulo 5 e 7).

8.3 Calibração da resposta estrutural experimental

Alguns dos casos de carregamentos associados a caminhada dos indivíduos sobre o Piso 1, descritos no Capítulo 7, a partir dos testes experimentais executados, foram escolhidos para análise e calibrados conforme a análise dinâmica experimental. Optou-se por simular os casos com a dinâmica da caminhada de uma pessoa nos ritmos de caminhada lenta, normal e rápida, nas trajetórias perpendicular, paralela e diagonal, no Piso 1, que foi o piso experimentado no qual se obteve as maiores respostas dinâmicas durante o experimento, conforme ilustrado na Figura 116. Preliminarmente, foi realizada uma análise, via uso do método da superposição modal, a fim de verificar qual seria o número de modos de vibração mais adequado para representação da resposta estrutural dinâmica do piso investigado. Por meio do uso do método da superposição modal, é possível uma redução considerável na

complexidade matemática envolvida em análises dinâmicas de vibração forçada, reduzindo, deste modo, o esforço computacional das análises e, conseqüentemente, o tempo de cada análise numérica realizada.

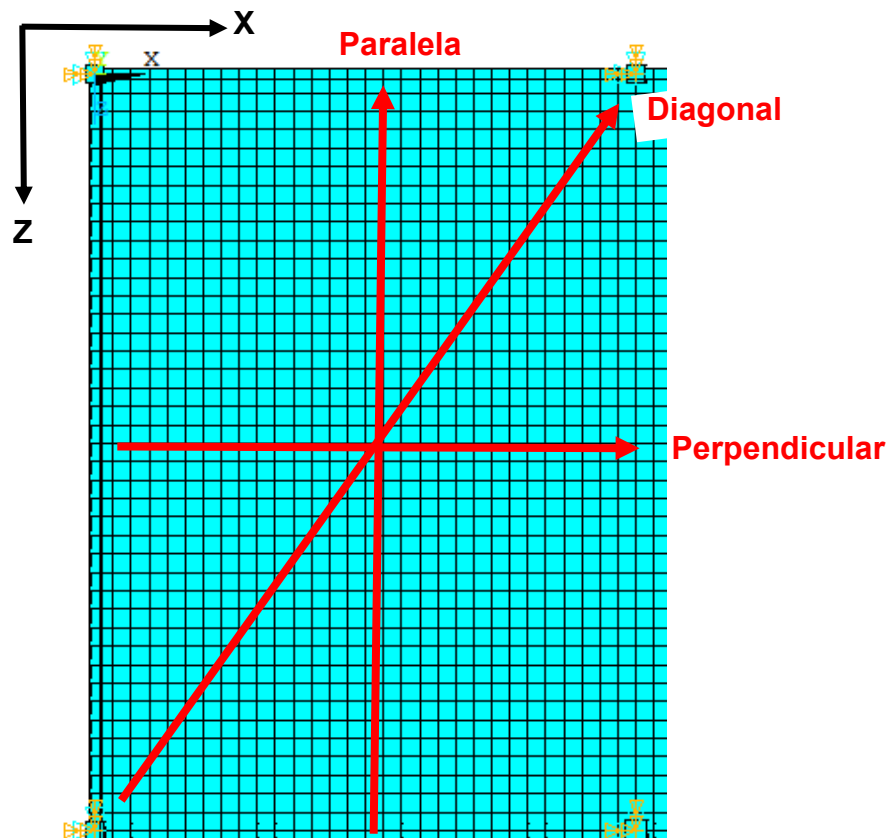


Figura 116 - Esquema das trajetórias calibradas no Piso 1.

Logo, o foco desta análise destinou-se aos 5 primeiros modos de vibração do sistema estrutural do piso investigado e, com isso, foi possível observar uma convergência na resposta a partir da utilização desta quantidade de modos de vibração superpostos (superposição modal), na simulação numérica de cada um dos testes de caminhada, considerando-se como carregamento os modelos biodinâmicos MC-K e MC-AISC (Figura 117).

A resposta dinâmica estrutural investigada é apresentada, em termos de acelerações verticais associados ao caminhar humano, conforme os modelos MC-K e MC-AISC, representando a resposta do sistema, e comparada com os testes experimentais equivalentes. São realizadas análises de vibração forçada através da utilização do programa computacional ANSYS [130] via modelo de elementos finitos, conforme metodologia apresentada no item anterior deste capítulo, com a utilização do modelo biodinâmico.

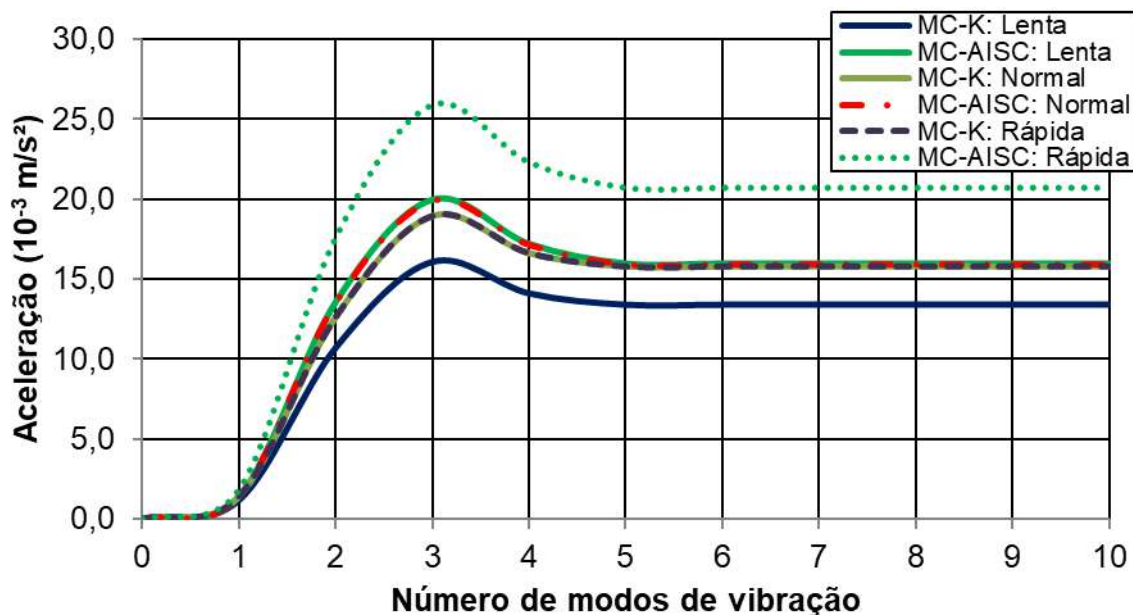


Figura 117 - Convergência das acelerações verticais de pico numéricas em função do número de modos de vibração nos testes de caminhada (1 pessoa andando).

A Tabela 19 apresenta os resultados das acelerações verticais de pico dos modelos numéricos, obtidas via emprego do programa computacional ANSYS [130], em comparação com os valores destas acelerações obtidas mediante testes experimentais realizados sobre o Piso 1, conforme descrito no Capítulo 7.

Após a comparação dos valores das acelerações de pico, pode-se perceber que o modelo em estudo se encontra bem representado numericamente pelo modelo numérico-computacional desenvolvido, via método dos elementos finitos (ANSYS [130]).

A partir da Tabela 19, pode-se inferir que as propriedades dinâmicas do sistema estão bem representadas, principalmente quando considerados os biodinâmicos do modelo MC-K, pois este modelo apresentou, das 18 respostas dinâmicas comparadas, onze com diferenças menores que 10 %, em módulo, seis com diferenças entre 10 % e 20 %, em módulo, e apenas uma comparação com diferença superior a 30 %, em módulo, para os picos máximo e mínimo, no que se refere à caminhada de uma pessoa no Piso 1 investigado. Enquanto o modelo MC-AISC, das 18 respostas dinâmicas comparadas, duas com diferenças menores que 10 %, em módulo, oito com diferenças entre 10 % e 20 %, em módulo, três com diferenças entre 20 % e 30 %, em módulo, e cinco comparações com diferença superior a 30 %, em módulo, para os picos máximo e mínimo. Assim, percebe-se um ajuste melhor aos

dados experimentais do modelo biodinâmico MC-K, considerando 4 pessoas estacionárias no piso.

Tabela 19 - Comparativo: acelerações de pico (modelo numérico) e experimentos.

f_p (Hz)	Direção	Valor	Aceleração de pico (m/s ²)			Diferença (%) (MC-K/ MC-AISC)		Figura/ Página
			TE	Modelo numérico				
				MC-K	MC-AISC			
1,70	Pe.	Máx.	0,0120	0,0119	0,0143	-0,8	19,2	Figura 118/ Página 151
		Mín.	0,0131	0,0134	0,0160	2,3	22,1	
	Pa.	Máx.	0,0116	0,0077	0,0128	-33,6	10,3	Figura 120/ Página 151
		Mín.	0,0117	0,0116	0,0122	-0,9	4,3	
	Di.	Máx.	0,0194	0,0205	0,0248	5,7	27,8	Figura 122/ Página 153
		Mín.	0,0190	0,0197	0,0282	3,7	48,4	
2,00	Pe.	Máx.	0,0141	0,0114	0,0159	-19,1	12,8	Figura 124/ Página 154
		Mín.	0,0141	0,0158	0,0158	12,1	12,1	
	Pa.	Máx.	0,0116	0,0101	0,0131	-12,9	12,9	Figura 126/ Página 155
		Mín.	0,0120	0,0115	0,0114	-4,2	-5,0	
	Di.	Máx.	0,0106	0,0096	0,0127	-9,4	19,8	Figura 128/ Página 156
		Mín.	0,0113	0,0116	0,0149	2,7	31,9	
2,30	Pe.	Máx.	0,0138	0,0155	0,0202	12,3	46,4	Figura 130/ Página 157
		Mín.	0,0162	0,0158	0,0207	-2,5	27,8	
	Pa.	Máx.	0,0194	0,0223	0,0286	14,9	47,4	Figura 132/ Página 158
		Mín.	0,0220	0,0229	0,0248	4,1	12,7	
	Di.	Máx.	0,0215	0,0255	0,0402	18,6	87,0	Figura 134/ Página 159
		Mín.	0,0255	0,0254	0,0299	-0,4	17,3	

Legenda:

- f_p : frequência do passo.
- TE: Teste experimental.
- MC-K: Modelos biodinâmicos com formulação de Kerr [74].
- MC-AISC: Modelos biodinâmicos com formulação do AISC [8].
- Pe.: Perpendicular; Pa.: Paralela; e Di.: Diagonal.

Em seguida, a Figuras 118 a 135 apresentam a comparação gráfica dos resultados obtidos pelos testes experimentais (Exp) com as respostas dinâmicas do

modelo numérico computacional desenvolvido, via método dos elementos finitos (ANSYS [130]), utilizando-se como carregamento os modelos MC-K e MC-AISC.

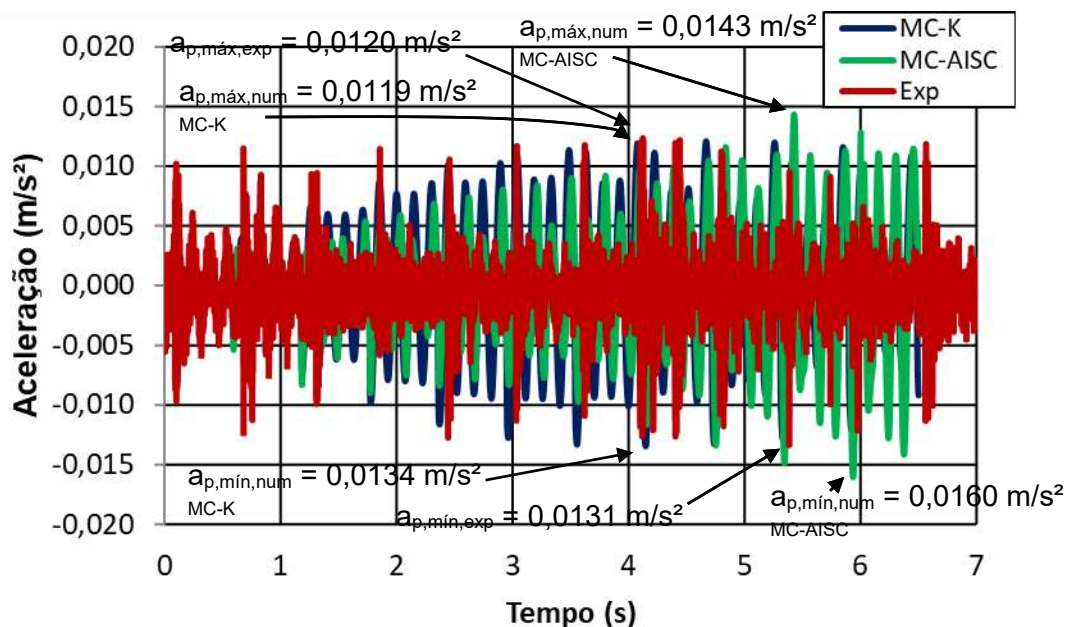


Figura 118 - Comparação das acelerações verticais numéricas e experimental no domínio do tempo ($f_p = 1,70$ Hz: caminhada lenta; e sentido: perpendicular).

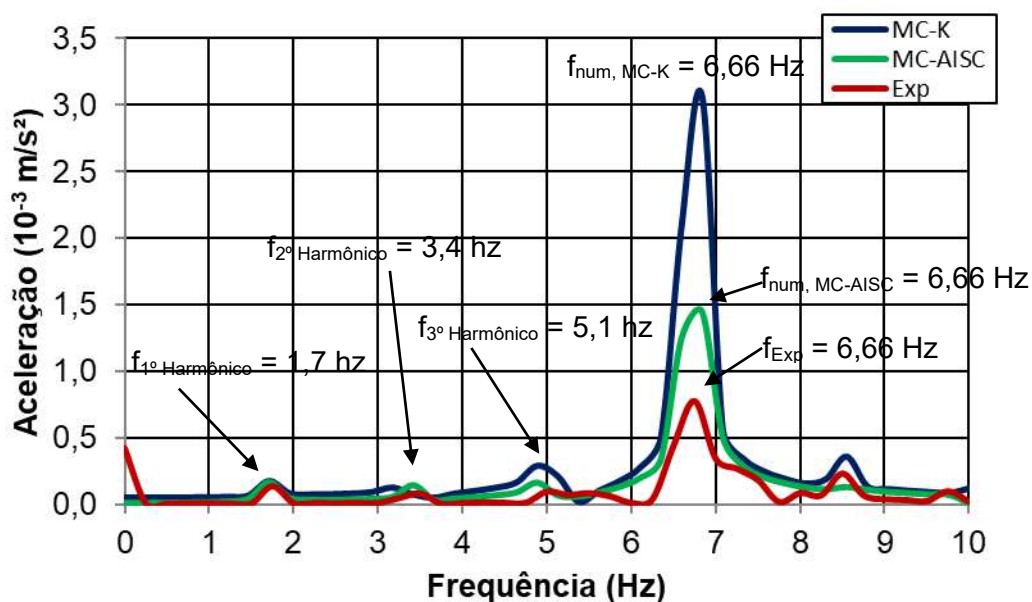


Figura 119 - Comparação das acelerações verticais numéricas e experimental no domínio da frequência ($f_p = 1,70$ Hz: caminhada lenta; e sentido: perpendicular).

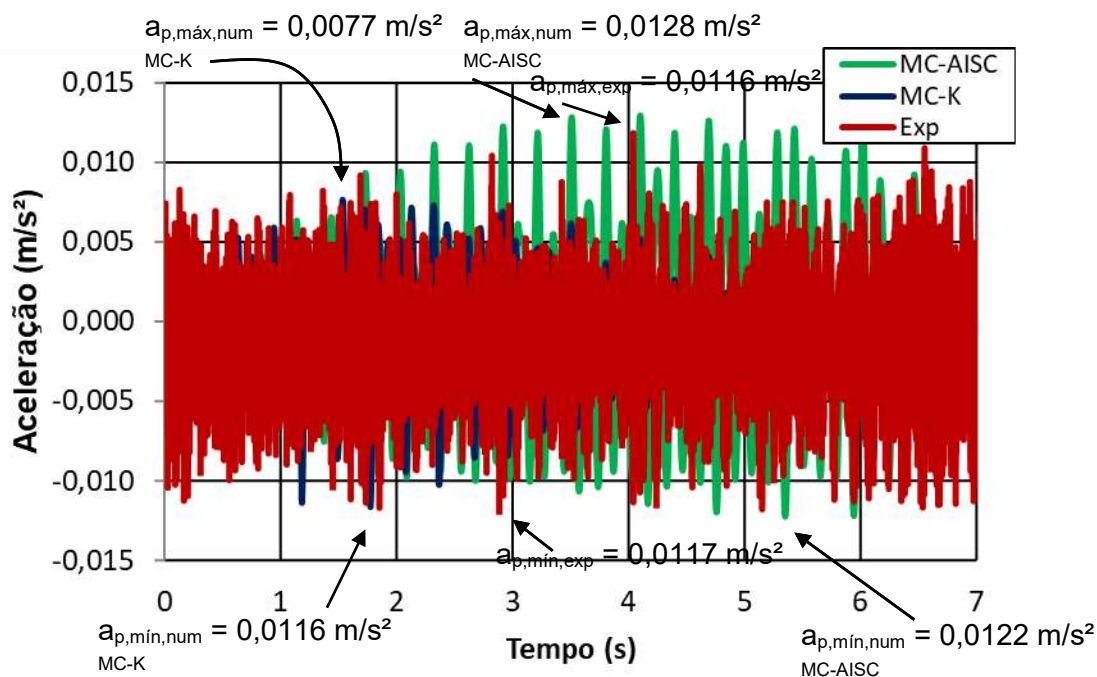


Figura 120 - Comparação das acelerações verticais numéricas e experimental no domínio do tempo ($f_p = 1,70$ Hz: caminhada lenta; e sentido: paralela).

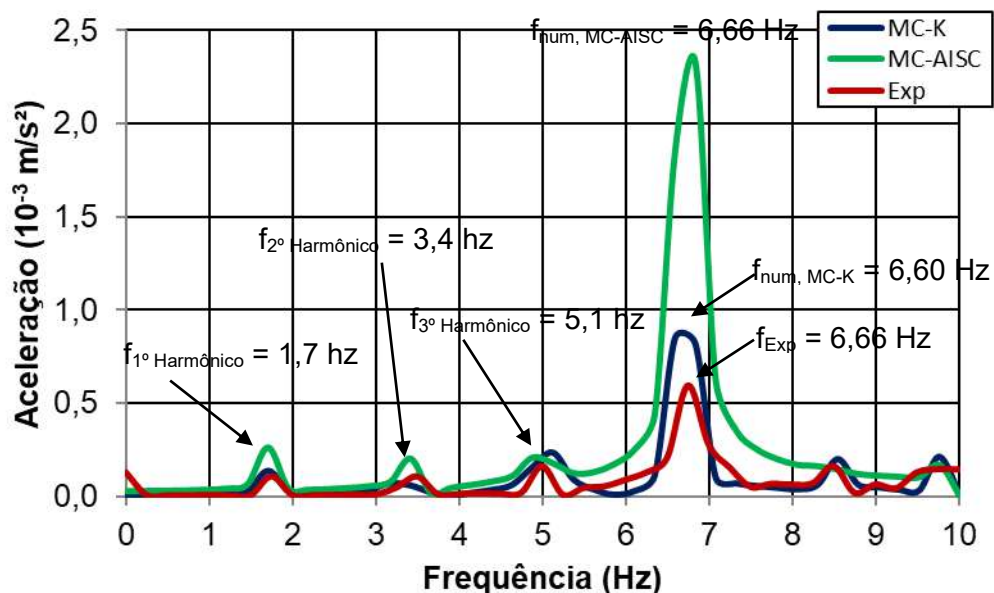


Figura 121 - Comparação das acelerações verticais numéricas e experimental no domínio da frequência ($f_p = 1,70$ Hz: caminhada lenta; e sentido: paralela).

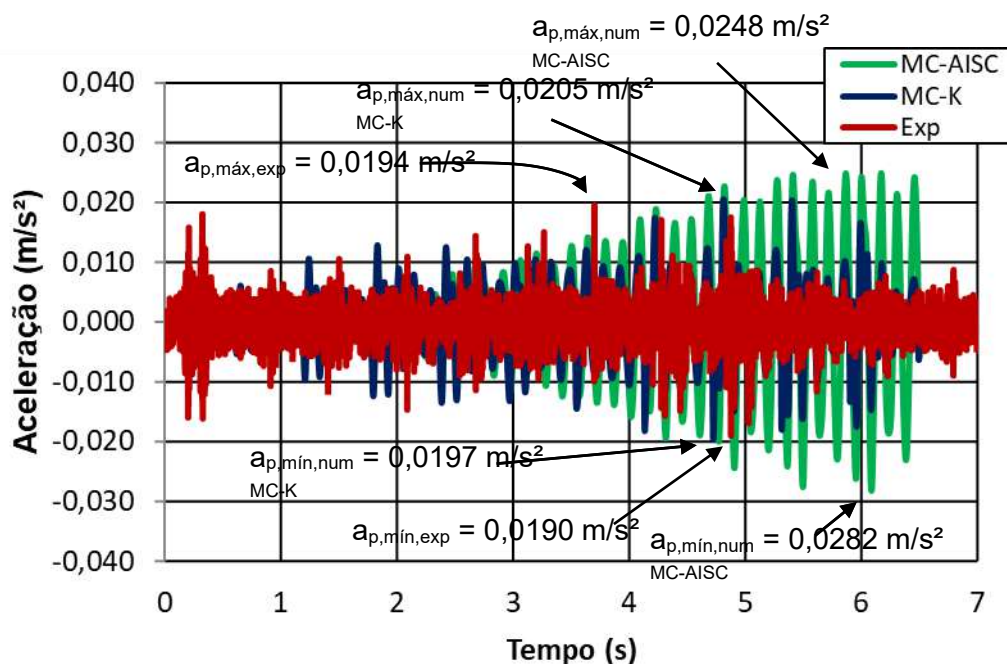


Figura 122 - Comparação das acelerações verticais numéricas e experimental no domínio do tempo ($f_p = 1,70$ Hz: caminhada lenta; e sentido: diagonal).

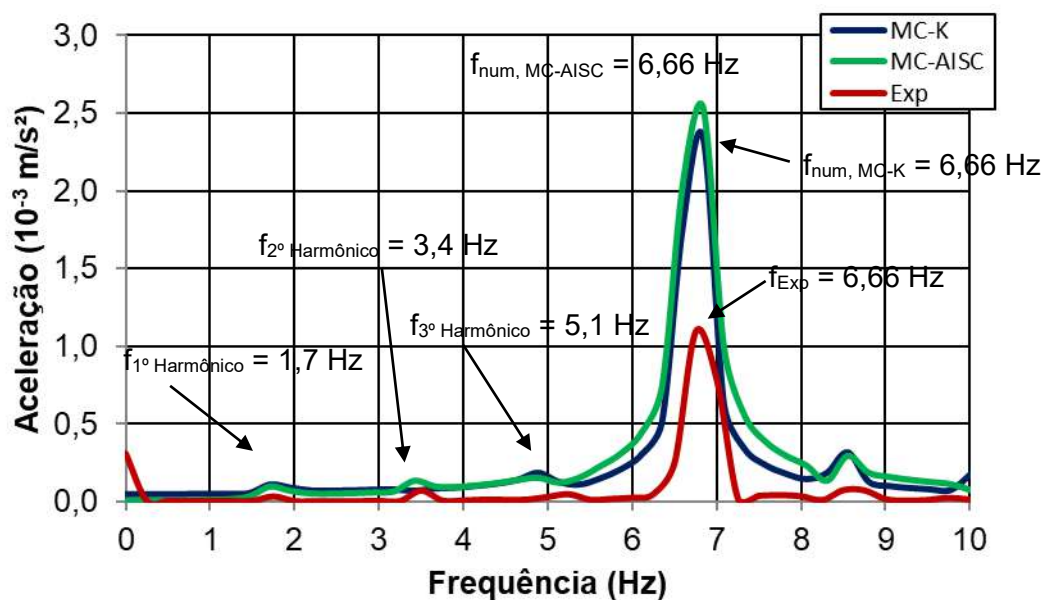


Figura 123 - Comparação das acelerações verticais numéricas e experimental no domínio da frequência ($f_p = 1,70$ Hz: caminhada lenta; e sentido: diagonal).

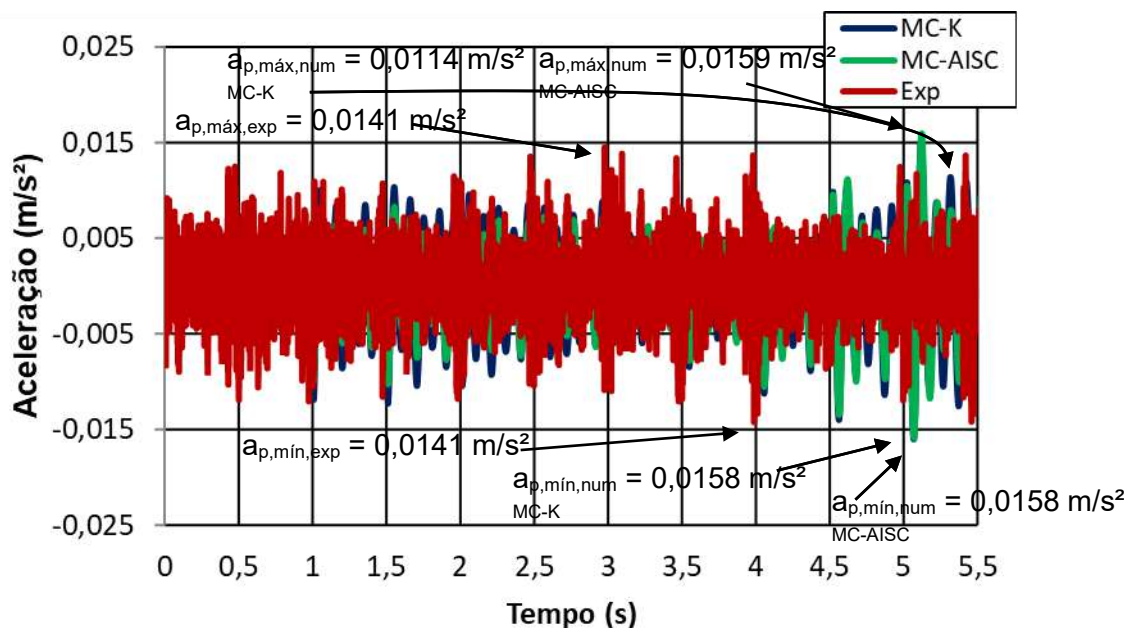


Figura 124 - Comparação das acelerações verticais numéricas e experimental no domínio do tempo ($f_p = 2,00 \text{ Hz}$: caminhada normal; e sentido: perpendicular).

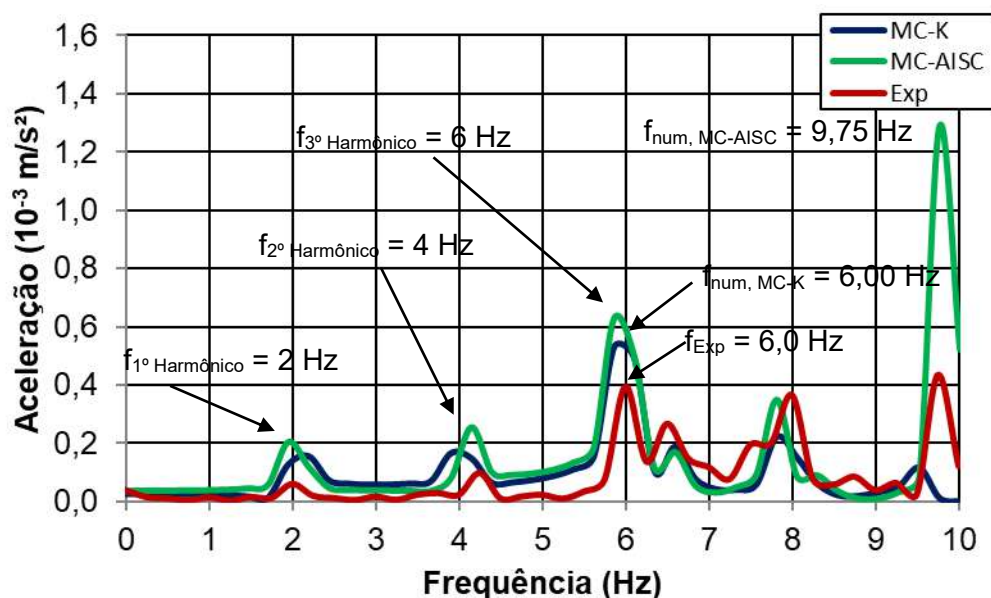


Figura 125 - Comparação das acelerações verticais numéricas e experimental no domínio da frequência ($f_p = 2,00 \text{ Hz}$: caminhada normal; e sentido: perpendicular).

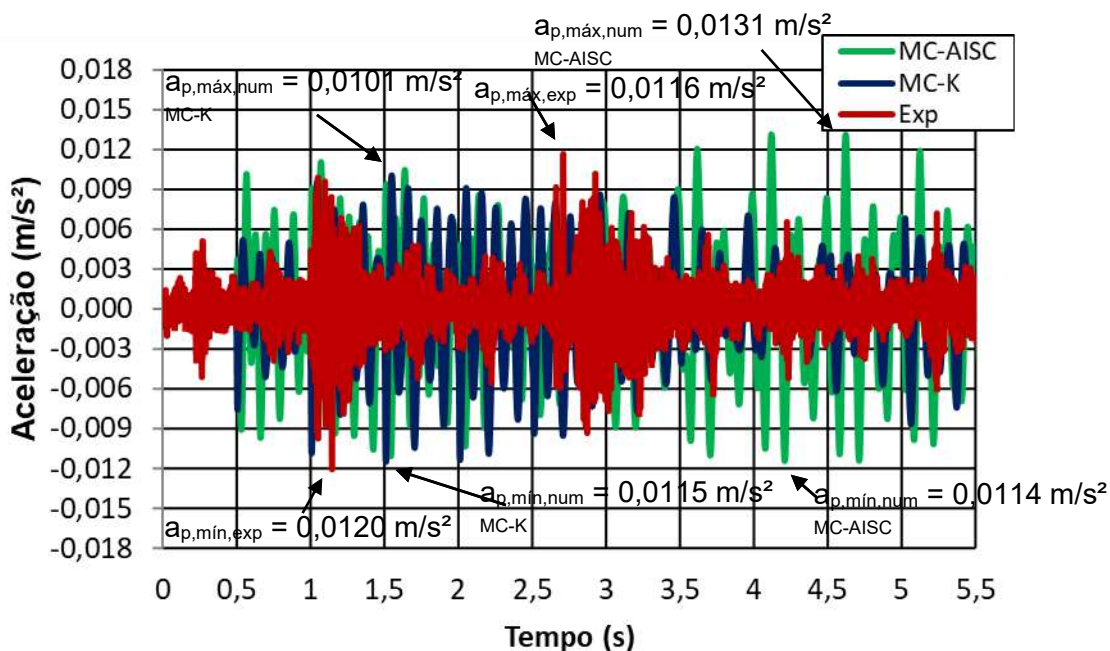


Figura 126 - Comparação das acelerações verticais numéricas e experimental no domínio do tempo ($f_p = 2,00 \text{ Hz}$: caminhada normal; e sentido: paralela).

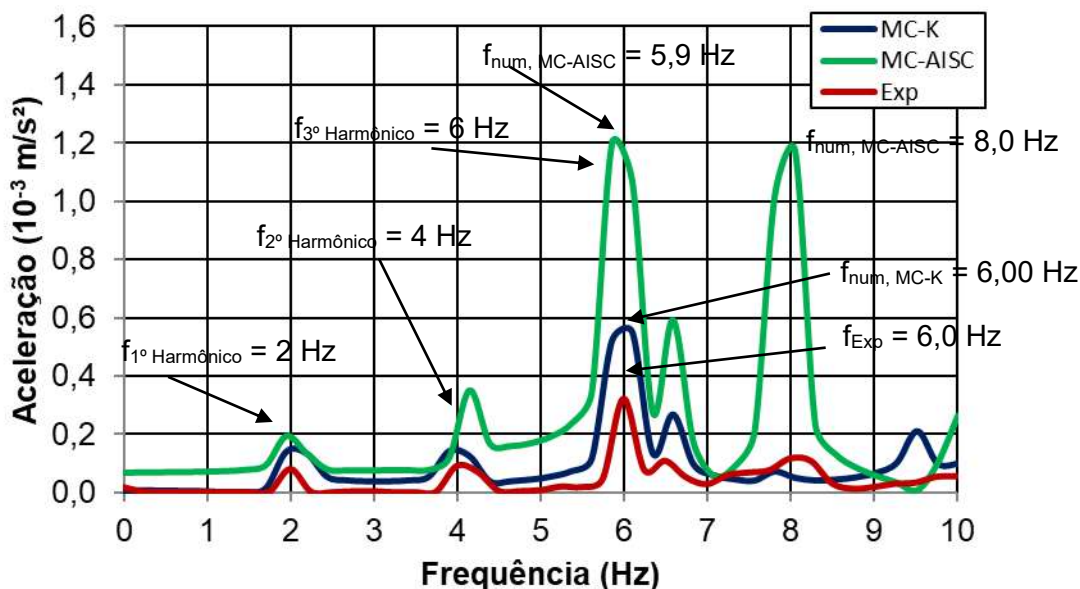


Figura 127 - Comparação das acelerações verticais numéricas e experimental no domínio da frequência ($f_p = 2,00 \text{ Hz}$: caminhada normal; e sentido: paralela).

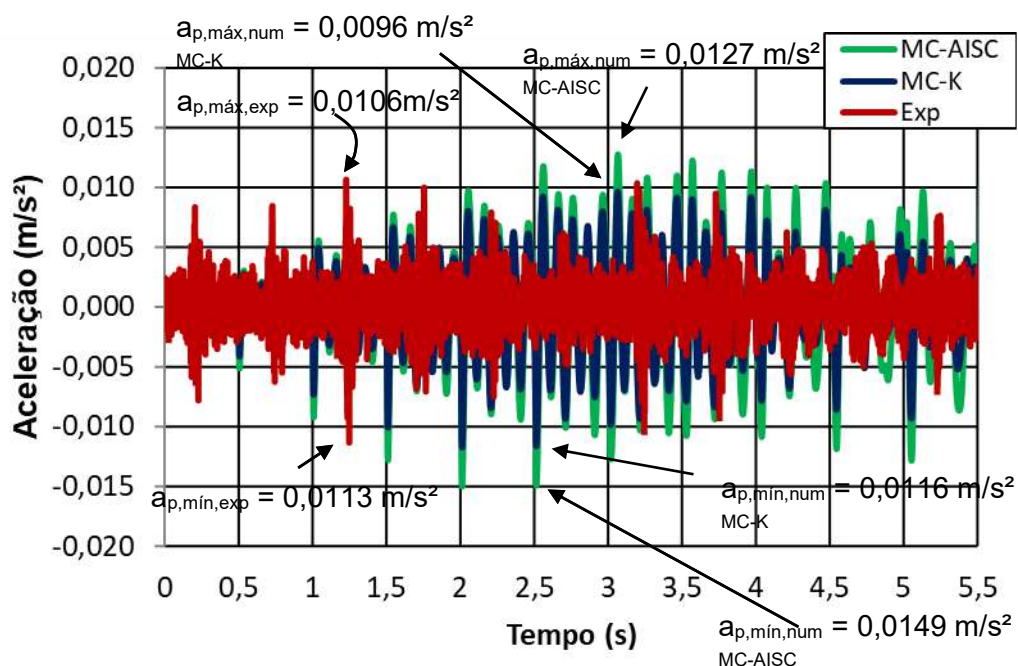


Figura 128 - Comparação das acelerações verticais numéricas e experimental no domínio do tempo ($f_p = 2,00$ Hz: caminhada normal; e sentido: diagonal).

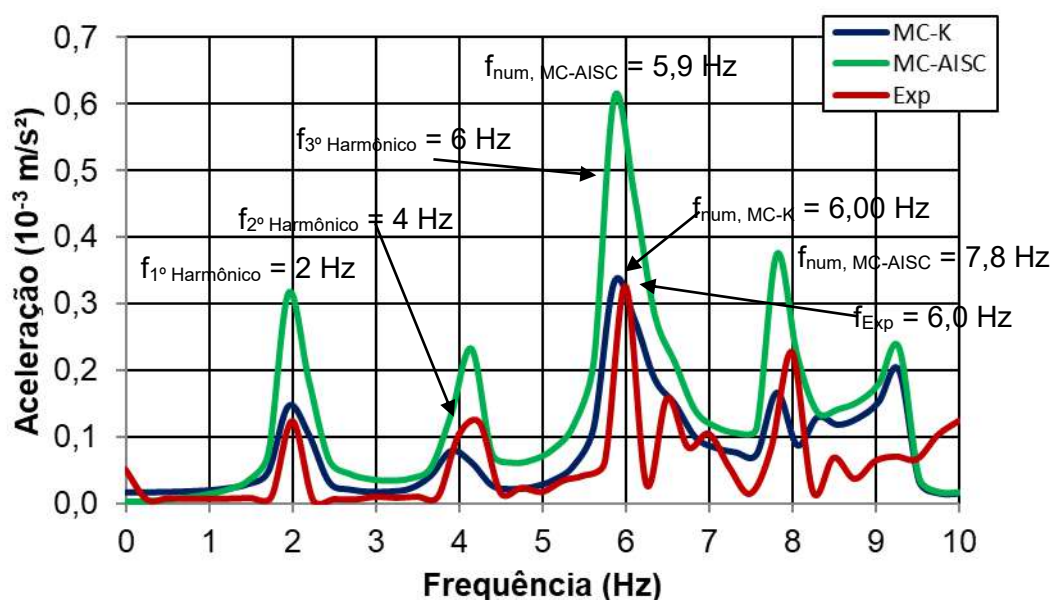


Figura 129 - Comparação das acelerações verticais numéricas e experimental no domínio da frequência ($f_p = 2,00$ Hz: caminhada normal; e sentido: diagonal).

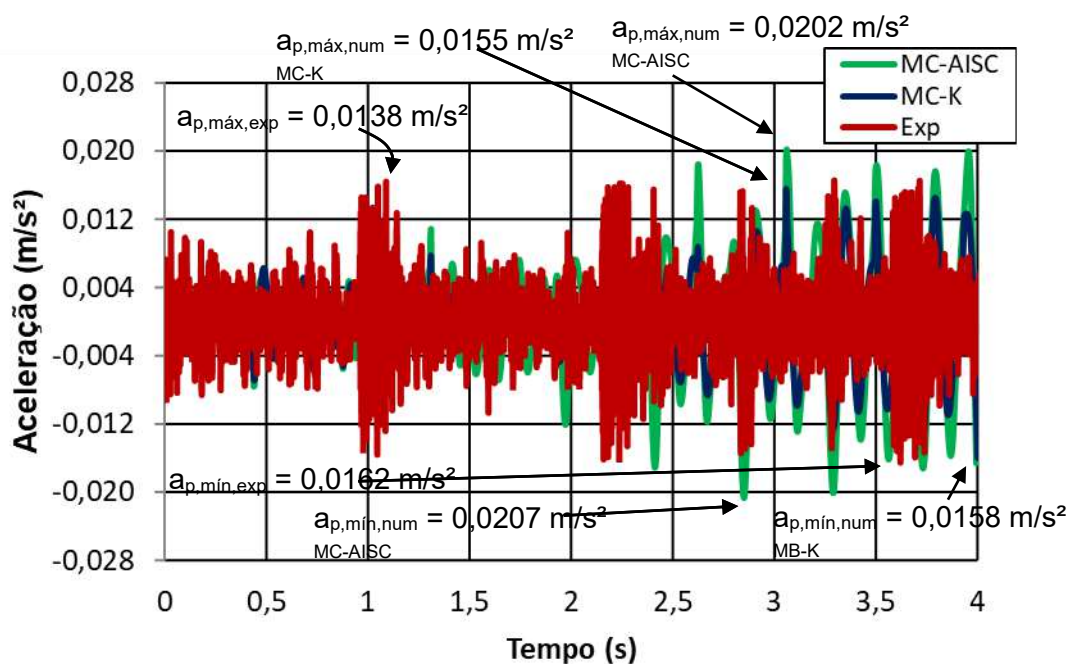


Figura 130 - Comparação das acelerações verticais numéricas e experimental no domínio do tempo ($f_p = 2,30$ Hz: caminhada rápida; e sentido: perpendicular).

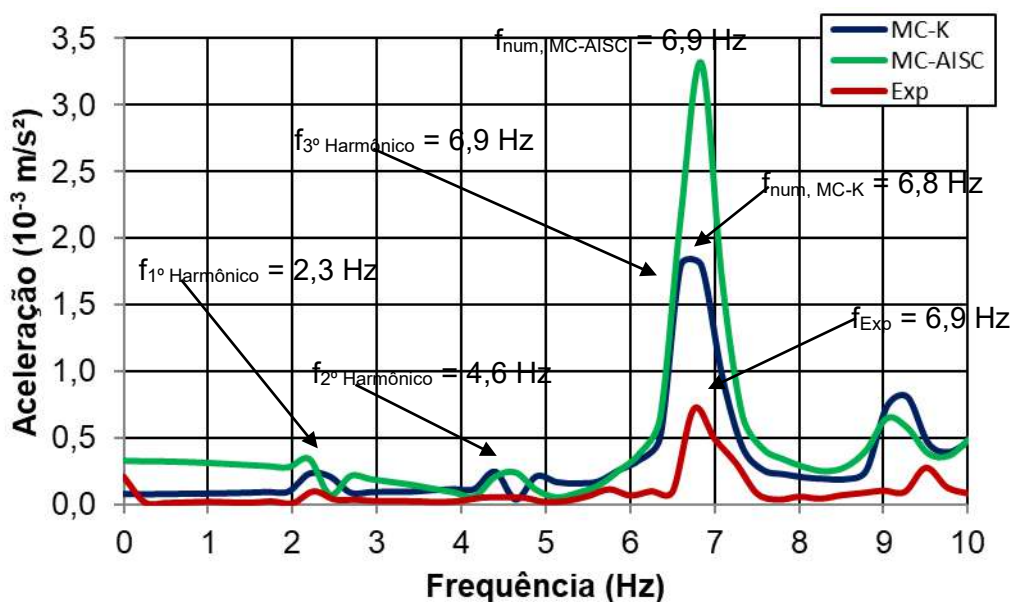


Figura 131 - Comparação das acelerações verticais numéricas e experimental no domínio da frequência ($f_p = 2,30$ Hz: caminhada rápida; e sentido: perpendicular).

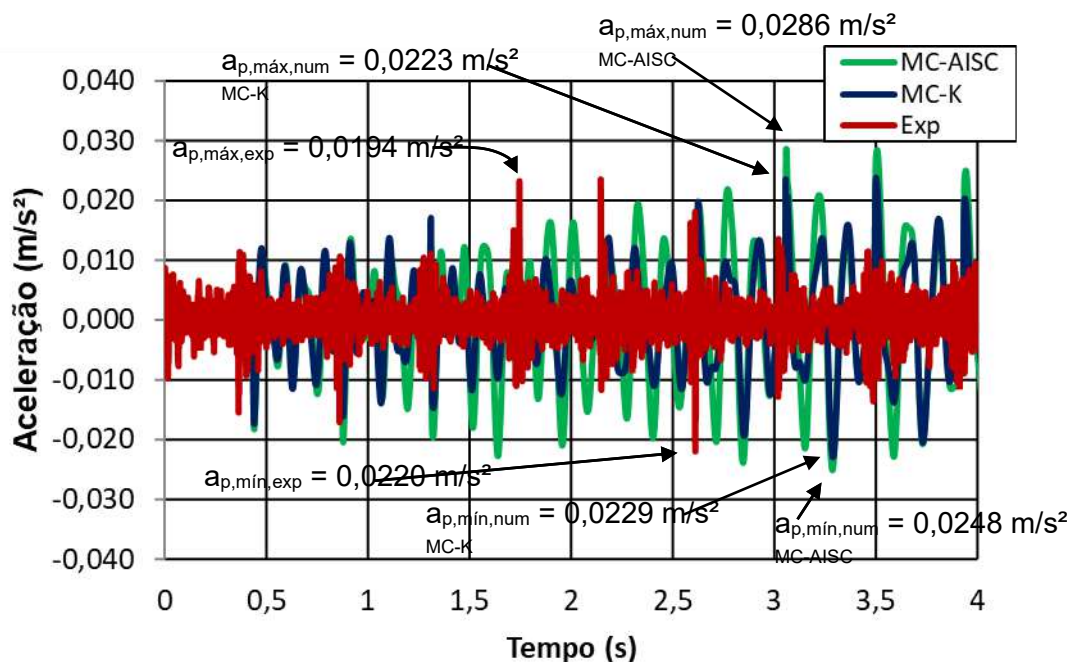


Figura 132 - Comparação das acelerações verticais numéricas e experimental no domínio do tempo ($f_p = 2,30$ Hz: caminhada rápida; e sentido: paralela).

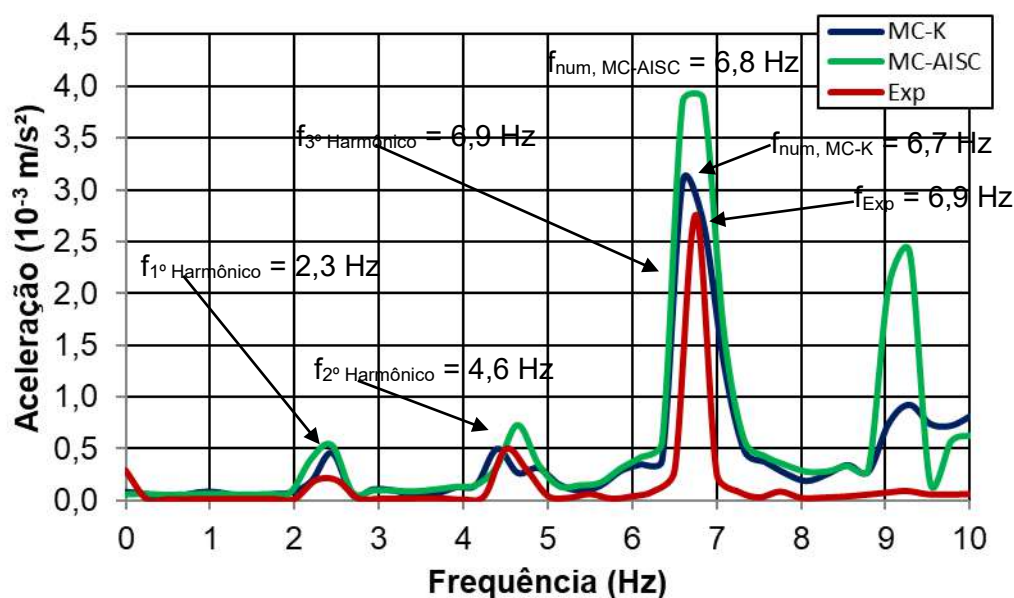


Figura 133 - Comparação das acelerações verticais numéricas e experimental no domínio da frequência ($f_p = 2,30$ Hz: caminhada rápida; e sentido: paralela).

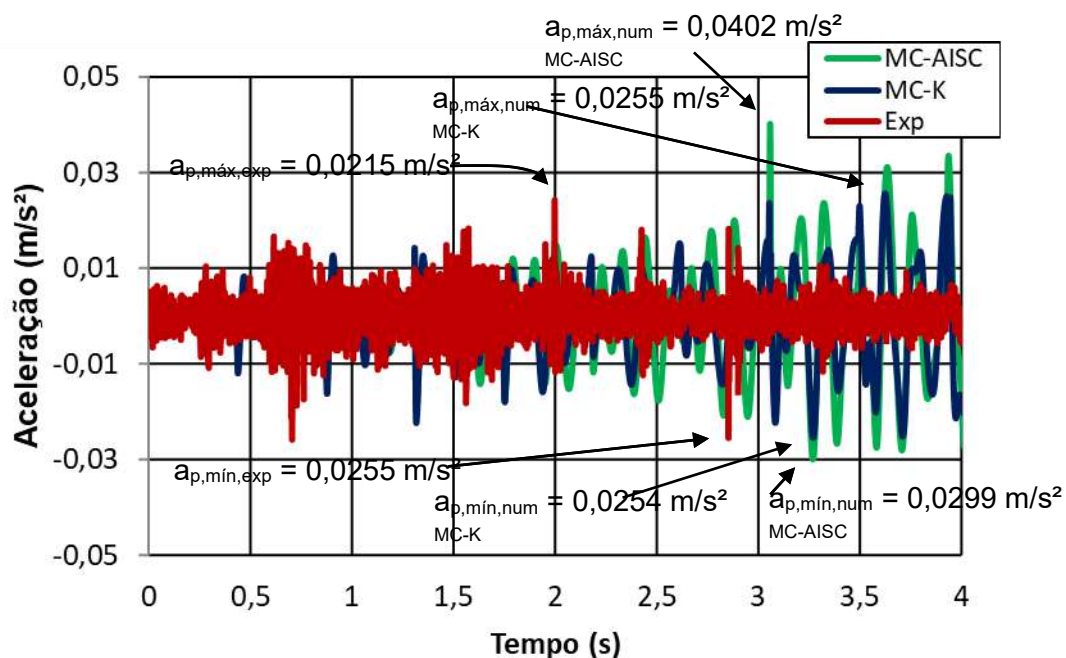


Figura 134 - Comparação das acelerações verticais numéricas e experimental no domínio do tempo ($f_p = 2,30$ Hz: caminhada rápida; e sentido: diagonal).

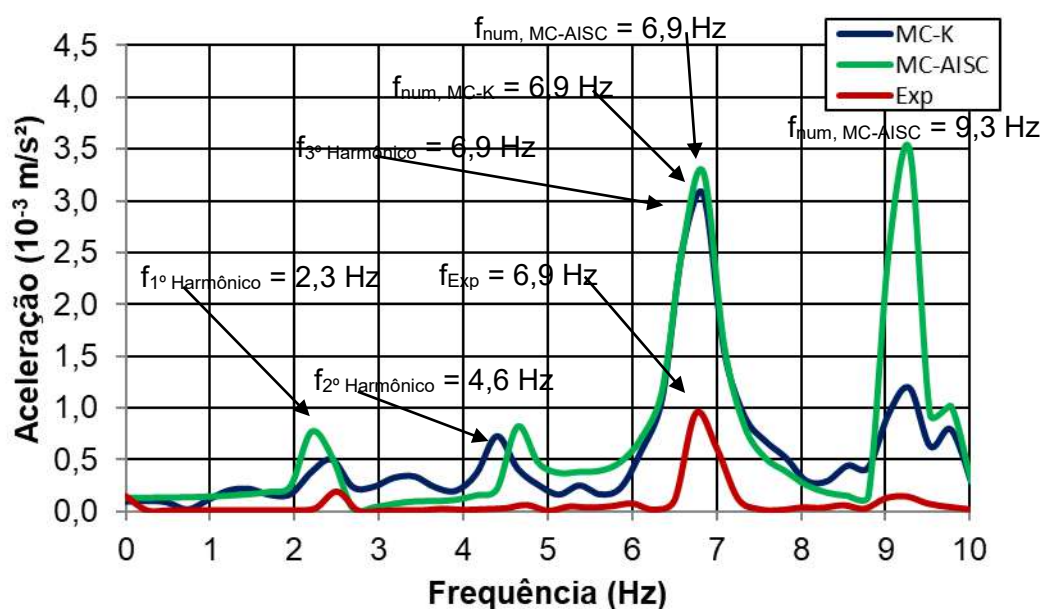


Figura 135 - Comparação das acelerações verticais numéricas e experimental no domínio da frequência ($f_p = 2,30$ Hz: caminhada rápida; e sentido: diagonal).

Avaliando os gráficos no domínio do tempo constantes nas Figura 118, 120, 122, 125, 126, 128, 130, 132 e 134, observou-se que os valores das acelerações de pico máxima obtida, segundo os respectivos modelos biodinâmicos de carga de MC-K e MC-AISC, e os testes experimentais, são da ordem de 0,0255, 0,0254 e 0,0299 m/s², respectivamente, para o caso de caminhada rápida ($f_p = 2,3$ Hz) na trajetória diagonal. Nota-se que nem sempre os picos ocorrem concomitantemente, principalmente para as acelerações experimentais. Vale ressaltar que apesar dos experimentos serem controlados, a edificação sofre outros carregamentos como vento e proveniente da própria construção que estava em andamento, tais como: equipamentos de movimentação de cargas e de pessoas acoplados a estrutura, circulação de trabalhadores, tráfego da rodovia próxima, entre outros.

Avaliando os gráficos no domínio do frequências constantes nas Figura 118, 121, 123, 125, 127, 129, 131, 133 e 135, percebe-se que em todos eles são possíveis de identificar os harmônicos provenientes da simulação do caminhar humano, inclusive nas respostas dinâmicas dos ensaios experimentais, porém, geralmente, com uma transferência de energia bem menor que os modelos numéricos. Em relação a resposta dinâmica, percebe-se que os maiores picos de transferência de energia, exceto para alguns casos do modelo MC-AISC, estão na faixa de frequência de 6,5 a 7 Hz, coincidente também com a frequência natural da estrutura e com o 3º harmônico dos modelos de carregamento biodinâmico MC-K e MC-AISC, inclusive das respostas experimentais, demonstrando, deste modo, também, a validação do modelo numérico-computacional desenvolvido nesta tese. Ressalta-se também a coincidência da maioria dos picos de transferência de energia entre o modelo MC-K e os picos de transferência dos ensaios experimentais. O mesmo ocorre o modelo MC-K, com a ressalva que, neste modelo de carregamento, há maior existência de picos que não são verificados nos ensaios experimentais.

O guia de projeto do AISC [8] cita que apenas um componente harmônico da modelo de carregamento é usado para projeto, visto que todos os outros produzem pequenas vibrações em comparação quando um dos harmônicos está associado à ressonância, pode-se, inclusive, ser desconsiderados harmônicos não associados ao efeito de ressonância. Diante do exposto, pode-se inferir que um modelo de carregamento em série de Fourier, como é o caso do modelo matemático proposto por Keer [74], tem menos chances de ocorrer o efeito da ressonância, o que deixa suas simulações menos conservadoras.

Diante do exposto neste tópico, percebe-se que o modelo de carregamento MC-K, que combina a utilização de modelos biodinâmicos para representar as pessoas associados ao modelo matemático de carregamento de Kerr [74] (MC-K) apresentou resultados mais próximos com os resultados obtidos nos ensaios de vibração forçada em detrimento do modelo que associa ao modelo matemático de carregamento proposto pelo guia de projeto do AISC [130]. Deste modo, nesta tese, para a realização de estudos paramétricos, utilizou-se o modelo de carregamento biodinâmico MC-K, em virtude de sua maior acurácia aprestada neste capítulo.

8.4 Observações finais do capítulo

No presente capítulo, foram apresentados os resultados das análises de vibração forçada do modelo computacional desenvolvido e comparado com os resultados experimentais apresentados no Capítulo 7. Desta forma, foi possível avaliar a resposta dinâmica do modelo de forma a conhecer o seu comportamento quando da aplicação dos modelos de carregamentos biodinâmicos. No capítulo seguinte, serão realizados estudos paramétricos da caminhada humana verificando-se a influência na resposta dinâmica do Piso 1 investigado neste trabalho de pesquisa.

9 ANÁLISE PARAMÉTRICA DA RESPOSTA DINÂMICA

9.1 Considerações iniciais

A vibração de pisos induzida pela caminhada humana é influenciada principalmente pela frequência do passo, taxa de amortecimento da estrutura e trajetória do caminhar. Diante do exposto, a partir do modelo em elementos finitos (Capítulo 4) e dos modelos de carregamento biodinâmico descritos no item 8.2 desta Tese, este capítulo pretende expor a avaliação paramétrica de quatro parâmetros foram avaliados: frequência do passo, número de pessoas andando e estacionárias, trajetórias e taxa de amortecimento.

9.2 Descrição da metodologia do estudo paramétrico

Os modelos de carregamento utilizados para desenvolvimento dos estudos paramétricos realizados no presente capítulo são os modelos biodinâmicos, representativos das características dinâmicas (massa, amortecimento e rigidez) das pessoas, em conjunto com os modelos de “força dura”, que insere o efeito do peso, denominados MC-K e MC-AISC no Capítulo 8. Além desses, serão utilizados comparativamente os modelos tradicionais de “força dura”, aqui denominados de MFD-K e MFD-AISC, respectivamente correspondentes às formulações de Kerr [74] e do guia de projeto do AISC [8]. E, quanto às propriedades modais representativas do pedestre utilizadas, estas foram obtidas a partir das expressões constantes na Equação (5) provenientes do estudo de Da Silva et al. [87] e estão apresentadas na Tabela 20. Em relação ao peso da pessoa, neste estudo paramétrico, foi utilizado o peso de 71,2 kg, que conforme recomendação do guia de projeto do AISC [8] para a atividade do caminhar humano.

Além disso, diante dos resultados observados no capítulo de calibração dos resultados, optou-se por utilizar o modelo matemático de força dura do Kerr [74],

combinado ou não, dependendo do estudo, com os modelos biodinâmicos, em virtude de um melhor enquadramento com os testes experimentais.

Tabela 20 - Resumo das propriedades do biodinâmicos utilizados.

Frequência do passo (Hz)	Características Modais dos Biodinâmicos					
	Movimento (Silva et al. [87])			Estacionário (Brownjohn [142] ¹)		
	m (kg)	c (Ns/m)	k (N/m)	m (kg)	c (Ns/m)	k (N/m)
1,50	61,04	1096,79	17936,10	73,60	1946	82000
1,60	57,29	1036,01	17261,26	73,60	1946	82000
1,70	53,54	975,23	16586,42	73,60	1946	82000
1,80	49,79	914,45	15911,58	73,60	1946	82000
1,90	46,03	853,51	15234,96	73,60	1946	82000
2,00	42,28	792,73	14560,12	73,60	1946	82000
2,10	38,53	731,95	13885,28	73,60	1946	82000
2,17	35,90	689,32	13411,96	73,60	1946	82000
2,20	34,78	671,17	13210,44	73,60	1946	82000
2,30	31,03	610,39	12535,60	73,60	1946	82000
2,40	27,27	549,45	11858,98	73,60	1946	82000
2,50	23,52	488,67	11184,14	73,60	1946	82000
¹ Propriedades levantadas experimentalmente para uma pessoa em pé e estacionária.						
² Linhas demarcadas são a propriedades referente às caminhadas lenta, normal, ressonância e rápida.						

9.3 Influência da frequência do passo

A frequência do passo domina a carga dinâmica resultante, conforme Bachmann e Ammann [67]. Ainda segundo os autores, a faixa de frequência do passo para uma caminhada normal em uma superfície horizontal encontra-se entre 1,5 e 2,5 Hz. Em geral, o pico da força devido ao impacto de um único pé aumenta com a frequência do passo Wheeler [141].

Logo, para uma frequência de passo relativamente mais alta, é possível deduzir que uma resposta dinâmica transiente maior será induzida. Alia-se a este fato a possibilidade das frequências naturais da estrutura estiverem em coincidência com um múltiplo da frequência do passo, ocorrendo, nesta situação, o efeito da ressonância e magnitude da resposta dinâmica poderá ser potencializada ainda mais.

Neste item do estudo paramétrico, a influência da frequência do passo na resposta dinâmica do Piso 1 induzida pela caminhada humana foi investigada por meio do uso dos modelos de carregamento biodinâmico citados anteriormente no item 8.2. A taxa de amortecimento do piso foi mantida em de 1,35 %, máxima conforme dados experimentais e o comprimento do passo foi alterado seguindo as recomendações da Tabela 5. Uma pessoa de 71,2 kg caminhando perpendicularmente, conforme a Figura 136, foi o caso utilizado para avaliação da variação da frequência do passo.

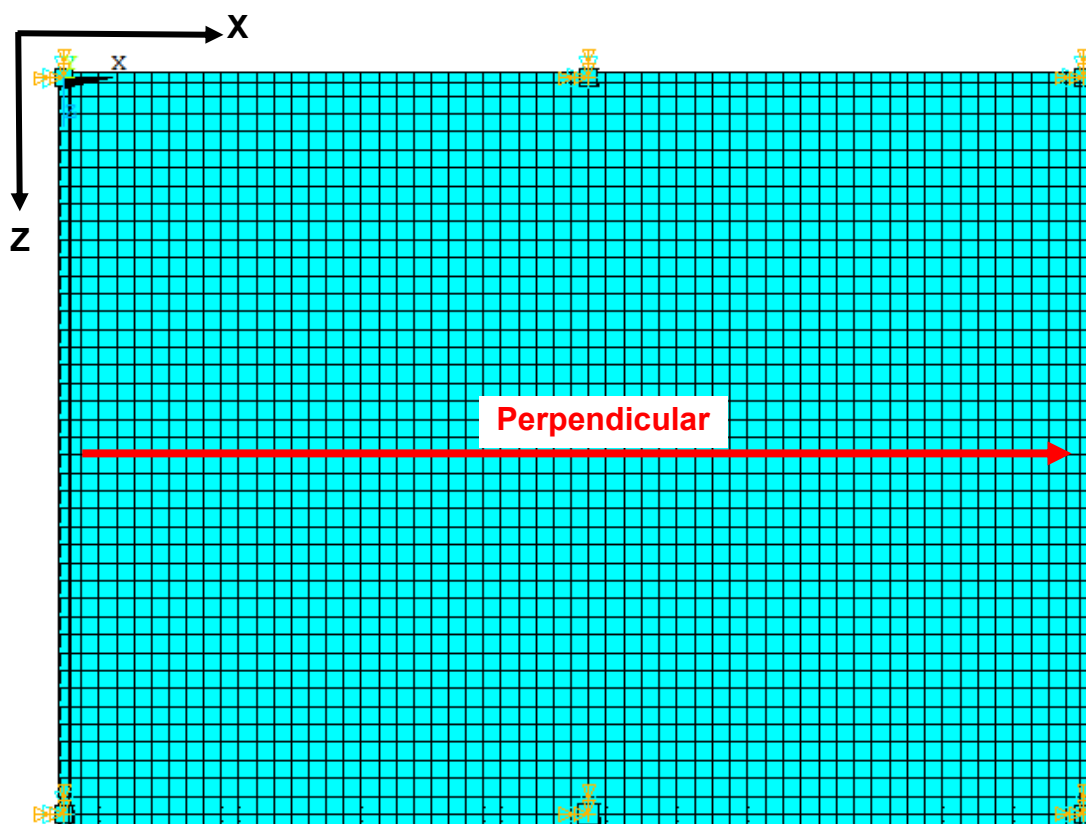


Figura 136 - Trajetória do estudo paramétrico no Piso 1: variação do passo.

Foram avaliadas as acelerações obtidas a partir da variação da frequência do passo de 1,5 a 2,5 Hz com incremento de 0,1 Hz. Além disso, foi adicionado 4 modelos biodinâmicos estacionários, denominado “MCE-K”, na estrutura de forma a representar pessoas parada em pé, conforme ocorreu durante os ensaios, e comparou-se com os demais resultados. Os resultados obtidos em termos de acelerações de pico e RMS (raiz do valor quadrático médio) são apresentados nas Figuras 137 e 138.

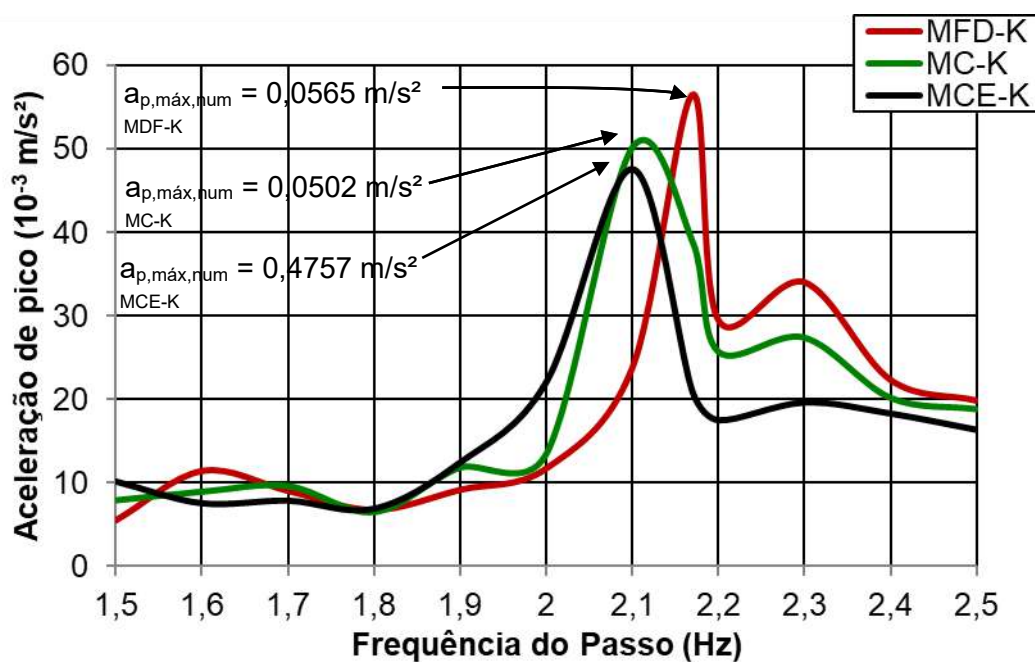


Figura 137 - Influência da frequência do passo na resposta dinâmica do Piso 1: comparativo dos valores de aceleração de pico entre Exp, MC-K e MCE-K.

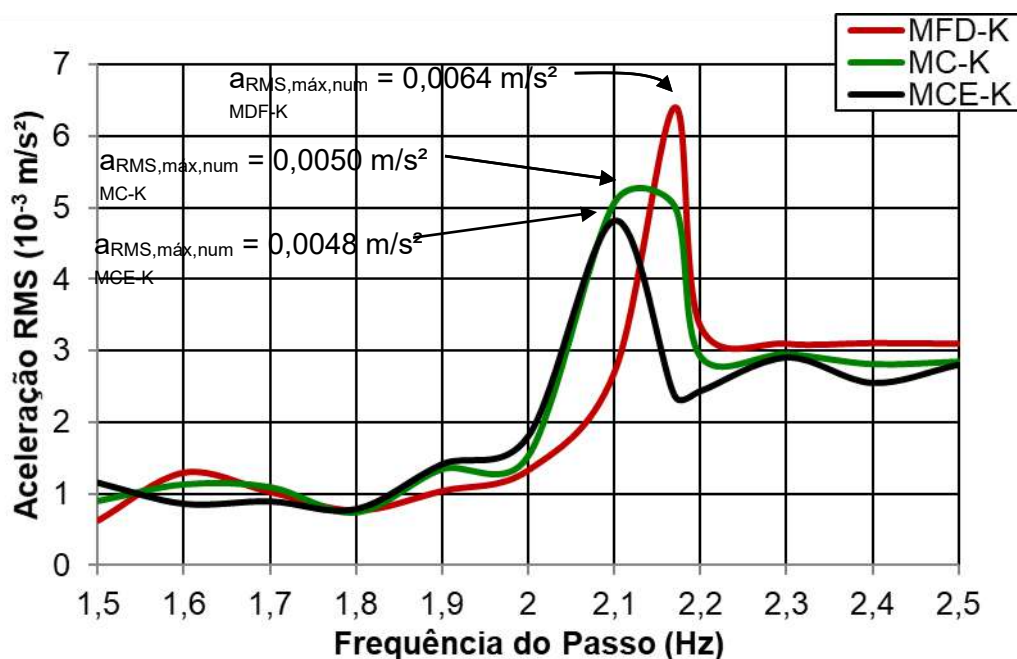


Figura 138 - Influência da frequência do passo na resposta dinâmica do Piso 1: comparativo dos valores de aceleração RMS entre Exp, MC-K e MCE-K.

Os valores das acelerações RMS e pico de cada histórico de aceleração, de acordo com as Figuras 137 e 138 para ambos os modelos de carregamento de “força dura”, com biodinâmicos e com biodinâmico e biodinâmicos estacionários

empregados, apresentaram uma tendência ascendente com o aumento da frequência do passo. No entanto, ganhos significativos podem ser observados na frequência de passo de 2,17 Hz, em função do terceiro múltiplo do harmônico da modelo matemático de carregamento serem próximos com a frequência fundamental da Piso 1 (ou seja, 6,51 Hz, como mostrado na Figura 75), e, como resultado, a ocorrência de ressonância nessa faixa de frequência aumenta em até 6 vezes, em comparação aos valores da resposta dinâmica fora desta faixa de frequência de passo.

Em relação as diferenças, comparando os modelos de carregamento de “força dura”, com biodinâmicos e com biodinâmico e biodinâmicos estacionários empregados, pode-se observar, para aceleração de pico, reduções da ordem de - 21,88 %, - 4,00 % e - 25,00 % quando comparado os modelos “força dura” *versus* biodinâmicos, biodinâmicos *versus* “biodinâmicos+estacionários” e “força dura” *versus* “biodinâmicos+estacionários”, respectivamente. Em relação à aceleração RMS, reduções da ordem de - 21,88 %, - 4,00 % e - 25,00 % quando comparado os modelos “força dura” *versus* biodinâmicos, biodinâmicos *versus* “biodinâmicos+estacionários” e “força dura” *versus* “biodinâmicos+estacionários”, respectivamente.

9.4 Avaliação da trajetória da caminhada

Como observado anteriormente nos testes experimentais de vibração forçada (Capítulo 8), houve alterações nos valores quando a trajetória de pessoa no piso era alterada entre as direções perpendicular, paralela, diagonal e aleatória, conforme ilustrado nas Figura 97. Neste estudo paramétrico, objetivando observar tal efeito no modelo numérico calibrado, foram considerados novas trajetórias e pontos de captação das acelerações de pico e RMS, conforme ilustrado na Figura 139.

Neste tópico do estudo paramétrico, a influência da trajetória da pessoa na resposta dinâmica do Piso 1 induzida pela caminhada humana foi investigada por meio do uso dos modelos de carregamento biodinâmico citados anteriormente no item 8.2, sem a consideração de pessoas estacionárias no piso. A taxa de amortecimento do piso foi mantida em de 1,35 %, máxima conforme dados experimentais e o comprimento do passo foi alterado seguindo as recomendações da Tabela 5. Uma pessoa de 71,2 kg caminhando, conforme a Figura 139, foi o caso utilizado para avaliação da variação da trajetória no piso. Foram avaliadas as

acelerações obtidas a partir da variação da trajetória da pessoa entre perpendicular, paralela e aleatória. Os resultados obtidos em termos de acelerações de pico e RMS (raiz do valor quadrático médio) são apresentados nas Figuras 140 e 141.

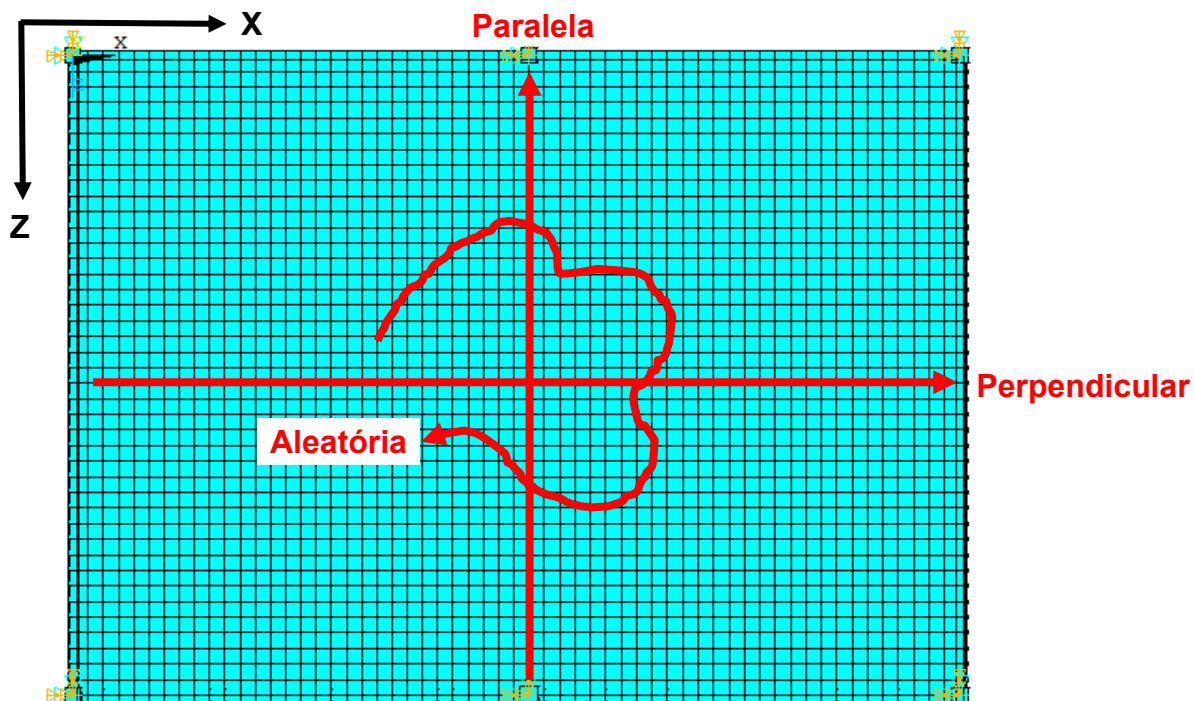


Figura 139 - Trajetórias do estudo paramétrico no Piso 1: variação da trajetória.

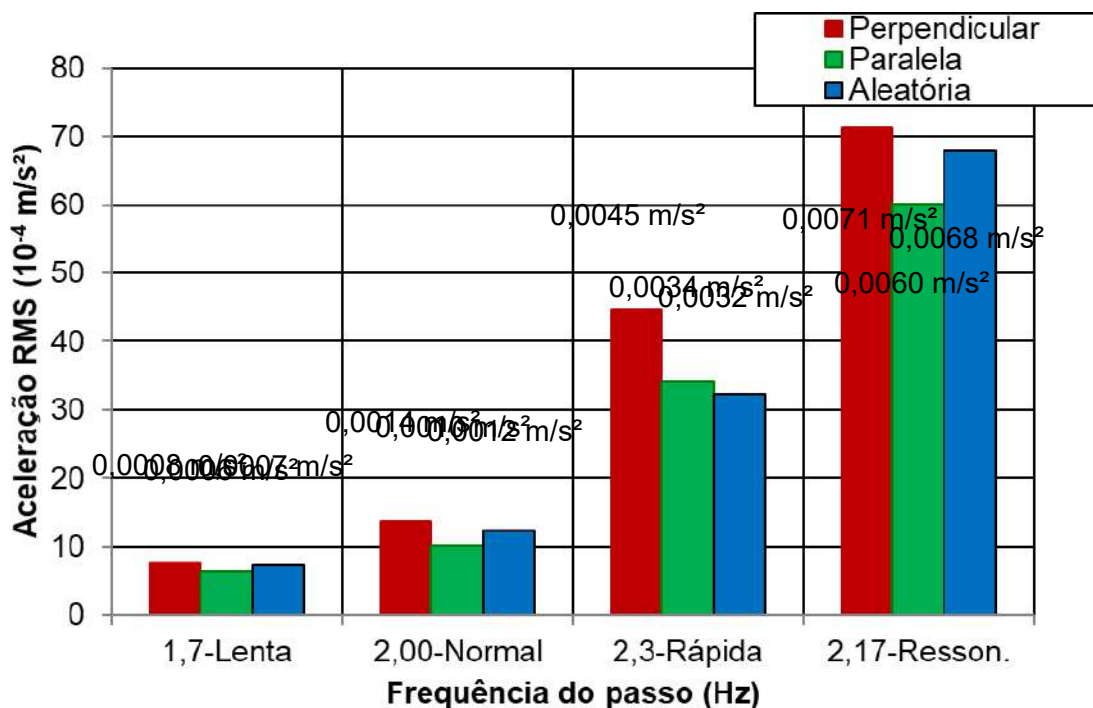


Figura 140 - Influência da trajetória da pessoa (perpendicular, paralela e aleatória) na resposta dinâmica do Piso 1: comparativo dos valores de aceleração RMS.

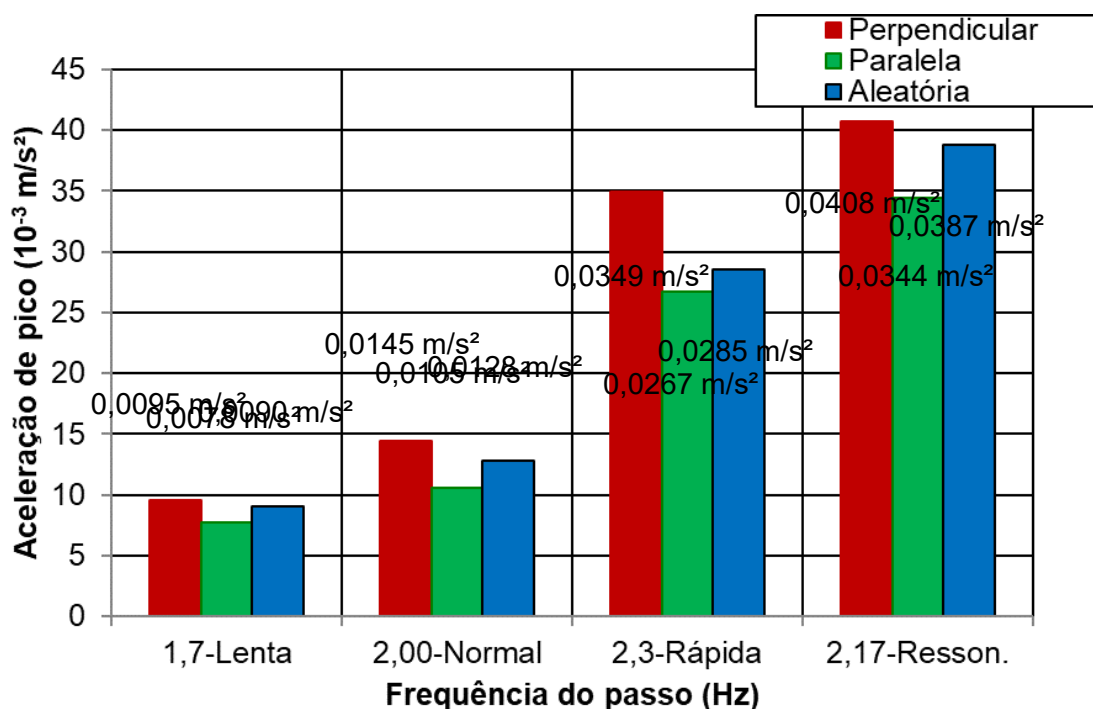


Figura 141 - Influência da trajetória da pessoa (perpendicular, paralela e aleatória) na resposta dinâmica do Piso 1: comparativo dos valores de aceleração de pico.

Assim como nos ensaios experimentais de força dura, foi verificado que a variação da trajetória da pessoa no piso que está caminhando tem impacto na resposta dinâmica da estrutura. As diferenças máximas observadas foram de - 29 % e - 27 %, quando comparado aceleração RMS na direção perpendicular versus aleatória da caminhada em ritmo rápido e aceleração de pico na direção perpendicular versus paralela da caminhada em ritmo normal. Pode-se inferir que a resposta dinâmica da caminhada paralela ser inferior à perpendicular devido ao carregamento transcorrer sobre a viga no caso do sentido paralelo ao vigamento. Ressalta-se que o ponto de observação da resposta dinâmica, assim como as trajetórias consideradas neste tópico não coincidem com as realizadas nos testes experimentais.

9.5 Efeito da variação do número de pessoas caminhando

Neste tópico do estudo paramétrico, a influência do número de pessoas na resposta dinâmica do Piso 1 induzida pela caminhada sincronizadas foi investigada por meio do uso dos modelos de carregamento biodinâmico citados anteriormente no

item 8.2, sem a consideração de pessoas estacionárias no piso. A taxa de amortecimento do piso foi mantida em de 1,35 %, máxima conforme dados experimentais e o comprimento do passo foi alterado seguindo as recomendações da Tabela 5. Variou-se então o número de pessoas caminhando sobre o Piso 1 de uma a três, com cada pessoa pesando 71,2 kg caminhando sincronizada com as demais nas direções perpendicular, paralela e aleatória, conforme ilustrado na Figura 142.

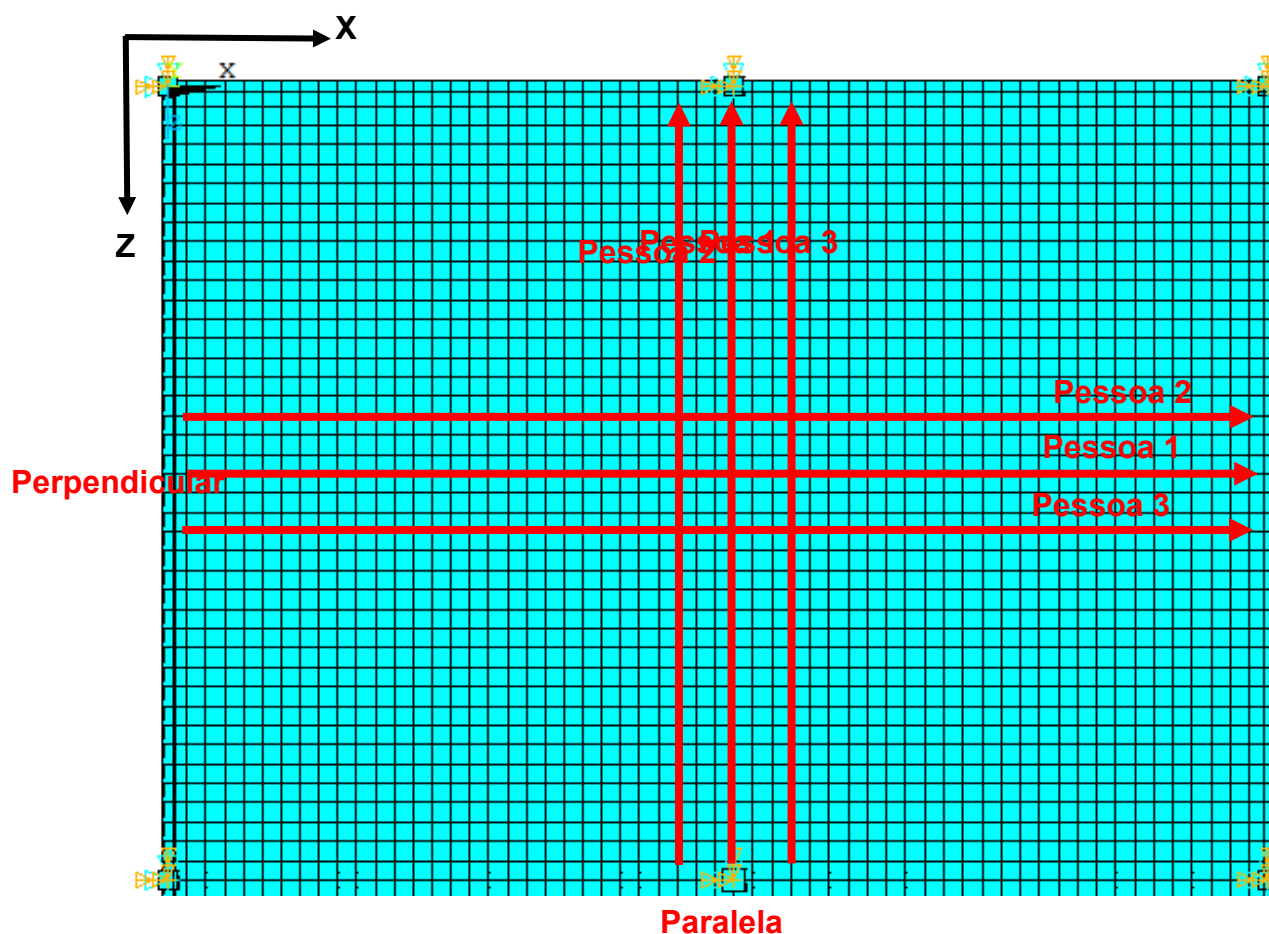


Figura 142 - Trajetórias do estudo paramétrico no Piso 1: variação nº pessoas.

Diante do exposto, estes foram os casos de carregamento utilizados para avaliação da variação do número de pessoas caminhando sobre o Piso 1 investigado. Assim, foram avaliadas as respostas dinâmicas obtidas a partir da variação do número de pessoas caminhando no piso para cada uma das trajetórias previamente escolhidas (direções perpendicular, paralela e aleatória). Os resultados obtidos em termos de acelerações de pico e *RMS* (raiz do valor quadrático médio) são apresentados nos gráficos constantes das Figuras 143 a 148, onde são ilustradas as diferenças nas respostas dinâmicas para cada incremento de pessoa no piso investigado.

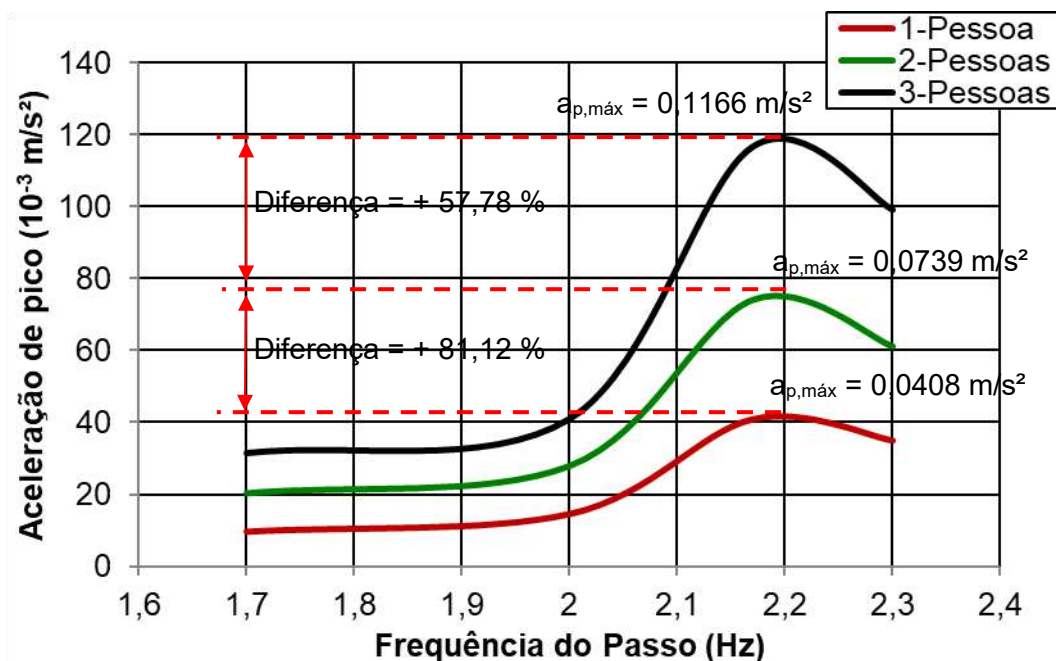


Figura 143 - Influência do número de pessoas (perpendicular) na resposta dinâmica do Piso 1: comparativo dos valores de aceleração de pico.

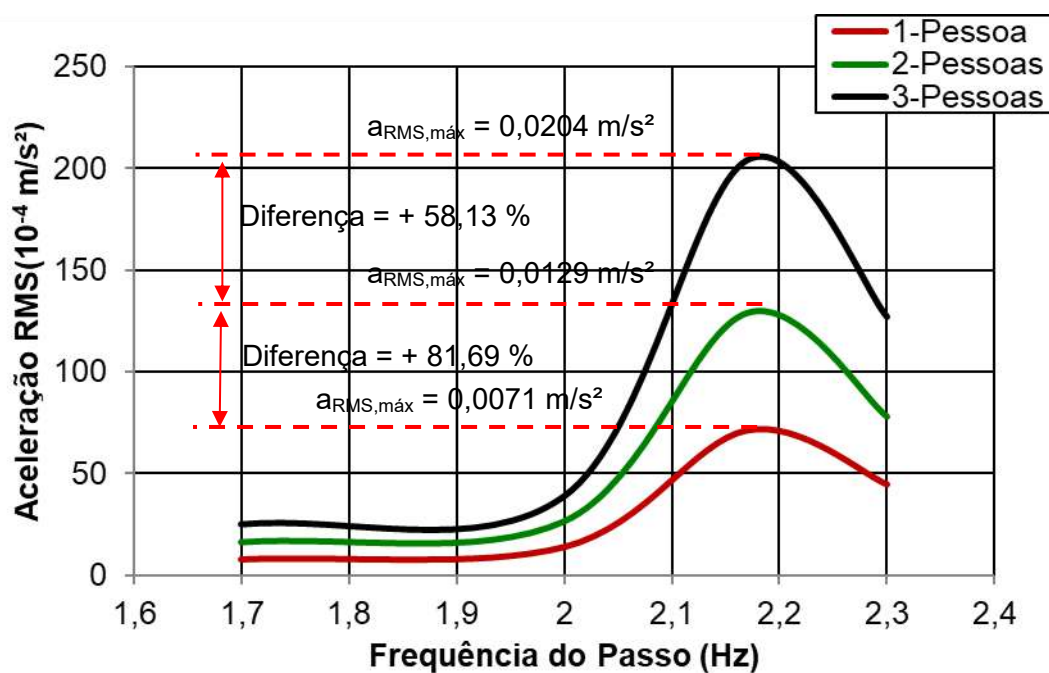


Figura 144 - Influência do número de pessoas (perpendicular) na resposta dinâmica do Piso 1: comparativo dos valores de aceleração RMS.

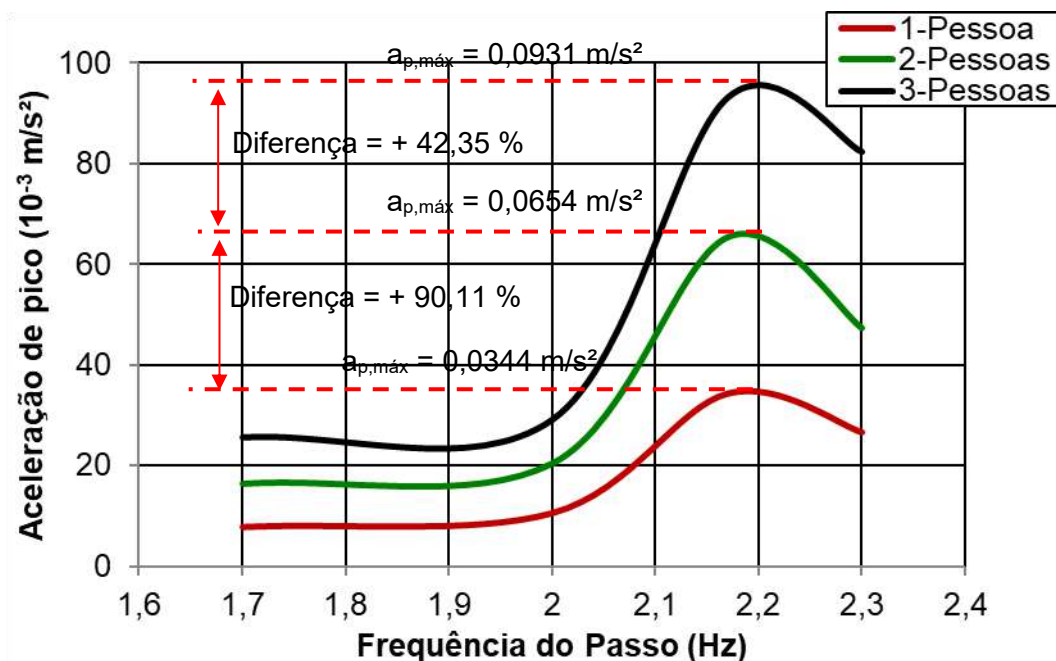


Figura 145 - Influência do número de pessoas (paralela) na resposta dinâmica do Piso 1: comparativo dos valores de aceleração de pico.

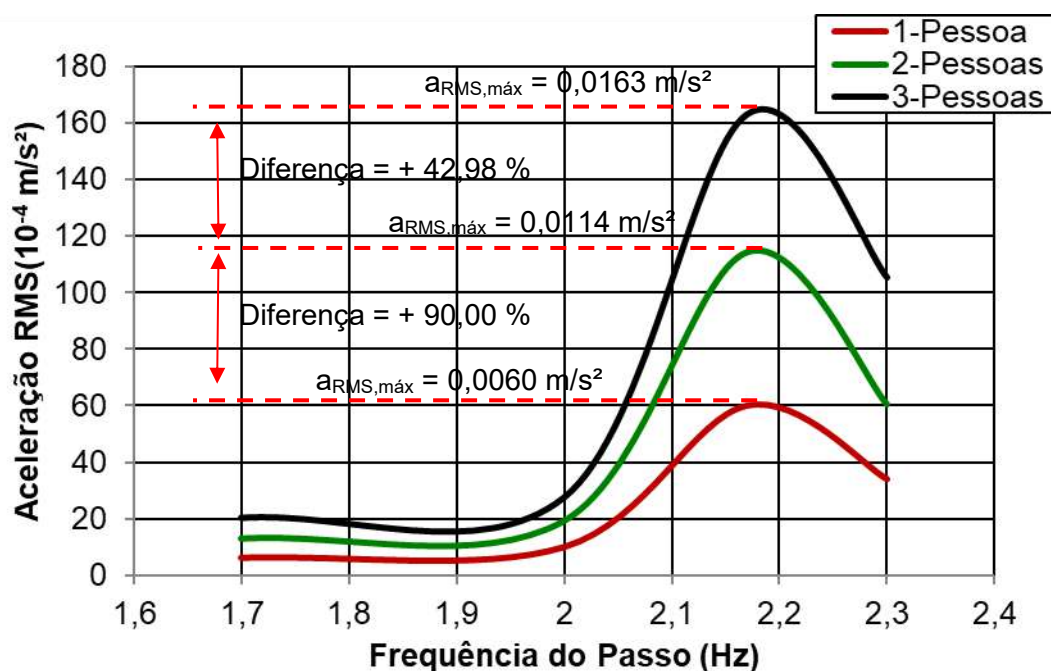


Figura 146 - Influência do número de pessoas (paralela) na resposta dinâmica do Piso 1: comparativo dos valores de aceleração RMS.

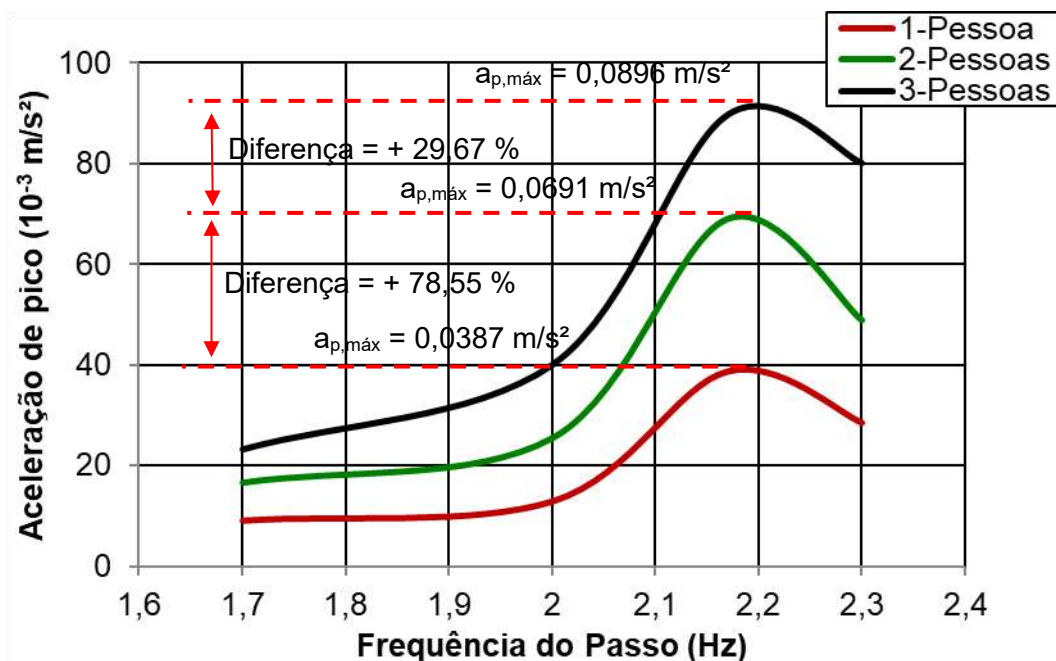


Figura 147 - Influência do número de pessoas (aleatória) na resposta dinâmica do Piso 1: comparativo dos valores de aceleração de pico.

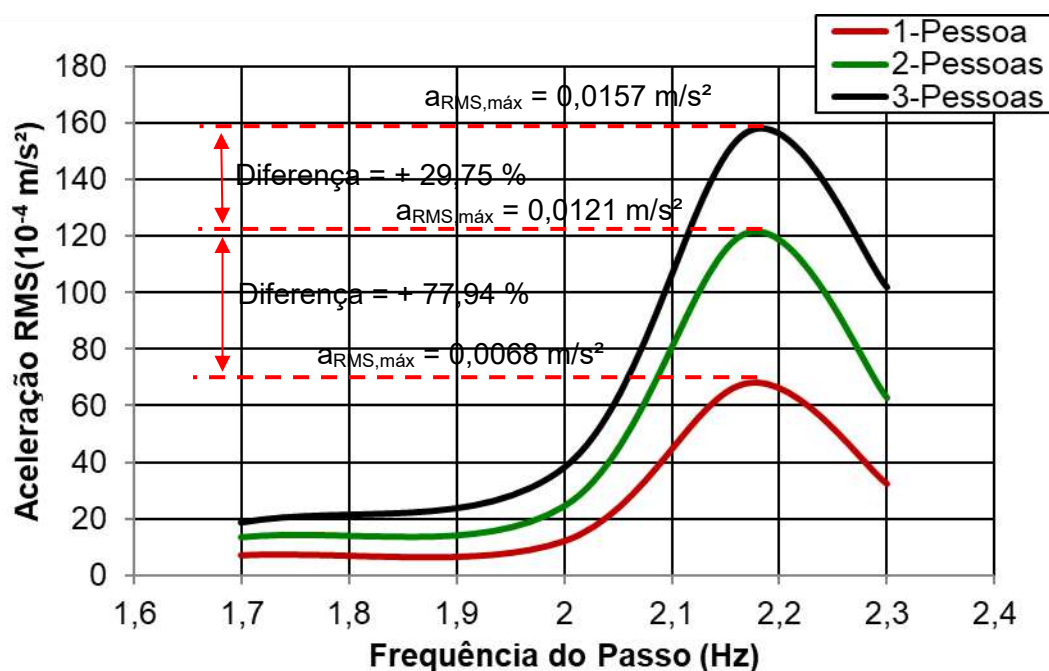


Figura 148 - Influência do número de pessoas (aleatória) na resposta dinâmica do Piso 1: comparativo dos valores de aceleração RMS.

Verifica-se, a partir de observações realizadas nas Figuras 143 a 148, que as acelerações, tanto valores de pico quanto RMS, em seus valores máximos,

aumentaram entre 79 % e 90 % e 78 % e 90 %, respectivamente, quando o número de pessoas caminhando no Piso 1 aumenta de uma para duas. Por outro lado, as acelerações, tanto valores de pico quanto RMS, em seus valores máximos, aumentaram entre 30 % e 55 %, quando o número de pessoas caminhando no Piso 1 aumenta de duas para três. Observa-se também que fora da região de ressonância ($f_p = 2,17$ Hz), essas proporções mantêm se na mesma ordem de grandeza. Os aumentos observados são esperados, tendo em vista que o carregamento aumenta 100 % e 33 %, respectivamente, no nas variações de uma para duas e de duas para três pessoas andando respectivamente. Verifica-se ainda que os percentuais relativos aos aumentos da resposta dinâmica da caminhada aleatórias foram razoavelmente menores que os demais, isto se deve, possivelmente, devido a aleatoriedade dos outros dois indivíduos que são adicionados, pois nas trajetórias perpendicular e paralela, os indivíduos são adicionados lateralmente e caminham paralelamente, porém tal configuração não é totalmente possível na caminhada aleatória.

9.6 Análise da influência de pessoas estacionárias

Neste tópico do estudo paramétrico, pretende-se verificar a influência de pessoas estacionárias na resposta dinâmica do Piso 1 induzida pela caminhada sincronizadas de três pessoas andando simultaneamente, por meio do uso dos modelos de carregamento biodinâmico citados anteriormente no item 8.2. A taxa de amortecimento do piso foi mantida em de 1,35 %, máxima conforme dados experimentais e o comprimento do passo foi alterado seguindo as recomendações da Tabela 5. Variou-se então o número de pessoas estacionárias sobre o Piso 1 de nenhuma para quatro, com cada pessoa pesando 71,2 kg, e de uma a três pessoas caminhando sincronizadamente nas direções perpendicular, conforme ilustrado na Figura 149. Estes foram os casos utilizados para avaliação da variação do número de pessoas estacionárias sobre o piso. Foram avaliadas as respostas dinâmicas obtidas a partir da variação do número de pessoas estacionárias no piso, para trajetória perpendicular, alterando-se o número de pessoas caminhando de uma até três. Os resultados obtidos em termos de acelerações de pico e RMS (raiz do valor quadrático médio) são apresentados nas Figuras 150 a 155.

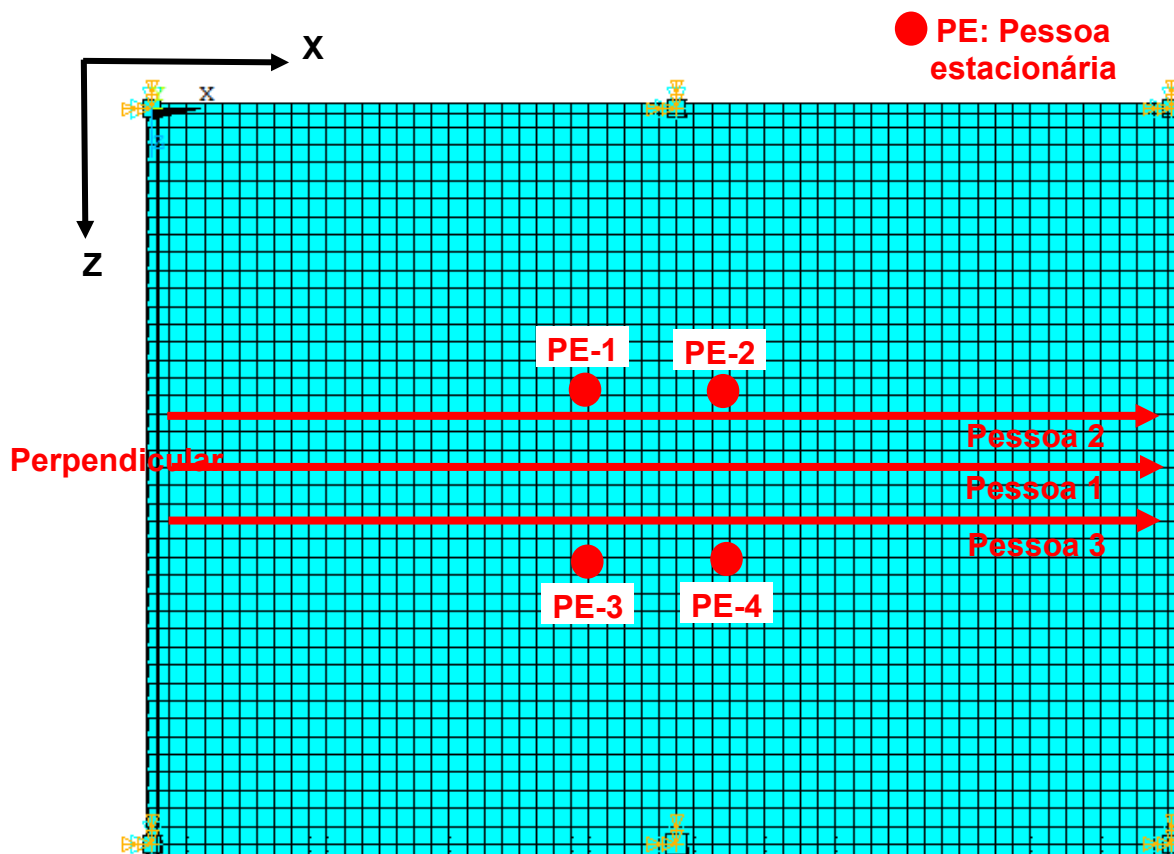


Figura 149 - Trajetórias do estudo paramétrico no Piso 1: variação nº pessoas estacionárias.

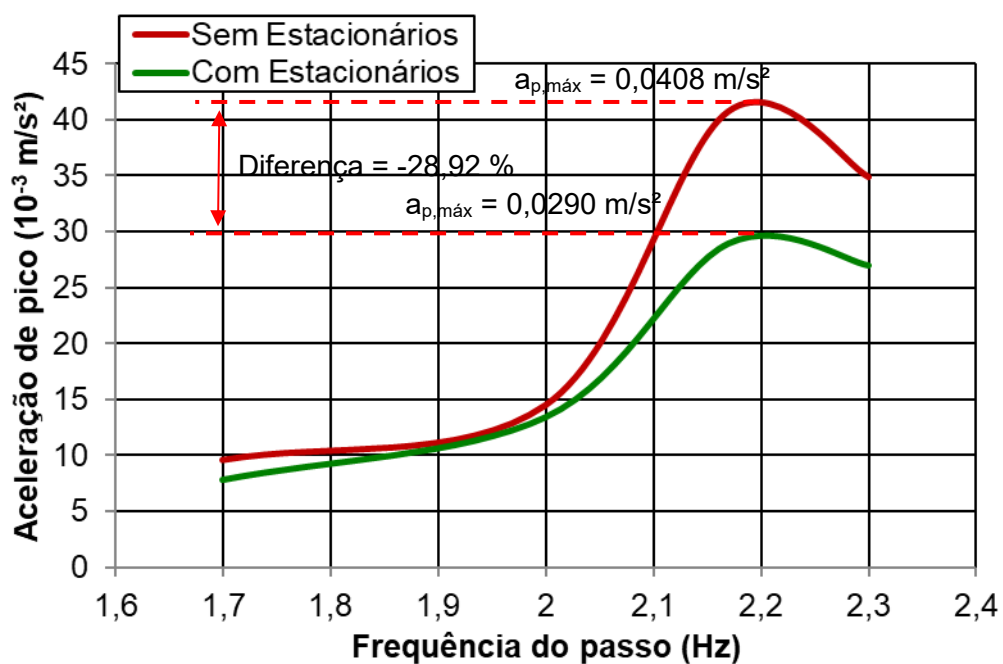


Figura 150 - Influência de quatro pessoas estacionárias (uma pessoa andando) na resposta dinâmica do Piso 1: comparativo dos valores de aceleração de pico.

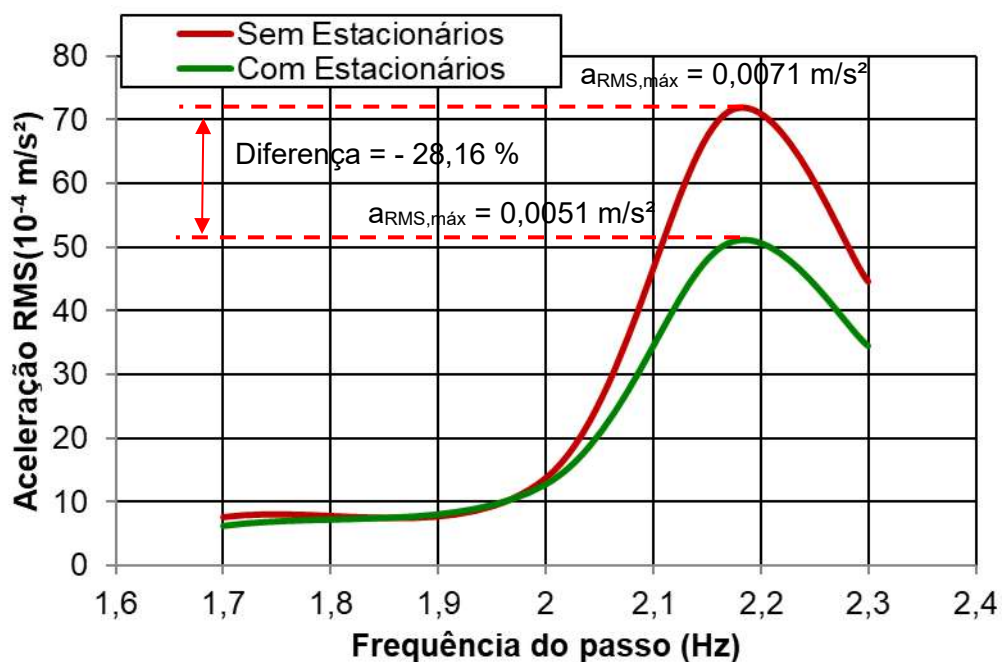


Figura 151 - Influência de quatro pessoas estacionárias (uma pessoa andando) na resposta dinâmica do Piso 1: comparativo dos valores de aceleração RMS.

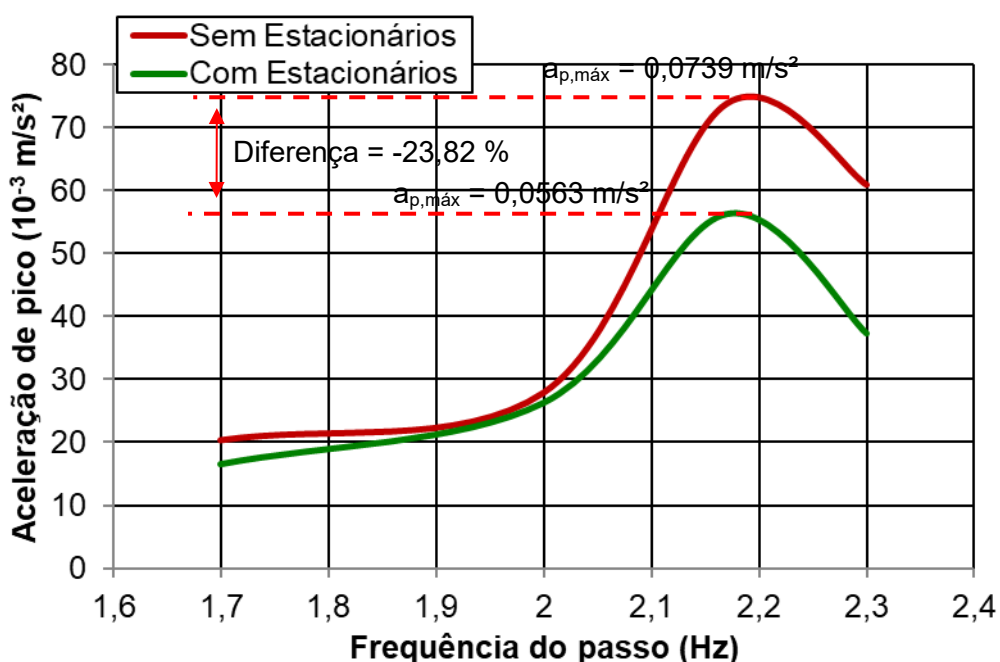


Figura 152 - Influência de quatro pessoas estacionárias (duas pessoas andando) na resposta dinâmica do Piso 1: comparativo dos valores de aceleração de pico.

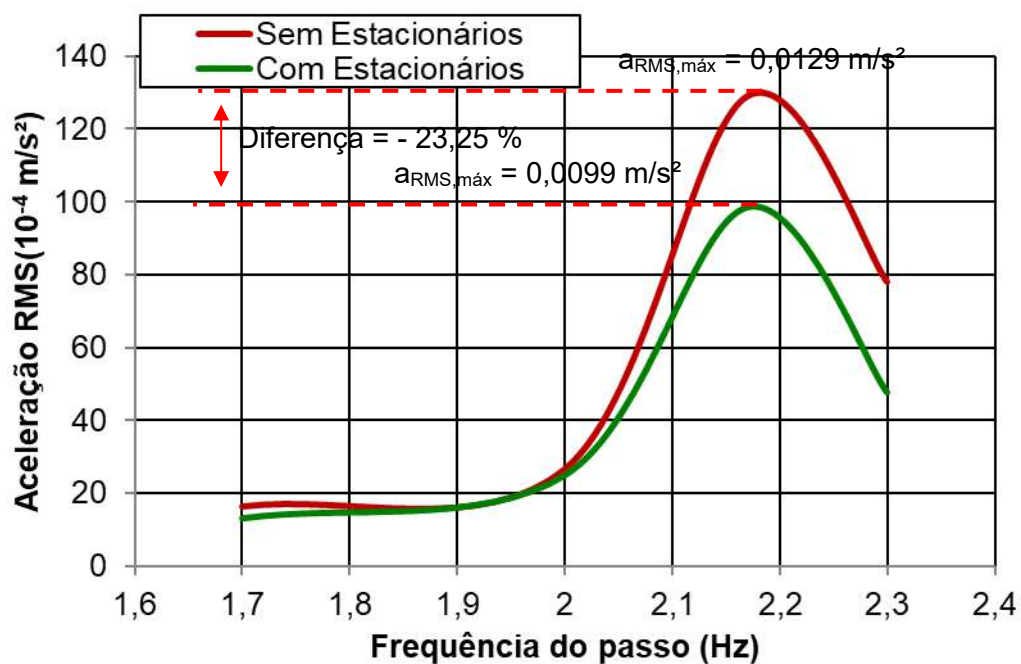


Figura 153 - Influência de quatro pessoas estacionárias (duas pessoas andando) na resposta dinâmica do Piso 1: comparativo dos valores de aceleração RMS.

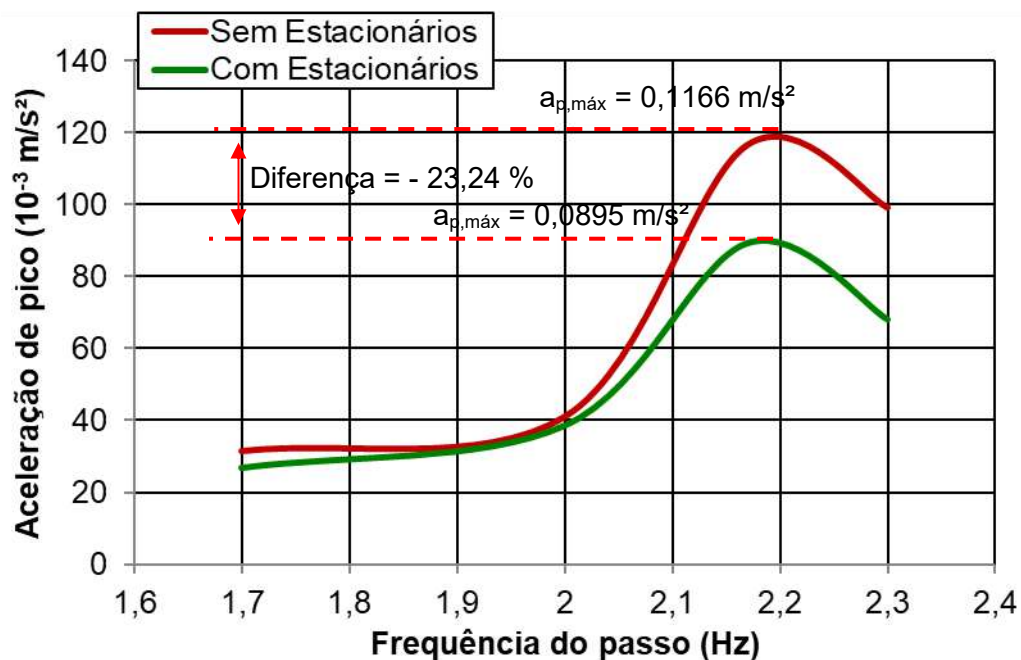


Figura 154 - Influência de quatro pessoas estacionárias (três pessoas andando) na resposta dinâmica do Piso 1: comparativo dos valores de aceleração de pico.

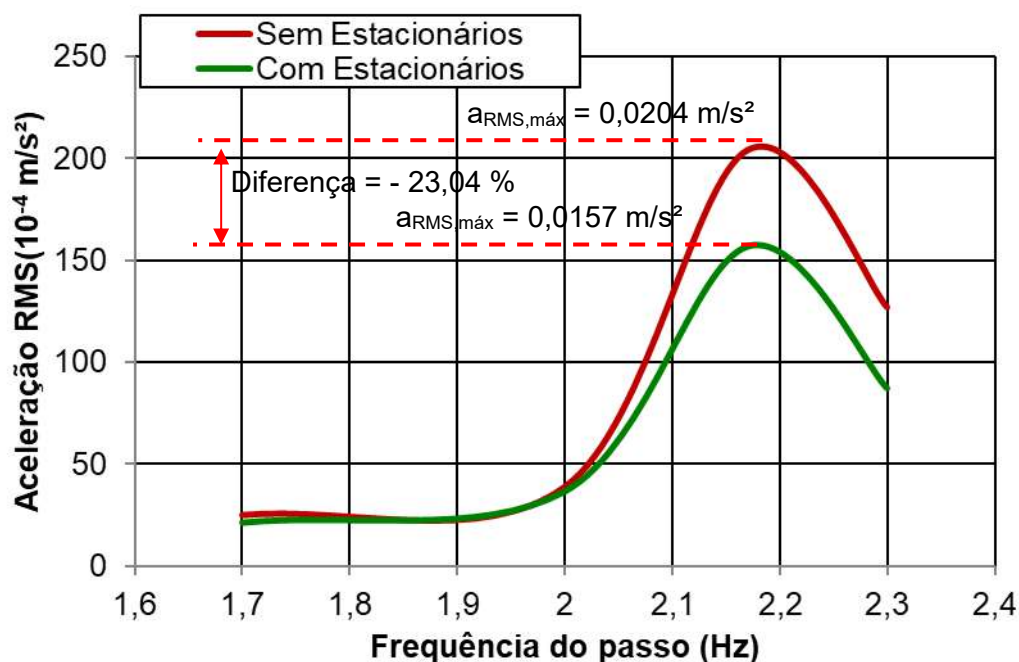


Figura 155 - Influência de quatro pessoas estacionárias (três pessoas andando) na resposta dinâmica do Piso 1: comparativo dos valores de aceleração RMS.

Verifica-se, a partir de observações realizadas nas Figuras 150 a 155, que as acelerações, tanto valores de pico quanto RMS, em seus valores máximos, diminuiram entre 23 % e 29 % e 23 % e 28 %, respectivamente, quando o número de pessoas estacionárias no Piso 1 aumenta de nenhuma para quatro. Observa-se também que fora da região de ressonância ($f_p = 2,17$ Hz), essas diferenças são menores e, possivelmente, isto se deve devido à alteração sensível das propriedades dinâmicas, principalmente a frequência natural do Piso 1, causada pela adição das pessoas paradas, que, dentre outros aspectos, reduz o efeito da ressonância. Verifica-se ainda que em ritmos de passos mais altos (acima de 2,17 Hz), verifica-se que as diferenças reduzem, porém são razoavelmente maiores em módulo que as diferenças para frequência de passo menores.

9.7 Influência da taxa de amortecimento

Neste tópico do estudo paramétrico, pretende-se verificar o impacto da taxa de amortecimento na resposta dinâmica do Piso 1 induzida pela caminhada

sincronizadas de três pessoas andando simultaneamente, em ritmo ressonante com o Piso 1, ou seja, frequência de passo de 2,17 Hz, por meio do uso dos modelos de carregamento biodinâmico citados anteriormente no item 8.2. A taxa de amortecimento do piso foi variada de 1,35 %, máxima conforme dados experimentais, até 5 %, e o comprimento do passo foi considerado seguindo as recomendações da Tabela 5. Variou-se também o número de pessoas estacionárias sobre o Piso 1 de nenhuma para quatro, com cada pessoa pesando 73,6 kg. Foram consideradas três pessoas caminhando sincronizadamente nas direções perpendicular, conforme ilustrado na Figura 142.

Estes foram os casos utilizados para avaliação do impacto da taxa de amortecimento na resposta dinâmica do piso. Foram avaliadas as respostas dinâmicas obtidas a partir da variação taxa de amortecimento do piso para trajetória perpendicular, com e sem pessoas estacionárias. Os resultados obtidos em termos de acelerações de pico e *RMS* (raiz do valor quadrático médio) são apresentados nas Figuras 156 e 157.

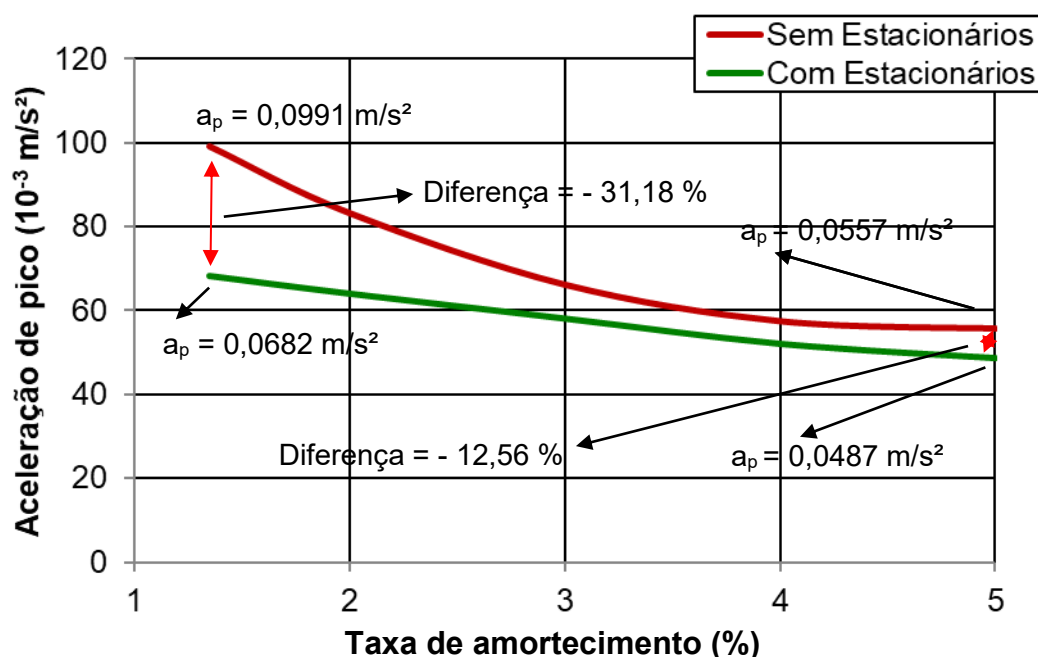


Figura 156 - Influência da taxa de amortecimento (ritmo em ressonância, direção horizontal e 3 pessoas andando) na resposta dinâmica do Piso 1: comparativo dos valores de aceleração de pico com e sem pessoas estacionárias.

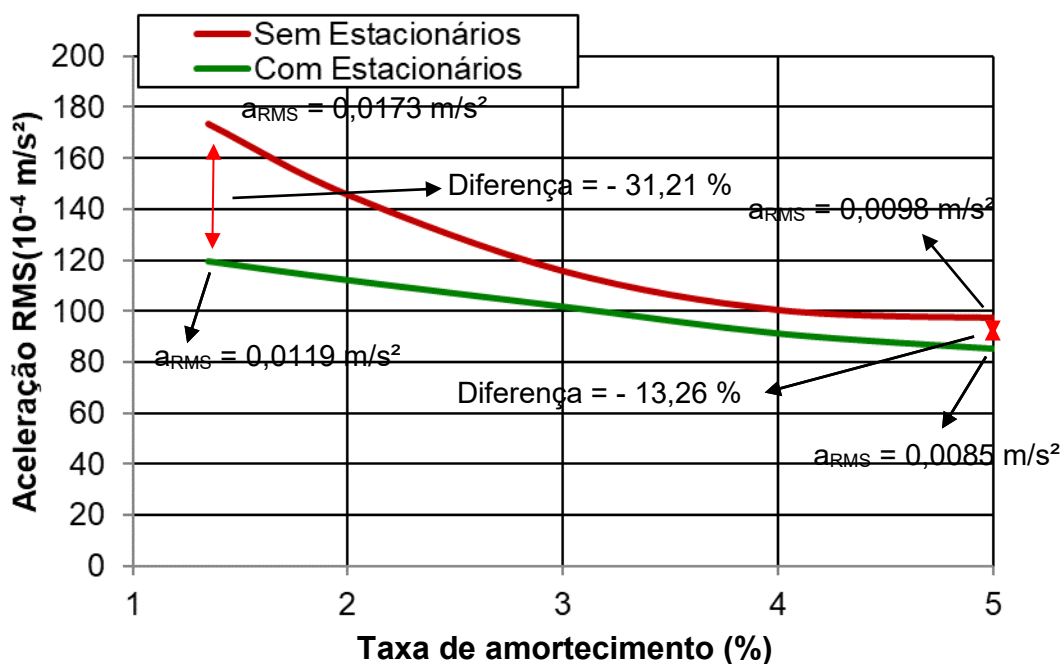


Figura 157 - Influência da taxa de amortecimento (ritmo em ressonância, direção horizontal e 3 pessoas andando) na resposta dinâmica do Piso 1: comparativo dos valores de aceleração RMS com e sem pessoas estacionárias.

Verifica-se, a partir de observações realizadas nas Figuras 156 e 157, que as acelerações, em relação aos valores das acelerações de pico, tanto para com caso sem e com estacionários, diminuíram aproximadamente 44 e 29 %, respectivamente, com a variação da taxa de amortecimento do Piso 1 de 1,35 % para 5 %. Em relação aos valores das acelerações RMS, tanto para com caso sem e com estacionários, diminuíram aproximadamente 43 e 29 %, respectivamente, com a variação da taxa de amortecimento do Piso 1 de 1,35 % para 5 %.

Observa-se também que as diferenças devido a adição das pessoas estacionárias são menores à medida que se aumenta a taxa de amortecimento do piso, caindo de aproximadamente 31 % para 13 %, respectivamente, quando a taxa de amortecimento é aumentada de 1,35 % para 5 %. Isto indica que o aumento de pessoas andando ou estacionárias no piso investigado causa menor influência nas respostas dinâmicas quanto maior for a taxa de amortecimento inerente do sistema estrutural.

9.8 Observações finais do capítulo

Nesse capítulo, a influência de parâmetros como frequência do passo, trajetória da caminhada, número de pessoas caminhando, número de pessoas estacionárias e a taxa de amortecimento do piso impactam na resposta dinâmica do piso. Os resultados indicaram a importância do efeito da interação indivíduo-estrutura nas respostas máximas do Piso 1 e como as características biodinâmicas das pessoas afetam estas respostas. No capítulo seguinte, será avaliado o conforto humano da estrutura e as comparações com os limites relativos das normas de projeto.

10 AVALIAÇÃO DO CONFORTO HUMANO

10.1 Considerações iniciais

Este capítulo visa investigar o comportamento dinâmico do Piso 1, piso no qual, durante os ensaios experimentais, identificou-se as maiores respostas dinâmicas, quanto ao conforto humano mediante ações oriundas do caminhar de pedestres. Assim, foram analisadas as acelerações verticais máximas da estrutura obtidas pelos testes experimentais (caminha lenta, normal, em ressonância e rápida), descritas no Capítulo 7. Adicionalmente, também se verificou o conforto humano para todas simulações numéricas de caminhada que foram realizadas objetivando representar situações propostas no estudo paramétrico. Logo, as repostas dinâmicas encontradas na análise dinâmica experimental de vibração forçada para o Piso 1 foram comparadas com os valores limites propostos pela literatura técnica do AISC [8], da ISO 2631-2 [152] e das normas brasileiras ABNT NBR 8800:2008 [153] e ABNT NBR 6118:2014 [45]. As recomendações das principais normas nacionais e internacionais, além de guias de projetos, em relação aos níveis de vibrações em pisos, podem ser verificadas no Anexo C.

Vale a pena ressaltar que a estrutura, durante o monitoramento experimental realizado nesta Tese, não se encontrava finalizada, estando pendente os acabamentos, divisórias internas, fechamentos externos, instalações, mobiliários, equipamentos, entre outros. A inclusão desses componentes tem a capacidade de aumentar as taxas de amortecimento estrutural e atenuam os níveis de vibração da estrutura, sendo favoráveis, portanto, ao conforto dos usuários.

O ponto do pavimento analisado corresponde a amplitude modal máxima verificada no 2º Modo de Vibração do pavimento investigado, para todos os casos do estudo paramétrico realizado (Figura 75), enquanto para os testes experimentais foram considerados os maiores valores obtidos nos sensores.

10.2 Análise das acelerações de pico experimentais e numéricas

Apenas a literatura internacional apresenta limites de níveis de vibração em relação a acelerações. O guia de projeto do AISC [8] recomenda, por exemplo, que as acelerações de pico em um piso sejam limitadas a 0,5% g (0,049 m/s²) e, a ISO 2631-2 [152], recomenda um limite para a aceleração *RMS* não superior a 0,02 m/s². Tais limites referem-se à ocupação do tipo escritório, pois, dentre as atividades relacionadas nestas referências, esta é que mais se aproxima da futura destinação da edificação. Os resultados de aceleração de pico e *RMS* experimentais encontrados para o Piso 1 são apresentados na Tabela 21, onde são comparados aos limites propostos pelos norma e guia de projeto citados.

Tabela 21 - Comparação das acelerações no Piso 1 com limites normativos [127].

Frequência de passo (Hz)	Trajectoria	Aceleração de Pico (m/s ²)	Conforto Humano AISC	Aceleração <i>RMS</i> (m/s ²)	Conforto Humano ISO 2631-2
1,7	Aleatória	0,012	Atende	0,002	Atende
	Diagonal	0,019	Atende	0,002	Atende
	Paralela	0,011	Atende	0,002	Atende
	Perpendicular	0,012	Atende	0,002	Atende
2	Aleatória	0,022	Atende	0,003	Atende
	Diagonal	0,011	Atende	0,002	Atende
	Paralela	0,011	Atende	0,002	Atende
	Perpendicular	0,011	Atende	0,002	Atende
2,3	Aleatória	0,028	Atende	0,003	Atende
	Diagonal	0,025	Atende	0,003	Atende
	Paralela	0,023	Atende	0,002	Atende
	Perpendicular	0,016	Atende	0,003	Atende
2,17	Aleatória	0,030	Atende	0,004	Atende
	Diagonal	0,016	Atende	0,003	Atende
	Paralela	0,023	Atende	0,003	Atende
	Perpendicular	0,020	Atende	0,004	Atende

Observa-se que as maiores respostas dinâmicas do Piso 1, em termo de aceleração de pico e *RMS*, são 0,030 m/s² e 0,004 m/s², respectivamente, referente a excitação causada por uma pessoa caminhando com frequência de passo de 2,17 Hz (caminhada em ressonância) em trajetória aleatória. Com base na Tabela 21, todas as acelerações de pico e *RMS* experimentais foram inferiores aos limites estabelecidos pelo AISC [8] e ISO 2631-2 [152]. Diante do exposto, pode-se inferir

que o sistema estrutural investigado, em função do caminhar humano de uma pessoa, não apresentará problemas de conforto humano, conforme Ferreira [127].

Nesta tese, todas as acelerações de pico e *RMS* encontradas nos casos avaliados no estudo paramétrico foram dispostos nas Tabelas 21 a 24, onde também foram comparadas com os limites estabelecidos pelo AISC [8] e ISO 2631-2 [152], todas em relação somente ao Piso 1 do pavimento investigado.

Tabela 22 - Comparação das acelerações numéricas no Piso 1 com limites normativos para direção perpendicular.

Ritmo	NP	BE	a_p (m/s ²)	CH AISC	a_{RMS} (m/s ²)	CH ISO
Lenta	1	SEM	0,0095	Atende	0,0008	Atende
		COM	0,0078	Atende	0,0006	Atende
	2	SEM	0,0203	Atende	0,0016	Atende
		COM	0,0165	Atende	0,0013	Atende
	3	SEM	0,0313	Atende	0,0025	Atende
		COM	0,0268	Atende	0,0022	Atende
Normal	1	SEM	0,0145	Atende	0,0014	Atende
		COM	0,0134	Atende	0,0013	Atende
	2	SEM	0,0279	Atende	0,0027	Atende
		COM	0,0262	Atende	0,0025	Atende
	3	SEM	0,0408	Atende	0,0039	Atende
		COM	0,0386	Atende	0,0037	Atende
Rápida	1	SEM	0,0349	Atende	0,0045	Atende
		COM	0,0270	Atende	0,0035	Atende
	2	SEM	0,0610	Não Atende	0,0078	Atende
		COM	0,0373	Atende	0,0048	Atende
	3	SEM	0,0991	Não Atende	0,0127	Atende
		COM	0,0682	Não Atende	0,0087	Atende
Ressonância	1	SEM	0,0408	Atende	0,0071	Atende
		COM	0,0290	Atende	0,0051	Atende
	2	SEM	0,0739	Não Atende	0,0129	Atende
		COM	0,0563	Não Atende	0,0099	Atende
	3	SEM	0,1166	Não Atende	0,0204	Não Atende
		COM	0,0895	Não Atende	0,0157	Atende

LEGENDA:

- **NP:** número de pessoas caminhando.
- **BE:** presença de pessoas estacionárias.
- **CH AISC:** conforto humano conforme critério de aceleração de pico do guia de projeto do AISC [8].
- **CH ISO:** conforto humano - critério de aceleração RMS da norma ISO 2631-2 [152].
- a_p : aceleração de pico.
- a_{RMS} : aceleração RMS.

Tabela 23 - Comparação das acelerações numéricas no Piso 1 com limites normativos para direção paralela.

Ritmo	NP	BE	a_p (m/s ²)	CH AISC	a_{RMS} (m/s ²)	CH ISO
Lenta	1	SEM	0,0078	Atende	0,0006	Atende
		COM	0,0068	Atende	0,0005	Atende
	2	SEM	0,0164	Atende	0,0013	Atende
		COM	0,0138	Atende	0,0011	Atende
	3	SEM	0,0256	Atende	0,0021	Atende
		COM	0,0215	Atende	0,0017	Atende
Normal	1	SEM	0,0105	Atende	0,0010	Atende
		COM	0,0089	Atende	0,0008	Atende
	2	SEM	0,0204	Atende	0,0019	Atende
		COM	0,0177	Atende	0,0017	Atende
	3	SEM	0,0291	Atende	0,0028	Atende
		COM	0,0257	Atende	0,0025	Atende
Rápida	1	SEM	0,0267	Atende	0,0034	Atende
		COM	0,0214	Atende	0,0027	Atende
	2	SEM	0,0473	Atende	0,0061	Atende
		COM	0,0427	Atende	0,0055	Atende
	3	SEM	0,0823	Não Atende	0,0105	Atende
		COM	0,0630	Não Atende	0,0081	Atende
Ressonância	1	SEM	0,0344	Atende	0,0060	Atende
		COM	0,0269	Atende	0,0047	Atende
	2	SEM	0,0654	Não Atende	0,0114	Atende
		COM	0,0503	Não Atende	0,0088	Atende
	3	SEM	0,0931	Não Atende	0,0163	Atende
		COM	0,0704	Não Atende	0,0123	Atende

LEGENDA:

- **NP**: número de pessoas caminhando.
- **BE**: presença de pessoas estacionárias.
- **CH AISC**: conforto humano conforme critério de aceleração de pico do guia de projeto do AISC [8].
- **CH ISO**: conforto humano - critério de aceleração RMS da norma ISO 2631-2 [152].
- a_p : aceleração de pico.
- a_{RMS} : aceleração RMS.

Tabela 24 - Comparação das acelerações numéricas no Piso 1 com limites normativos para direção aleatória.

Ritmo	NP	BE	a_p (m/s ²)	CH AISC	a_{RMS} (m/s ²)	CH ISO
Lenta	1	SEM	0,0090	Atende	0,0007	Atende
		COM	0,0079	Atende	0,0006	Atende
	2	SEM	0,0166	Atende	0,0013	Atende
		COM	0,0142	Atende	0,0011	Atende
	3	SEM	0,0232	Atende	0,0019	Atende
		COM	0,0192	Atende	0,0015	Atende
Normal	1	SEM	0,0128	Atende	0,0012	Atende
		COM	0,0114	Atende	0,0011	Atende
	2	SEM	0,0255	Atende	0,0024	Atende
		COM	0,0234	Atende	0,0022	Atende
	3	SEM	0,0400	Atende	0,0038	Atende
		COM	0,0377	Atende	0,0036	Atende
Rápida	1	SEM	0,0285	Atende	0,0032	Atende
		COM	0,0193	Atende	0,0025	Atende
	2	SEM	0,0490	Atende	0,0063	Atende
		COM	0,0382	Atende	0,0049	Atende
	3	SEM	0,0800	Não Atende	0,0102	Atende
		COM	0,0559	Não Atende	0,0072	Atende
Ressonância	1	SEM	0,0387	Atende	0,0068	Atende
		COM	0,0266	Atende	0,0047	Atende
	2	SEM	0,0691	Não Atende	0,0121	Atende
		COM	0,0450	Atende	0,0079	Atende
	3	SEM	0,0896	Não Atende	0,0157	Atende
		COM	0,0768	Não Atende	0,0134	Atende

LEGENDA:

- **NP**: número de pessoas caminhando.
- **BE**: presença de pessoas estacionárias.
- **CH AISC**: conforto humano conforme critério de aceleração de pico do guia de projeto do AISC [8].
- **CH ISO**: conforto humano - critério de aceleração RMS da norma ISO 2631-2 [152].
- a_p : aceleração de pico.
- a_{RMS} : aceleração RMS.

Tabela 25 - Comparação das acelerações numéricas no Piso 1 com limites normativos para direção horizontal.

Ritmo	NP	BE	ξ (%)	a_p (m/s ²)	CH AISC	a_{RMS} (m/s ²)	CH ISO
Ressonância	3	SEM	1,35	0,0991	Não Atende	0,0173	Atende
			2	0,0832	Não Atende	0,0146	Atende
			3	0,0662	Não Atende	0,0116	Atende
			4	0,0575	Não Atende	0,0101	Atende
			5	0,0557	Não Atende	0,0098	Atende
Ressonância	3	COM	1,35	0,0682	Não Atende	0,0119	Atende
			2	0,0640	Não Atende	0,0112	Atende
			3	0,0581	Não Atende	0,0102	Atende
			4	0,0521	Não Atende	0,0091	Atende
			5	0,0487	Atende	0,0085	Atende

LEGENDA:

- **NP**: número de pessoas caminhando.
- **BE**: presença de pessoas estacionárias.
- **CH AISC**: conforto humano conforme critério de aceleração de pico do guia de projeto do AISC [8].
- **CH ISO**: conforto humano - critério de aceleração RMS da norma ISO 2631-2 [152].
- a_p : aceleração de pico.
- a_{RMS} : aceleração RMS.
- ξ : taxa de amortecimento do piso.

Com base nas Tabelas 21 a 24, que sintetiza a avaliação do conforto humano de todos os casos avaliados no estudo paramétrico, considerando os critérios de aceleração de pico do guia de projeto do AISC [8] e de aceleração *RMS* da norma ISO 2631-2 [152], percebe-se que somente alguns poucos casos não tiveram o conforto humano atendido. Somente situações com 2 ou 3 pessoas, andando sincronizadas em ritmo rápido ou em ressonância, apresentaram valores acima dos limites estabelecidos nas referências. Apenas o caso de caminhada em trajetória perpendicular, em ritmo de ressonância, com três pessoas andando sobre o piso, sem consideração das pessoas estacionárias, não atendeu o critério de aceleração RMS da norma ISO 2631-2 [152]. Entretanto, por se tratar de casos específicos e tendo em vista sincronização perfeita da aplicação da força do caminhar humano no piso por ocasião do modelo numérico, apesar de o piso está calibrado numericamente, estes poucos casos não tem potencial de desqualificar o piso do ponto de vista do conforto humano, sendo necessário, para isto, validação experimental.

Outro ponto favorável, vale ressaltar novamente, é que a estrutura, durante o monitoramento experimental, não se encontrava finalizada, estando pendente os acabamentos, divisórias internas, fechamentos externos, instalações entre outros, e foi modelada numericamente desta forma. Assim, a inclusão desses componentes aumenta as taxas de amortecimento e atenuam os níveis de vibração da estrutura, sendo favoráveis portanto ao conforto dos usuários.

Em relação a variação do amortecimento da estrutura, com base na Tabela 25, pode-se observar a redução da resposta dinâmica do piso com o aumento do amortecimento da estrutura, tendo o aumento da taxa de amortecimento até 5 %, inclusive, para o caso de caminhada em trajetória perpendicular, em ritmo de ressonância, com três pessoas andando sobre o piso, com consideração das pessoas estacionárias, alterado a situação de não atendimento para atendimento do conforto humano para aceleração de pico, conforme recomendação do guia de projeto do AISC [8].

É importante discorrer também que critérios baseados em valores de aceleração de pico tendem a ser mais conservadores, pois possivelmente um ou alguns poucos picos isolados de aceleração dificilmente comprometerão o conforto de pessoas sobre o piso. Por outro lado, a principal desvantagem ao uso de um valor de aceleração *RMS* está no fato deste valor apresentar pouca sensibilidade aos eventuais choques ocorridos durante o tempo de medição, uma vez que os picos esparsos influenciam pouco nos valores finais de *RMS*.

Diante do exposto, fica evidente a importância de analisar o conforto humano quanto a sensibilidade às vibrações excessivas segundo os diferentes critérios, dando atenção aos valores máximos de aceleração ocorridos durante ensaios com a sua correspondente frequência e os valores *RMS*. Porém, o usuário final sempre será o responsável pela adequação do projeto de um piso quando às vibrações excessivas, desde que não haja queixas, neste sentido, na utilização da estrutura devido seu uso corriqueiro.

Outro ponto relevante é o fato de as acelerações estarem próximas dos limites recomendados nas referências. Logo, pode-se inferir que, para o caso de atividade humana de alto impacto, como é o caso de saltos ou ginástica rítmica, o piso investigado não deverá atender os critérios de conforto humano.

10.3 Observações finais do capítulo

No presente capítulo, foi avaliado o desempenho do Piso 1 quanto ao conforto humano devido aos níveis de vibrações provados pelo caminhar de pessoas. Assim, os valores das acelerações máximas de pico e RMS experimentais e numéricos foram comparados com os valores limites propostos na literatura técnica, concluindo que o piso investigado atende ao critério de conforto humano. No capítulo seguinte, serão apresentadas todas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

11 CONSIDERAÇÕES FINAIS

11.1 Considerações iniciais do capítulo

Este trabalho de pesquisa tem como objetivo principal o de avaliar qualitativamente e quantitativamente o efeito da interação indivíduo-estrutura sobre o comportamento dinâmico de pisos, mediante o desenvolvimento de testes experimentais e modelagem numérica, considerando-se para tal o emprego de sistemas biodinâmicos associados a sistemas do tipo “massa-mola-amortecedor”, com um grau de liberdade (S1GL), objetivando representar o comportamento dinâmico das pessoas. O piso estudado neste trabalho corresponde ao 8º pavimento de um edifício real e existente, o qual se encontrava em fase de construção no momento dos ensaios e foi projetado para ser um hospital escola de uma universidade particular na cidade de Belo Horizonte/MG.

Destaca-se que o 8º pavimento do edifício foi escolhido para a realização da campanha de ensaios experimentais (testes de vibração livre e forçada). Em paralelo, um modelo numérico tridimensional, desenvolvido via uso do MEF, por meio do emprego do programa computacional ANSYS [130], foi desenvolvido para o estudo da interação dinâmica do sistema indivíduo-estrutura, com base no uso de modelos biodinâmicos (sistema massa-mola-amortecedor), em conjunto com a utilização de modelos matemáticos tradicionais de “força dura”, de maneira a simular o caminhar das pessoas sobre a estrutura.

Após a calibração do modelo numérico, realizada de acordo com a resposta experimental, um estudo paramétrico foi desenvolvido considerando-se os seguintes elementos: interação dinâmica pessoa-estrutura; características dinâmicas dos indivíduos; modelagem matemática do caminhar; trajetórias das pessoas; frequências de passo; taxas de amortecimento. Finalmente, a resposta estrutural dinâmica do piso foi avaliada (deslocamentos e acelerações), e comparada com os valores limites propostos pelo guia de projeto do AISC [8] e pela norma internacional ISO 2631-2 [152], visando uma avaliação do conforto humano do sistema. Em seguida, apresenta-se um resumo acerca das principais conclusões alcançadas ao longo do desenvolvimento do trabalho de pesquisa.

11.2 Calibração das frequências naturais e modos de vibração

O modelo em elementos finitos do 8º pavimento do edifício investigado foi calibrado a partir de medições experimentais, inicialmente, no que diz respeito aos valores das frequências naturais da estrutura investigada. Deve-se ressaltar a modelagem via MEF desenvolvida apresentou resultados coerentes e confiáveis, pois a diferença existente entre os valores numéricos e experimentais, quanto à análise de vibração livre, apresentam valores bem ajustados, com diferenças inferiores a 3% até o 7º modo de vibração do modelo numérico.

Em seguida, com base na consideração de modelos biodinâmicos, parados e de pé sobre o piso, destaca-se que o comportamento dinâmico do sistema estrutural apresentou modificações em relação aos valores dos parâmetros modais (frequência natural, massa modal, amortecimento modal e rigidez modal), devido à presença das pessoas sobre o piso em estudo. Ao longo das análises, foi verificado que o valor da frequência fundamental do Piso 1 diminui com o aumento do número de pessoas, da ordem de 5%, tendo em mente uma variação de até 100 pessoas sobre o sistema. Por outro lado, em relação à taxa de amortecimento modal do Piso 1, obteve-se um acréscimo relativo de até 87%, demonstrando que a presença das pessoas impacta muito mais no amortecimento estrutural do piso, do que nos valores das frequências naturais.

11.3 Acelerações de pico experimentais

Em relação aos ensaios de vibração forçada, realizados via emprego de uma pessoa caminhando sobre os pisos selecionados no 8ª pavimento da edificação, observa-se na resposta da estrutura no domínio da frequência que o segundo, terceiro e nono modos de vibração do modelo são os mais excitados ($f_{02} = 6,51$ Hz, $f_{03} = 6,88$ Hz e $f_{09} = 9,25$ Hz). Isto se deve à proximidade da frequência natural destes modos de vibração com o terceiro e quarto harmônico do caminhar [$f_p(3^o h) = 3 \times 2,3 = 6,9$ Hz; $f_p(4^o h) = 4 \times 2,3 = 9,2$ Hz], resultando em valores elevados para as acelerações de pico e RMS.

Verifica-se, também, que a máxima aceleração de pico experimental encontrada foi de $0,028 \text{ m/s}^2$ e a máxima aceleração RMS experimental foi de $0,003 \text{ m/s}^2$, verificadas para caminhada humana em ritmo rápido, considerando-se a trajetória aleatória, excitando com maior amplitude a segunda, terceira e nona frequências naturais do Piso 1.

11.4 Calibração das acelerações de pico

Os modelos de carregamento representativos das ações dinâmicas impostas pelo caminhar de pessoas sobre pisos foram estudados e implementados numericamente, tendo como meta a simulação mais realista da atividade do caminhar humano, a fim de obter valores das acelerações de pico ajustadas aos testes experimentais. Assim sendo, desenvolveu-se uma estratégia de modelagem numérica com base no emprego de sistemas biodinâmicos combinados com o emprego de modelos de “força dura”, utilizados para a representação do caminhar humano. Estes modelos biodinâmicos correspondem a sistemas do tipo massa mola amortecedor acoplados diretamente na estrutura (interação total), com um grau de liberdade (S1GL), evidenciando assim o efeito da interação dinâmica indivíduo-estrutura (sistema indivíduo-estrutura).

Uma análise de sensibilidade foi desenvolvida, via utilização do método da superposição modal, de modo a determinar um número ótimo de modos de vibração do piso mais adequado à representação da resposta estrutural dinâmica do modelo numérico investigado. Este estudo é relevante, tendo em vista que um número reduzido de modos utilizado na análise por superposição modal reduz significativamente o esforço computacional. Assim sendo, foi identificada uma convergência na resposta dinâmica da estrutura a partir da utilização de 5 modos de vibração do piso, no que se refere a simulação numérica de cada um dos testes de caminhada.

Os modelos biodinâmicos foram acoplados ao modelo em elementos finitos do Piso 1, no que tange às análises de vibração forçada, de modo a representar as pessoas paradas sobre o piso (de pé sobre as lajes de concreto) e caminhando, gerando uma boa calibração da resposta estrutural dinâmica do modelo numérico com

resultados satisfatórios com relação aos valores obtidos nos testes experimentais. Assim, pode-se inferir que as propriedades dinâmicas do sistema estão bem representadas, principalmente quando considerados os biodinâmicos do modelo MC-K, pois este modelo matemático apresentou, das 18 respostas dinâmicas investigadas, onze destas com diferenças inferiores a 10%, seis com diferenças na faixa de 10% a 20%, e apenas uma com diferença superior a 30%, tendo em mente a avaliação dos valores de pico (máximos e mínimos), no que se refere à caminhada de uma pessoa sobre o Piso 1.

Em resumo, quanto aos resultados para a caminhada realizada por uma pessoa sobre as lajes de concreto, as diferenças existentes entre a resposta estrutural dinâmica fornecida via modelagem numérica em comparação com os testes experimentais, para os valores de aceleração de pico (valores máximos e mínimos, respectivamente), para o modelo matemático considerado mais ajustado neste estudo (MC-K), são os seguintes: 1 % e 34 % para a caminhada lenta ($f_p = 1,70$ Hz); 3 % e 19 % para caminhada normal ($f_p = 2,00$ Hz); e 0,5% e 19% para caminhada rápida ($f_p = 2,3$ Hz).

Como conclusão, pode-se inferir que a natureza do modelo matemático de carregamento dinâmico desenvolvido, bem como a definição das componentes harmônicas, é bastante importante para uma simulação numérica mais precisa do caminhar humano sobre pisos, nomeadamente com relação aos valores das acelerações de pico e RMS. Assim sendo, as propriedades dinâmicas do Piso 1 (massa, amortecimento e rigidez) e das pessoas devem ser inseridas na análise dinâmica de maneira precisa, tendo em vista a relevância destas grandezas para uma apropriada previsão da resposta estrutural dinâmica da estrutura, relacionada ao caminhar de indivíduos (caminhada lenta, normal e rápida).

11.5 Avaliação paramétrica da resposta dinâmica do piso investigado

Os modelos matemáticos de carregamento utilizados para desenvolvimento do estudo paramétrico realizado neste trabalho de pesquisa são simulados numericamente, via emprego dos sistemas biodinâmicos, representativos das

características dinâmicas das pessoas (massa, amortecimento e rigidez), em conjunto com os modelos de “força dura”, denominados MC-K e MC-AISC.

Em relação à variação da frequência do passo (ritmo da caminhada humana), os valores das acelerações de pico e RMS, calculados mediante emprego dos modelos de carregamento desenvolvidos neste trabalho de pesquisa, apresentaram uma tendência de crescimento com base no aumento da frequência do passo das pessoas. No entanto, ganhos significativos podem ser observados na frequência de passo de 2,17 Hz ($f_p = 2,17$ Hz), em função do terceiro múltiplo do harmônico do modelo matemático de carregamento estar próximo da frequência fundamental do Piso 1 ($f_{01} = 3 \times 2,17 = 6,51$ Hz); e, como resultado disto, a ocorrência de ressonância nesta faixa de frequência aumenta de 2 a 6 vezes os valores da resposta dinâmica do modelo em comparação aos valores fora desta faixa de frequência de passo (fora da faixa de ressonância).

Do ponto de vista da trajetória de caminhada das pessoas sobre o piso, assim como nos testes experimentais, foi verificado que a variação da geometria da trajetória dos indivíduos sobre as lajes de concreto possui impacto sobre resposta estrutural dinâmica do modelo. Neste sentido, as diferenças máximas observadas foram da ordem de 29%, com referência ao valor da aceleração RMS.

No que tange ao número de pessoas caminhando em sincronia sobre o piso em estudo, verifica-se que os valores máximos das acelerações (pico e RMS), aumentaram da ordem de 78% e 90%, respectivamente, quando o número de pessoas caminhando sobre o Piso 1 aumentou de uma para duas pessoas. Por outro lado, estes valores máximos (pico e RMS) aumentaram na faixa de 30% e 58% e 30% e 58%, respectivamente, quando o número de pessoas caminhando sobre as lajes do Piso 1 aumenta de duas para três. Observa-se, também, que fora da região de ressonância ($f_p = 2,17$ Hz), estas proporções se mantêm basicamente na mesma ordem de grandeza. Verifica-se, ainda que os valores percentuais relativos aos acréscimos dos valores da resposta dinâmica da estrutura submetida à caminhada aleatória dos indivíduos foram razoavelmente inferiores a todos os demais. Isto se deve, possivelmente, a aleatoriedade dos outros dois indivíduos que são adicionados e também a natureza da trajetória aleatória sobre o piso.

Em relação à presença (ou não) de pessoas estacionárias sobre o piso, pode-se observar que os valores máximos das acelerações (pico e RMS), diminuíram da ordem de 23% e 29%, respectivamente, quando o número de pessoas estacionárias

sobre as lajes do Piso 1 aumenta para quatro pessoas. Observa-se, também, que fora da região de ressonância ($f_p = 2,17$ Hz), essas diferenças são inferiores; e, possivelmente, isto se deve ao fato de que ocorrem alterações sensíveis das propriedades dinâmicas do sistema, principalmente referente aos valores das frequências naturais do Piso 1, causadas em função da adição das pessoas estacionárias, que, dentre outros aspectos, reduzem o efeito da ressonância. Verifica-se, ainda, que para os valores das frequências de passo mais elevadas (acima de 2,17 Hz), esta faixa de variação da resposta dinâmica se mostrou inferior.

Finalmente, em relação à variação da taxa de amortecimento da estrutura, verifica-se que os valores das acelerações de pico e RMS (sem e com o uso de sistemas biodinâmicos estacionários sobre as lajes), diminuíram da ordem de 43% e 29%, respectivamente, com base na variação da taxa de amortecimento do Piso 1 de 1,35% para 5%. Observa-se, também, que as diferenças devido à adição das pessoas (sistemas biodinâmicos estacionários) são menores na medida em que se aumenta a taxa de amortecimento estrutural do piso, diminuindo de 30% para 13%, respectivamente, quando a taxa de amortecimento aumenta de 1,35% para 5%. Isto indica que o aumento de pessoas sobre o piso causa menor influência na resposta estrutural dinâmica quanto maior for a taxa de amortecimento da estrutura.

11.6 Avaliação do conforto humano

Os valores das respostas estruturais encontradas com base na realização dos testes experimentais (vibração forçada) sobre as lajes do Piso 1 foram comparadas com os limites recomendados pela literatura técnica (AISC [8]; ISO 2631-2 [152]). O guia de projeto do AISC [8] recomenda, por exemplo, que as acelerações de pico sobre um piso sejam limitadas a 0,5% g ($0,049$ m/s²). De outra forma, a ISO 2631-2 [152], recomenda um limite para a aceleração RMS não superior a 0,02 m/s². Estes limites normativos foram considerados nesta investigação, pois se referem à ocupação do tipo “escritórios”, e dentre as atividades relacionadas nestes códigos, esta é que mais se aproxima da futura destinação da edificação em estudo.

Assim sendo, em relação aos ensaios experimentais, cabe ressaltar que todos os valores das acelerações de pico e RMS experimentais determinados nesta

investigação apresentam-se inferiores aos limites estabelecidos pelas recomendações de projeto (AISC [8]; ISO 2631-2 [152]). Destaca-se que somente situações com 2 ou 3 pessoas, andando sincronizadas em ritmo rápido ou mesmo em ressonância, produziram valores de acelerações (pico e RMS) acima dos limites estabelecidos (AISC [8]; ISO 2631-2 [152]).

Em relação à resposta dinâmica obtida numericamente, nos casos analisados no âmbito do estudo paramétrico, apenas a situação referente à caminhada das pessoas em trajetória perpendicular, com frequência de ressonância ($f_p = 2,17$ Hz), com três pessoas andando sobre o piso e sem a consideração das pessoas estacionárias, não atendeu o critério de aceleração RMS da norma ISO 2631-2 [152]. Entretanto, por se tratar de um caso muito específico, e tendo em vista a perfeita sincronização da aplicação da força dinâmica do caminhar humano sobre o piso, tal fato não apresenta potencial de par desqualificar a estrutura sob o ponto de vista do conforto humano.

Em relação à variação do amortecimento do sistema, reduções dos valores da resposta dinâmica do piso podem ser observadas com base no aumento do amortecimento estrutural (1,35% até 5%). Por exemplo, considerando-se a situação do caminhar das pessoas em trajetória perpendicular (ressonância: $f_p = 2,17$ Hz), com três pessoas caminhando sobre o piso, com consideração dos indivíduos estacionários, a avaliação final da resposta foi modificada, a partir do aumento da taxa de amortecimento, para atendimento do conforto humano (acelerações de pico), de acordo com as recomendações do AISC [8].

Outro ponto relevante, diz respeito ao fato de que durante o monitoramento experimental dinâmico a estrutura não se encontrava inteiramente finalizada, pois os acabamentos de piso, alvenarias, divisórias internas, fechamentos externos, instalações dentre outros ainda estavam incompletos; e, desta maneira, o sistema estrutural foi modelado numericamente desta forma. Assim sendo, a inclusão destes componentes seguramente irá gerar um aumento nos valores das taxas de amortecimento, contribuindo de modo favorável para ao conforto humano dos usuários do piso.

Pode-se inferir ainda que, para o caso de atividade humana de alto impacto, como é o caso de saltos ou ginástica rítmica, o piso investigado não deverá atender os critérios de conforto humano, pois as acelerações, para caminhada, já estavam nos limites das recomendações.

11.7 Considerações gerais sobre o efeito da interação dinâmica pessoa-estrutura

Considerando-se os resultados obtidos ao longo do desenvolvimento deste trabalho de pesquisa, levando-se em conta a campanha de testes experimentais realizados sobre o piso misto (aço-concreto) investigado, e a posterior calibração destes resultados via desenvolvimento da modelagem numérica em elementos finitos, cabe ressaltar que o efeito da interação dinâmica pessoa-estrutura conduziu a valores atenuados para as amplitudes da resposta estrutural do sistema, demonstrando a importância da consideração deste efeito através do emprego de modelos biodinâmicos para a simulação do caminhar humano, enfatizando a necessidade da consideração das propriedades modais dos usuários de pisos edifícios para a análise dinâmica e avaliação do conforto humano.

Este trabalho de pesquisa evidencia que a resposta teórica calculada com base na modelagem da interação dinâmica pessoa-estrutura fornece resultados consistentes com a resposta experimental, dependendo, entretanto, do modelo biodinâmico empregado nas análises, pois este apresenta influência significativa sobre a resposta dinâmica da estrutura. Portanto, destaca-se a necessidade de refinar o modelo matemático utilizado neste estudo (modelo biodinâmico: S1GL), de maneira a avançar nas investigações sobre o tema de pesquisa, principalmente no que diz respeito a determinação dos parâmetros representativos das características dinâmicas das pessoas (massa, amortecimento e rigidez), no que se refere a cada tipo de atividade humana desenvolvida sobre pisos.

11.8 Sugestões para trabalhos futuros

a) Investigação de outros modelos matemáticos para os sistemas biodinâmicos, além do S1GL utilizado neste trabalho de pesquisa, objetivando uma representação mais refinada acerca do caminhar humano sobre pisos.

b) Desenvolver simulações numéricas com a geração aleatória dos parâmetros dos modelos biodinâmicos, de modo a simular carregamentos de multidão, com diferentes configurações de grupos sobre os pisos.

c) Realização de novos ensaios experimentais no mesmo edifício e pavimento investigado neste estudo, de forma a verificar a influência do aumento o número de pessoas, e avaliando, inclusive, a nova configuração de projeto do edifício, com a obra finalizada, verificando a influência dos elementos de vedação, dos acabamentos e do mobiliário sobre a resposta dinâmica final do sistema.

d) Desenvolvimento de estudos numéricos e experimentais sobre pisos constituídas por outros tipos de materiais (concreto armado e madeira), verificando as diferenças das características dos materiais em uma análise comparativa.

e) Desenvolvimento de estudos numéricos e experimentais, de preferência no mesmo pavimento do edifício investigado neste trabalho, com outros tipos de atividade humana, tais como: dança, saltos, ginástica térmica, musculação, entre outras.

REFERÊNCIAS

- [1] GÉRADIN, M.; RIXEN, D. Mechanical vibrations. Theory and application to structural dynamics. Second Edition, New York, John Wiley & Sons, Inc., 1997.
- [2] EVOLUÇÃO da engenharia civil. Alcance Engenharia jr, 2020. Disponível em: <<https://alcancejr.com.br/evolucao-da-engenharia-civil/>>. Acesso em: 11 de novembro de 2021.
- [3] SAIDI, I.; GADA, E. F.; WILSON, J. L.; HARITOS, N. Development of passive viscoelastic damper to attenuate excessive floor vibrations. *Engineering Structures*, v. 33, p. 3317–3328, dec. 2011.
- [4] HANAGAN, L. M. Walking-induced floor vibration case studies. *Journal of Architectural Engineering*, v. 11, n. 1, mar. 2005.
- [5] COMO fica a prática de atividade física durante a pandemia de Coronavírus?. Saúde Brasil, 2020. Disponível em: < <https://saudebrasil.saude.gov.br/eu-que-ro-me-exercitar-mais/como-fica-a-pratica-de-atividade-fisica-durante-a-pandemia-de-coronavirus>>. Acesso em: 11 de novembro de 2021.
- [6] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO 10.137: Bases for design of structures – Serviceability of buildings and walkways against vibrations*, Switzerland, 2007.
- [7] OHLSSON, S. V. Floor vibration and human discomfort. PhD Thesis. Chalmers University of Technology. Gothenburg, Sweden. 1982.
- [8] MURRAY, T. M.; ALLEN, D. E.; UNGAR, E. E.; DAVIS, D. B. Steel design guide series 11: Vibrations of steel-framed structural systems due to human activity. 2nd Edition. 1st Printing. Chicago, USA: American Institute of Steel Construction, 2016.
- [9] MURRAY, T. M. Acceptability criterion for occupant- induced floor vibrations. *Engineering Journal of American Institute of Steel Construction*, v. 18, n.2, p. 62-70, 1981.
- [10] VARELA, W. D. *Modelo teórico-experimental para análises de vibrações induzidas por pessoas caminhando sobre lajes de edifícios*. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro/RJ, Brasil, 2004.
- [11] ELLIS, B. R.; LITTLER, J. D. Response of cantilever grandstands to crowd loads. Part I: Serviceability evaluation, in Proceedings of the Institution of Civil Engineers – *Structures and Buildings*, p. 235-241. 2004.
- [12] SMITH, A. L.; HICKS, S. J.; DEVINE, P. J. *Design of floors for vibrations: A new approach*. SCI Publication P354, Ascot, 2009.

- [13] SETAREH, M. Evaluation and assessment of vibrations owing to human activity. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Structures and Buildings*; v.165; p. 219–231, 2012.
- [14] RAO, S. S. Mechanical vibrations. Fifth Edition, Upper Saddle River, Pearson Education, Inc., 2010.
- [15] SILVA JUNIOR, L. A. *Análise experimental de vibrações em sistemas de piso misto de aço e concreto e avaliação de desempenho considerando o conforto humano*. 2015. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.
- [16] EL-DARDIRY, E.; WAHYUNI, E.; JI T.; ELLIS, B. R. Improving FE models of a long-span flat concrete floor using natural frequency measurements. *Journal of Computers and Structures*, v. 80, p. 2145–2156, nov. 2002.
- [17] MOREIRA, B. C., *Avaliação comparativa de pisos e edificações em estrutura metálica quanto ao critério de vibração*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal de Ouro Preto, UFOP, Ouro Preto, 2004.
- [18] MELLO, A. V. A.; *Vibrações em pisos de edificações induzidas por atividades humanas*. Dissertação de Mestrado. 189p. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ). Rio de Janeiro, 2005.
- [19] MURRAY, T. M.; ALLEN, D. E.; UNGAR, E. E. Steel design guide series 11: Floor vibrations due to human activity. 2nd printing. Chicago, USA: American Institute of Steel Construction, 2003.
- [20] EL-DARDIRY, E.; JI, T. Modelling of the dynamic behaviour of profiled composite floors. *Journal of Engineering and Structures*, v. 28, p. 567–579, mar. 2006.
- [21] DAVIS, D. B. Finite element modeling for prediction of low frequency floor vibrations due to walking. PhD Thesis. Virginia Polytechnic Institute and State University. Virginia, Estados Unidos. 2008.
- [22] ZHENG, T.; JI, T.; ELLIS, B. R. The significance of continuity in a multi-panel composite floor. *Journal of Engineering and Structures*, v. 32, p. 184–194, jan. 2010.
- [23] SETAREH, M. Vibration serviceability of a building floor structure. I: dynamic testing and computer modeling. *Journal of performance of constructed facilities*. P. 497–507, 2010.
- [24] CREȚU, D.; TULEI, E.; GHINDEA, C.; CRUCIAT, R. Vibrations induced by human activities in composite steel floor decks. Case study. In: *Steel Structures: Culture & Sustainability*, 2010, Istanbul, Turkey.

- [25] GONÇALVES, S. G. *Análise dinâmica não-linear de pisos mistos (aço-concreto) submetidos a ações humanas rítmicas*. 2011. 92f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.
- [26] FAISCA, R. G. Caracterização de cargas dinâmicas geradas por atividades humanas, 230f. Tese de Doutorado – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, BRASIL, 2003.
- [27] DALLARD, O.; FITZPATRICK, A. I.; FLINT, A.; LE BOURVA, S.; LOW, A.; MITH, R. M. R.; WILLFORD, M. *The London Millennium Footbridge*. *The Structural Engineer*, v. 79, n. 22, 2001.
- [28] PINTO, J. F. A. *Análise numérica de vibrações em sistemas de piso misto de aço e concreto e avaliação de desempenho considerando o conforto humano*. 2015. 130f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2015.
- [29] REIHER, H. E.; MEISTER, F. J. *The effect of vibration on people*. Traduzido da pela Forsch Geb. Ing, Wes: 2(11) pela U.S. Air Material Command – Tradução F-TS-616-RE, Wright Field, Ohio, p. 381-386, 1946.
- [30] LENZEN, K. H. *Vibration of steel joists-concrete slab floors*. *Engineering Journal*, v. 3, n. 3, p. 133-136, 1966.
- [31] SMITH, J. W. *The vibration of highway bridges and the effect on human comfort*. PhD Thesis, University of Bristol. Bristol, UK. 1969.
- [32] WISS, J. F.; PARMALEE, R. A. Human perception of transient vibration. *Journal of the Structural Division: ASCE*, v. 100, n. ST4, p. 773-787, 1974.
- [33] MURRAY, T. M. Design to prevent floor vibrations. *Engineering Journal*, v. AISC, n. 3ª ed., p. 82-87, 1975.
- [34] ALLEN, D. E.; RAINER, J. H. Vibration criteria for long span floors. *Canadian Journal of Civil Engineering*, v. 3, n. 2, p. 165-173, 1975.
- [35] CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION. CAN3-S16. 1-M84: Steel structures for buildings – Limits states design. Appendix G: Guide on floor vibrations. Ontario. 1989.
- [36] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 2631-2: Evaluation of human exposure to whole-body vibration - Part 2: Vibration in buildings (1 to 80 Hz), Switzerland, 1989.
- [37] BACHMANN, H. Case studies of structures with man-induced vibrations. *Journal of Structural Engineering*, v. 118, n. 3, p. 631-647, mar. 1992.
- [38] LAMAN, J. A.; MURRAY, T. M.; Design aids for walking vibrations in steel framed floors. *Engineering Journal / Second Quarter*, p.82-101,1999.

- [39] MURRAY, T. M.; ALLEN, D. E.; UNGAR, E. E. Steel design guide series 11: Floor vibrations due to human activity. 1st printing. Chicago, USA: American Institute of Steel Construction, 1997.
- [40] BATISTA, R. C.; VARELA, W. D. Medidas corretivas para vibrações de painéis contínuos de lajes de edifícios. XXX Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural, TRB0282. Brasília, DF, Brasil. 2002.
- [41] DA SILVA, J. G. S.; VELLASCO, P. C. G. DA S.; ANDRADE, S. A. L. DE; SOEIRO, F. J. da C. P.; WERNECK, R. N. Na evaluation of the dynamical performance of composite slabs. *Journal of Engineering and Structures*, v. 81, p. 1905–1913, fev. 2003.
- [42] REYNOLDS, P.; PAVIC, A. Effects of false floors on vibration serviceability of buildings floors. II: Response to pedestrian excitation. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, v. 17, n. 2, p. 75–96, may. 2003.
- [43] ARAÚJO, T. D.; DA COSTA Y. C. V. Evaluation of dynamic behavior of waffle slab to gym center. *Latin American Journal of Solids and Structures*, v. 11, p. 1114 – 31, 2005.
- [44] BACHMANN et al. Vibration problems in structures – practical guidelines, Basel (Switzerland):Institut für Baustatik und Konstruktion, Birkhäuser; 1995.
- [45] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6118*: Projeto de estruturas de concreto: Procedimento. Rio de Janeiro, 2004. 221 p.
- [46] MELLO, A. V. A.; SILVA, J. G. S. da; VELLASCO, P. C. G. da S.; ANDRADE, S. A. L. de; LIMA, L. R. O. de. Dynamic analysis of composite systems made of concrete slabs and steel beams. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 64, p. 1142–1151, 2007.
- [47] LOOSE, J. K. *Análise dinâmica de pisos mistos em aço-concreto submetidos a atividades humanas rítmicas*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal do Espírito Santo, UFES, Vitória, 2007.
- [48] BROWNJOHN, J. M. W.; MIDDLETON, C. J. Procedures for vibration serviceability assessment of high-frequency floors. *Engineering Structures*, v. 30, p. 1548–1559, jun. 2008.
- [49] SILVA, J. G. S. da; VELLASCO, P. C. G. da S.; ANDRADE, S. A. L. de. Vibration analysis of orthotropic composite floors for human rhythmic activities. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Science & Engineering*, v. 30, n. 1, p. 56-65, 2008.
- [50] ALMEIDA, R. R. S. *Análise de vibrações em sistemas estruturais para pisos mistos com joists submetidos a atividades humanas rítmicas*. 2008. 208f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

- [51] LOOSE, J. K.; FERREIRA, W. G.; DA SILVA, J. G. S. Influência das atividades humanas rítmicas sobre a resposta dinâmica de pisos mistos (aço concreto). *Revista Sul-Americana de Engenharia Estrutural, Passo Fundo*, v. 5, n. 2/3, p. 7-25, maio/dez. 2008.
- [52] HAN, W. H.; LEE, M.; MOON, K. Acceleration thresholds of vertical floor vibrations according to human perception levels in korea. *Advances in Structural Engineering*, v. 12, n. 4, 2009.
- [53] LANGER, N. A. S. *Estudo do conforto humano em pisos mistos (aço-concreto) submetidos a ações humanas rítmicas*. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2009.
- [54] LEE, K.; LEE, S.; WOO, S. Global vertical resonance phenomenon between steel building and human rhythmic excitations. *Journal of Constructional Steel Research*, v.92, p. 164–174, 2013.
- [55] COSTA-NEVES, L. F.; SILVA, J. G. S. da; LIMA, L. R. O.; JORDÃO, S. Multi-storey, multi-bay buildings with composite steel-deck floors under human-induced loads: the human comfort issue . *Journal of constructional steel research*, v.136, p. 34–46, 2014.
- [56] HICKS, S; PELTONEM, S. Design of slim floor construction against human induced vibrations. *Erstelldatum*, 2014.
- [57] GAJALAKSHMI, G.; MOHAIDEEN, J. A.; SRINIVASAN, K.; THIYAGARAJAN, P.; Mathematical model of human rhythmic activity on steel floor slab. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, v. 11, n. 7, p. 4516 – 25, Apr. 2016.
- [58] DA SILVA, J. G. S.; SIEIRA, A. C. C. F.; CAMPISTA F. F.; GASPAR C. M. R. Human comfort evaluation of a steel-concrete composite building subjected to aerobics. *Journal of Civil Engineering and Architecture*, v. 10, p. 1259-69, 2016.
- [59] HANAGAN, L. M.; MURRAY, T. M. Active control approach for reducing floor vibrations. *Journal of structural engineering*, v.123, n.11, p.1497-1505, nov.1997.
- [60] HANAGAN, L. M.; MURRAY, T. M. Experimental implementation of active control to reduce annoying floor vibrations. *Engineering Journal / Fourth Quarter*, p.123-127, 1998.
- [61] EBRAHIMPOUR, A.; SEEK R.L. A review of vibration serviceability criteria for floor structures. *Journal of Computers and Structures*, v. 83, p. 2488–94, nov. 2005.

- [62] DE SILVA, S.; THAMBIRATNAM, D. P. Dynamic characteristics of steel–deck composite floors under human-induced loads. *Journal of Computers and Structures*, v. 87, p. 1067–1076, sep. 2009.
- [63] DE SILVA, S.; THAMBIRATNAM, D. P. Vibration characteristics of concrete-steel composite floor structures. *ACI Structural Journal*, v. 108, n. 6, nov./dec. 2011.
- [64] CHEN, X.; DING, Y.; LI, A. Q.; ZHANG, Z. Q.; SUN, P. Investigations on serviceability control of long-span structures under human-induced excitation. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, v. 11, p. 57–71, mar. 2012.
- [65] GASPARGAR, C. M. R. *Análise dinâmica e controle de vibrações de pisos de edificações submetidos a atividades humanas rítmicas*. 2013. 151f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.
- [66] ALLEN, D. E.; RAINER, J. H.; PERNICA, G. Vibration criteria for assembly occupancies. *Canadian Journal of Civil Engineering*, v. 12, n. 3, p. 23-617, 1985.
- [67] BACHMANN, H. & AMMANN, W. Vibrations in structures induced by man and machines, IABSE Structural Engineering Document 3E, International Association for Bridges and Structural Engineering, ISBN 3-85748-052-X, 1987.
- [68] JI, T.; ELLIS, B. R. Floor Vibration Induced by Dance-Type Loads: Theory and Verification. *The Structural Engineer*, v. 72, n. 3, p. 37-50, fev. 1994.
- [69] ALVES, N. K. C. Cargas dinâmicas devido a pessoas em movimento. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Rio de Janeiro, 1997.
- [70] COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON. CEB 209 Vibration Problems in Structures. Practical Guidelines Bulletin d'Information. 1991.
- [71] B.R. Ellis, T. Ji, BRE Digest 426, Response of Structures Subject to Dynamic Crowd Loads, ISBN 1 86081 1744, 2004.
- [72] GASPARGAR, C. M. R.; DA SILVA, J. G. S. Influence of the human rhythmic activities modelling on the composite floors dynamic response. *Journal of Civil Engineering and Architecture Research*, vol. 2, no. 1, p. 429-437, jan. 2015.
- [73] CAMPISTA, F. F. *Análise de vibrações e estudo de conforto humano sobre pisos mistos (aço-concreto) submetidos a ações humanas rítmicas*. 2015. 117f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.
- [74] KERR, S. C. *Human induced loading on staircases*. 1988. 259 f. Tese (PhD em Engenharia). Universidade de Londres, Inglaterra.

- [75] ŽIVANOVIĆ, S., PAVIĆ, A., REYNOLDS, P. Vibration serviceability of footbridges under human-induced excitation: a literature review. *International Journal of Sound and Vibration*, v. 279, No. 1-2, p.1-74, 2005.
- [76] RACIC, V.; PAVIC, A.; BROWNJOHN, J. M. W. Experimental identification and analytical modelling of human walking forces: Literature review. *Journal of Sound and Vibration*, v. 326, n. 1-2, p. 1-49, 2009.
- [77] SACHSE, R.; PAVIC, A.; REYNOLDS, P.. Human-structure dynamic interaction in civil engineering dynamics: A literature review. *Shock and Vibration Digest*, v. 35, n. 1, p. 3-18, 2003
- [78] PEDERSEN, L.; FRIER, C.. Sensitivity of footbridge vibrations to stochastic walking parameters. *Journal of Sound and Vibration*, v. 329, n. 13, p. 2683-2701, 2010.
- [79] ŽIVANOVIĆ, S. Benchmark footbridge for vibration serviceability assessment under the vertical component of pedestrian load. *Journal of Structural Engineering*, v. 138, n. 10, p. 1193-1202, 2012.
- [80] Rainer, J.H., Pernica, G. and Allen, D.E. 1988. Dynamic Loading and Response of Footbridges, *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 15, No. 1, pp. 66–71.
- [81] JONES, C.A.; REYNOLDS, P.; PAVIC, A., Vibration serviceability of stadia structures subjected to dynamic crowd loads: A literature review, *Journal of Sound and Vibration*, v 330, n 8, p 1531-1566, April 11, 2011.
- [82] SACHSE, R.; PAVIC, A.; REYNOLDS, P. Parametric study of modal properties of damped two-degree-of-freedom crowd-structure dynamic systems, *Journal of Sound and Vibration*, 274 (3–5), 461–480, 2004.
- [83] SIM, J.; BLAKEBOROUGH, A.; WILLIAMS, M.; Modelling of joint crowd-structure system using equivalent reduced-DOF system, *Shock and Vibration*, 14 (4), 261–270, 2007.
- [84] PAVIC, A.; REYNOLDS, P. Experimental verification of novel 3DOF model for grandstand crowd-structure dynamic interaction, *26th International Modal Analysis Conference (IMAC XXVI)*, 2008.
- [85] IstructE/DCLG/DCMS JOINT WORKING GROUP. Dynamic Performance Requirements for Permanent Grandstands: Recommendations for Management Design and Assessment, Institution of Structural Engineers (IstructE), London, 2008. 60p.
- [86] SALYARDS, K. A.; HUA, Y. Assessment of dynamic properties of a crowd model for human–structure interaction modeling, *Engineering Structures*, v89, 103–110, 2015.

- [87] DA SILVA, F. T.; BRITO, H. M. B. F.; PIMENTEL, R. L. Modelling of crowd load in vertical direction using biodynamic model for pedestrians crossing footbridges, *Can. J. Civil Eng.*, v40, p. 1196–1204, 2013.
- [88] TOSO, M. A.; GOMES, H. M.; SILVA, F. T. da; PIMENTEL, R. L. Experimentally fitted biodynamic models for pedestrian–structure interaction in walking situations. *Mechanical Systems and Signal Processing*, v72-73, p590–606, 2016.
- [89] SHAHABPOOR, E.; PAVIC, A.; RACIC, V. Interaction between Walking Humans and Structures in Vertical Direction: A Literature Review. *Shock and Vibration*. Hindawi Publishing Corporation. V. 2016. 22p. 2016.
- [90] DEBONA, G. L. Monitoração Experimental e Modelagem Numérica sobre a Resposta Estrutural Dinâmica de Passarelas de Pedestres. 2016. 349f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Faculdade de Engenharia (FEN). Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Rio de Janeiro/RJ, 2016.
- [91] SHAHABPOOR, E.; PAVIC, A.; RACIC, V.; ZIVANOVIC, S. Effect of group walking traffic on dynamic properties of pedestrian structures. *Journal of Sound and Vibration*. V. 387. P. 207-225. 2017.
- [92] KUMAR, P.; KUMAR, A.; RACIC, V.; ERLICHER, S. Modelling vertical human walking forces using self-sustained oscillator. *Mechanical Systems and Signal Processing*. V. 99. P. 345-363. 2018.
- [93] CAMPISTA, D. F. *Estudo do comportamento estrutural dinâmico e avaliação do conforto humano das arquibancadas do Estádio Nacional de Brasília com base no emprego de sistemas biodinâmicos*. 2019. 273f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.
- [94] CAMPISTA, F. F. *Modelagem de sistemas biodinâmicos para avaliação do comportamento estrutural dinâmico de pisos mistos (aço-concreto) de edifícios submetidos a atividades humanas rítmicas*. 2019. 243f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.
- [95] SILVA, I. A. R. *Análise experimental e modelagem numérica para avaliação do efeito da interação pedestre-estrutura sobre o comportamento dinâmico de passarelas*. 2020. 306f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020.
- [96] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6120: Ações para o cálculo de estruturas de edificações*. Rio de Janeiro, 2019.
- [97] ŽIVANOVIĆ, S.; PAVIĆ, A.; INGÓLFSSON, E. T. Modeling spatially unrestricted pedestrian traffic on footbridges. *Journal of Structural Engineering*, v. 136, n. 10, p. 1296-1308, 2010.

- [98] JI, T.; ELLIS, B. R. Human-Structure Interaction in Vertical Vibrations. *Proceedings of the ICE-Structures and Buildings*, v.122, n.1, p.1–9, 1997.
- [99] ŽIVANOVIĆ, S.; DIAZ, I. M.; PAVIĆ, A. Influence of walking and standing crowds on structural dynamic properties. In: *Proceeding of conference & exposition on structural dynamics (IMAC XXVII)*. 2009.
- [100] SACHSE, R.. *The influences of human occupants on the dynamic properties of slender structures*. 2003. 348 f. Tese (PhD em Engenharia). Universidade de Sheffield, Inglaterra.
- [101] ISO 5982: 1981 Vibration and Shock–Mechanical Driving Point Impedance of the Human Body. *International Organisation for Standardisation (ISO)*, Geneva, Suíça, 1981.
- [102] MATSUMOTO, Y.; GRIFFIN, M. J. Mathematical models for the apparent masses of standing subjects exposed to vertical whole-body vibration. *Journal of Sound and Vibration*, v. 260, n. 3, p. 431-451, 2003.
- [103] SACHSE, R.; PAVIC, A.; REYNOLDS, P. The influence of a group of humans on modal properties of a structure. In: *Proceedings of the fourth international conference on structural dynamics*. 2002. P. 1241-1246.
- [104] REYNOLDS, P.; PAVIC, A.; IBRAHIM, Z.. Changes of modal properties of a stadium structure occupied by a crowd. In: *22nd International Modal Analysis Conference (IMAC XXII)*. Dearborn. Detroit. EUA. 2004. P. 1-10.
- [105] SALYARDS, K. A.; FIRMAN III, R. J. Human-Structure Interaction: Effects of Crowd Characteristics. *Civil Engineering Topics*, v, 4, Springer, 2011.
- [106] NHLEKO, S., ZINGONI, A., MOYO P. A variable mass model for describing load impulses due to periodic jumping. *Engineering Structures*, v.30, n 6, p.1760-1769, 2008.
- [107] FERRIS, D. P.; LOUIE, M.; FARLEY, C. T. Running in the real world: adjusting leg stiffness for different surfaces. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, v. 265, n. 1400, p. 989-994, 1998.
- [108] NIGG, B. M.; LIU, W.. The effect of muscle stiffness and damping on simulated impact force peaks during running. *Journal of biomechanics*, v. 32, n. 8, p. 849-856, 1999.
- [109] MIYAMORI, Y.; OBATA, T.; HAYASHIKAWA, T., SATO, K. Study on identification of human walking model based on dynamic response characteristics of pedestrian bridges. *The Eighth Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction*. 2001.
- [110] KIM, S-H.; CHO, K-I.; CHOI, M-S.; LIM, J-Y. Development of human body model for the dynamic analysis of footbridges under pedestrian induced excitation. *Steel Structures*, v. 8, n. 4, p. 333-345, 2008.

- [111] SILVA, F. T.; PIMENTEL, R. L. Biodynamic walking model for vibration serviceability of footbridges in vertical direction. In: *Proceeding of the 8th International Conference on Structural Dynamics (Eurodyn'11)*. 2011. P. 1090-1096.
- [112] CAPRANI, C.C., KEOGH, J., ARCHBOLD, P., FANNING, P. Enhancement Factors for the Vertical Response of Footbridges Subjected to Stochastic Crowd Loading. *Computers and Structures*, 102-103, p. 87-96, 2012.
- [113] SACHSE, R. Modelling effects of human occupants on modal properties of slender structures. *Structural Engineer*, v. 80, n. 5, p. 21, 2002.
- [114] FANNING, P.; ARCHBOLD, P.; PAVIC, A. A novel interactive pedestrian load model for flexible footbridges. In: *Proceeding of the 2005 Society for Experimental Mechanics Annual Conference on Experimental and Applied Mechanics*, Portland, Oregon, Junho. 2005. P. 7-9.
- [115] NIMMEN, K. V.; MAES, K.; ŽIVANOVIĆ, S.; LOMBAERT, G.; ROECK, G. D.; BROECK, P. V.. Identification and modelling of vertical human-structure interaction. In: *Dynamics of Civil Structures, Volume 2*. Springer, Cham, 2015. P. 319-330.
- [116] ZHENG, X.; BROWNJOHN, J. MW. Modeling and simulation of human-floor system under vertical vibration. In: *Smart Structures and Materials 2001: Smart Structures and Integrated Systems*. International Society for Optics and Photonics, 2001. P. 513-520.
- [117] MATSUMOTO, Y.; GRIFFIN, M. J. The horizontal apparent mass of the standing human body. *Journal of Sound and Vibration*, v. 330, n. 13, p. 3284-3297, 2011.
- [118] ŽIVANOVIĆ, S. et al. Design and construction of a very lively bridge. In: *Topics in Dynamics of Civil Structures, Volume 4*. Springer, New York, NY, 2013. P. 371-380.
- [119] KIM, S-H.; CHO, K-I.; CHOI, M-S.; LIM, J-Y. Development of human body model for the dynamic analysis of footbridges under pedestrian induced excitation. *Steel Structures*, v. 8, n. 4, p. 333-345, 2008.
- [120] QIN, J.W.; LAW, S.S.; YANG, Q.S.; YANG, N. Pedestrian-bridge dynamic interaction, including human participation. *Journal of Sound and Vibration*, v. 332, n. 4, p. 1107-1124, 2013.
- [121] QIN, J.W.; LAW, S.S.; YANG, Q.S.; YANG, N. Finite element analysis of pedestrian-bridge dynamic interaction. *Journal of Applied Mechanics*, v. 81, n. 4, 2014.
- [122] KIM, S.; PARK, S. Leg stiffness increases with speed to modulate gait frequency and propulsion energy. *Journal of biomechanics*, v. 44, n. 7, p. 1253-1258, 2011.

- [123] WHITTINGTON, B. R.; THELEN, D. G. A simple mass-spring model with roller feet can induce the ground reactions observed in human walking. *Journal of biomechanical engineering*, v. 131, n. 1, 2009.
- [124] MIYAMORI, Y.; OBATA, T.; HAYASHIKAWA, T., SATO, K. Study on identification of human walking model based on dynamic response characteristics of pedestrian bridges. *The Eighth Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction*. 2001.
- [125] VARELA, W. D.; BATTISTA, R. C. Um modelo para estimativa realista das vibrações em estruturas induzidas por pessoas caminhando. *Revista Sul-americana de Engenharia Estrutural, Passo Fundo*, v. 6, n. 1, 2009.
- [126] MARTIN, A. E.; SCHMIEDELER, J. P. Predicting human walking gaits with a simple planar model. *Journal of biomechanics*, v. 47, n. 6, p. 1416-1421, 2014.
- [127] FERREIRA, B. E. *Análise numérico-experimental de vibrações induzidas pelo caminhar humano sobre pisos mistos (aço-concreto)*. 2020. 186p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Departamento de Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020.
- [128] GOOGLE, INC. Google Maps. Disponível em: <<https://www.google.com.br/maps/place/R.+das+Avel%C3%A3s,+80+-+Vila+Cloris,+Belo+Horizonte+-+MG,+31744-030/@-19.8191717,-43.9476946,805m/data=!3m1!1e3!4m5!3m4!1s0xa68ff1370475c9:0x6c64bf9572ba2fa7!8m2!3d-19.8194306!4d-43.9489127>>. Acessado em: 10 outubro de 2021.
- [129] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 15812-1: Alvenaria Estrutural – Blocos cerâmicos Parte 1*. Rio de Janeiro, 2010. 41 p.
- [130] ANSYS Swanson Analysis Systems, Inc., P. O. Box 65, Johnson Road, Houston, PA, 15342-0065. Release 11.0, SP1 UP20070830, ANSYS, Inc. is a UL registered ISO 9001:2000 Company. Products ANSYS Academic Research, 2007.
- [131] CLOUGH, R. W., PENZIEN, J. *Dynamics of structures*. McGraw-Hill, 1993. 634 p.
- [132] MURRAY, T. M. Design to prevent floor vibrations. *Engineering Journal*, v. AISC, n. 3ª ed., p. 82-87, 1975.
- [133] NGUYEN, H. A. T. *Walking induced floor vibration design and control*. 2013. Tese (Doutorado) – Faculty of Engineering and Industrial Sciences. Swinburne University of Technology, Melbourne, Australia.
- [134] PCB Piezotronics. Installation and Operating Manual: Seismic, miniature (50 gm), ceramic flexural ICP accelerometer, Model 393B04. 2017.

- [135] BRUEL E KJAER. Product data: Data Acquisition Hardware. 2021.
- [136] AVELINO, A. F. Elementos Finitos: A base da tecnologia CAE: Análise Dinâmica. Ed Érica, 2008. 304 p.
- [137] INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION. *ISO 5349 – Mechanical vibration — Measurement and evaluation of human exposure to hand-transmitted vibration — Part 2: Practical guidance for measurement at the workplace*. 2001.
- [138] GOMES; P, F. Curso de Estatística Experimental. 15. Ed. Fealq, Piracicaba. 2009.
- [139] BRITO, J. L. V.; DOZ, G.N.; ÁVILA, S. M.; PIMENTEL, R. L.; BRASILIANO, A.; ROITMAN, N.; MAGLUTA, C.; BARBOSA, F. S.; NOGUEIRA, A. F. M. Avaliação do comportamento dinâmico de passarela composta localizada em Brasília. *In: XXXIV JORNADAS SUDAMERINAS DE INGENIERIA ESTRUCTURAL*, San Juan: 2010.
- [140] WILLFORD, M.; YOUNG, P. A Design Guide for Footfall Induced Vibration of Structures. *The Concrete Society Publication CCIP-016*, Trowbridge, UK, 2006.
- [141] WHEELER, J. E. Prediction and control of pedestrian-induced vibration in footbridges. *Journal of the structural division*, v. 108, n. 9, p. 2045-2065, 1982.
- [142] BROWNJOHN, J. M. W. Energy dissipation in one-way slabs with human participation. *Proceedings of the Asia-Pacific Vibration Conference*, Vol. 1, Nanyang Technological University, Singapore, p. 13–15, 1999.
- [143] CAPPELLINI, A. M. C. *an Innovative Approach To Evaluate People’S Effects on the Dynamic Behaviour*. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica, document em língua inglesa) – Department Of Mechanical Engineering, Doctoral Programme In Mechanical Engineering: Politecnico di Milano, Milão, Itália, 2015.
- [144] JI, T.; ELLIS, B. R. Human-Structure Interaction in Vertical Vibrations. *Proceedings of the ICE-Structures and Buildings*, v.122, n.1, p.1–9, 1997.
- [145] HE, W. et al. Experimental and Numerical Investigation of the Effect of Standing People on Dynamic Properties of a Beam-Like Bridge. *Mathematical Problems in Engineering*, v. 2017, 14 p., 2017.
- [146] SALYARDS, K. A.; FIRMAN III, R. J. Human-Structure Interaction: Effects of Crowd Characteristics. *Civil Engineering Topics*, v, 4, Springer, 2011.
- [147] SALYARDS, K. A.; NOSS, N. C. Experimental evaluation of the influence of human-structure interaction for vibration serviceability. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, v. 28, p. 458-465, 2014.

- [148] SIM, J. *Human-structure interaction in cantilever grandstands*. Tese (Doutorado em Engenharia, documento em língua inglesa) – University of Oxford, Oxford, Reino Unido, 2006.
- [149] TAKABATAKE, H. Dynamic analysis of rectangular plates with stepped thickness subjected to moving loads including additional mass. *Journal of Sound and Vibration* 213, v. 5, p. 829–842, 1998.
- [150] CAMPISTA, F. F., DA SILVA, J. G. S. 2017 Avaliação do conforto humano de pisos de Edificações submetidos à ginástica aeróbica com base na utilização de modelos biodinâmicos. XXXVI Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering (CILAMCE 2017). Florianópolis/SC, Brasil.
- [151] CAMPISTA, D. F., DA SILVA, J. G. S. 2016. Avaliação da resposta estrutural dinâmica das arquibancadas do estádio nacional de Brasília com base no emprego de modelos biodinâmicos. XXXVII Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering (CILAMCE 2016). Brasília/DF, Brasil, November 6-9.
- [152] INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION. *ISO 2631-2 – Mechanical vibration and shock – Evaluation of human exposure to whole-body vibration – Part 2: Vibration in Buildings (1 Hz to 80 Hz)*. 2003.
- [153] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 8800 – Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios*. Rio de Janeiro. 2008.
- [154] KALA, J.; SALAJKA, V.; HRADIL, P. Footbridge response on single pedestrian induced vibration analysis. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, v. 3, n. 2, p. 548-559, 2009.
- [155] ALLEN, D. E.; RAINER, J. H.; PERNICA, G. Vibration criteria for assembly occupancies. *Canadian Journal of Civil Engineering*, v. 12, n. 3, p. 617-623, 1985.

ANEXO A - RESPOSTAS DINÂMICAS DE TODOS OS ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Ressalta-se que os ensaios experimentais foram realizados em parceria com Ferreira [127].

A.1 - Ensaio de vibração livre [127]

A.1.1 - Aceleração no domínio do tempo [127]:

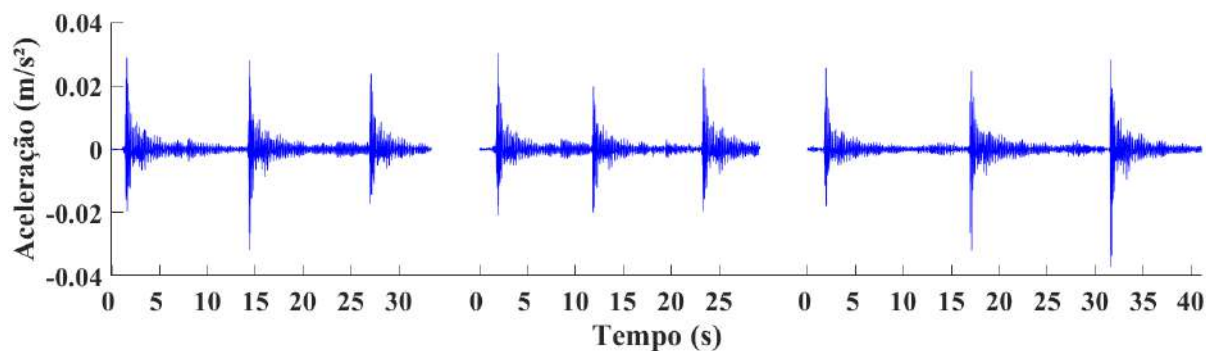


Figura A-1 – Aceleração x tempo registrada pelo canal 2, localizado no centro da laje – Piso 1.

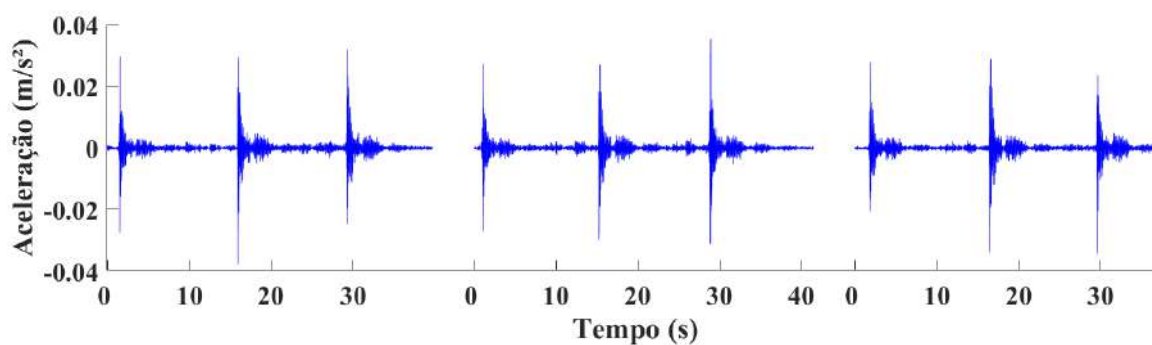


Figura A-2 – Aceleração x tempo registrada pelo canal 2, localizado no centro da laje – Piso 2.

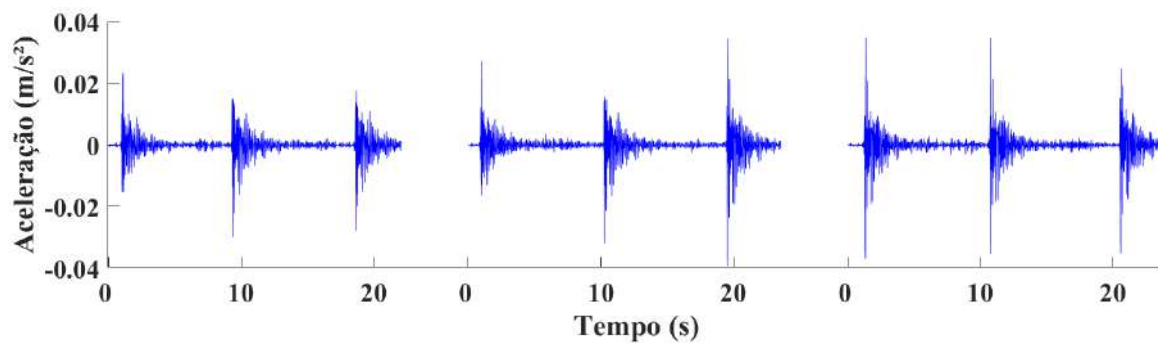


Figura A-3 – Aceleração x tempo registrada pelo canal 2, localizado no centro da laje
– Piso 3.

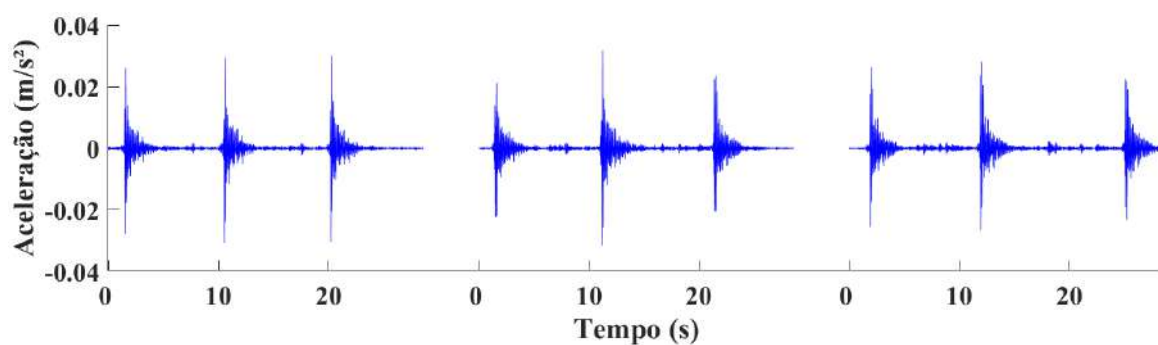


Figura A-4 – Aceleração x tempo registrada pelo canal 2, localizado no centro da laje
– Piso 4.

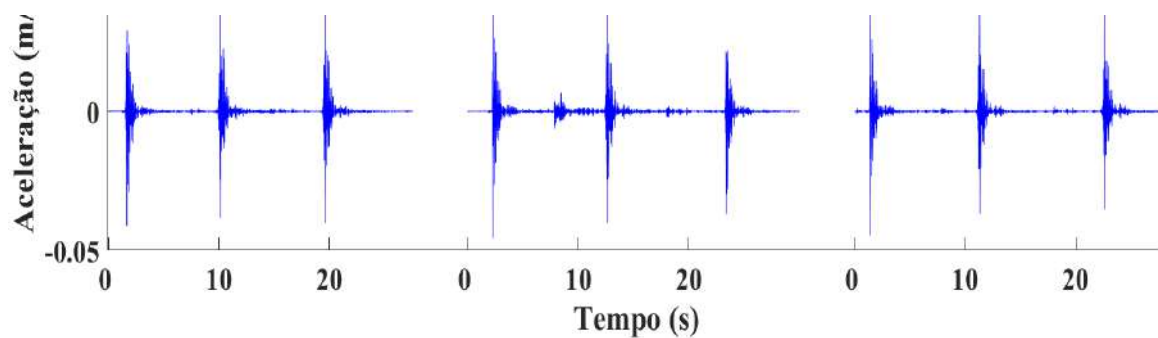


Figura A-5 – Aceleração x tempo registrada pelo canal 2, localizado no centro da laje
– Piso 5.

A.1.2 - Aceleração no domínio da frequência [127]:

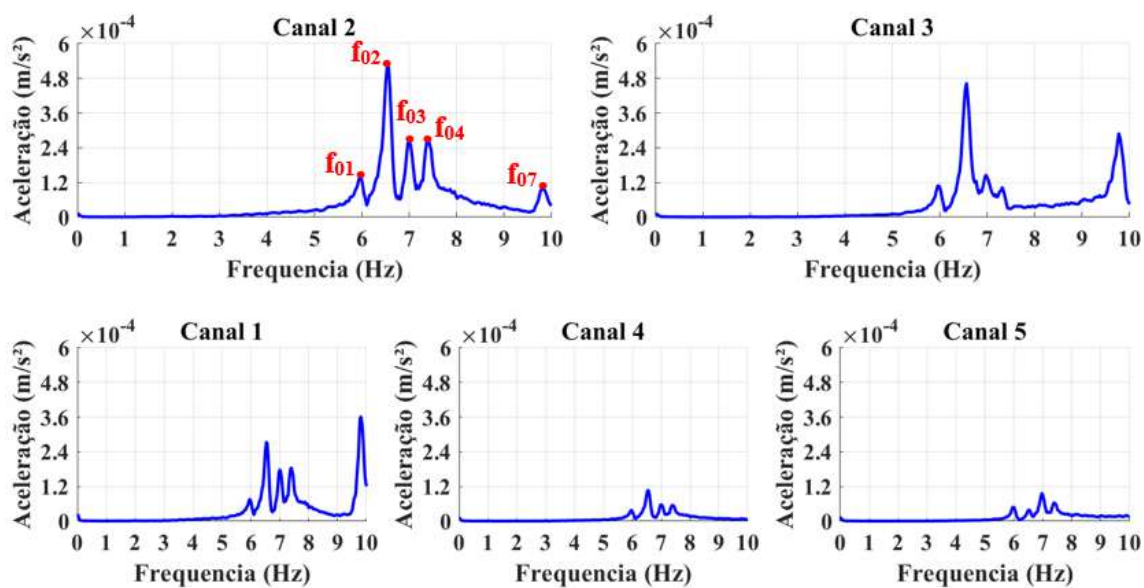


Figura A-6 – Espectros de frequências naturais da estrutura obtidos via medição experimental para impactos no centro do piso 1 ($f_{01} = 5,9$ Hz; $f_{02} = 6,5$ Hz; $f_{03} = 6,9$ Hz; $f_{04} = 7,3$ Hz; $f_{07} = 9,7$ Hz)

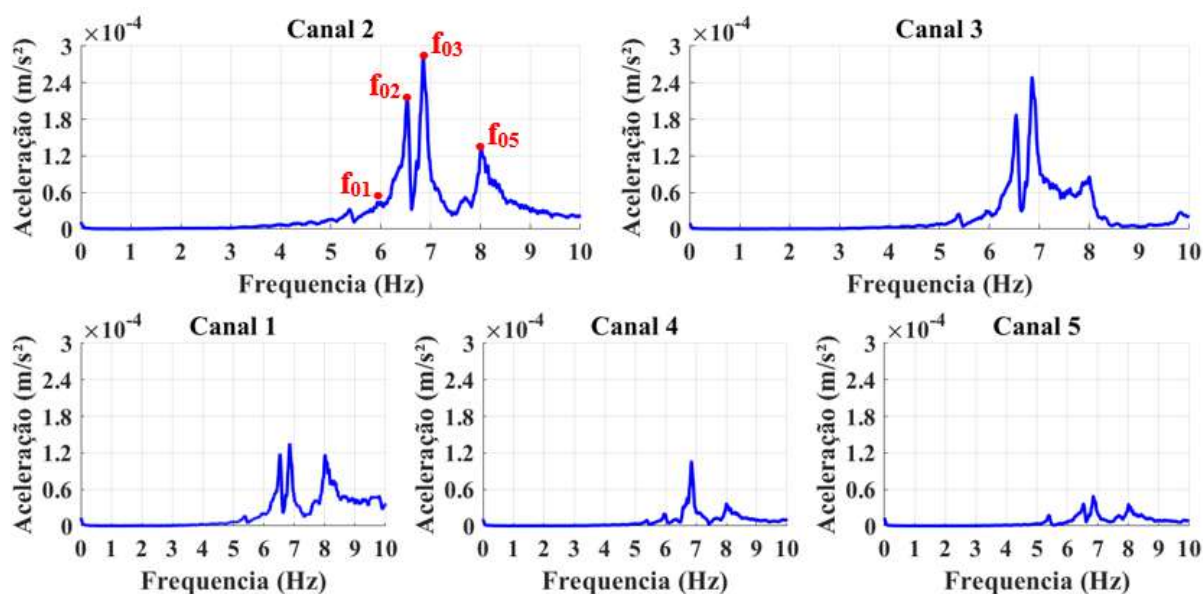


Figura A-7 – Espectros de frequências naturais da estrutura obtidos via medição experimental para impactos no centro do piso 2 ($f_{01} = 5,9$ Hz; $f_{02} = 6,5$ Hz; $f_{03} = 6,9$ Hz; $f_{05} = 8,0$ Hz)

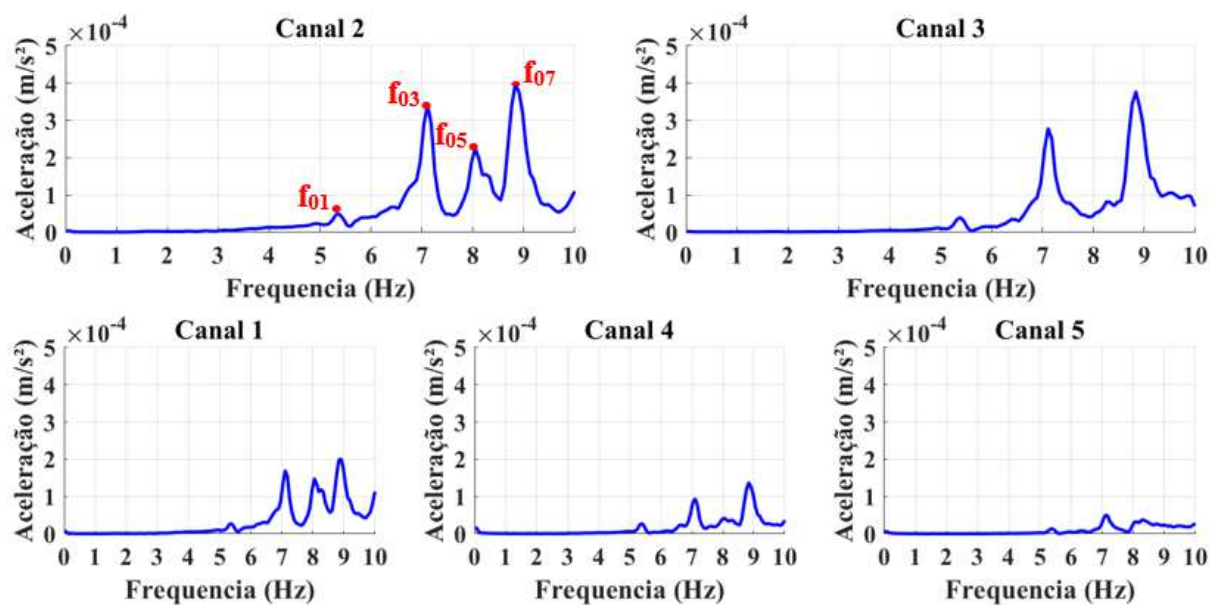


Figura A-8 – Espectros de frequências naturais da estrutura obtidos via medição experimental para impactos no centro do piso 3 ($f_{01} = 5,3$ Hz; $f_{03} = 7,1$ Hz; $f_{05} = 8,0$ Hz; $f_{07} = 8,8$ Hz)

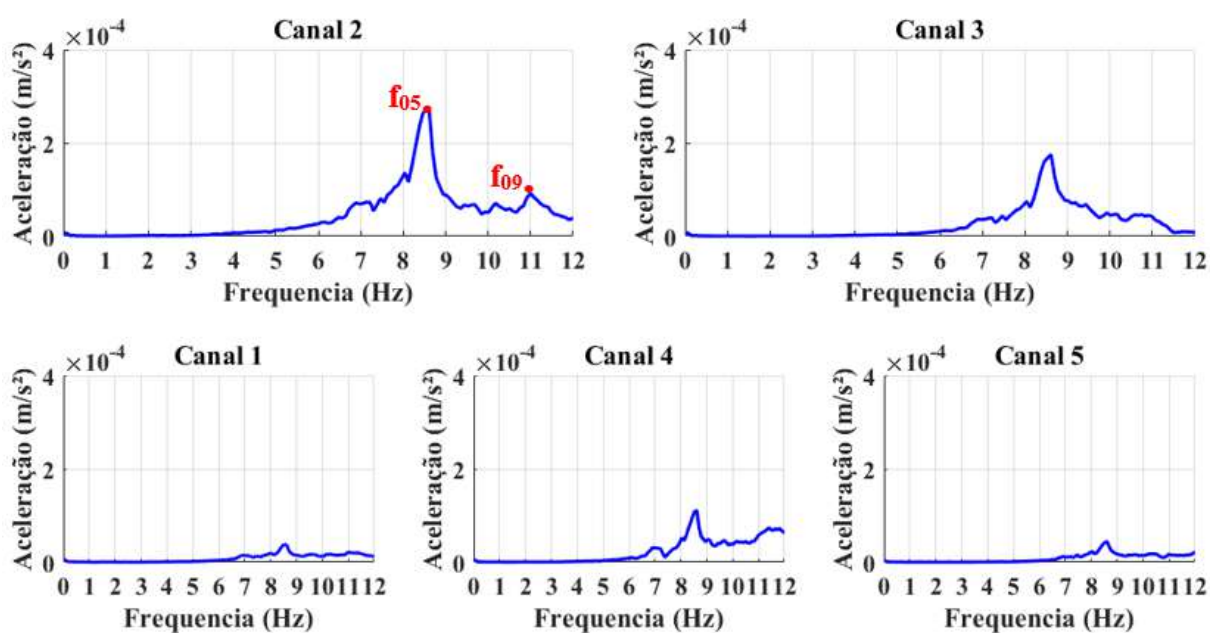


Figura A-9 – Espectros de frequências naturais da estrutura obtidos via medição experimental para impactos no centro do piso 4 ($f_{06} = 8,5$ Hz; $f_{09} = 11,0$ Hz)

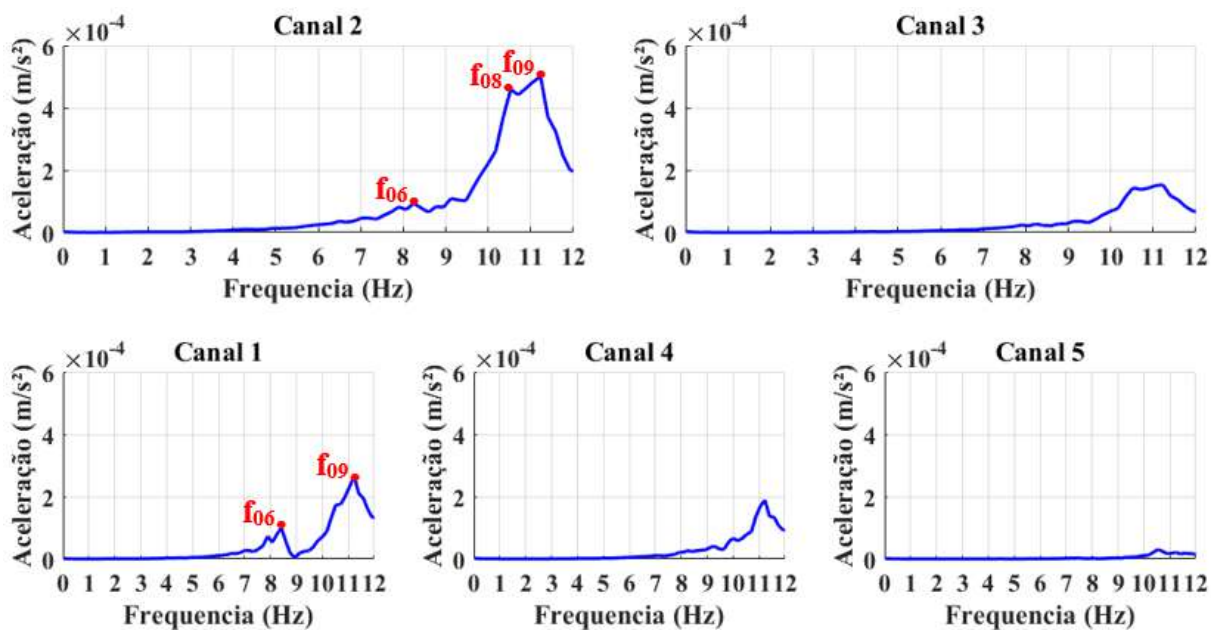


Figura A-10 – Espectros de frequências naturais da estrutura obtidos via medição experimental para impactos no centro do piso 5 ($f_{06} = 8,4$ Hz; $f_{08} = 10,6$ Hz; $f_{09} = 11,2$ Hz)

A.2 - Ensaios de vibração forçada [127]

A.2.1 Piso 1

A.2.1.1 Caminhada lenta

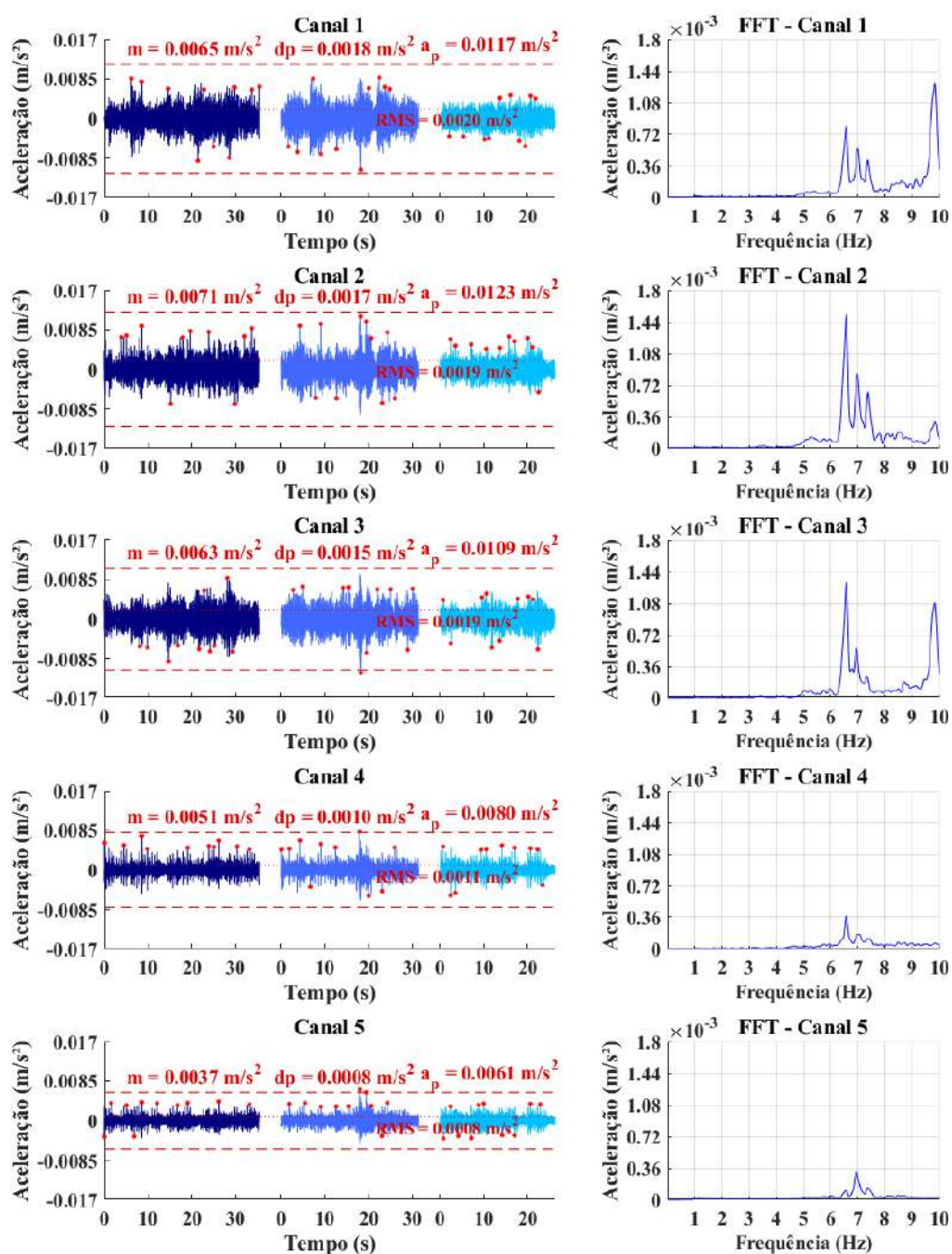


Figura A-11 – Resposta dinâmica do piso 1 para caminhada lenta em trajetória aleatória.

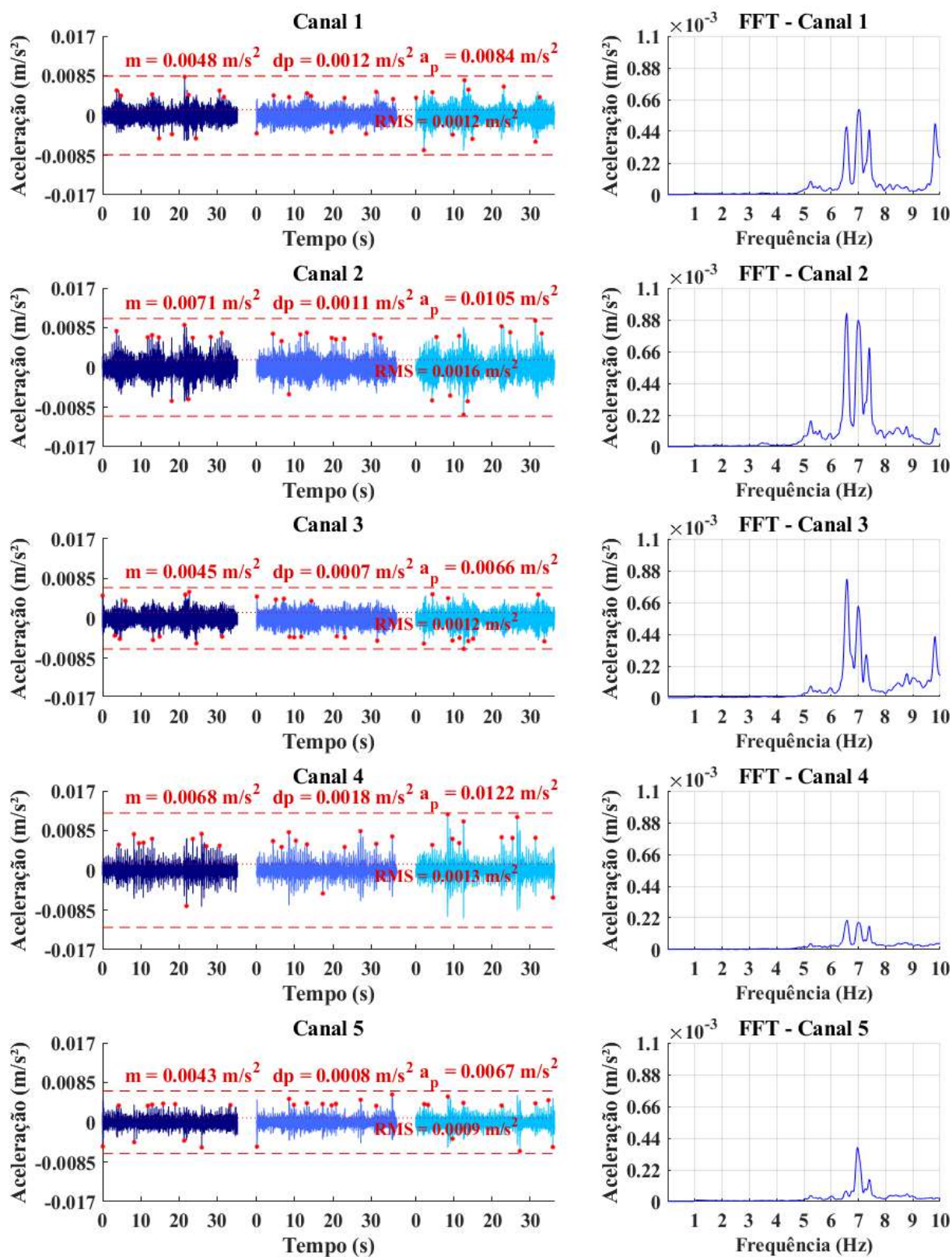


Figura A-12 – Resposta dinâmica do piso 1 para caminhada lenta em trajetória diagonal.

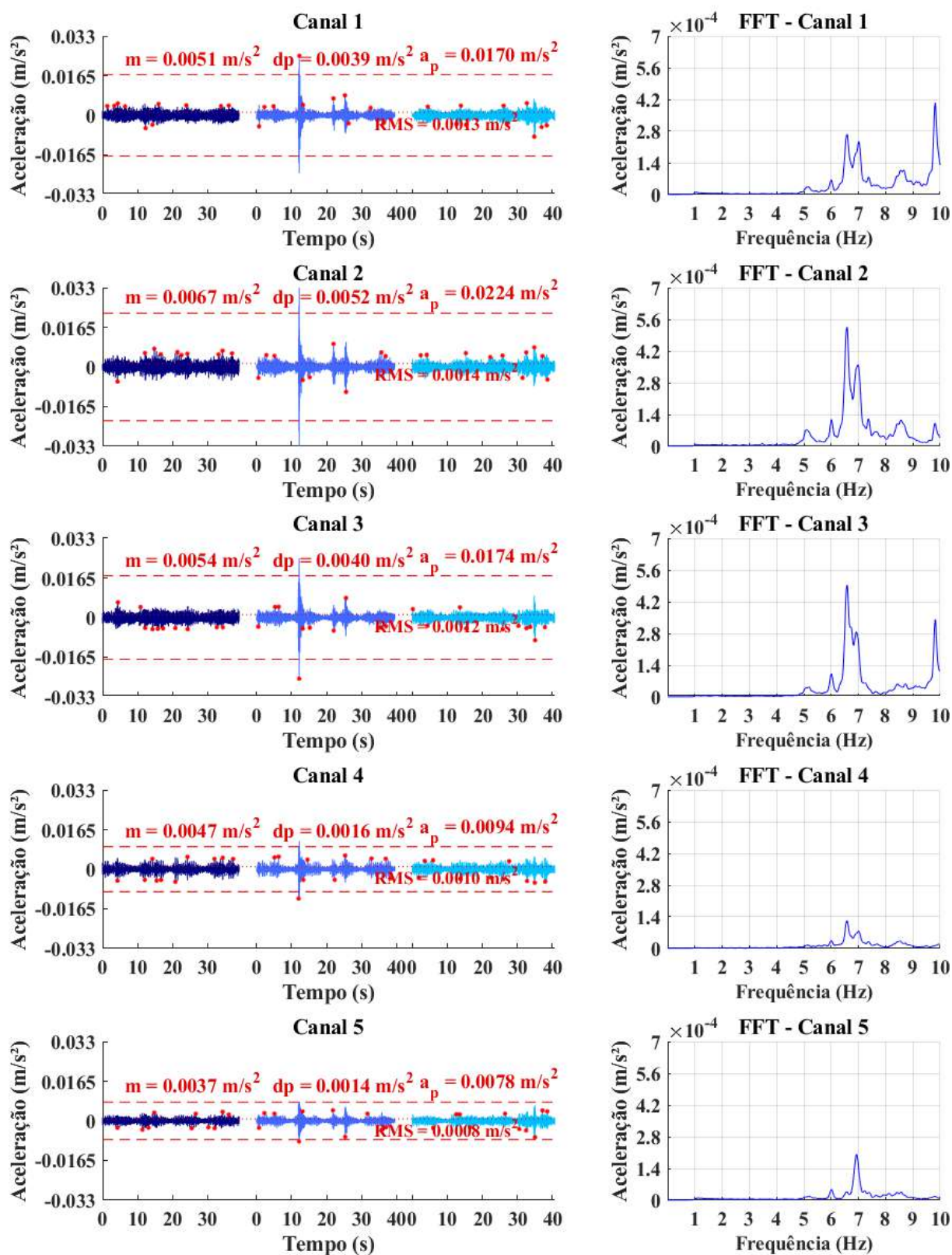


Figura A-13 – Resposta dinâmica do piso 1 para caminhada lenta em trajetória paralela.

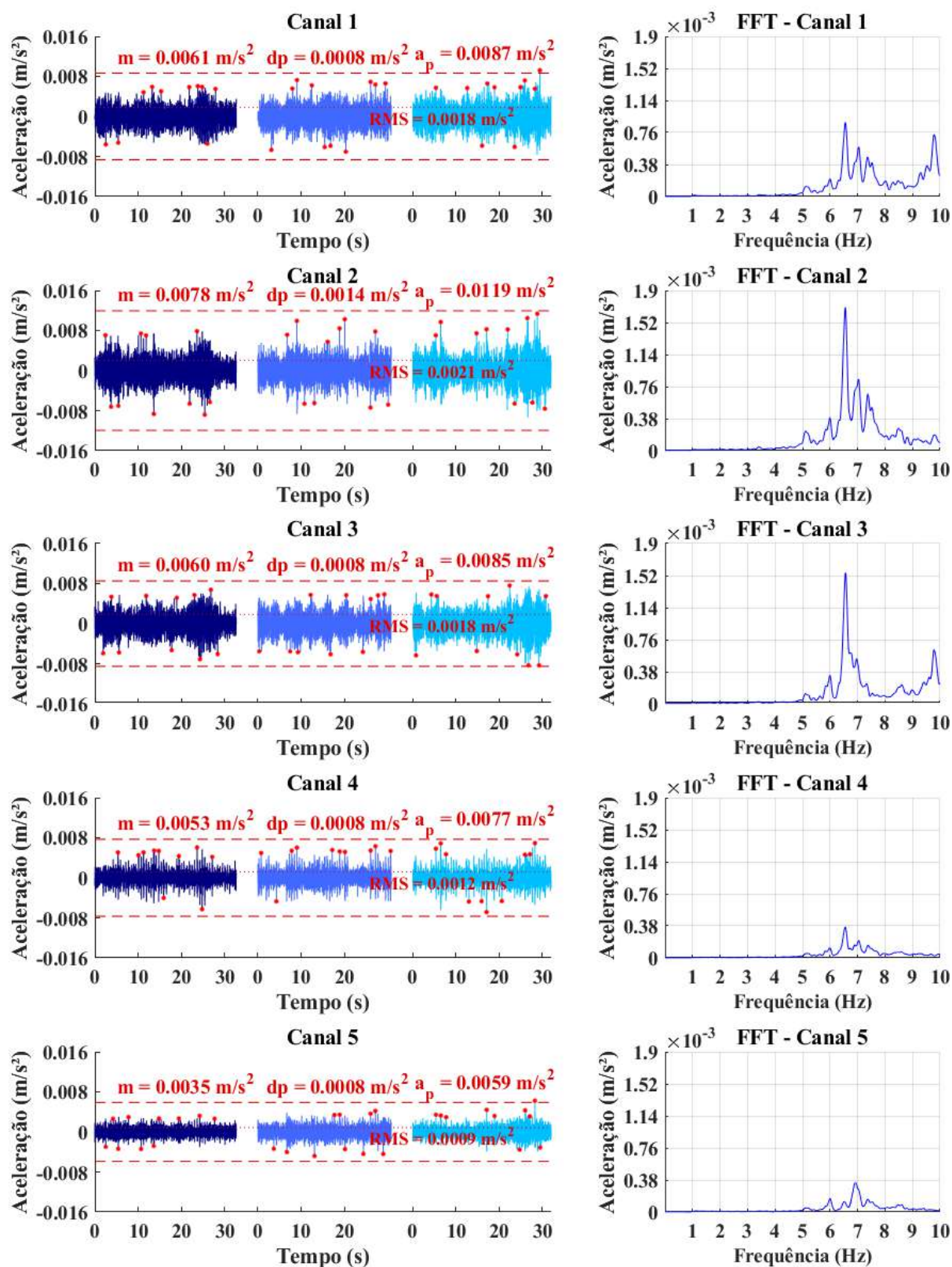


Figura A-14 – Resposta dinâmica do piso 1 para caminhada lenta em trajetória perpendicular.

A.2.1.2 Caminhada normal

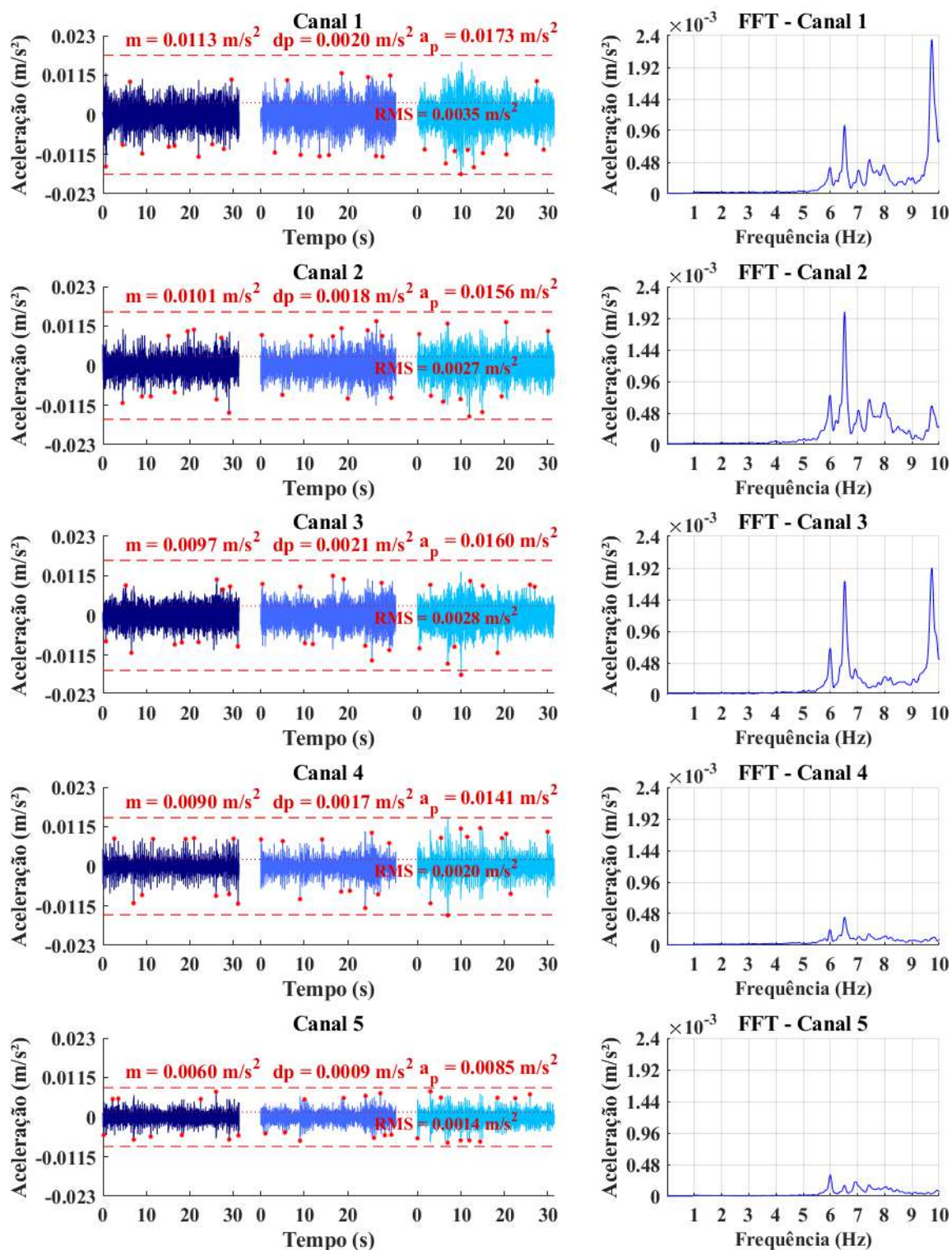


Figura A-15 – Resposta dinâmica do piso 1 para caminhada normal em trajetória aleatória.

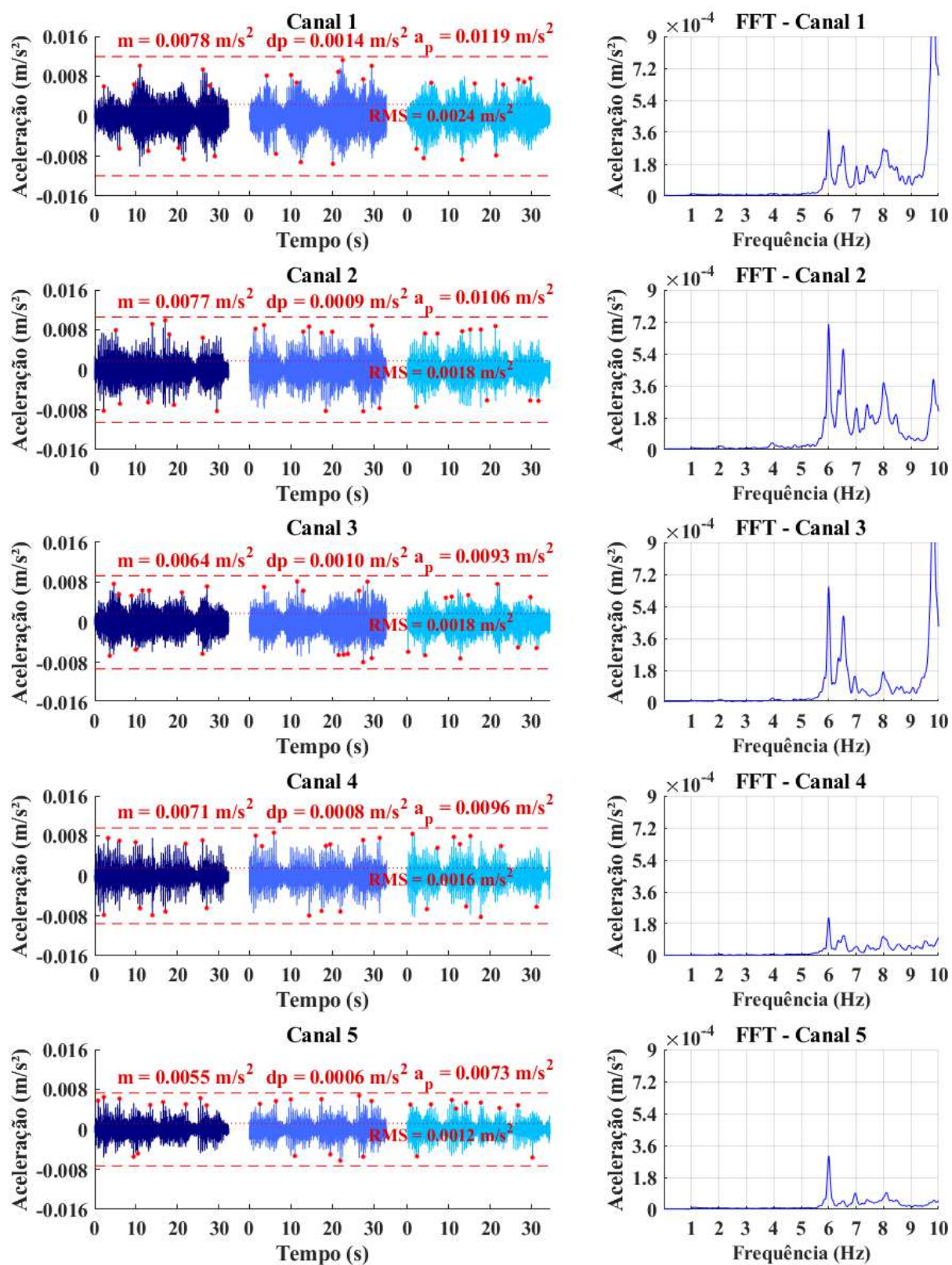


Figura A-16 – Resposta dinâmica do piso 1 para caminhada normal em trajetória diagonal.

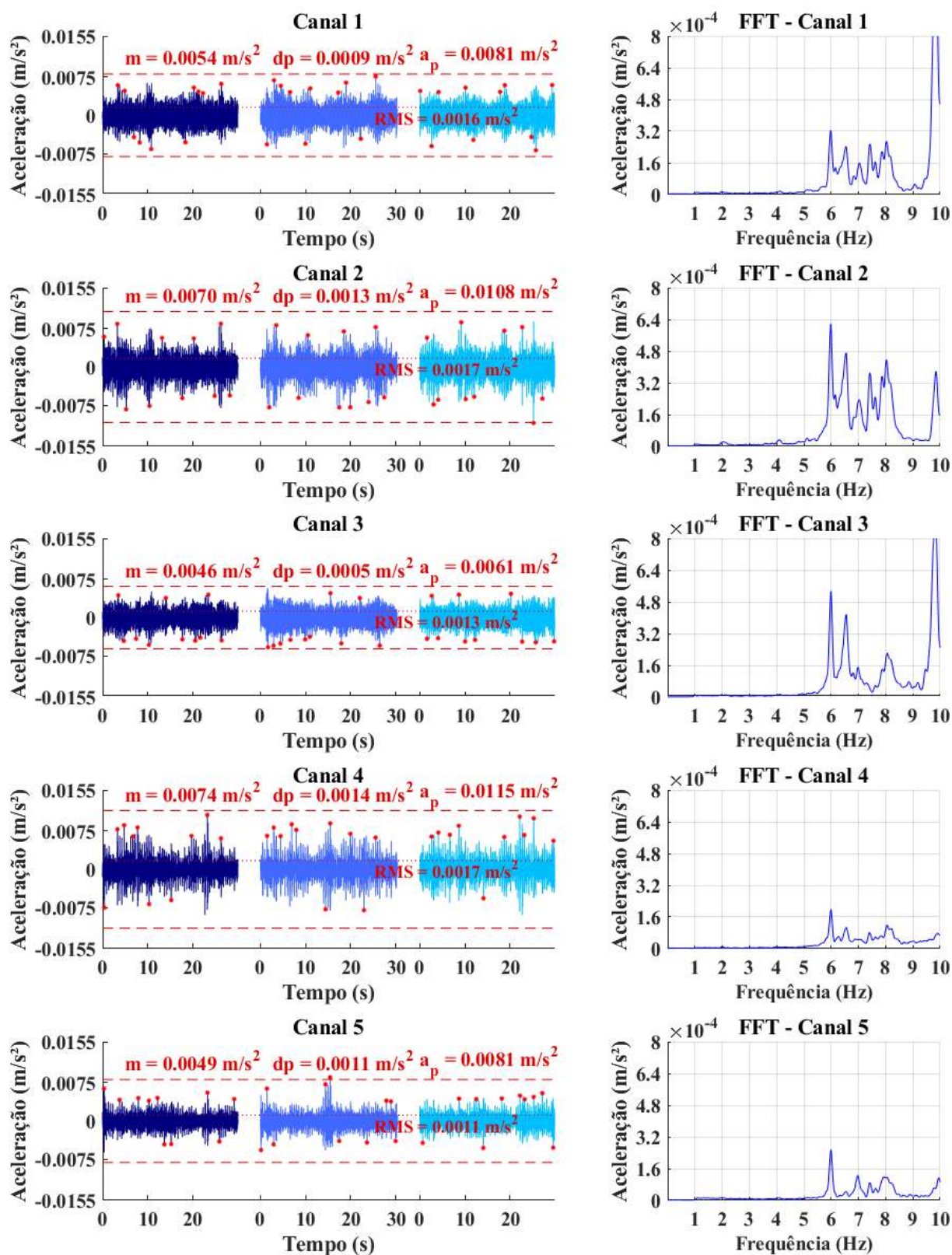


Figura A-17 – Resposta dinâmica do piso 1 para caminhada normal em trajetória paralela.

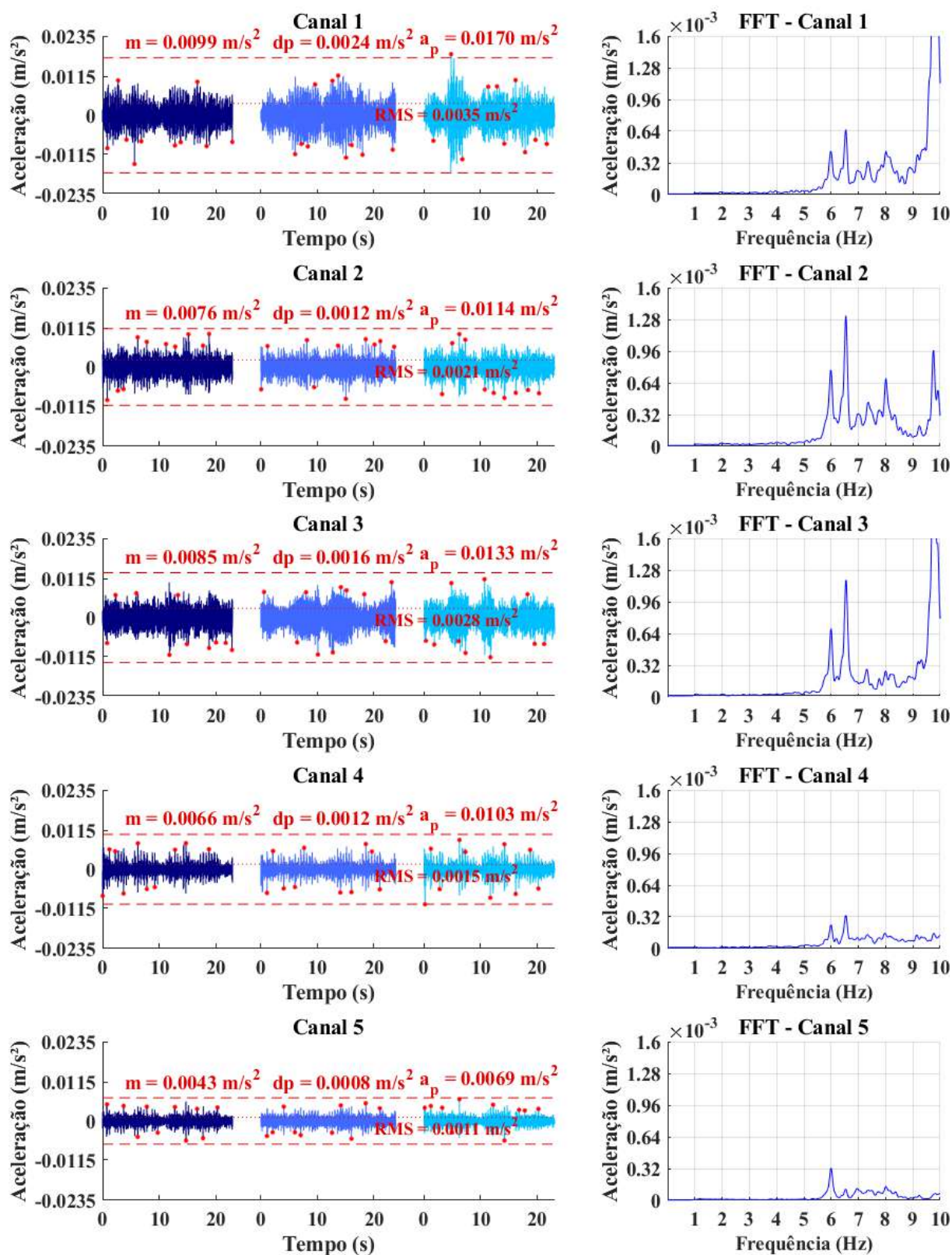


Figura A-18 – Resposta dinâmica do piso 1 para caminhada normal em trajetória perpendicular.

A.2.1.3 Caminhada rápida

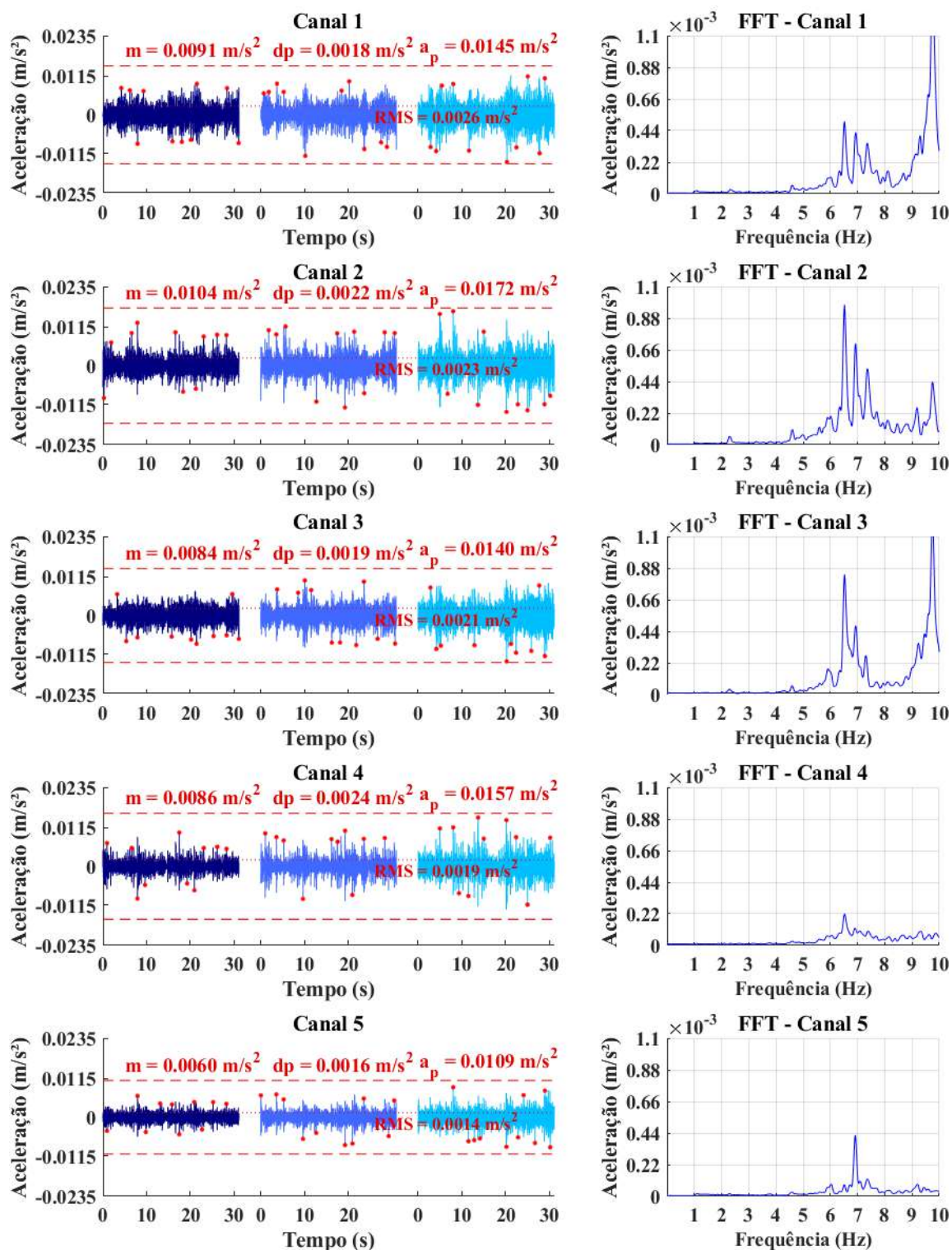


Figura A-19 – Resposta dinâmica do piso 1 para caminhada rápida em trajetória aleatória.

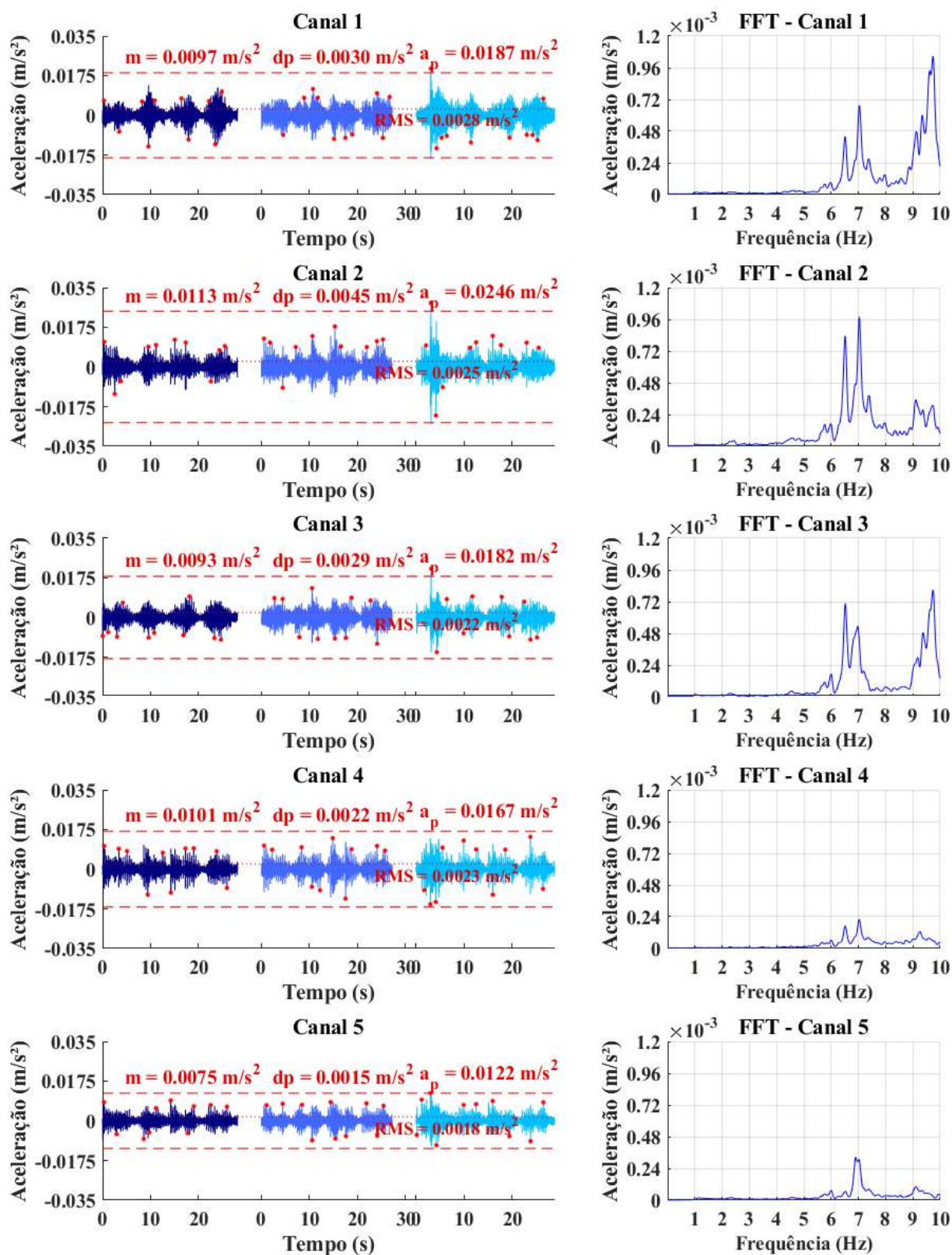


Figura A-20 – Resposta dinâmica do piso 1 para caminhada rápida em trajetória diagonal.

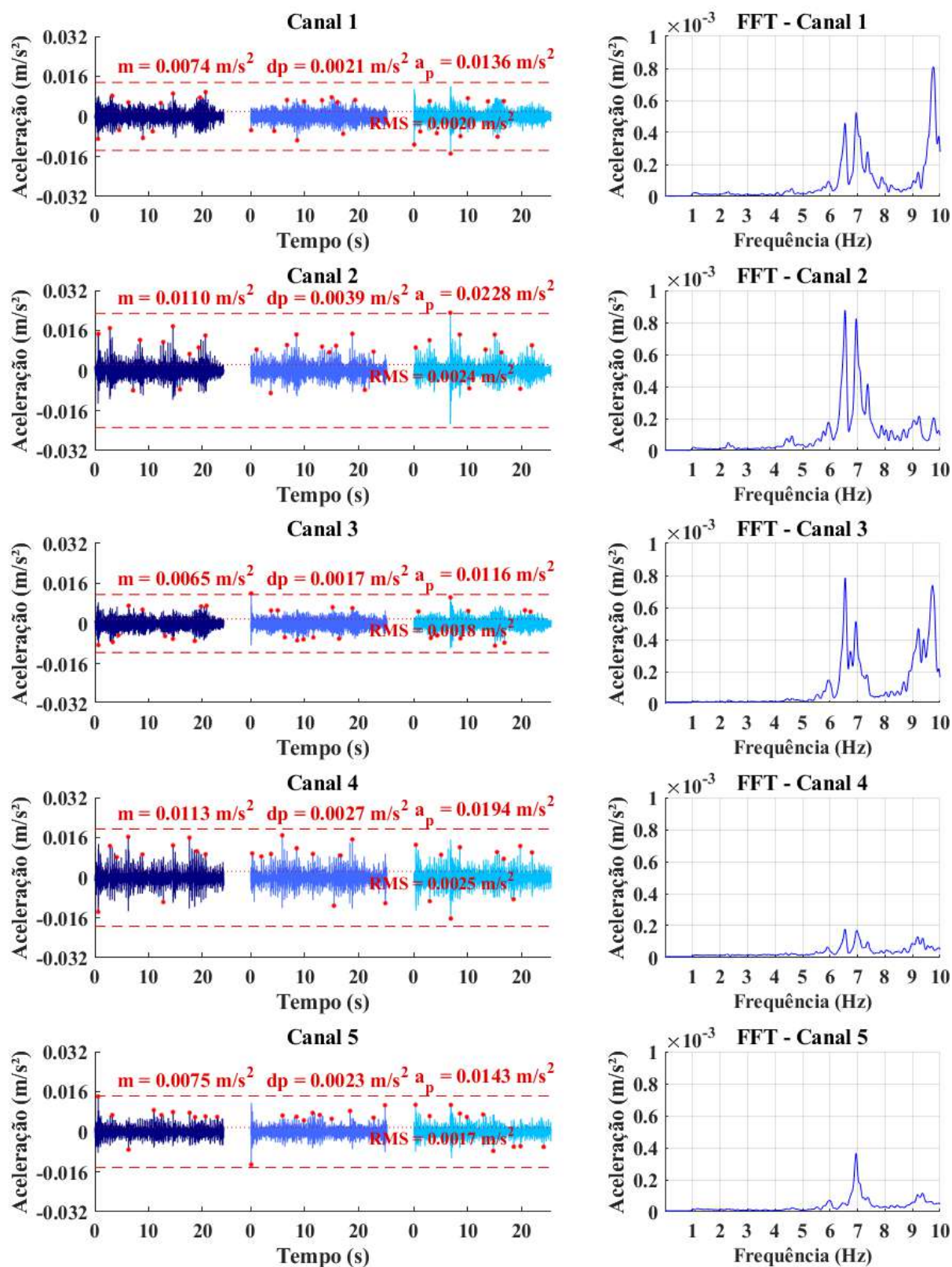


Figura A-21 – Resposta dinâmica do piso 1 para caminhada rápida em trajetória paralela.

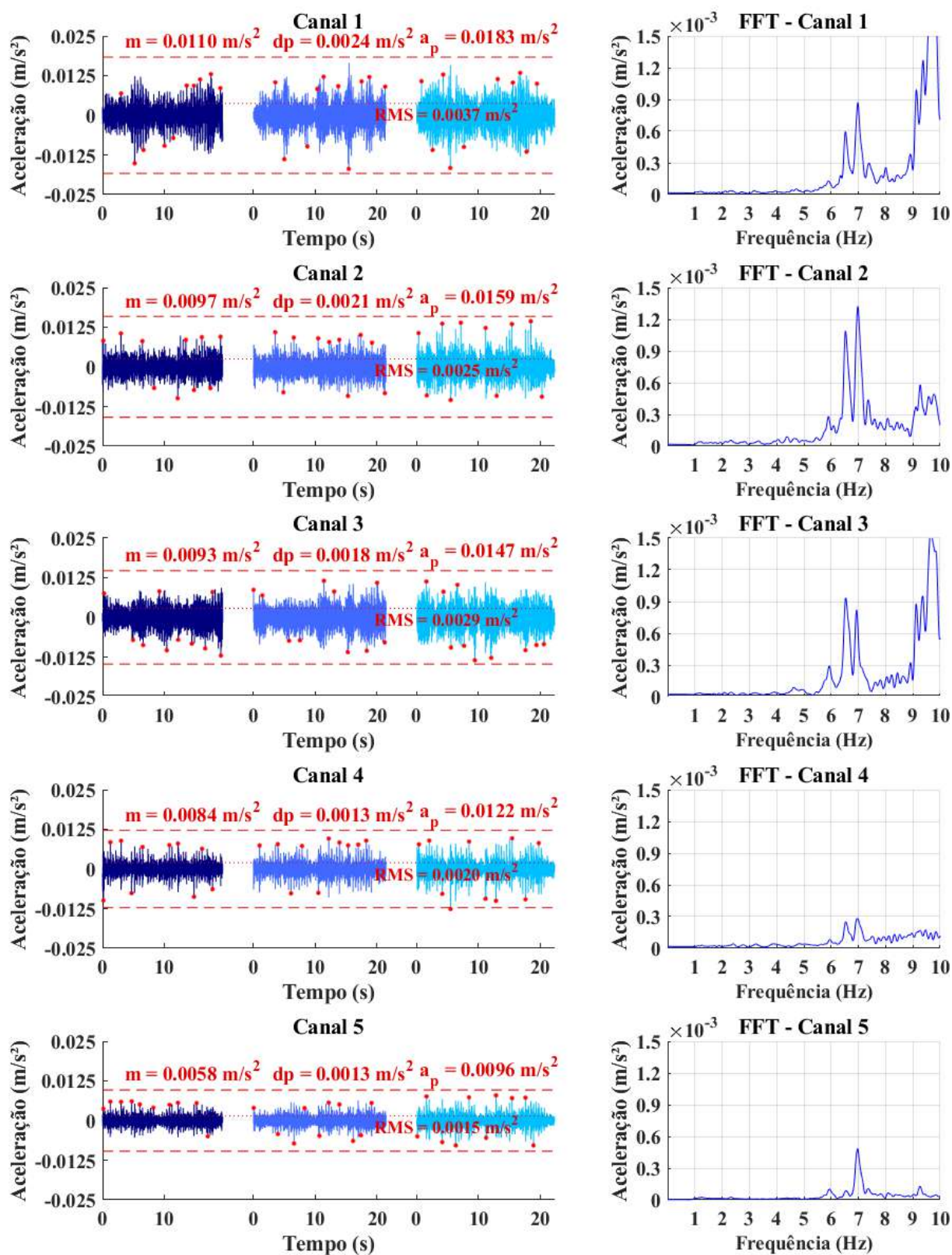


Figura A-22 – Resposta dinâmica do piso 1 para caminhada rápida em trajetória perpendicular.

A.2.2 Piso 2

A.2.2.1 Caminhada lenta

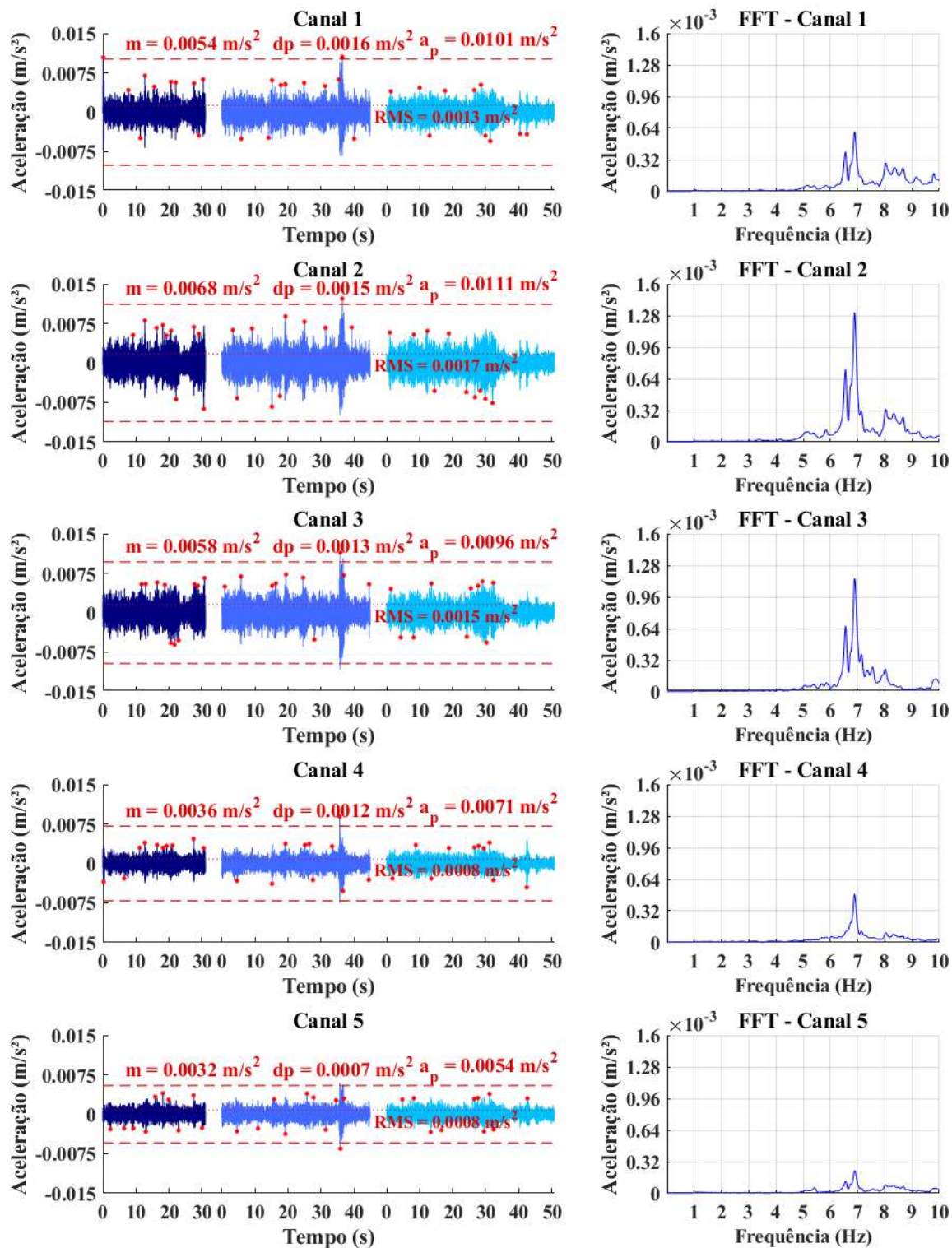


Figura A-23 – Resposta dinâmica do piso 2 para caminhada lenta em trajetória aleatória.

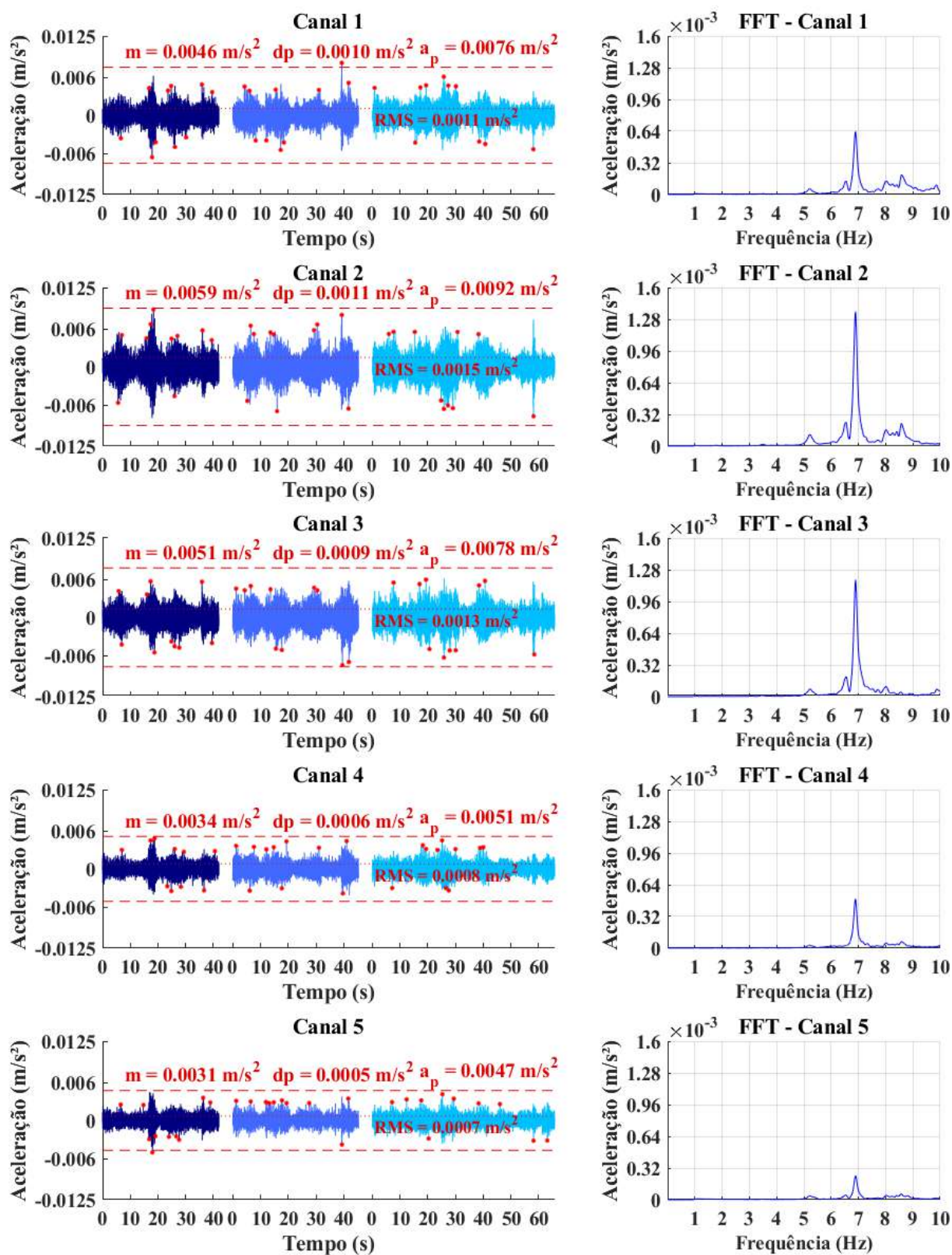


Figura A-24 – Resposta dinâmica do piso 2 para caminhada lenta em trajetória diagonal.

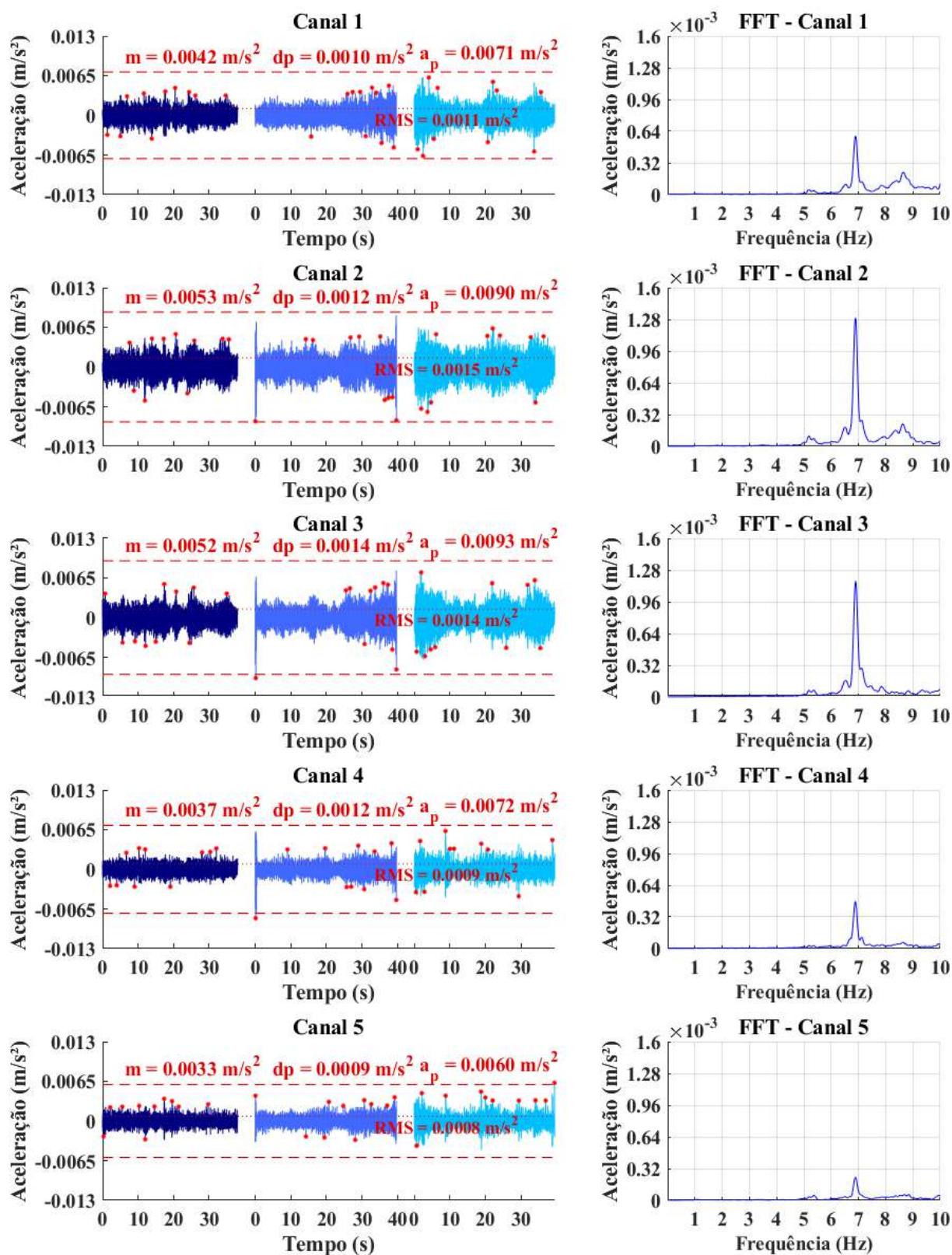


Figura A-25 – Resposta dinâmica do piso 2 para caminhada lenta em trajetória paralela.

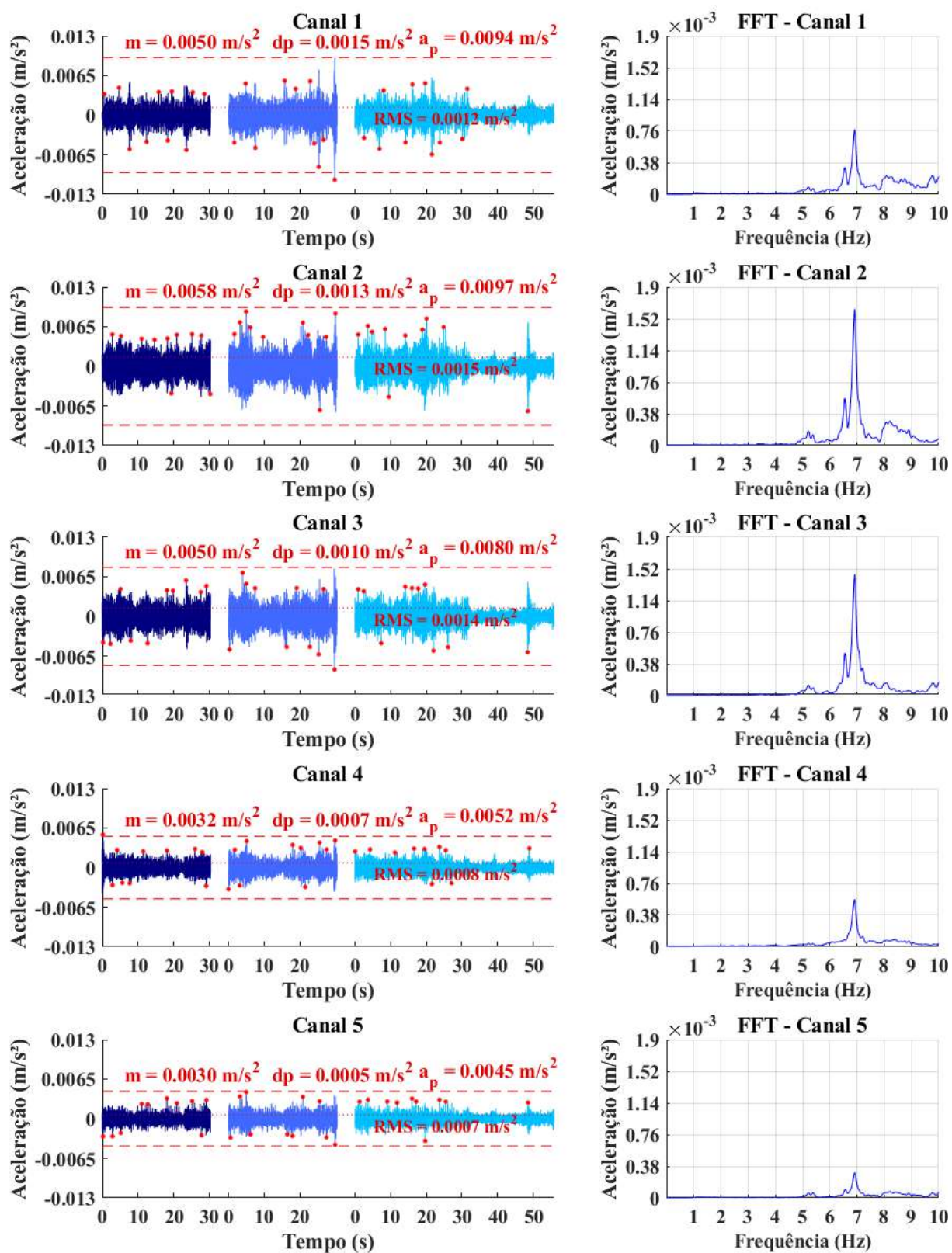


Figura A-26 – Resposta dinâmica do piso 2 para caminhada lenta em trajetória perpendicular.

A.2.2.2 Caminhada normal

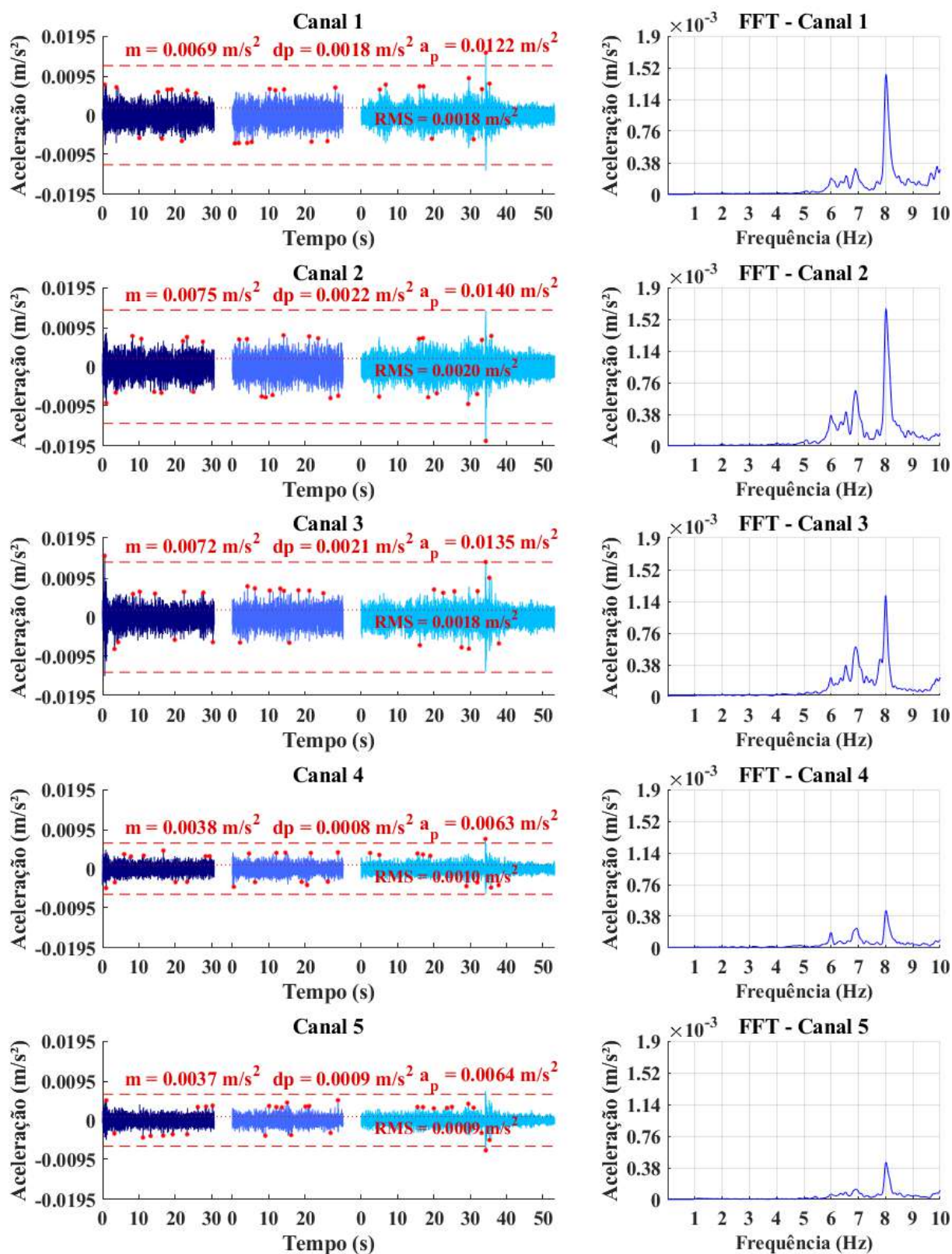


Figura A-27 – Resposta dinâmica do piso 2 para caminhada normal em trajetória aleatória.

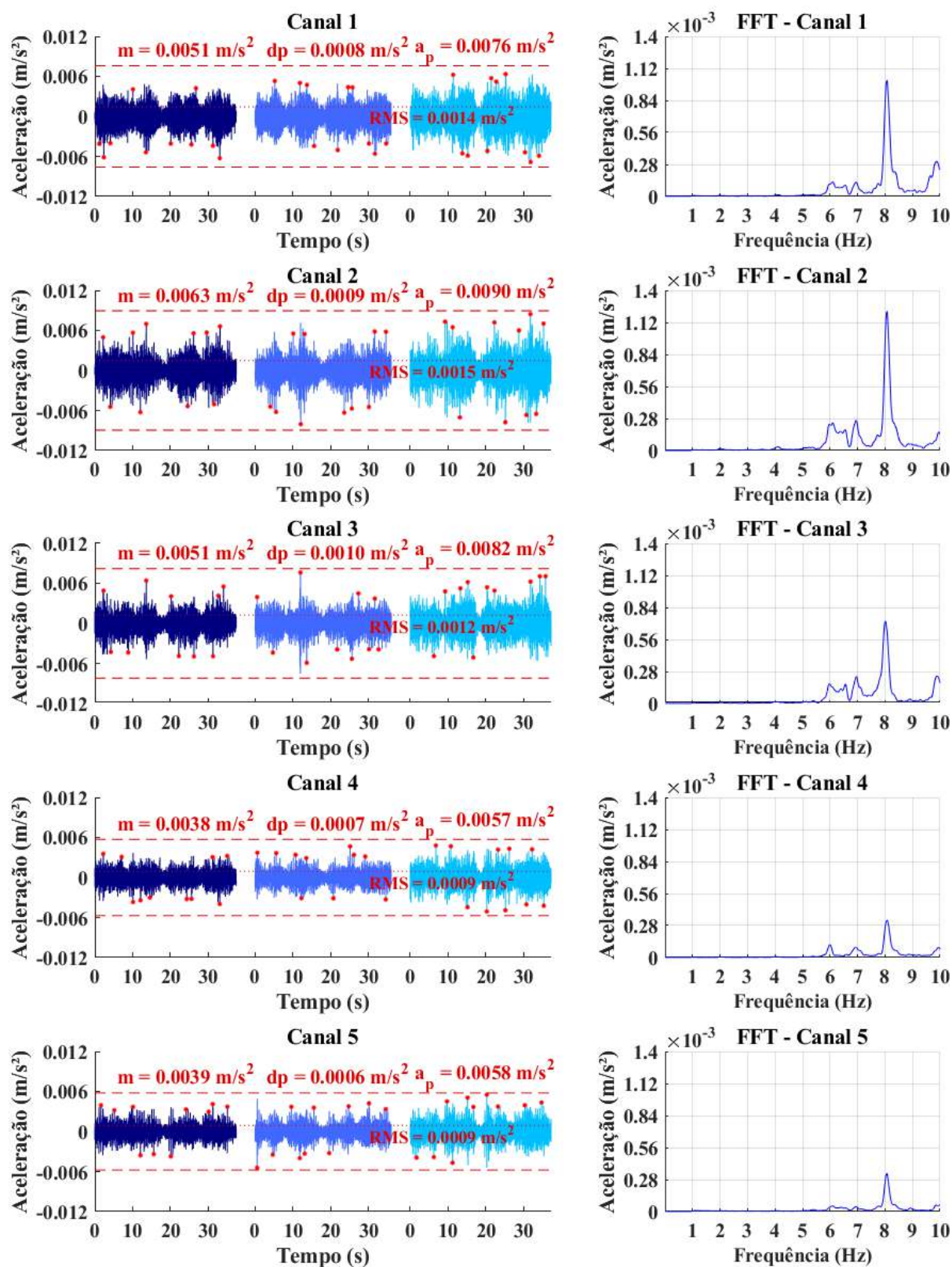


Figura A-28 – Resposta dinâmica do piso 2 para caminhada normal em trajetória diagonal.

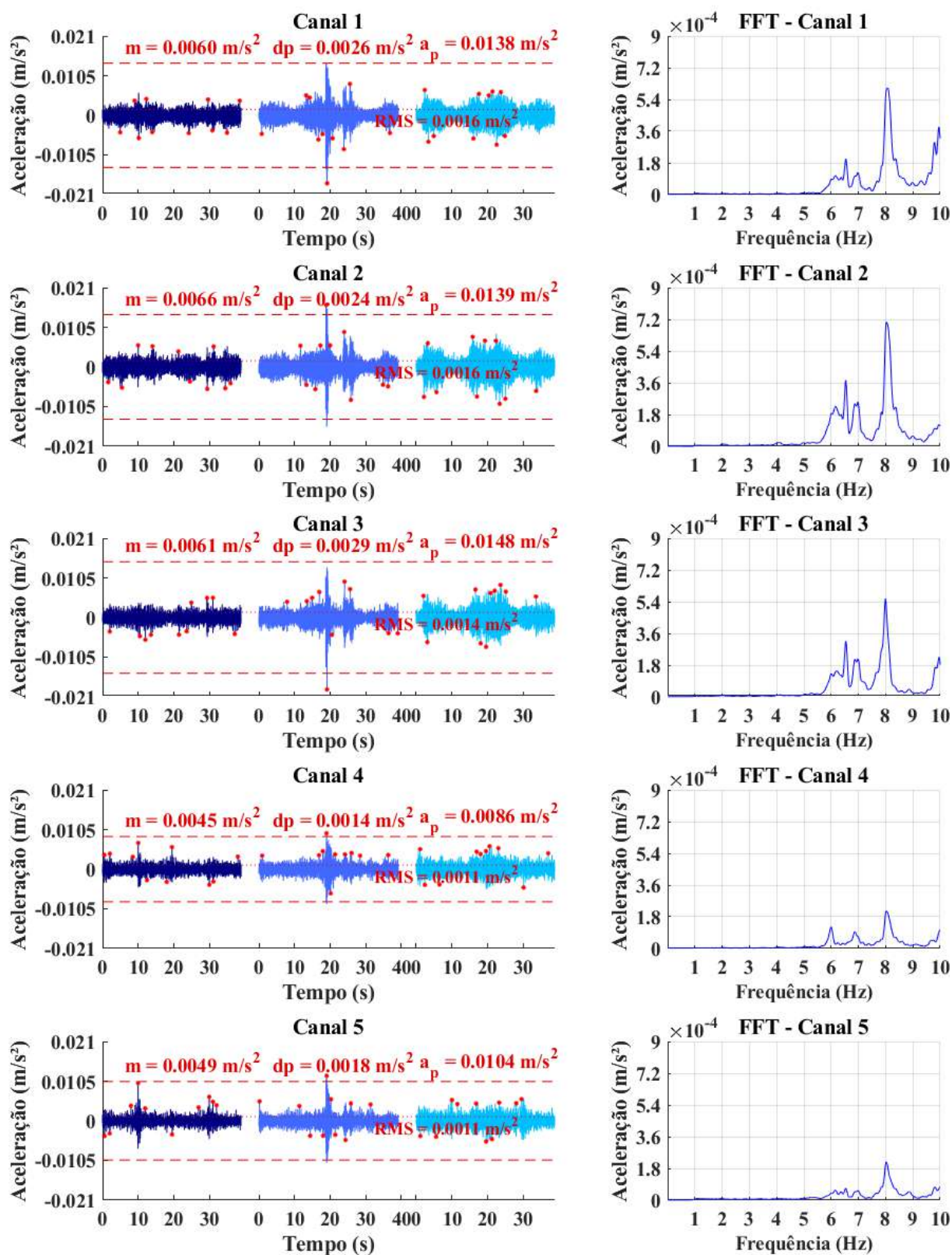


Figura A-29 – Resposta dinâmica do piso 2 para caminhada normal em trajetória paralela.

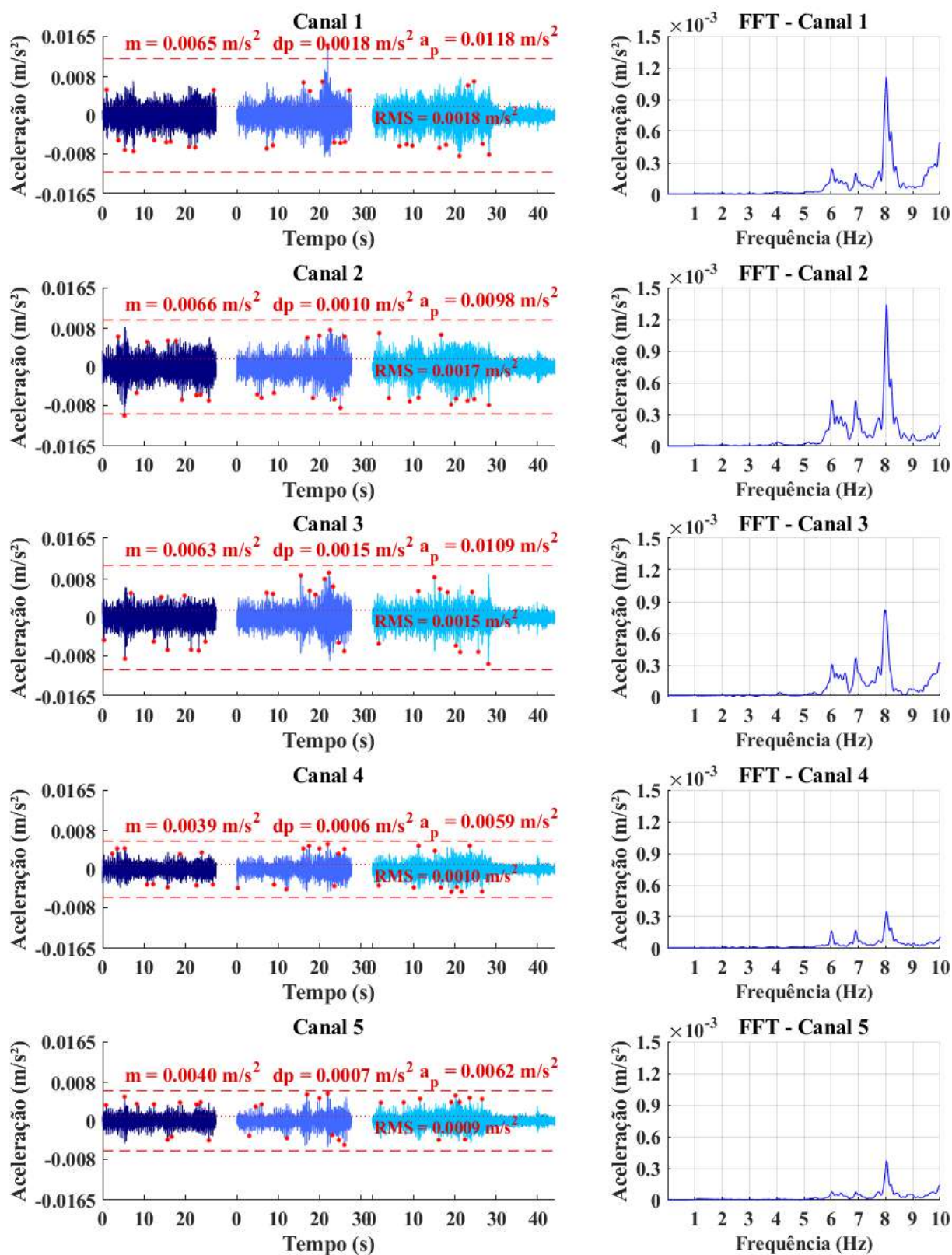


Figura A-30 – Resposta dinâmica do piso 2 para caminhada normal em trajetória perpendicular.

A.2.2.3 Caminhada rápida

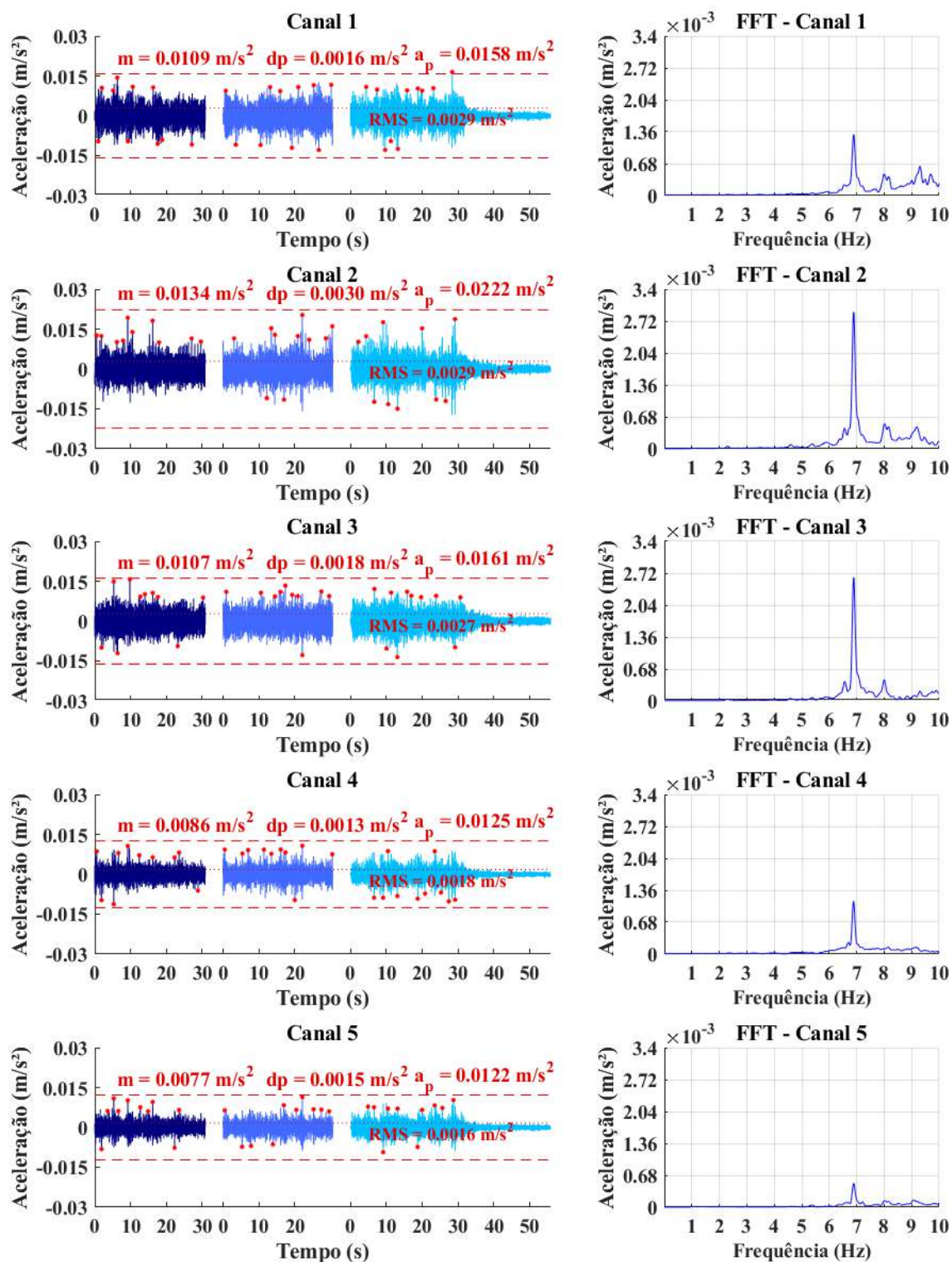


Figura A-31 – Resposta dinâmica do piso 2 para caminhada rápida em trajetória aleatória.

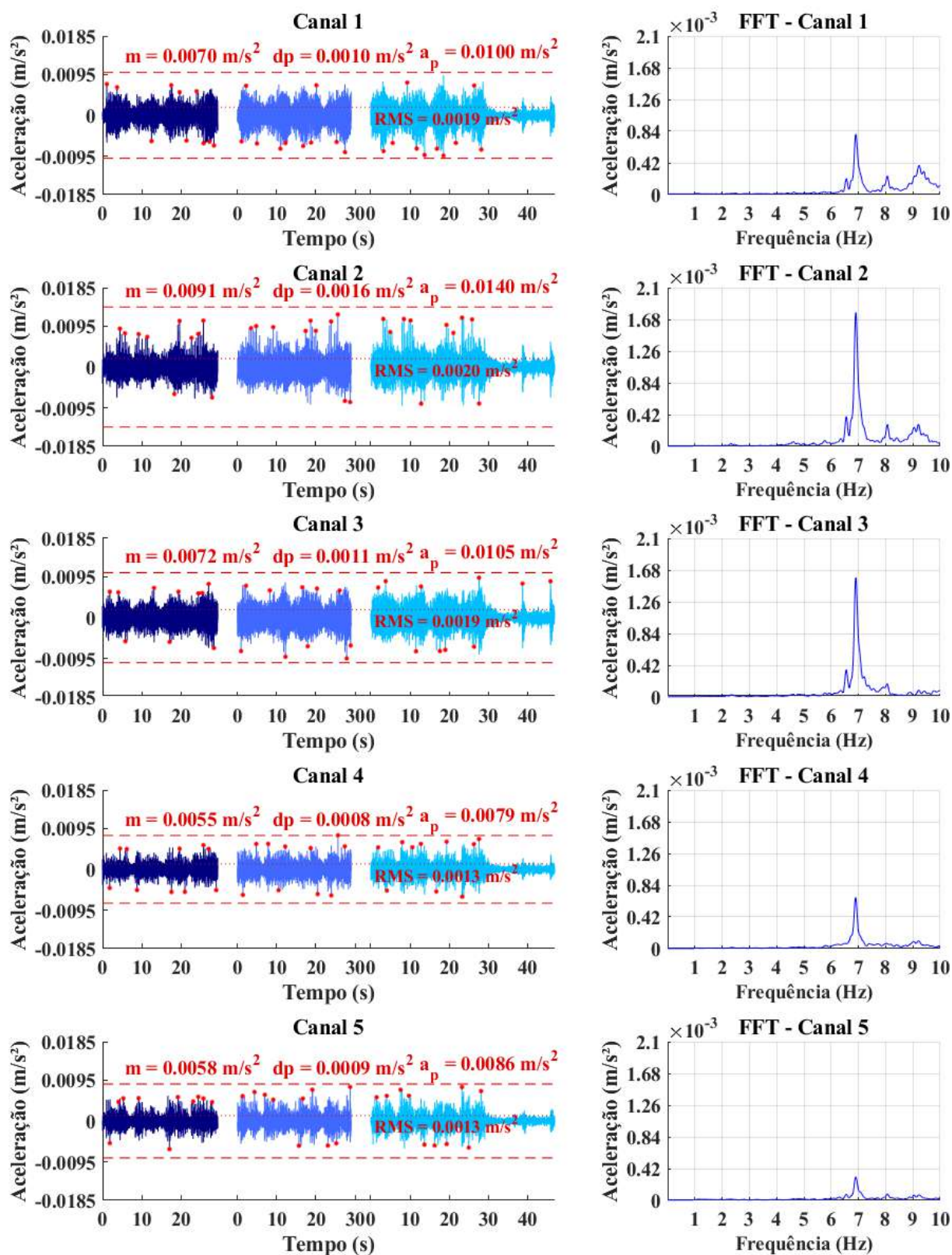


Figura A-32 – Resposta dinâmica do piso 2 para caminhada rápida em trajetória diagonal.

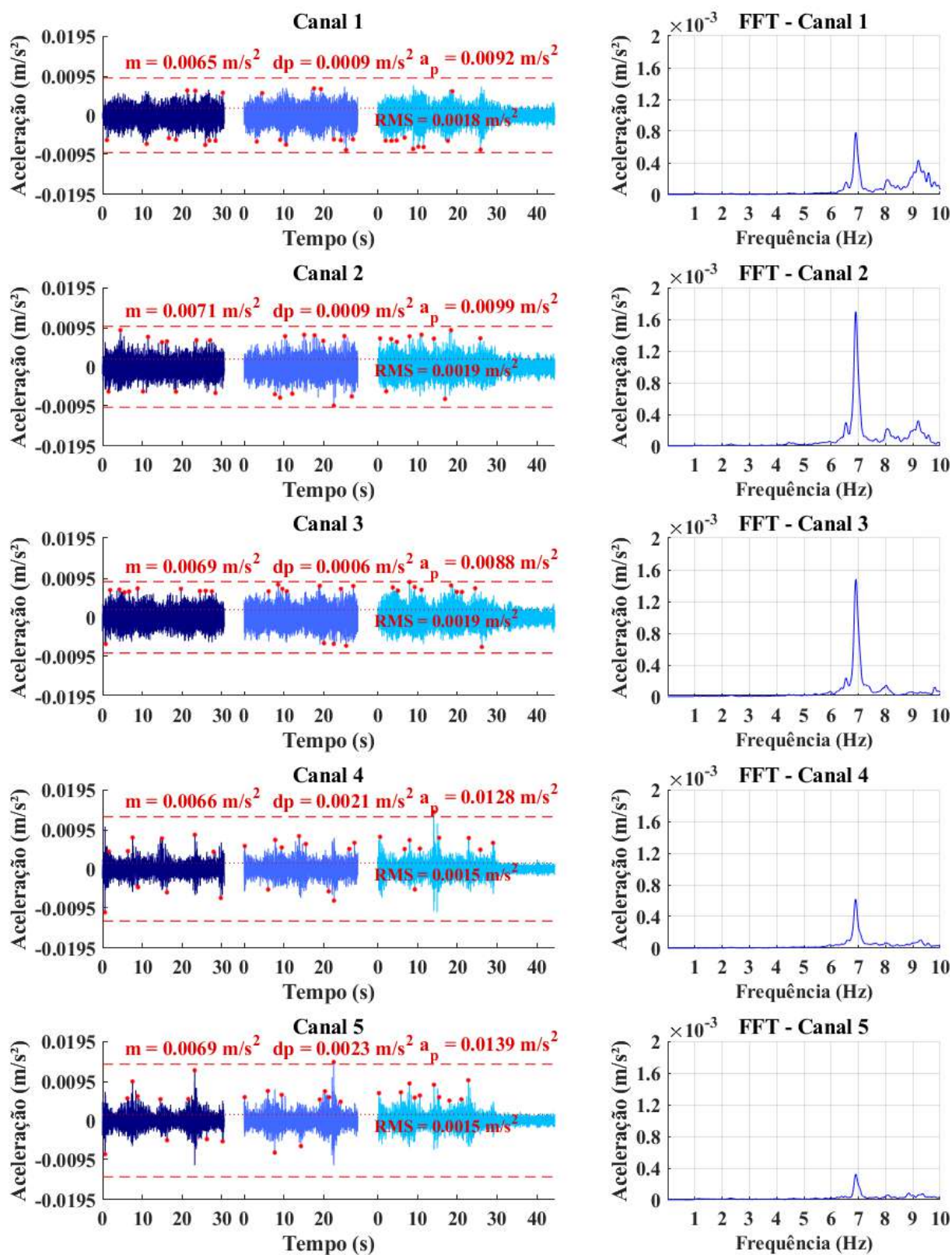


Figura A-33 – Resposta dinâmica do piso 2 para caminhada rápida em trajetória paralela.

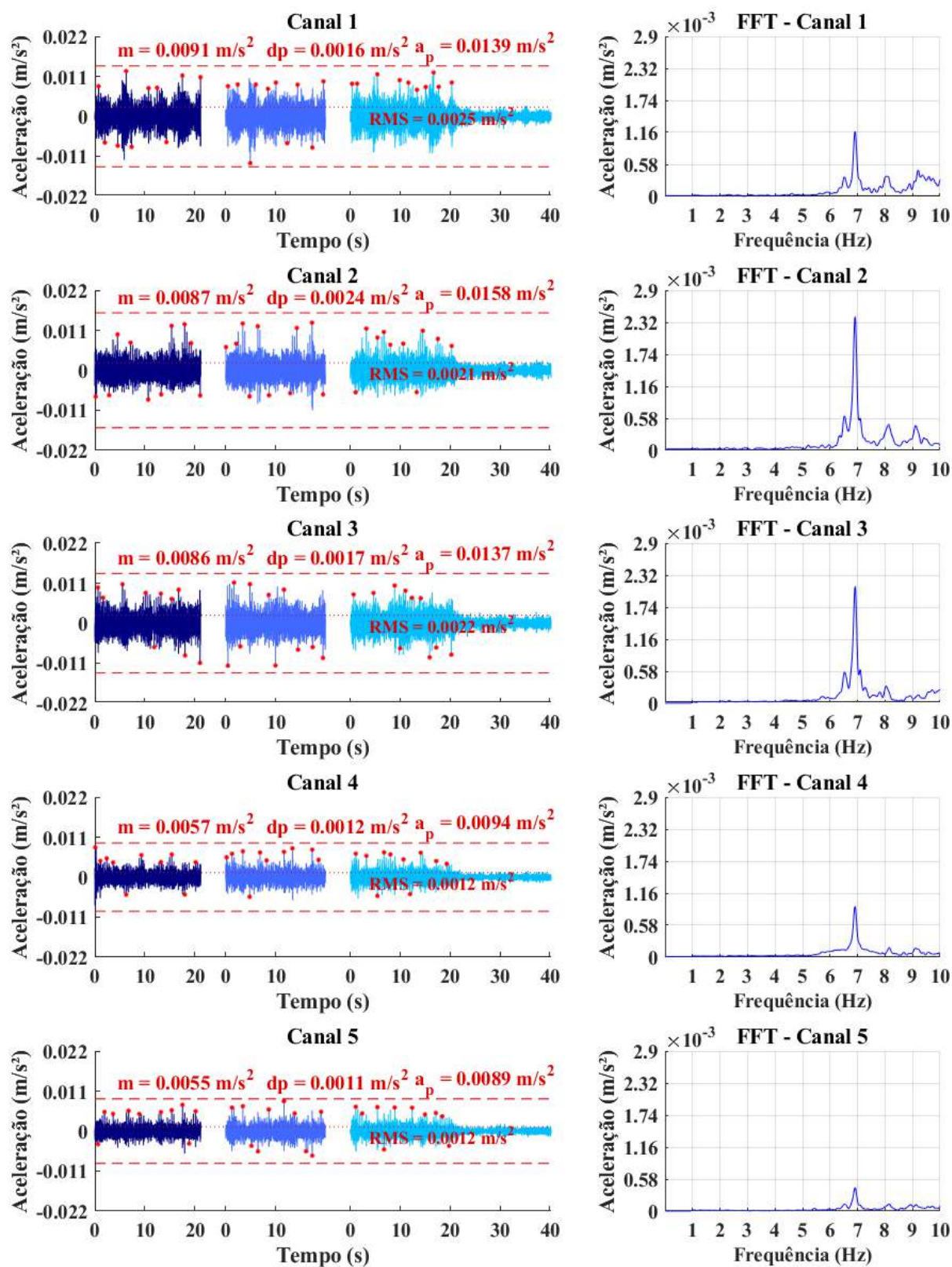


Figura A-34 – Resposta dinâmica do piso 2 para caminhada rápida em trajetória perpendicular.

A.2.3 Piso 3

A.2.3.1 Caminhada lenta

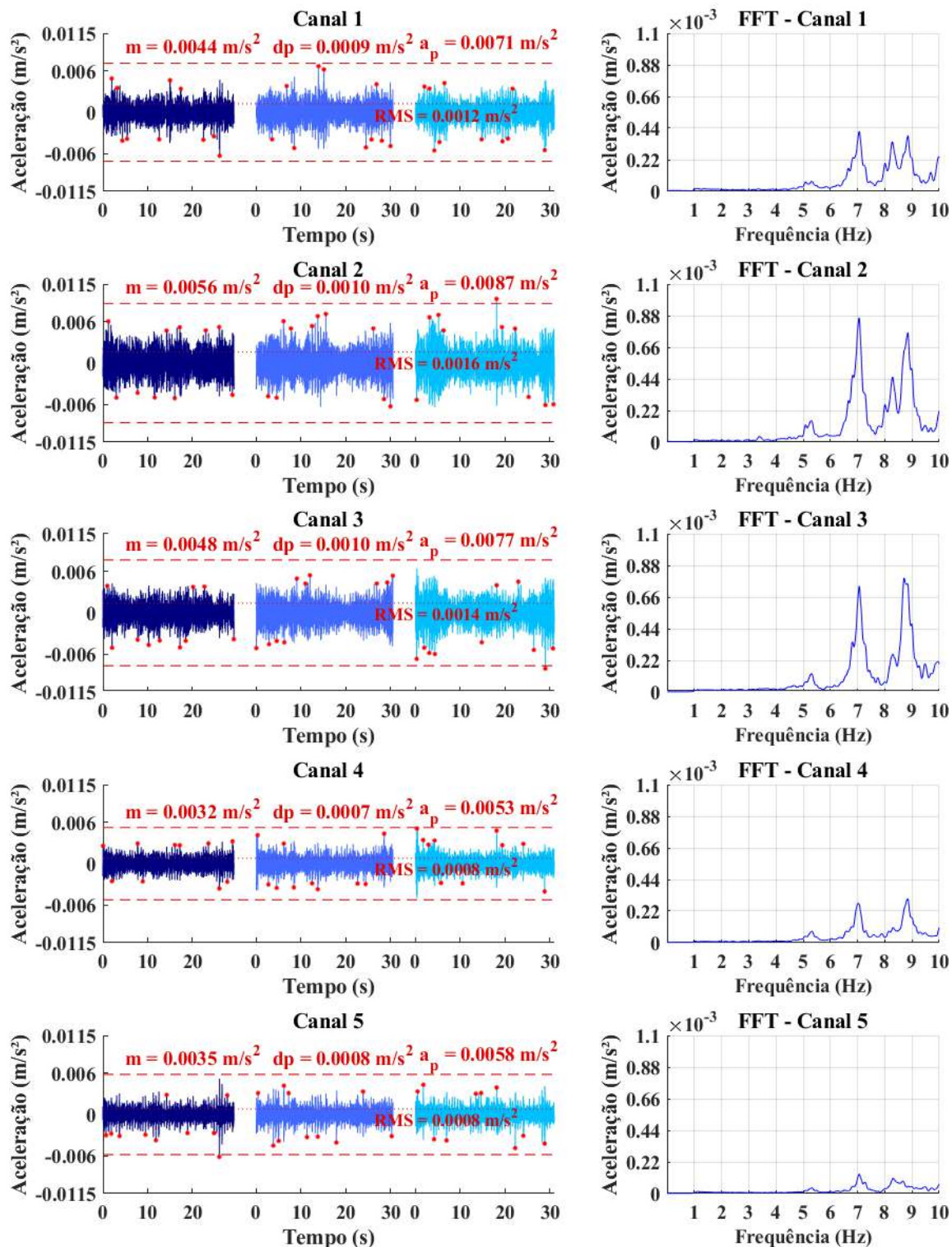


Figura A-35 – Resposta dinâmica do piso 3 para caminhada lenta em trajetória aleatória.

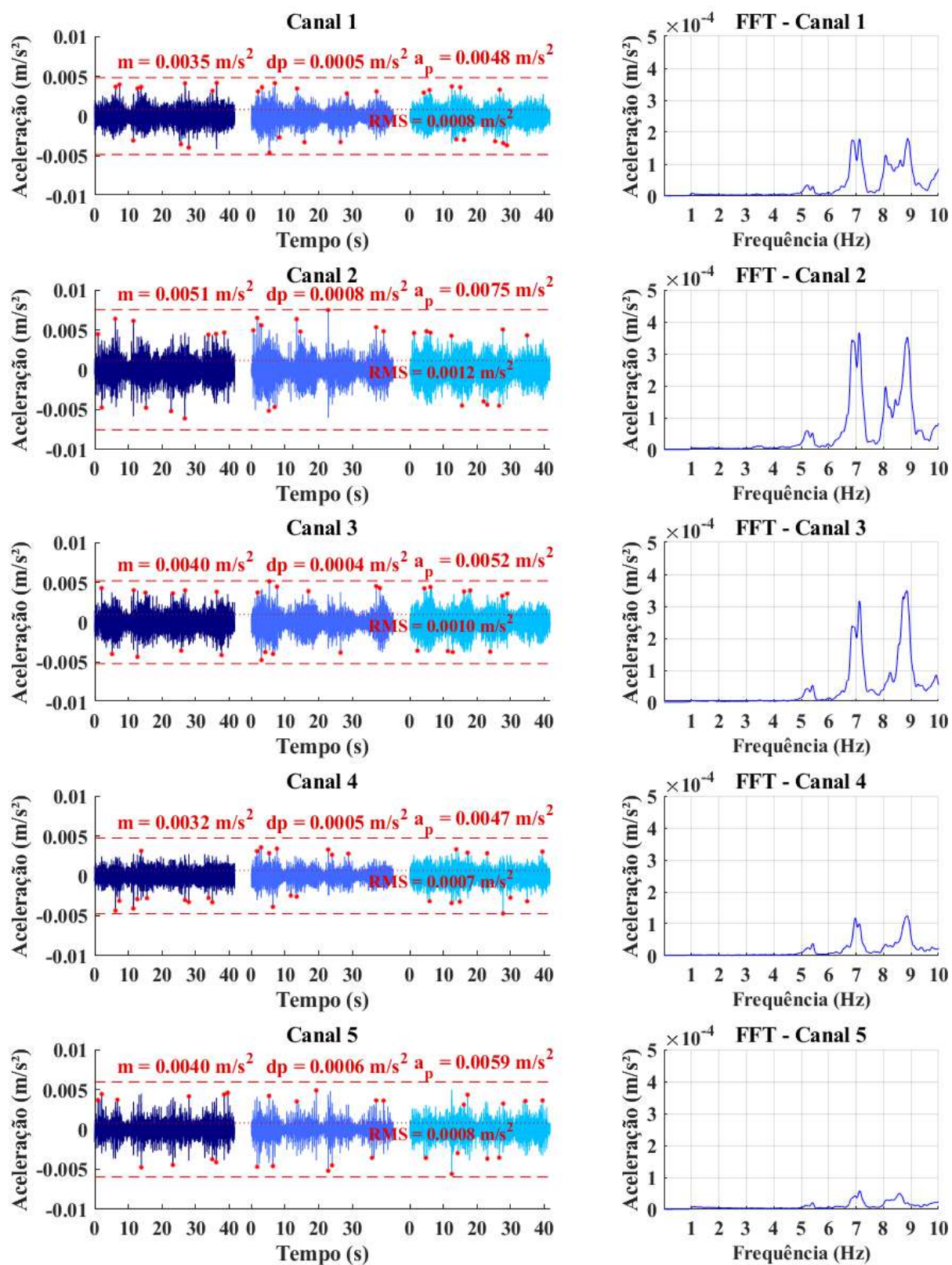


Figura A-36 – Resposta dinâmica do piso 3 para caminhada lenta em trajetória diagonal.

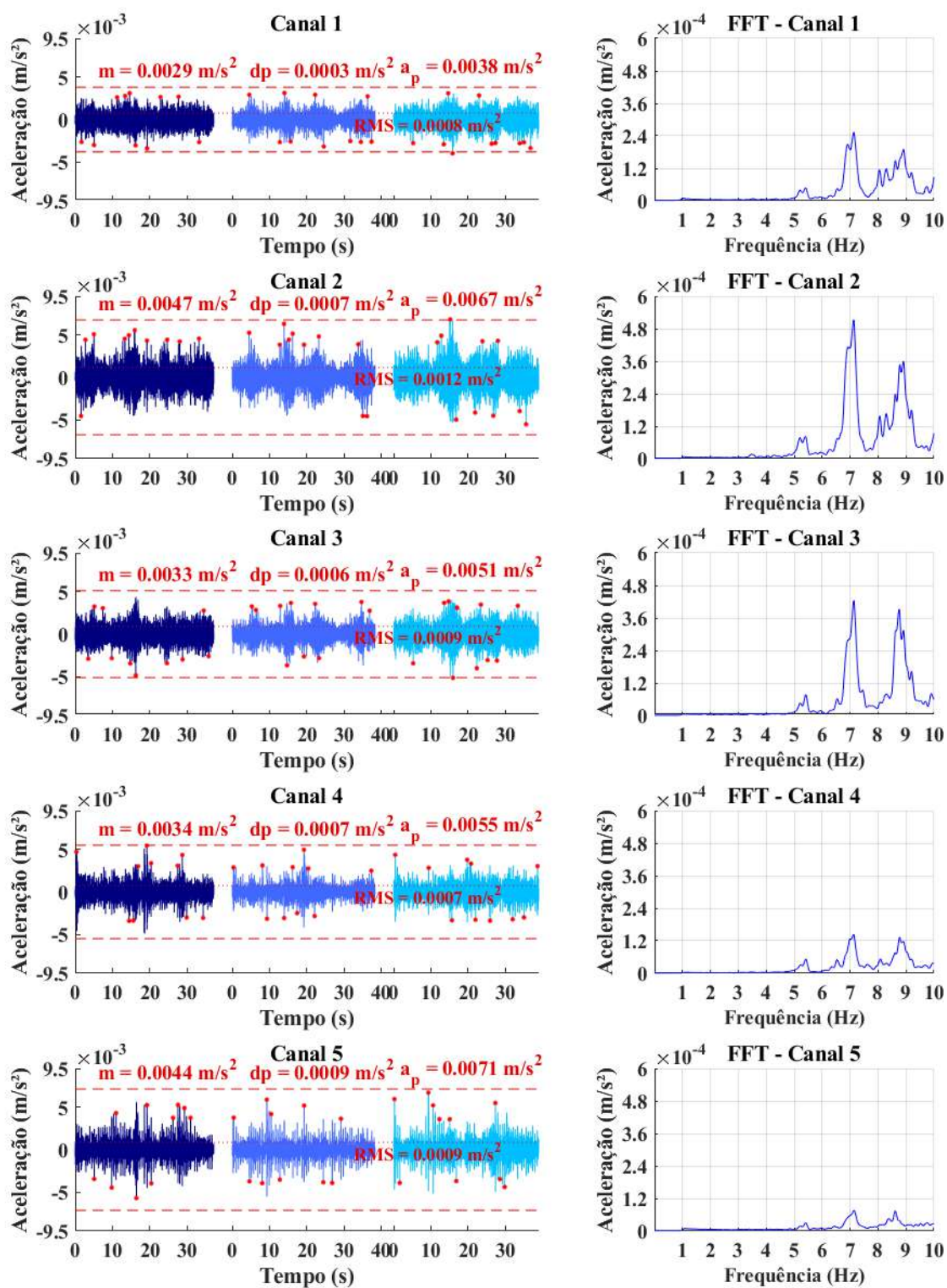


Figura A-37 – Resposta dinâmica do piso 3 para caminhada lenta em trajetória paralela.

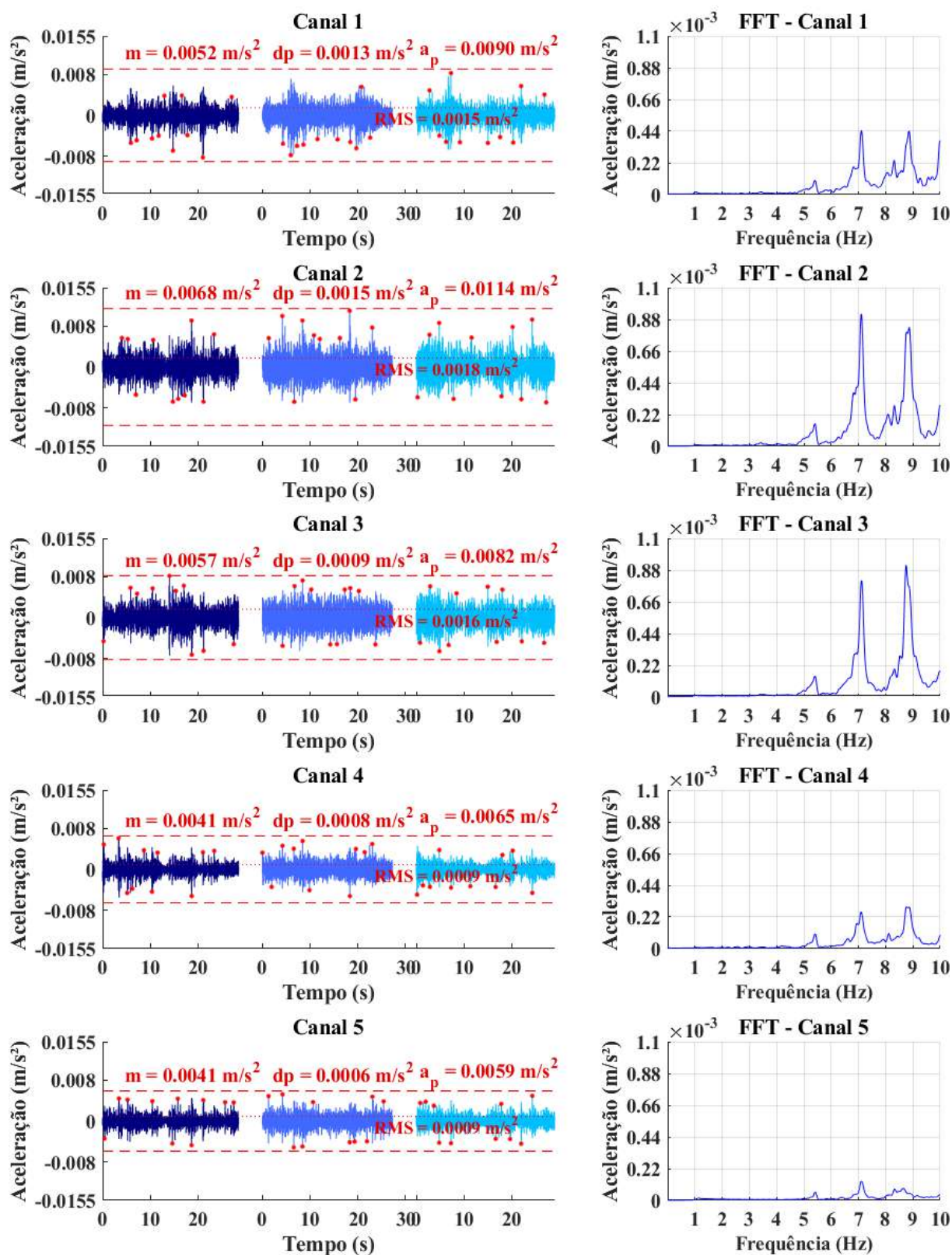


Figura A-38 – Resposta dinâmica do piso 3 para caminhada lenta em trajetória perpendicular.

A.2.3.2 Caminhada normal

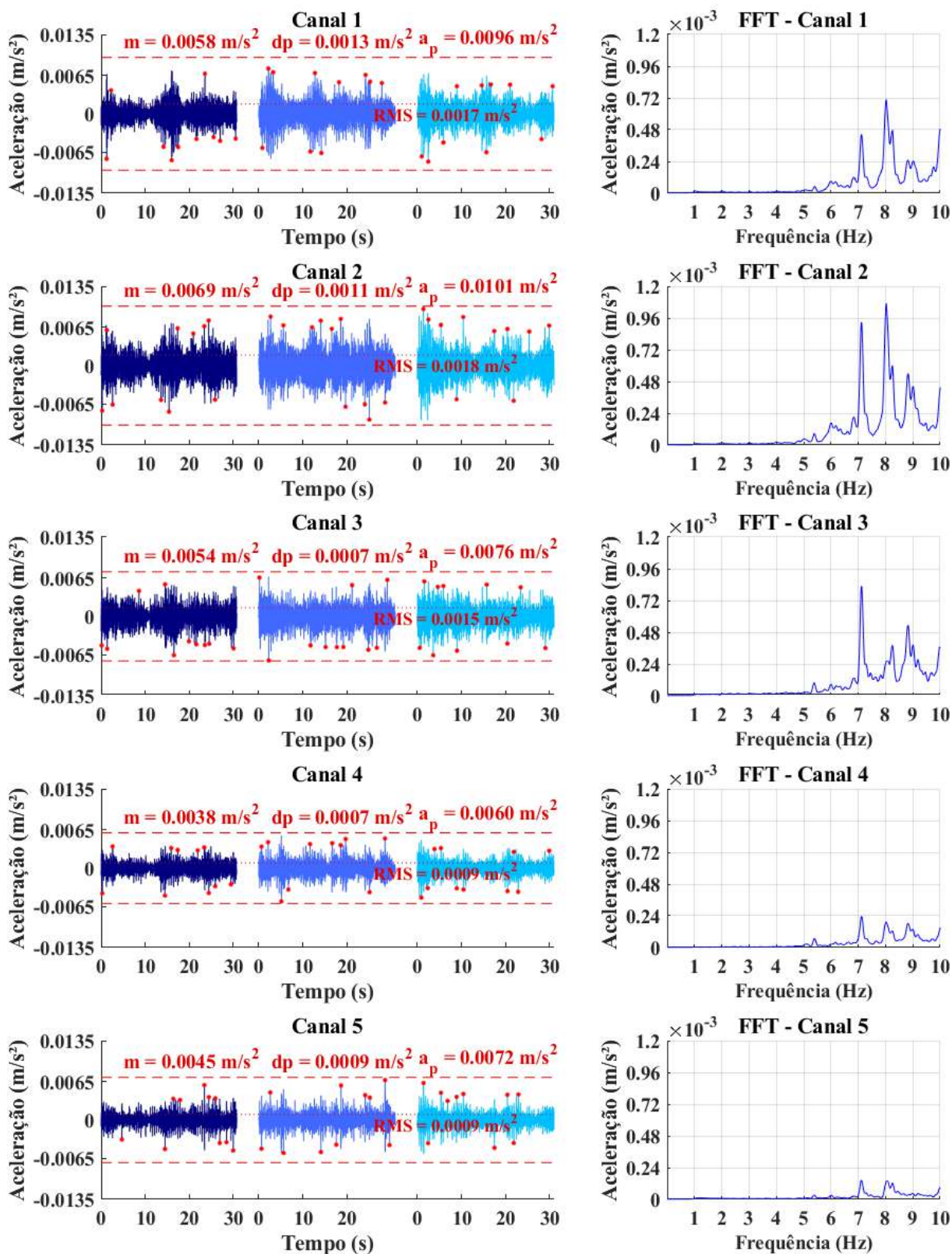


Figura A-39 – Resposta dinâmica do piso 3 para caminhada normal em trajetória aleatória.

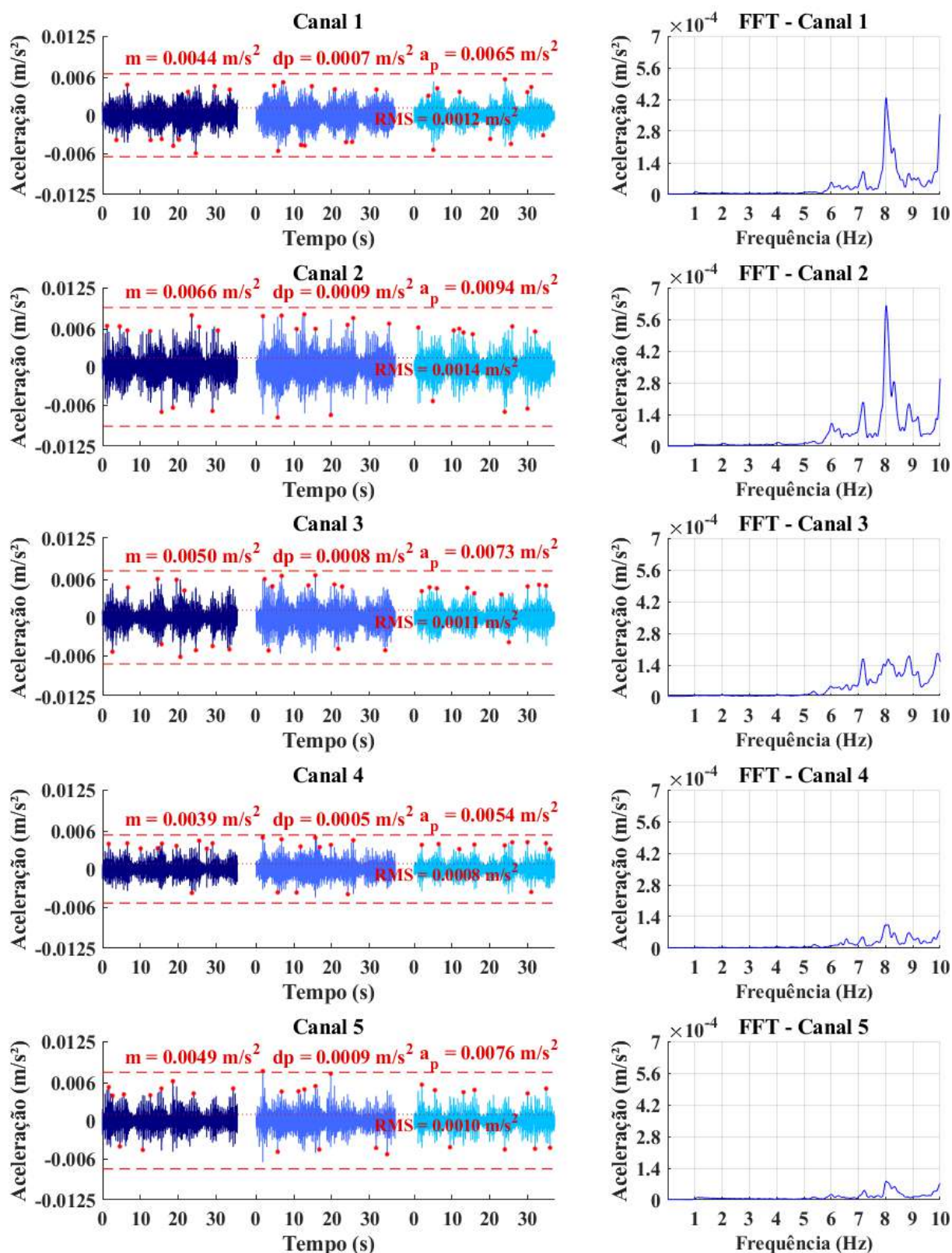


Figura A-40 – Resposta dinâmica do piso 3 para caminhada normal em trajetória diagonal.

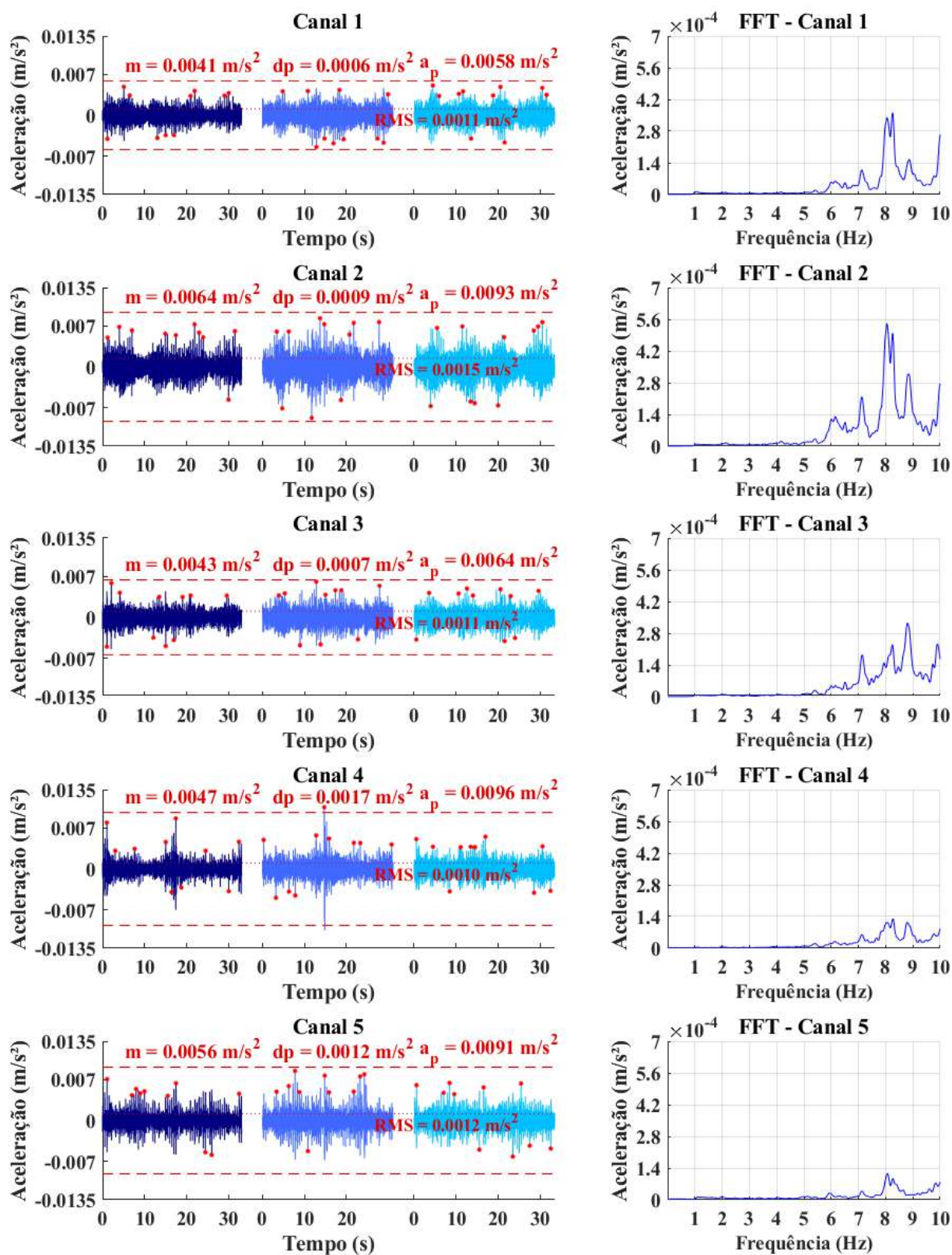


Figura A-41 – Resposta dinâmica do piso 3 para caminhada normal em trajetória paralela.

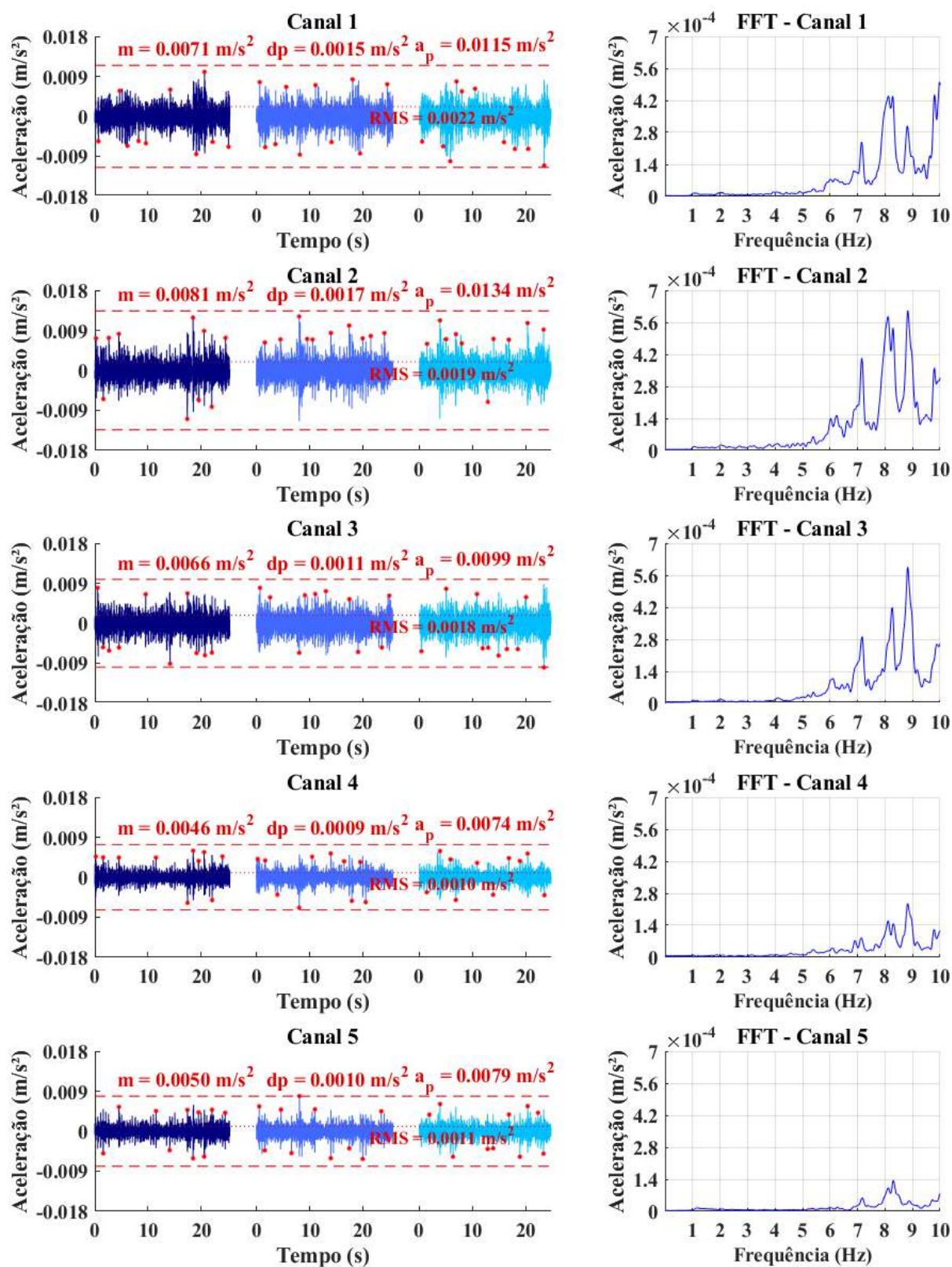


Figura A-42 – Resposta dinâmica do piso 3 para caminhada normal em trajetória perpendicular.

A.2.3.3 Caminhada rápida

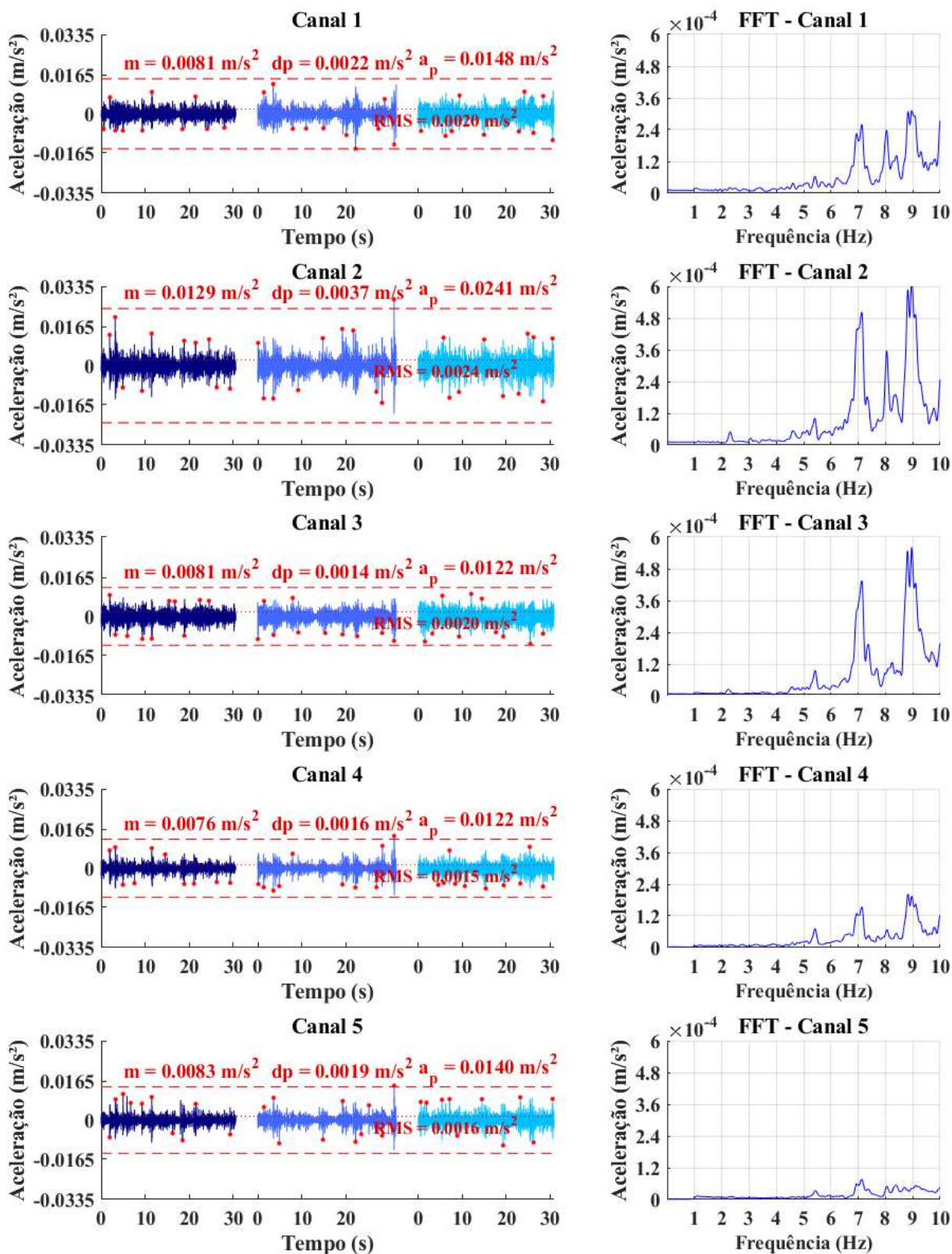


Figura A-43 – Resposta dinâmica do piso 3 para caminhada rápida em trajetória aleatória.

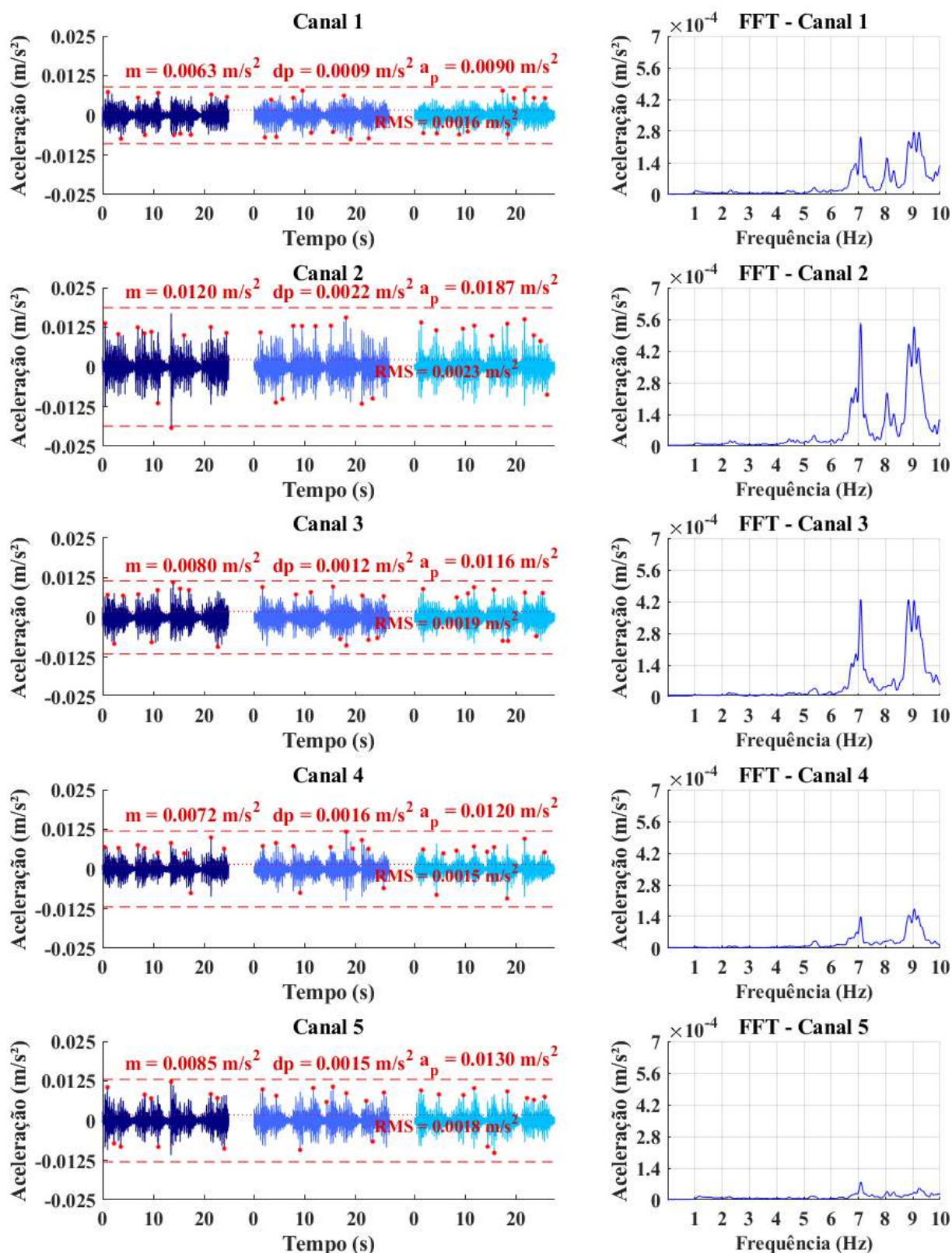


Figura A-44 – Resposta dinâmica do piso 3 para caminhada rápida em trajetória diagonal.

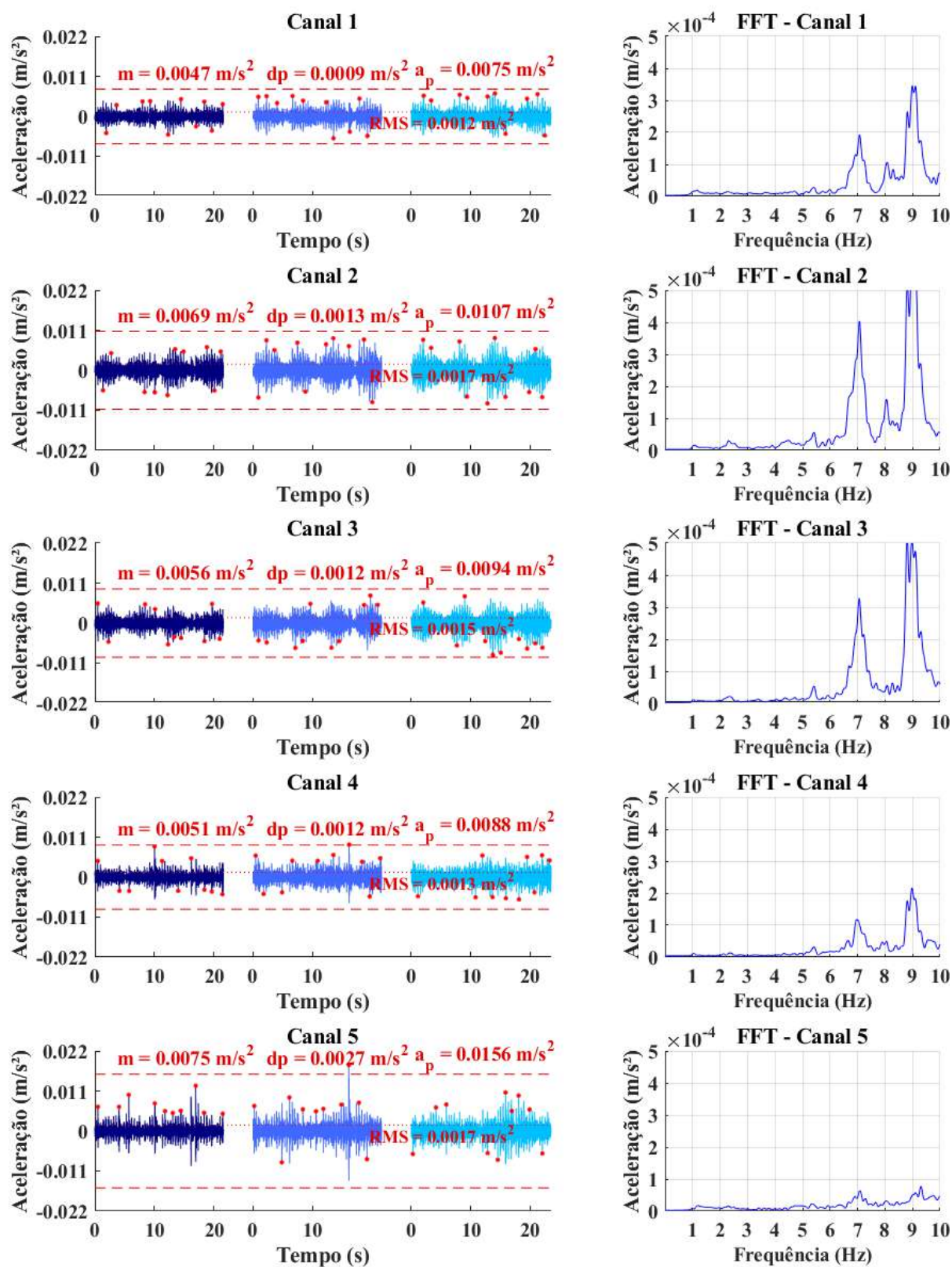


Figura A-45 – Resposta dinâmica do piso 3 para caminhada rápida em trajetória paralela.

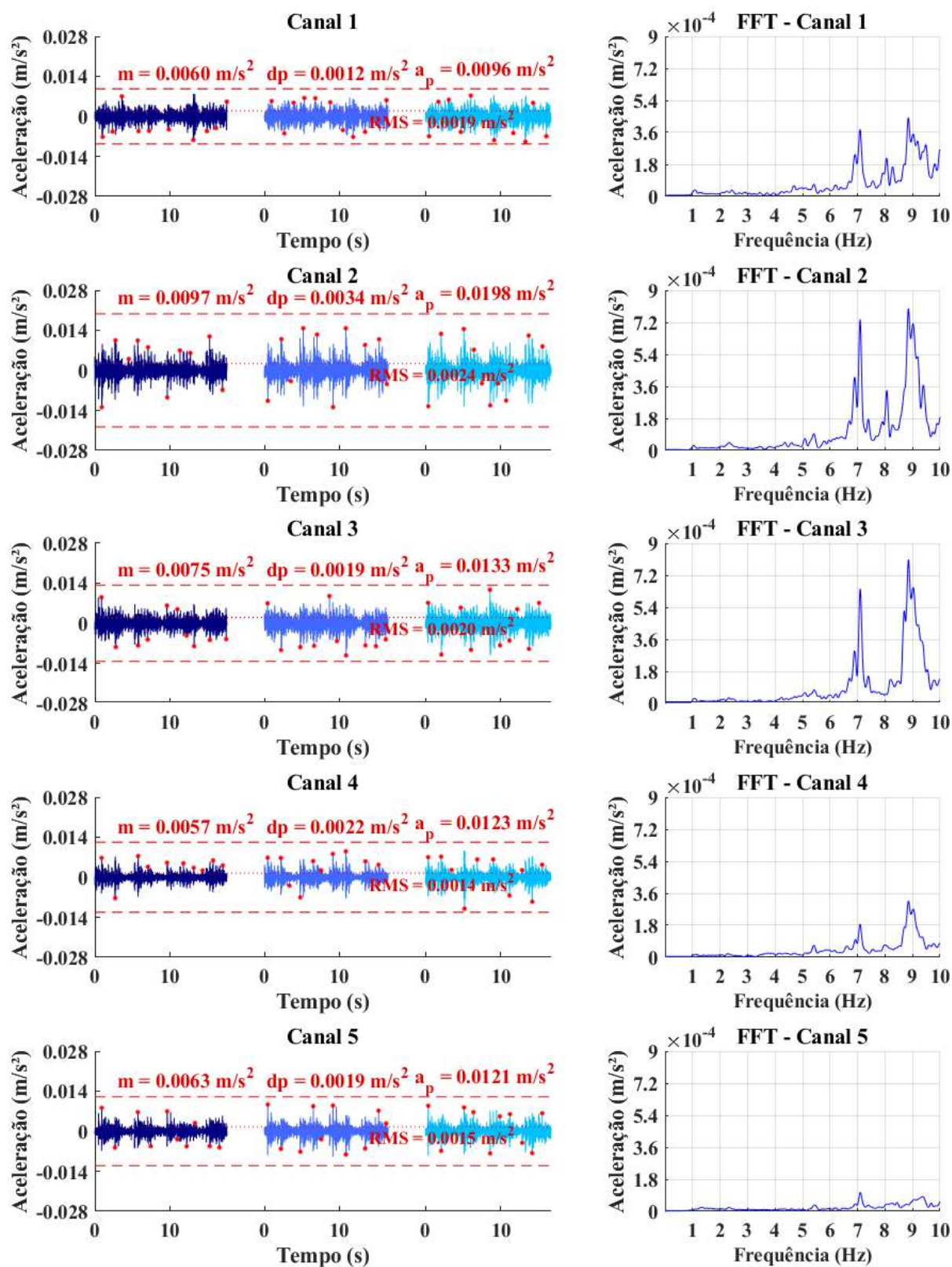


Figura A-46 – Resposta dinâmica do piso 3 para caminhada rápida em trajetória perpendicular.

A.2.4 Piso 4

A.2.4.1 Caminhada lenta

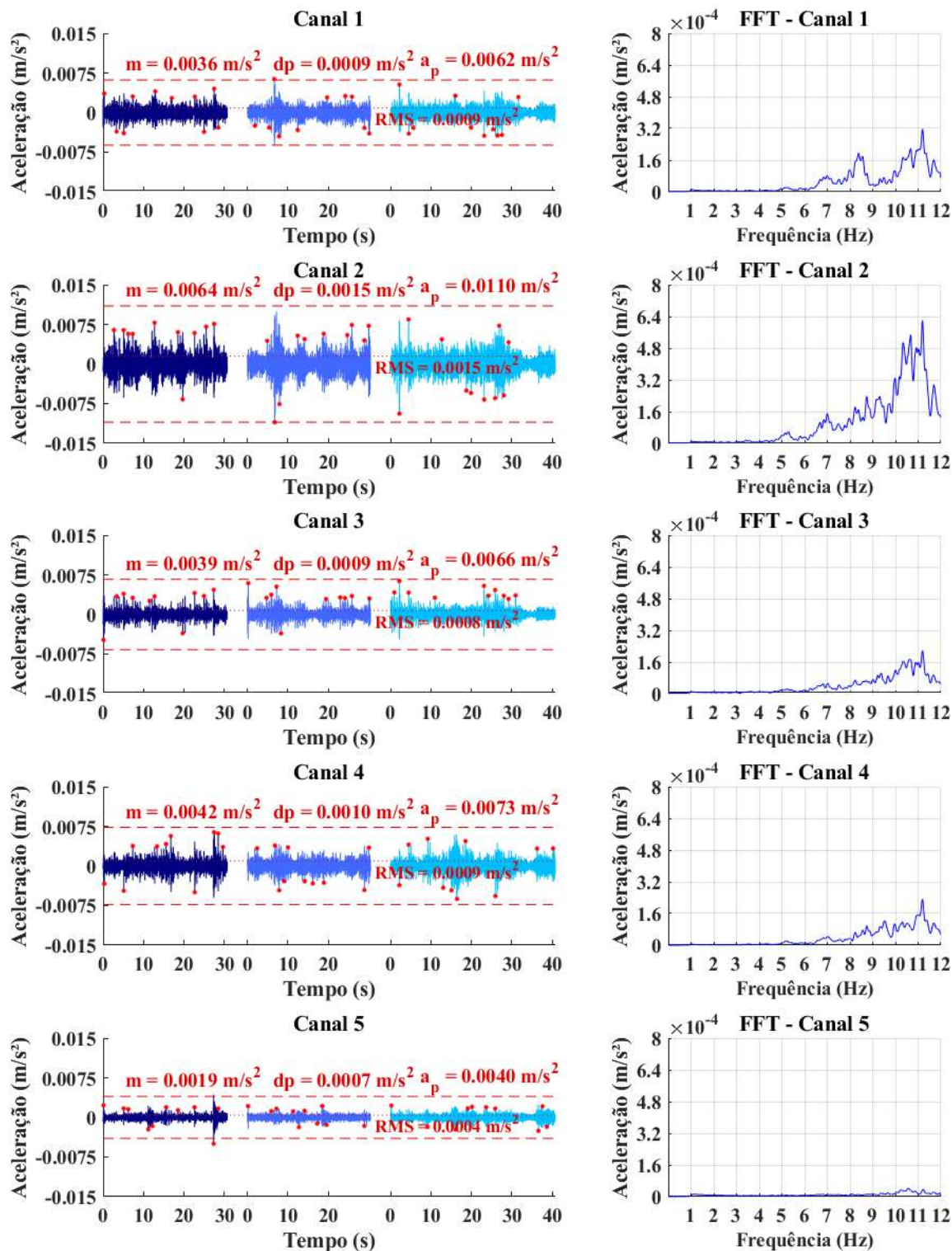


Figura A-47 – Resposta dinâmica do piso 4 para caminhada lenta em trajetória aleatória.

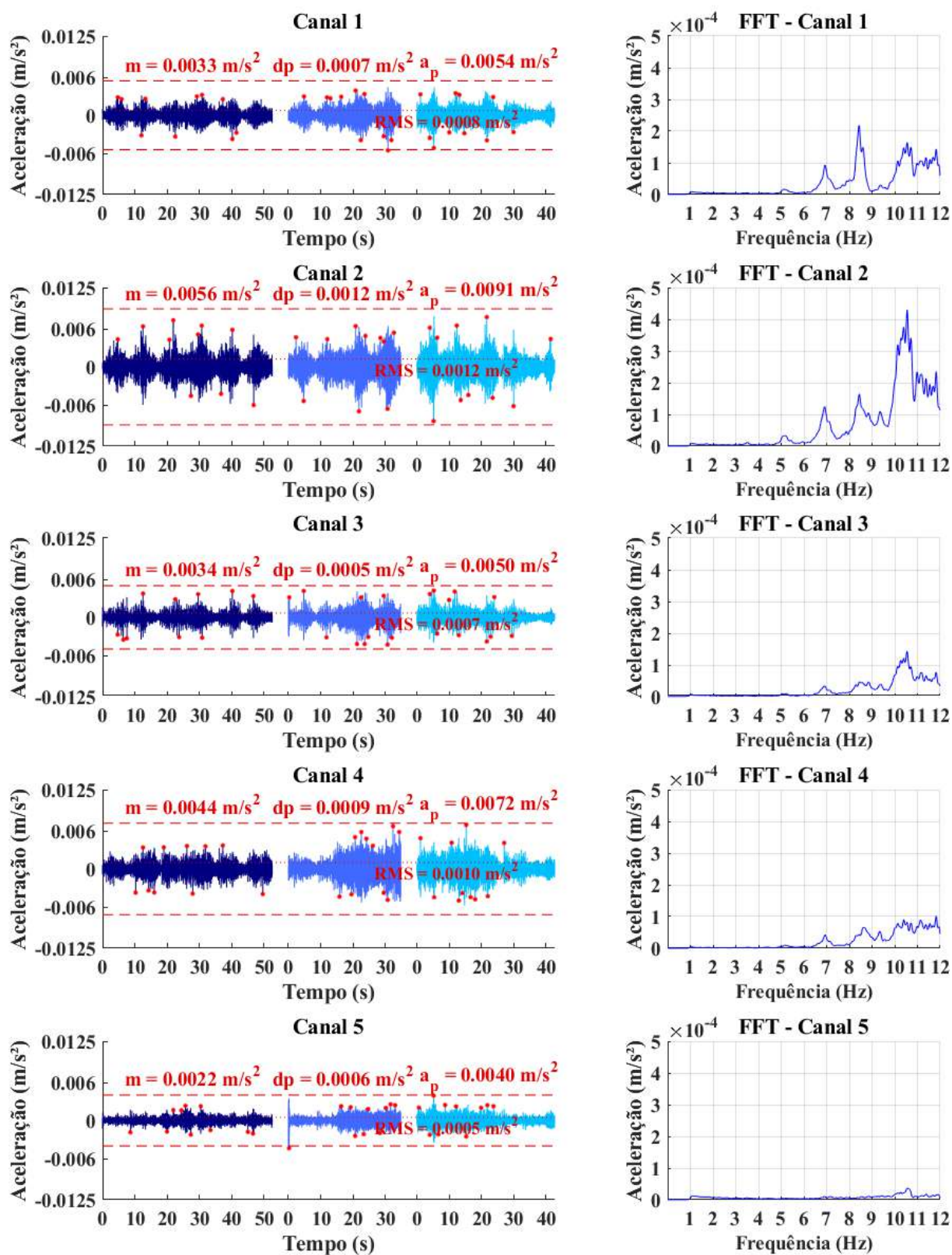


Figura A-48 – Resposta dinâmica do piso 4 para caminhada lenta em trajetória diagonal.

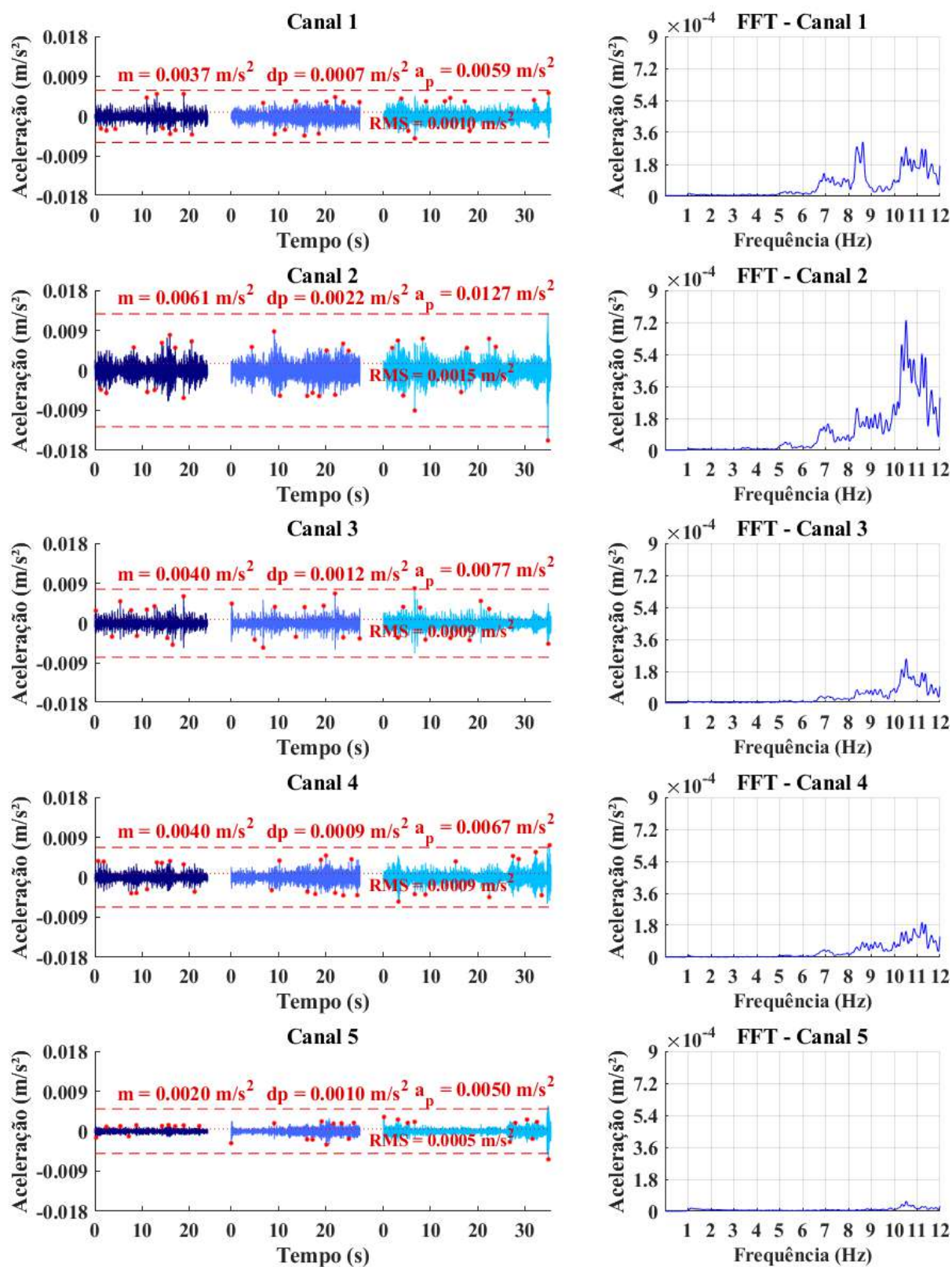


Figura A-49 – Resposta dinâmica do piso 4 para caminhada lenta em trajetória paralela.

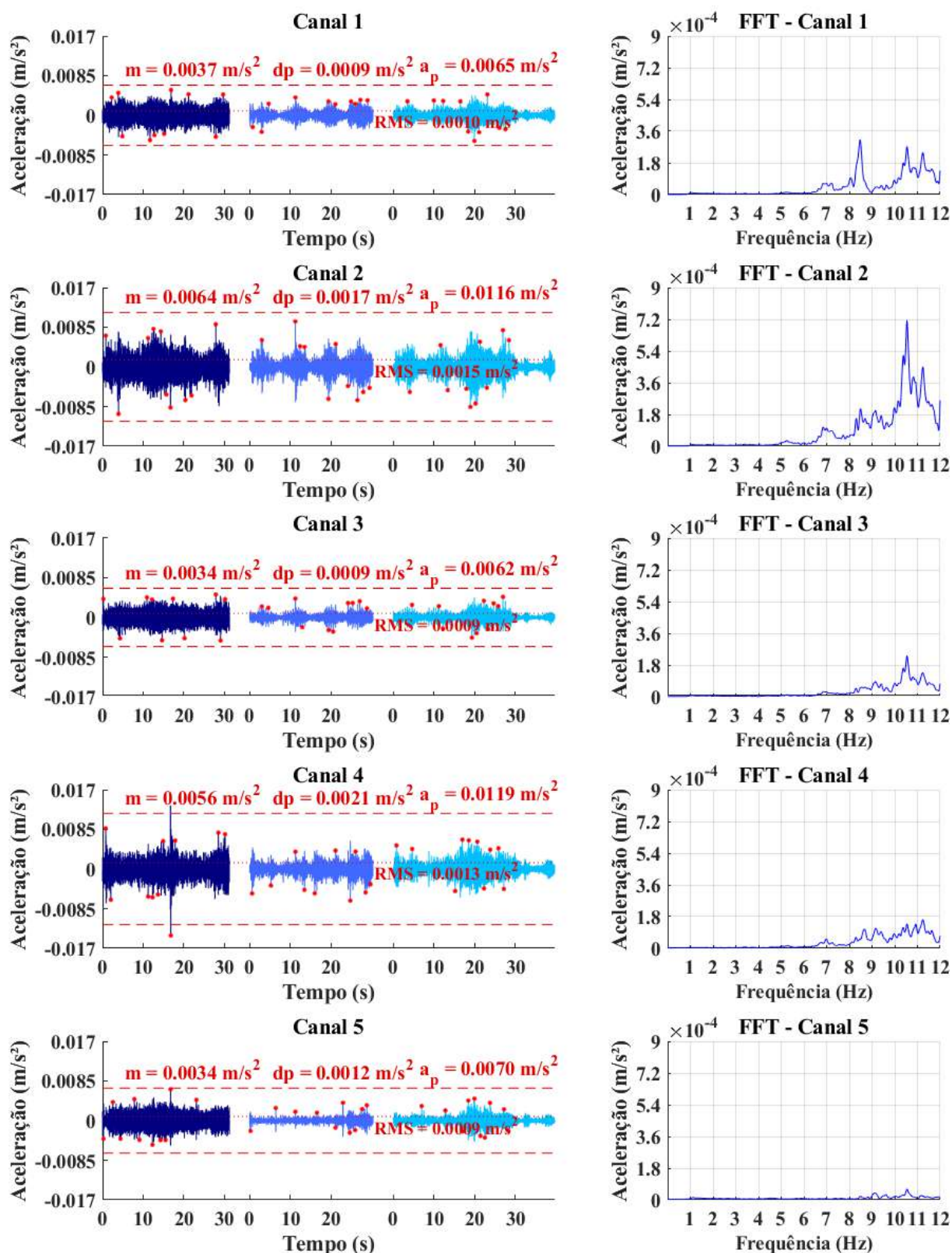


Figura A-50 – Resposta dinâmica do piso 4 para caminhada lenta em trajetória perpendicular.

A.2.4.2 Caminhada normal

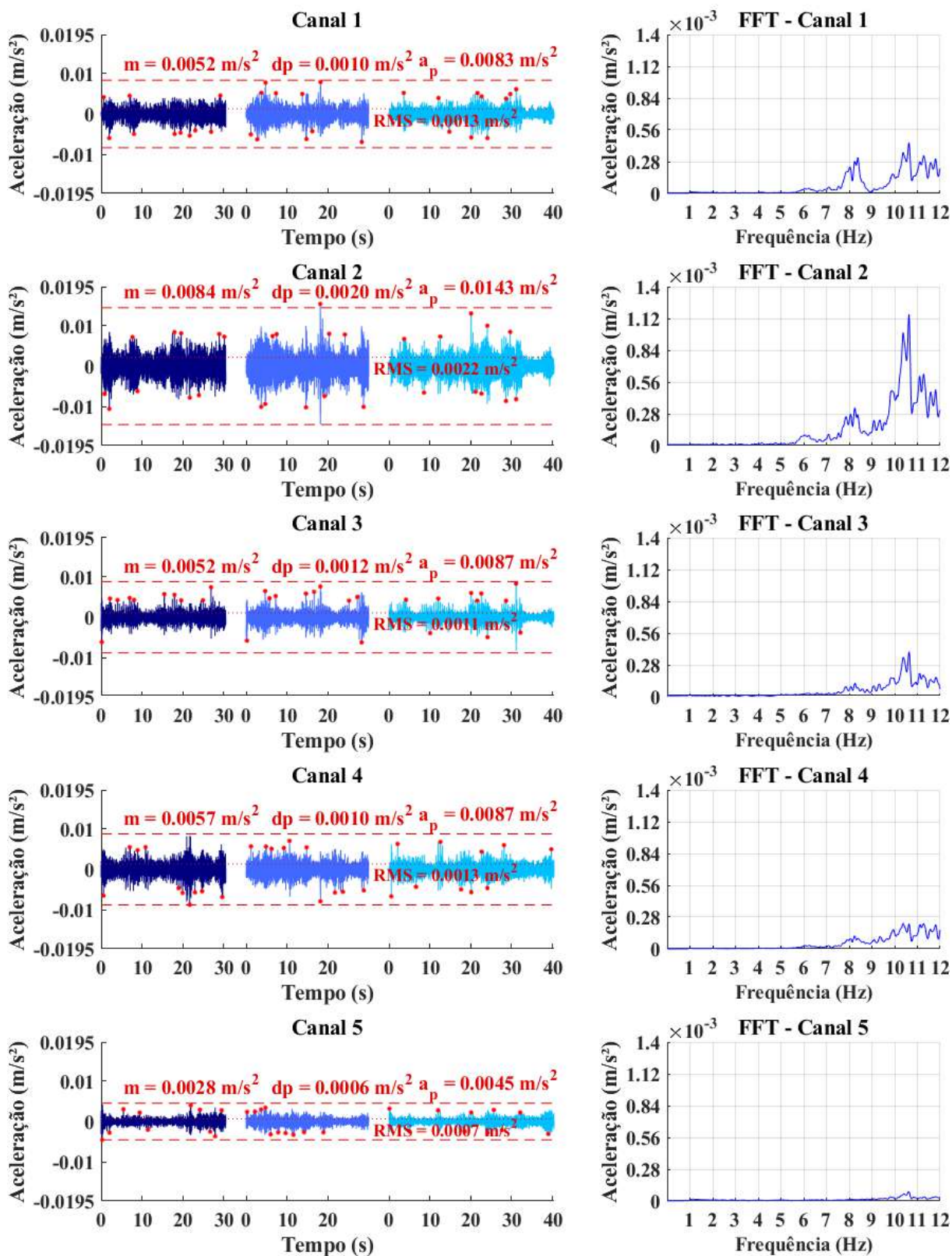


Figura A-51 – Resposta dinâmica do piso 4 para caminhada normal em trajetória aleatória.

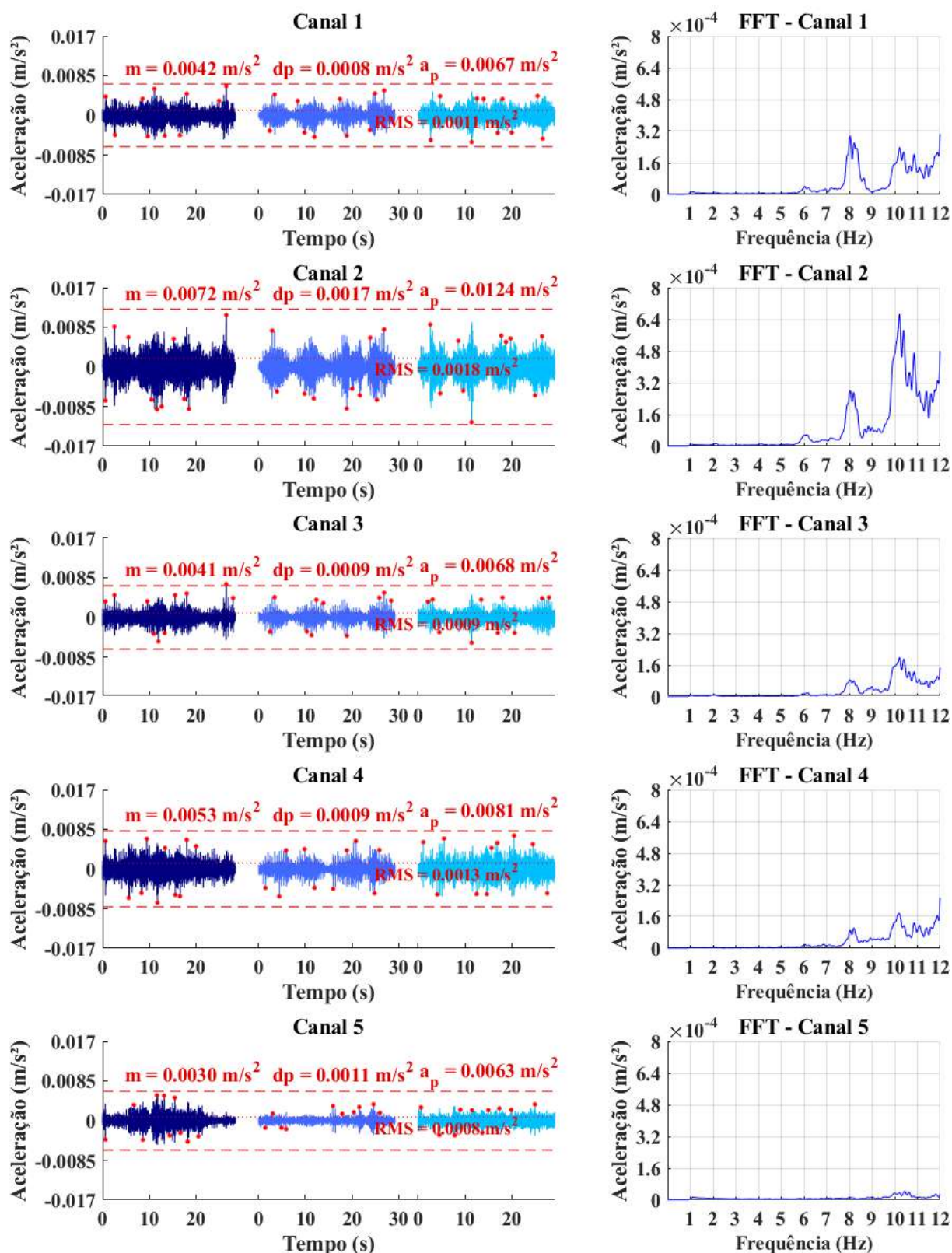


Figura A-52 – Resposta dinâmica do piso 4 para caminhada normal em trajetória diagonal.

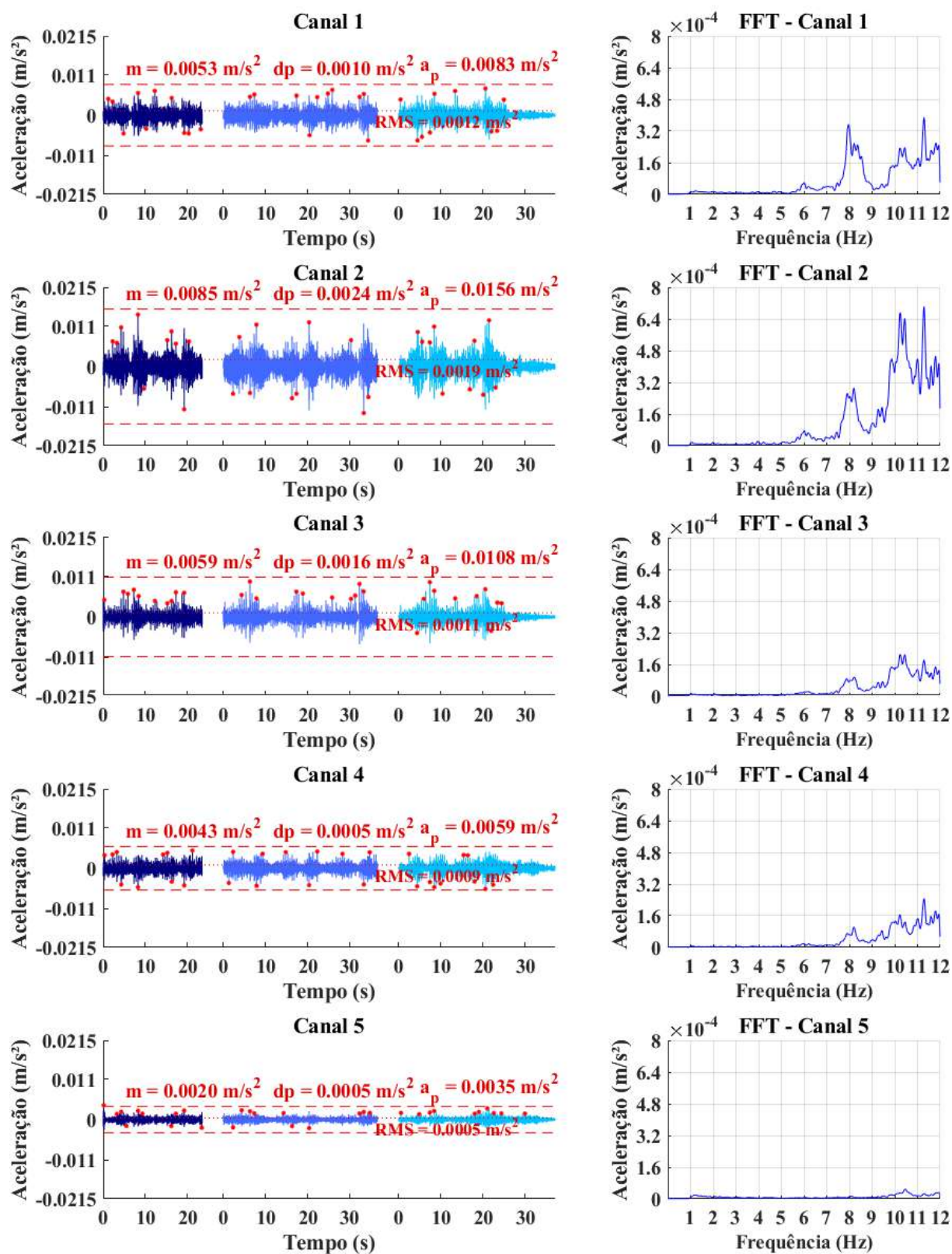


Figura A-53 – Resposta dinâmica do piso 4 para caminhada normal em trajetória paralela.

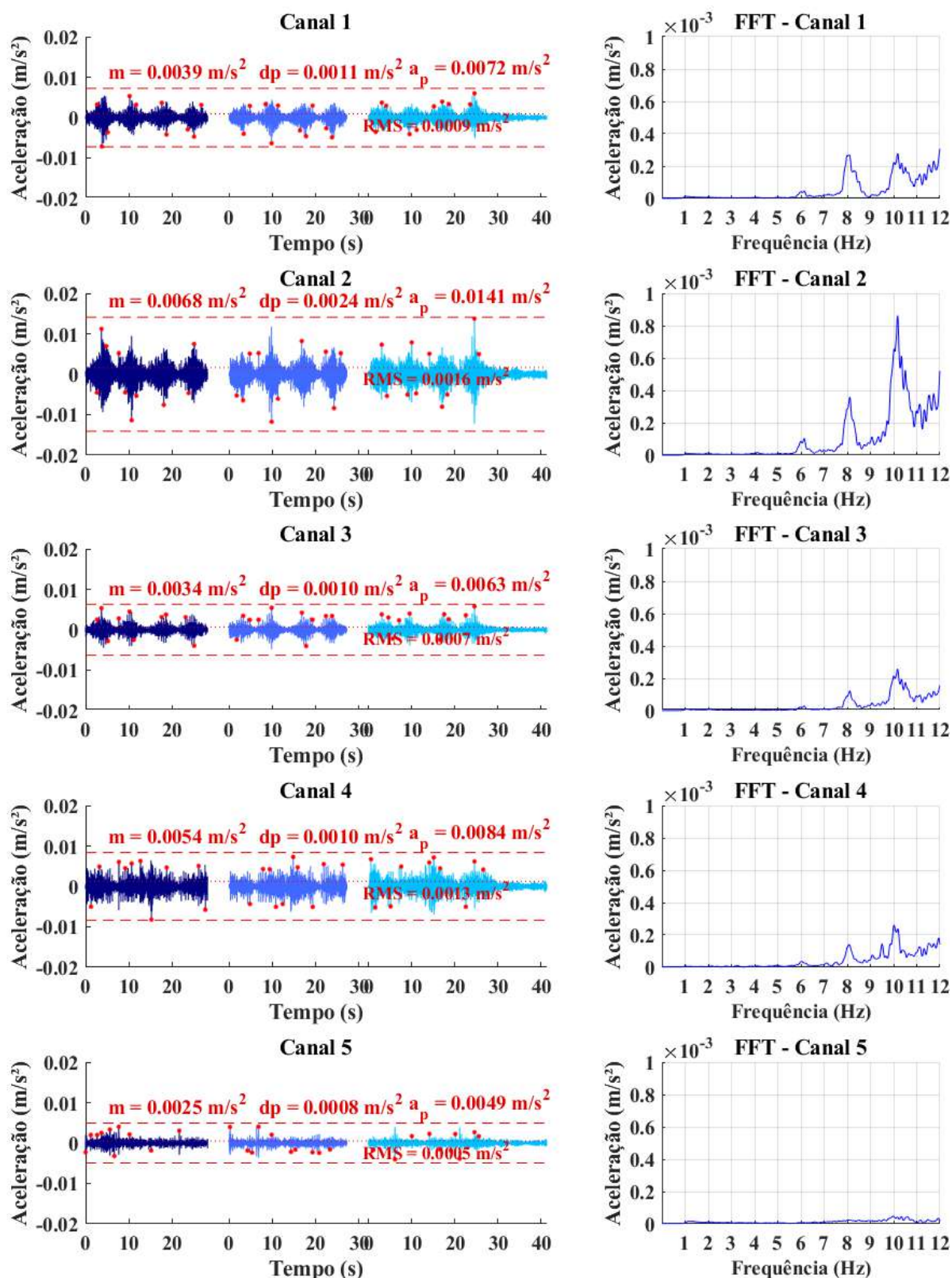


Figura A-54 – Resposta dinâmica do piso 4 para caminhada normal em trajetória perpendicular.

A.2.4.3 Caminhada rápida

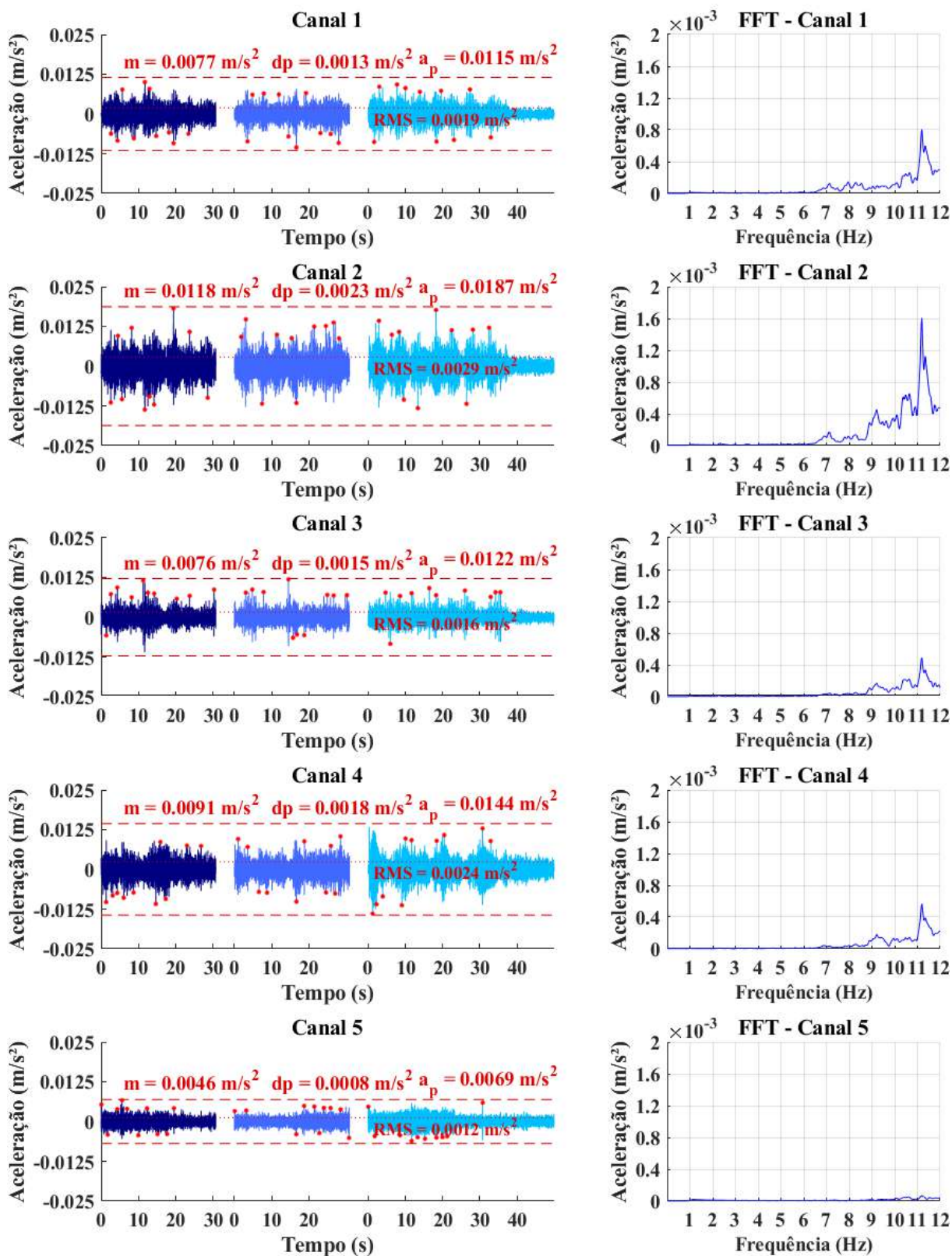


Figura A-55 – Resposta dinâmica do piso 4 para caminhada rápida em trajetória aleatória.

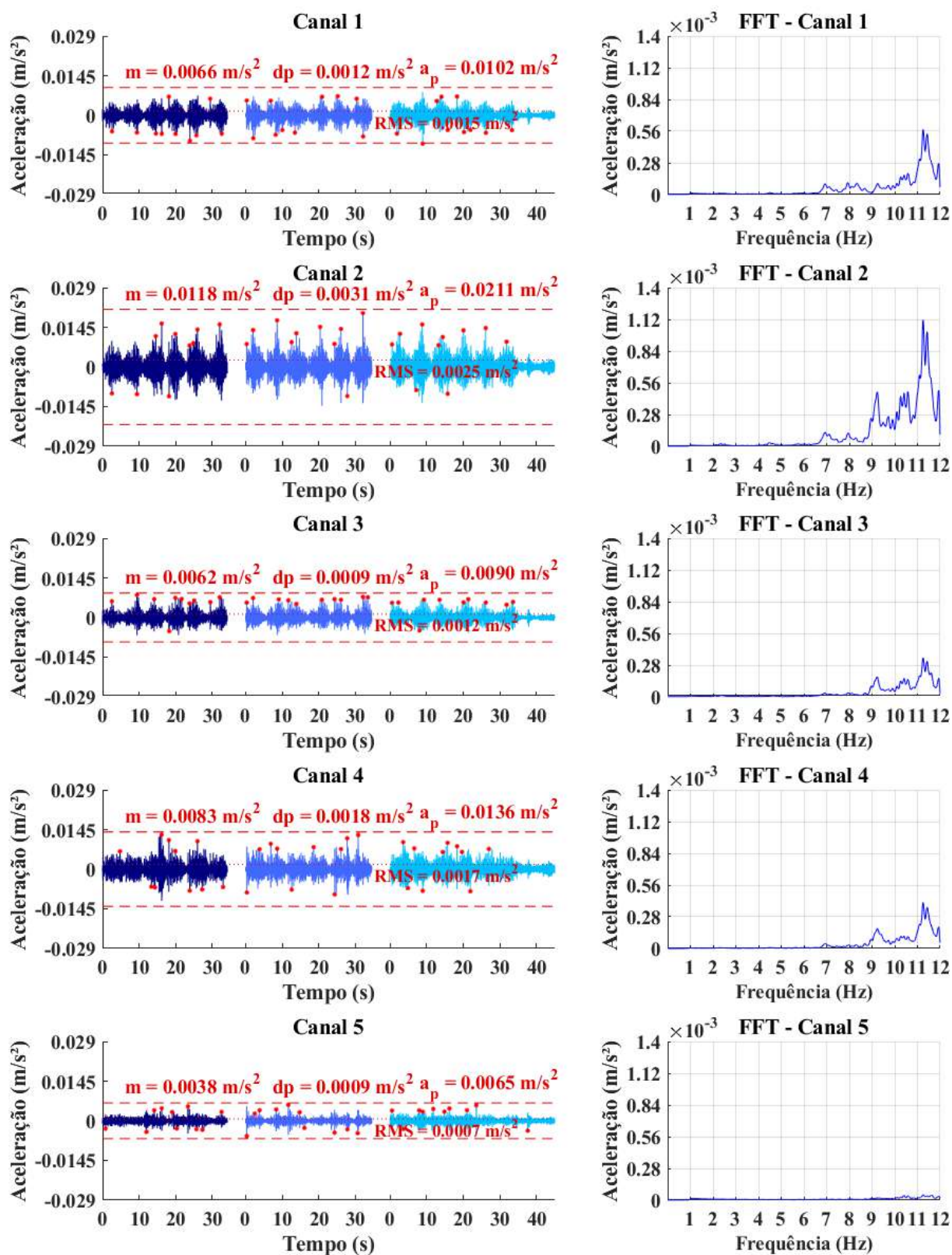


Figura A-56 – Resposta dinâmica do piso 4 para caminhada rápida em trajetória diagonal.

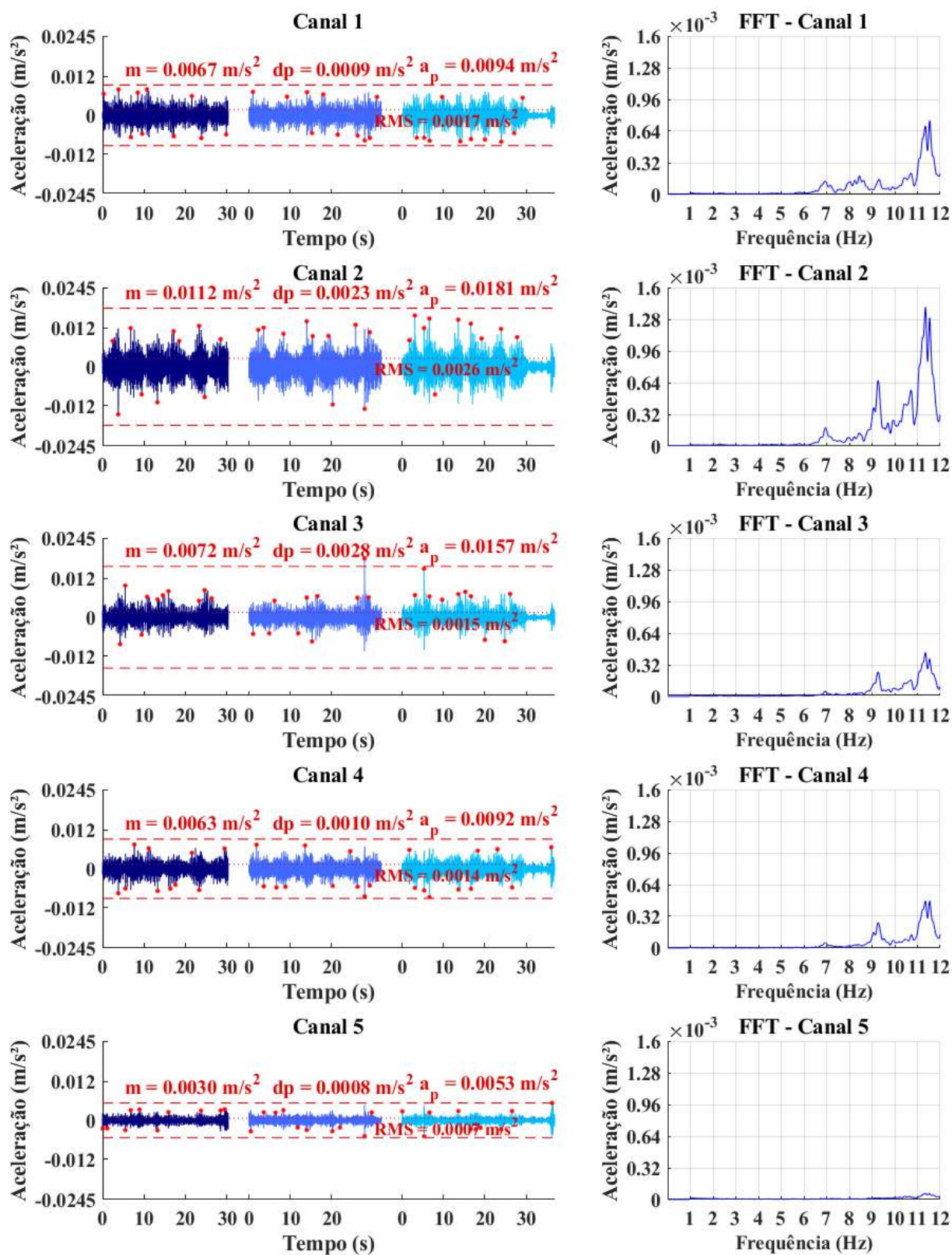


Figura A-57 – Resposta dinâmica do piso 4 para caminhada rápida em trajetória paralela.

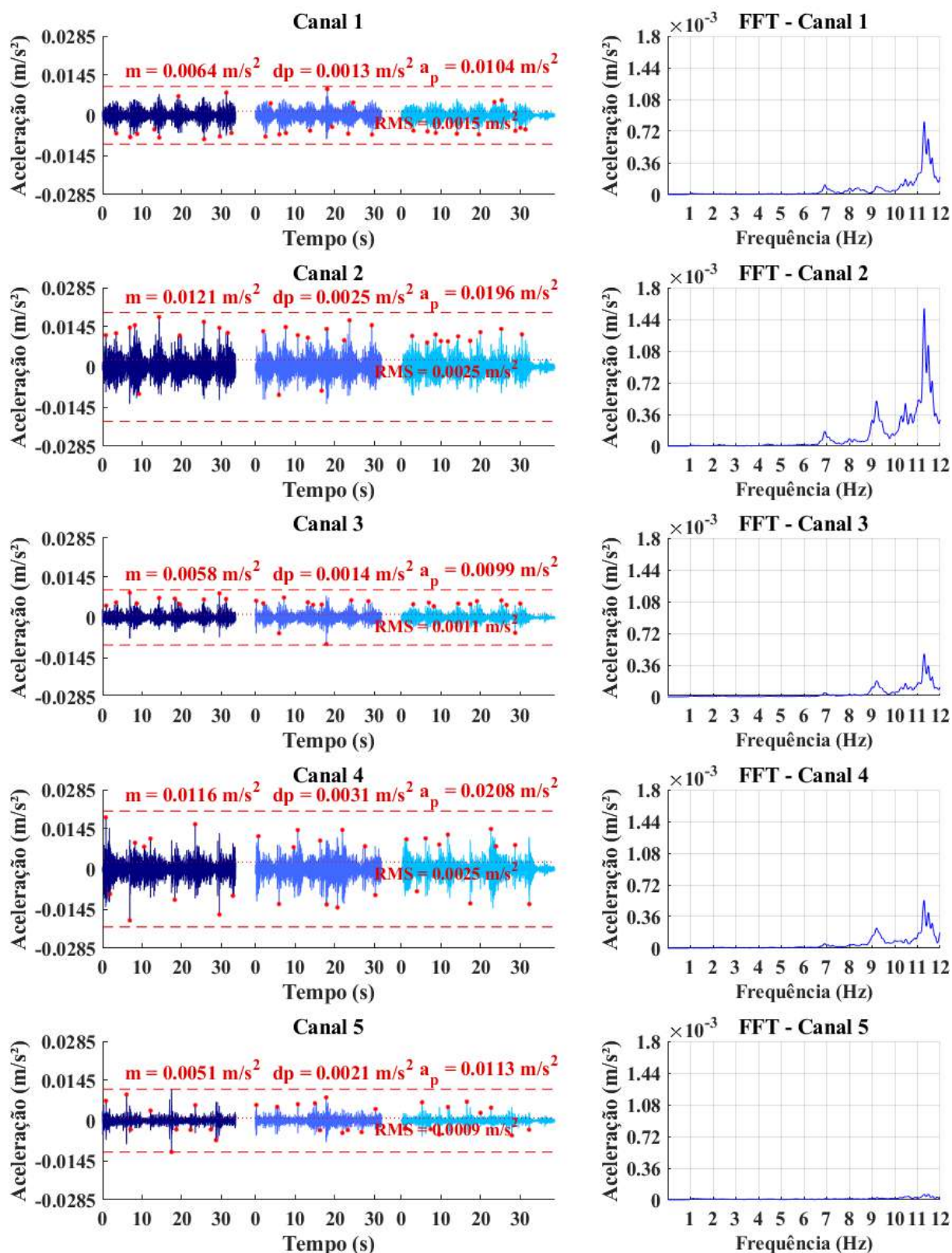


Figura A-58 – Resposta dinâmica do piso 4 para caminhada rápida em trajetória perpendicular.

A.2.5 Piso 5

A.2.5.1 Caminhada lenta

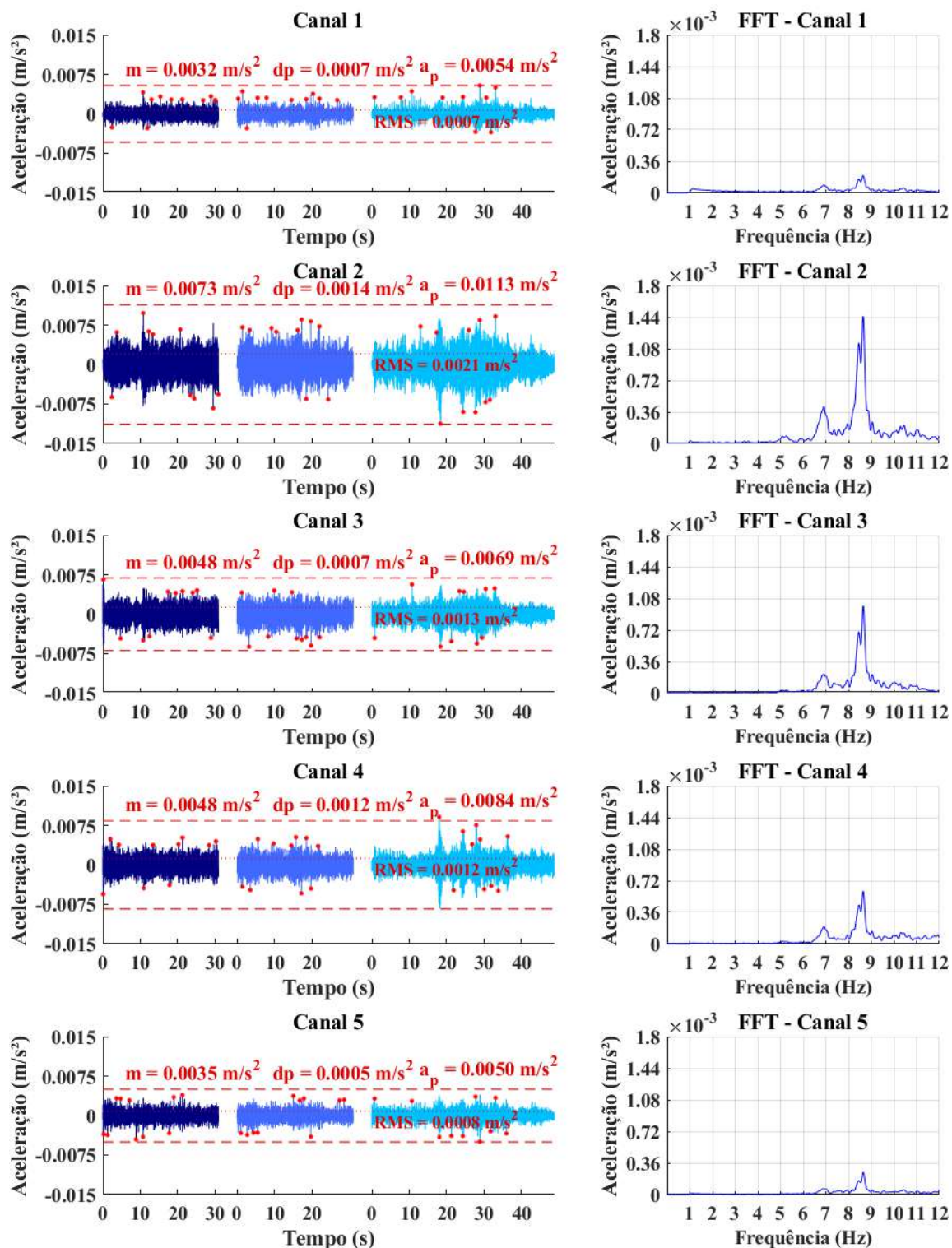


Figura A-59 – Resposta dinâmica do piso 5 para caminhada lenta em trajetória aleatória.

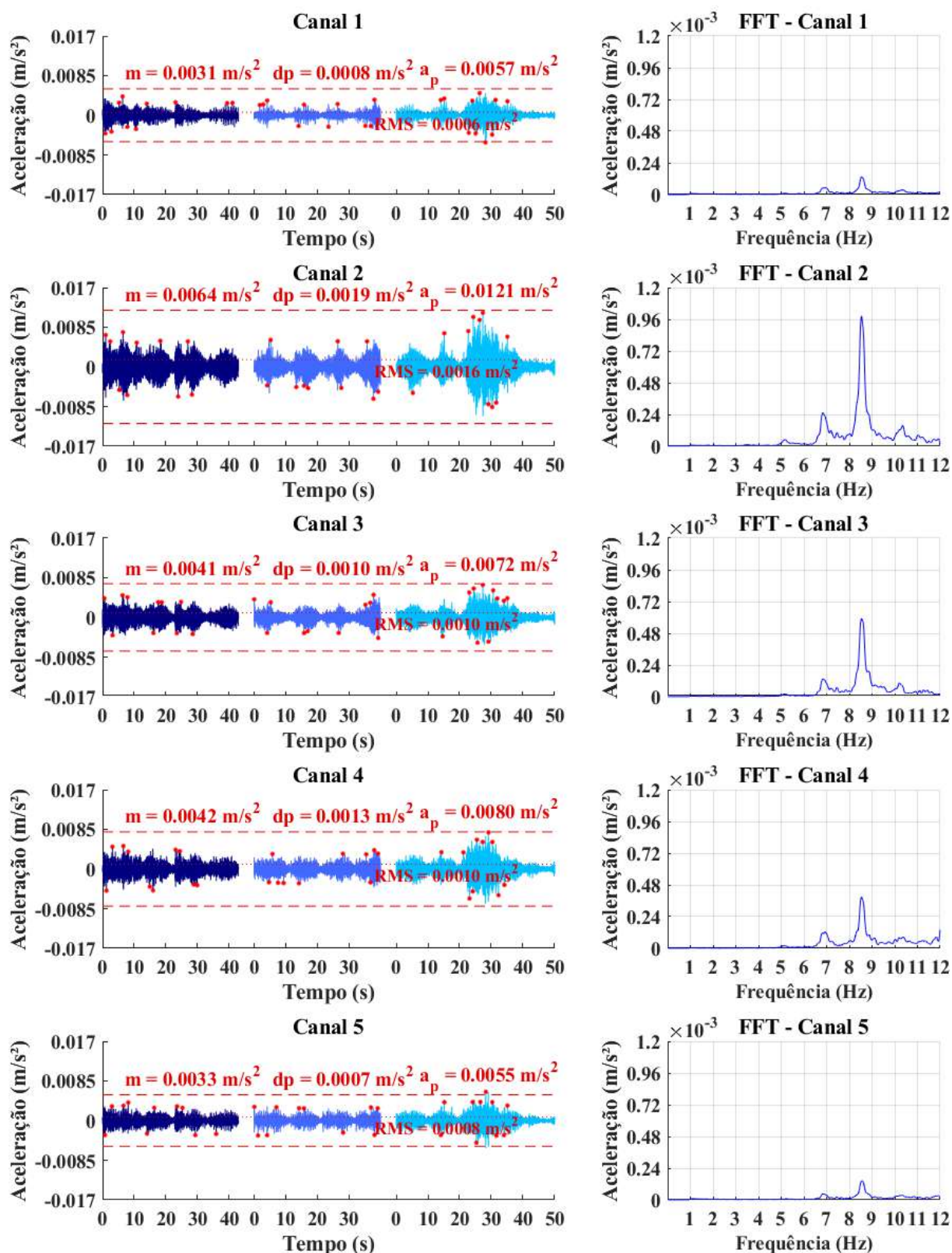


Figura A-60 – Resposta dinâmica do piso 5 para caminhada lenta em trajetória diagonal.

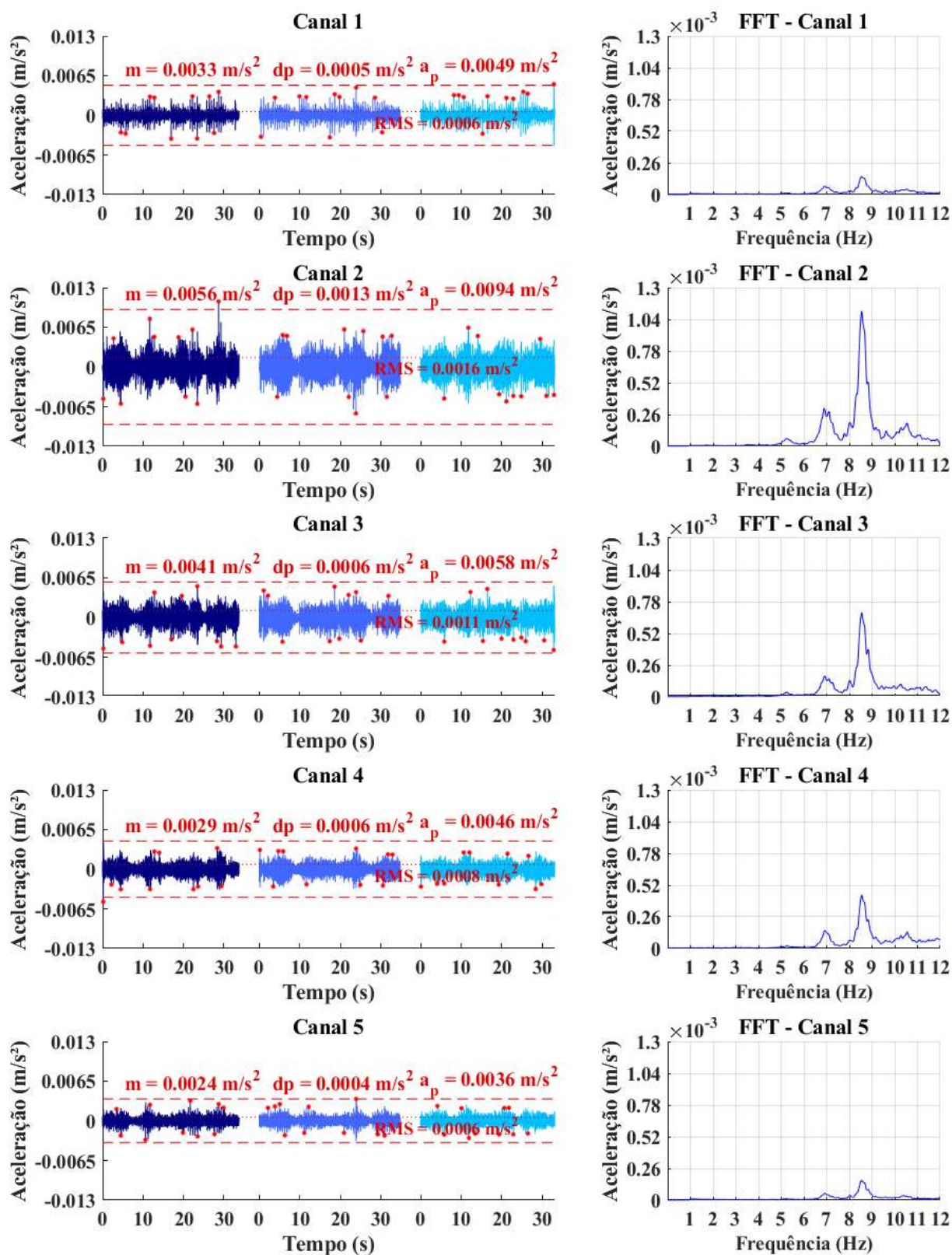


Figura A-61 – Resposta dinâmica do piso 5 para caminhada lenta em trajetória paralela.

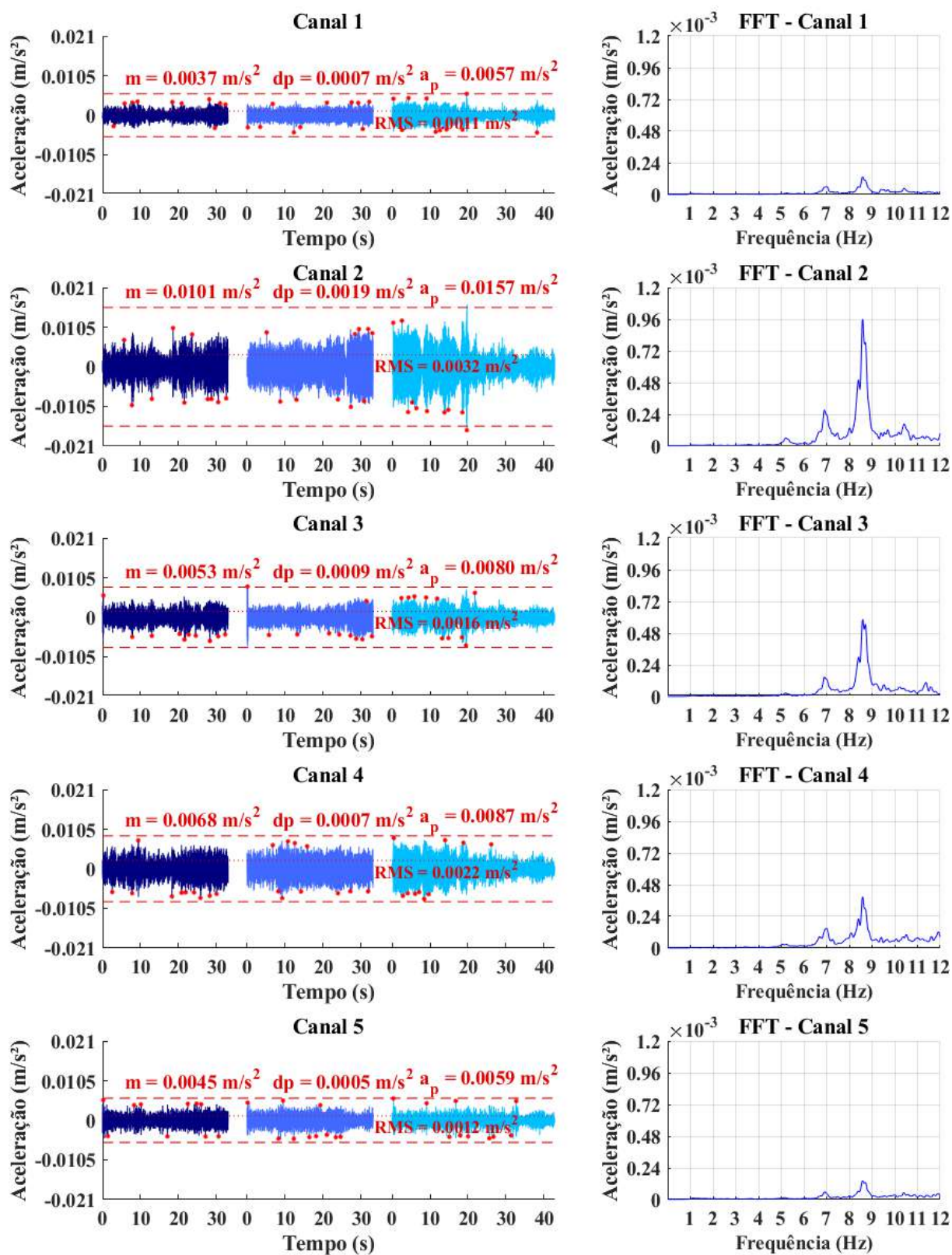


Figura A-62 – Resposta dinâmica do piso 5 para caminhada lenta em trajetória perpendicular.

A.2.5.2 Caminhada normal

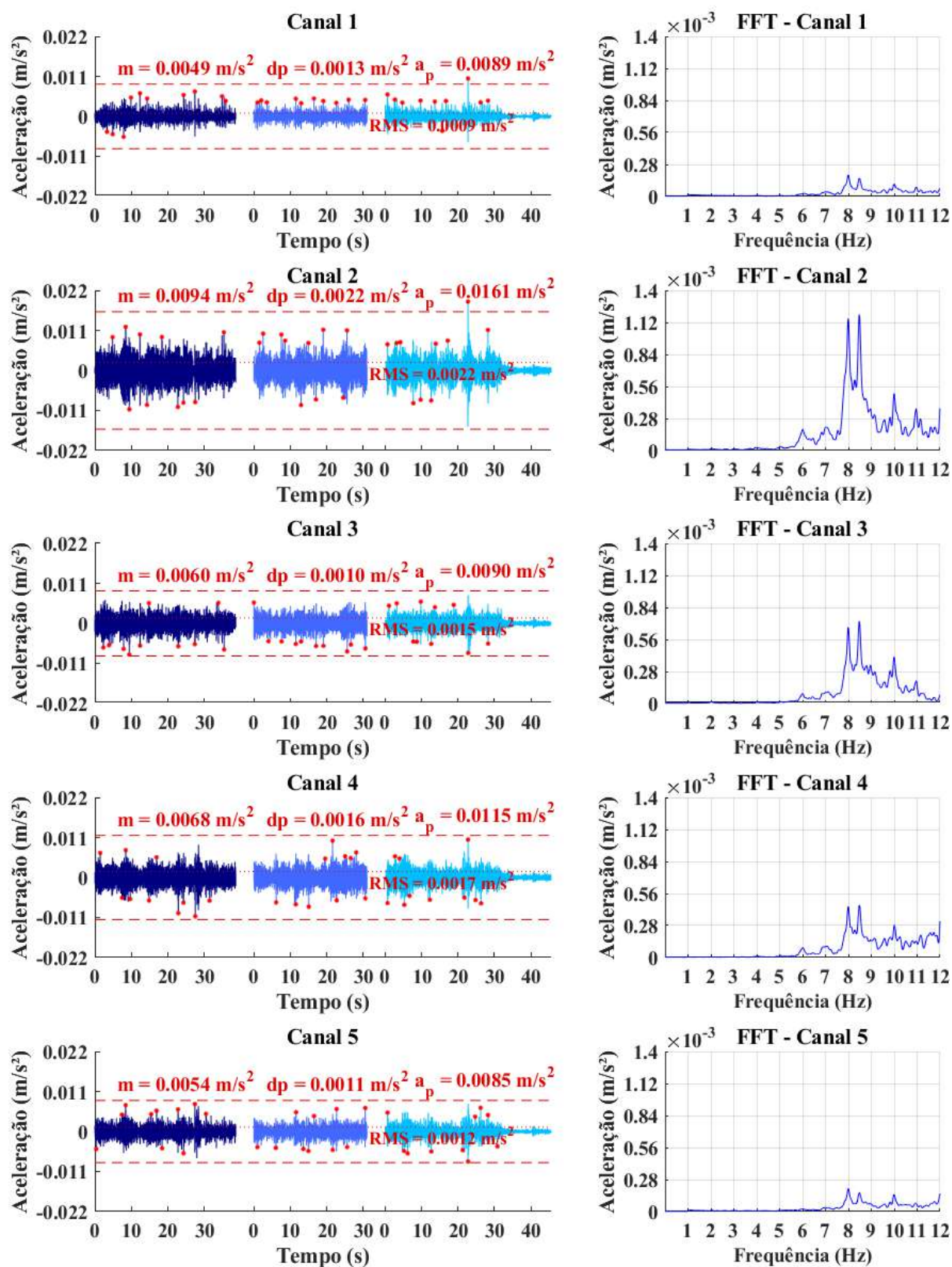


Figura A-63 – Resposta dinâmica do piso 5 para caminhada normal em trajetória aleatória.

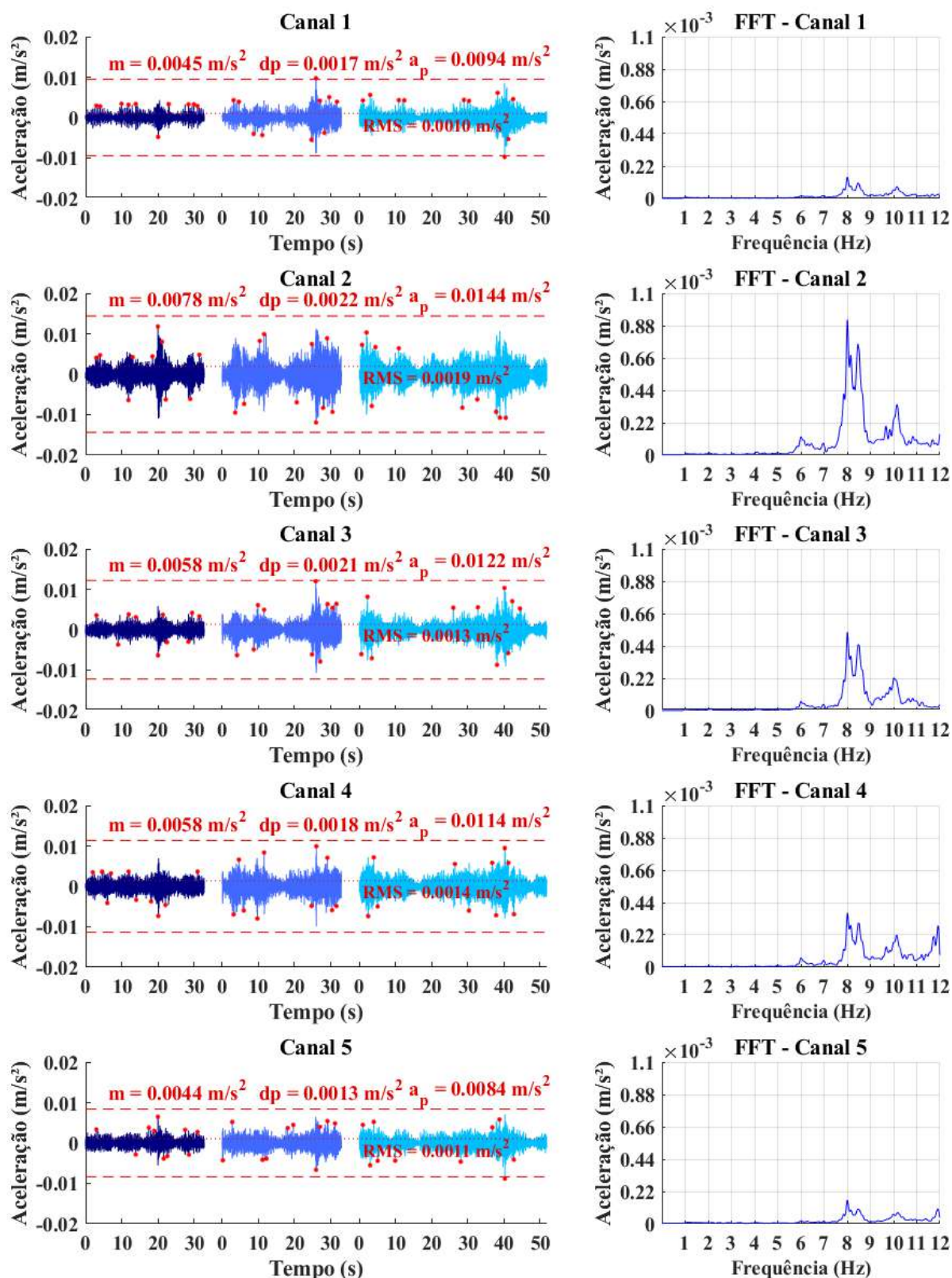


Figura A-64 – Resposta dinâmica do piso 5 para caminhada normal em trajetória diagonal.

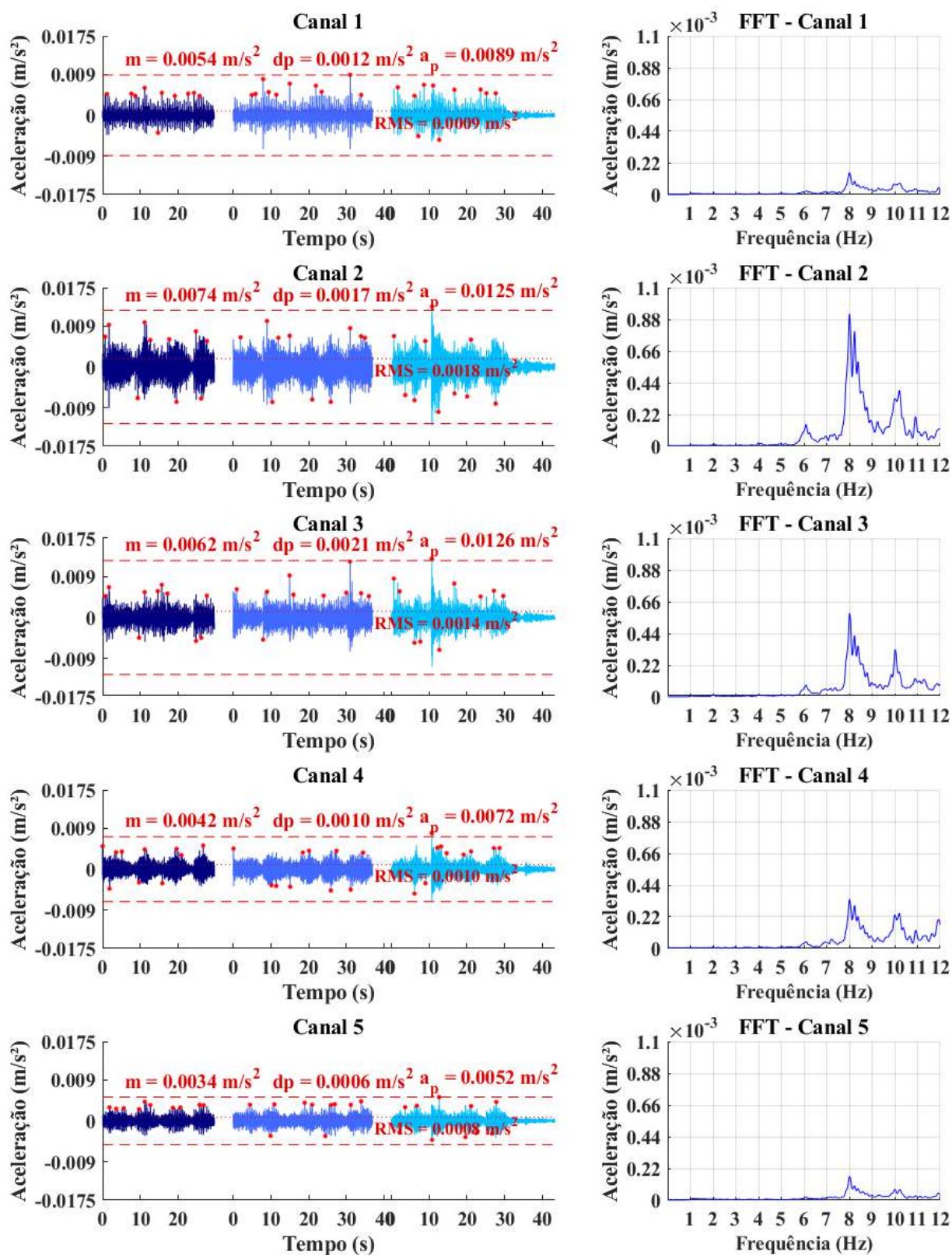


Figura A-65 – Resposta dinâmica do piso 5 para caminhada normal em trajetória paralela.

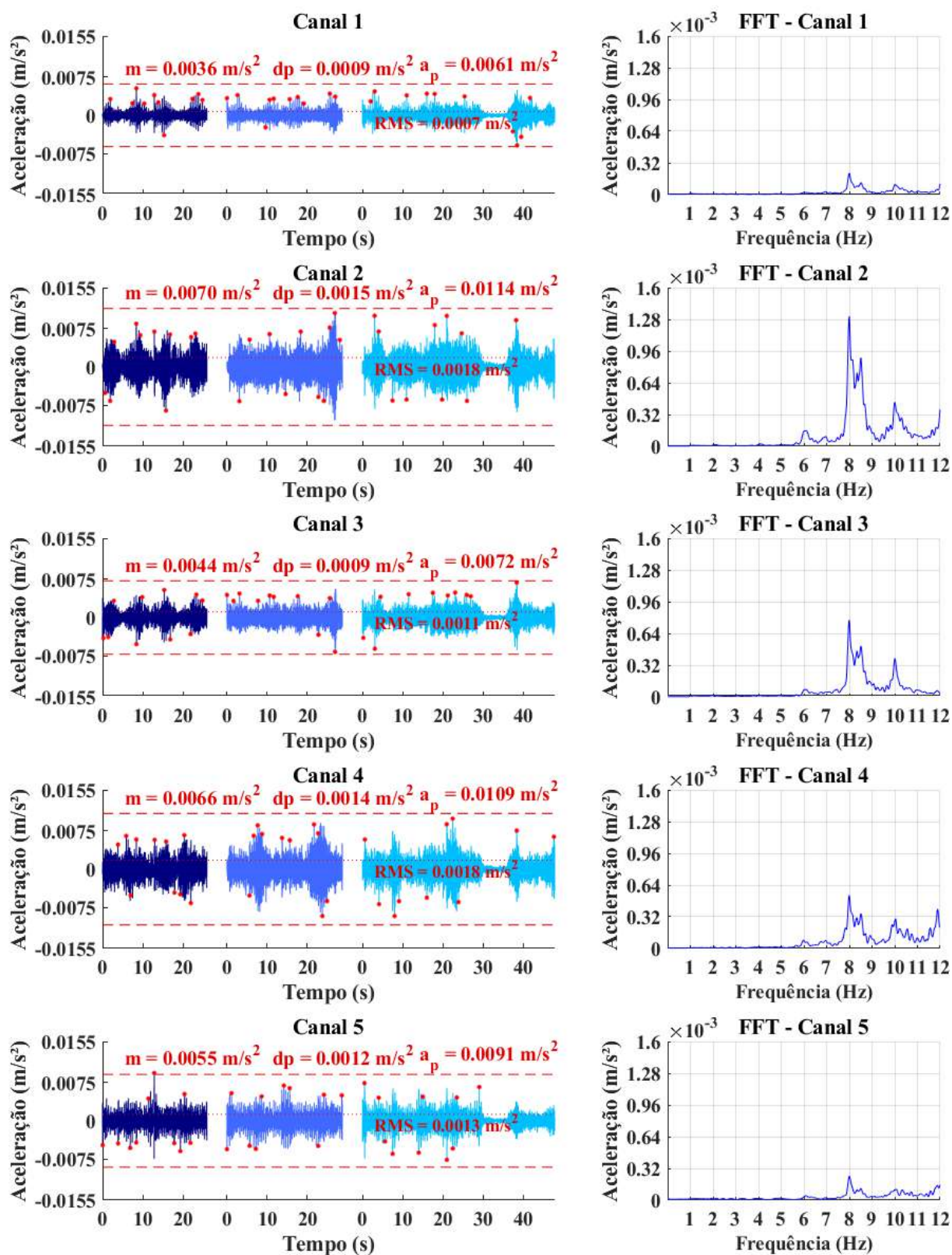


Figura A-66 – Resposta dinâmica do piso 5 para caminhada normal em trajetória perpendicular.

A.2.5.3 Caminhada rápida

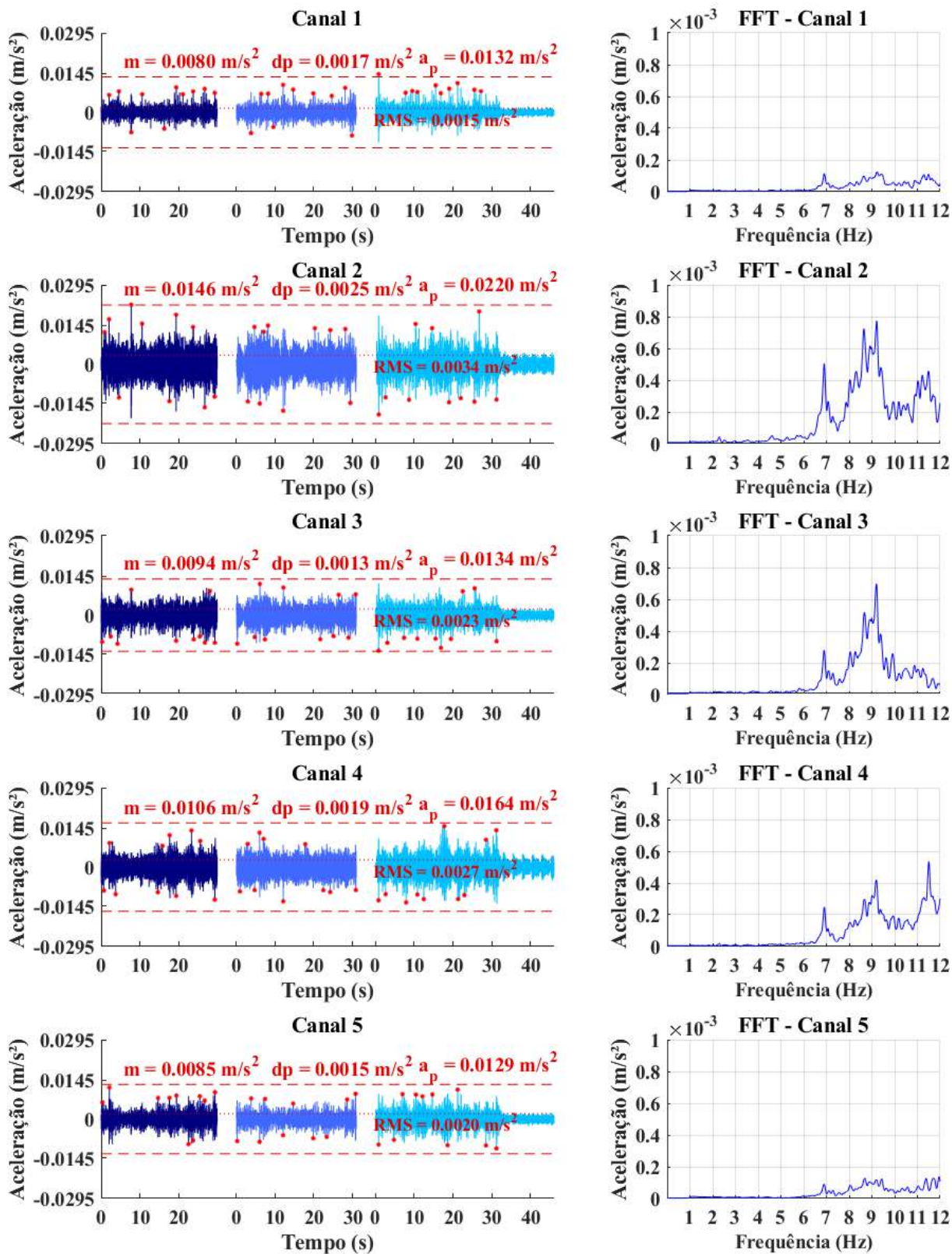


Figura A-67 – Resposta dinâmica do piso 5 para caminhada rápida em trajetória aleatória.

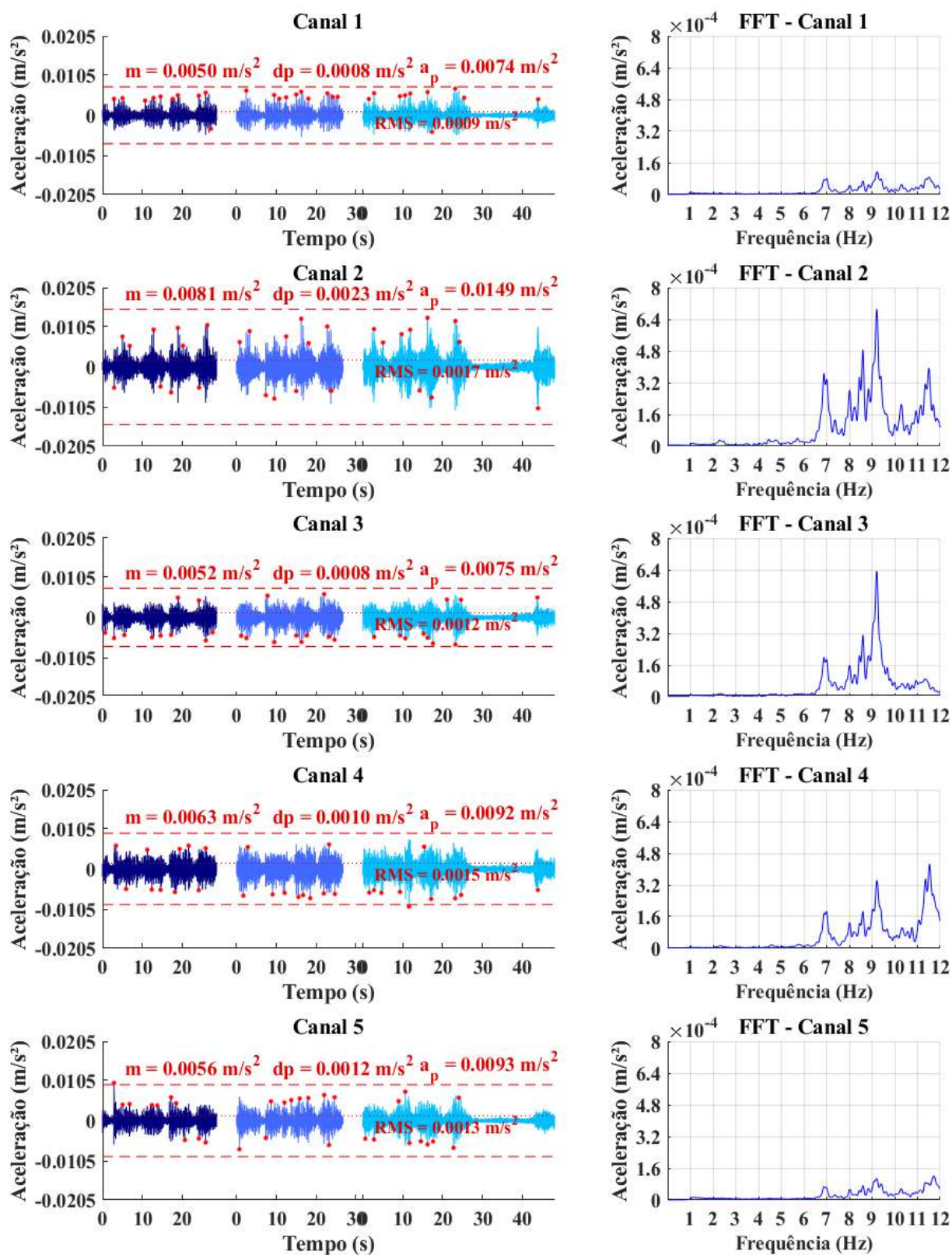


Figura A-68 – Resposta dinâmica do piso 5 para caminhada rápida em trajetória diagonal.

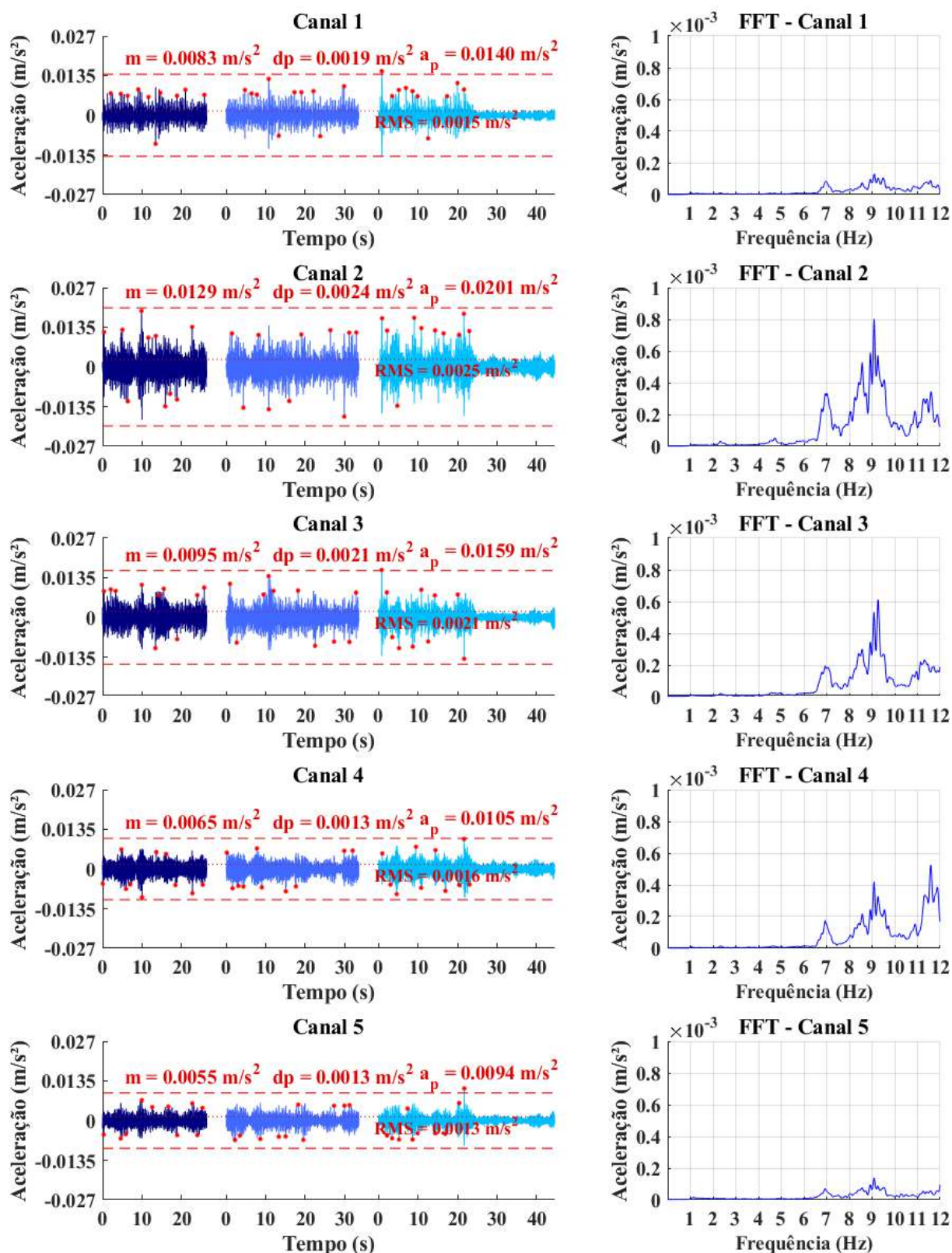


Figura A-69 – Resposta dinâmica do piso 5 para caminhada rápida em trajetória paralela.

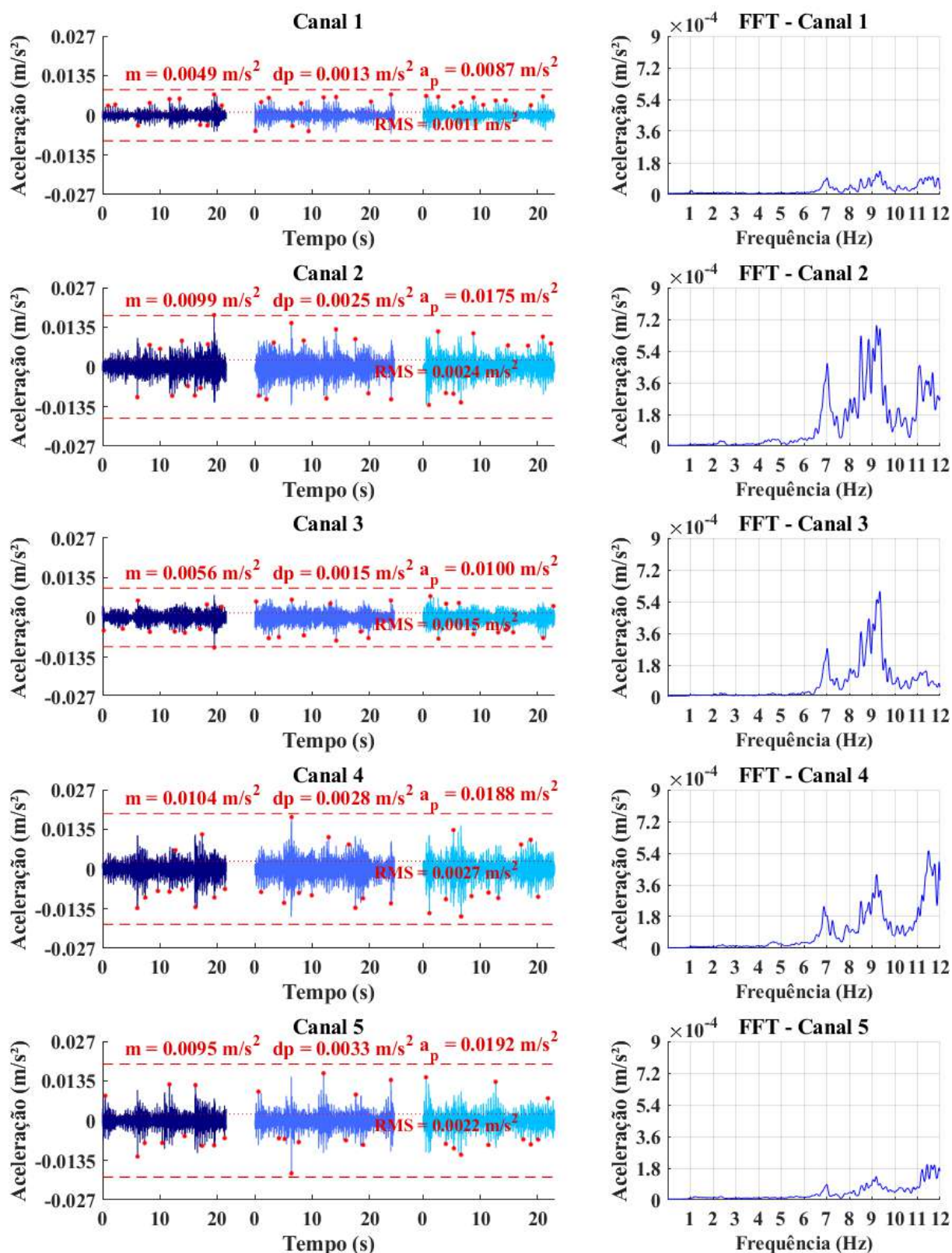


Figura A-70 – Resposta dinâmica do piso 5 para caminhada rápida em trajetória perpendicular.

ANEXO B - PROPRIEDADES GEOMÉTRICAS E MECÂNICAS DOS PERFIS DAS VIGAS E PILARES DO 8º PAVIMENTO

A seguir estão expostas em tabelas as especificações dos perfis que compõem as vigas e pilares do 8º pavimento do edifício estudado neste trabalho fornecido pela empresa que é responsável pela obra, assim como as respectivas dimensões e propriedades geométricas de cada viga e pilar.

I- PILARES:

Tabela B.1 - Propriedades geométricas e mecânicas dos pilares P1 e P31

Identificação Planta	P1, P31
Especificação Técnica	PSCX 300x380x6.30-0x0-φ0.0-C40
Parâmetros Básicos	
Ax (cm ²)	198,34
Iy (cm ⁴)	15.780,01
Iz (cm ⁴)	15.780,01
Dimensões	
bf (mm)	240,11
d (mm)	240,11
Vy (mm)	120,06
Vpy (mm)	120,06
Vz (mm)	120,06
Vpz (mm)	120,06
Propriedades Mecânicas	
Ay (cm ²)	165,29
Az (cm ²)	165,29
Ix (cm ⁴)	26.620,84
Wx (cm ³)	2.154,89
Wy (cm ³)	132,23
Wz (cm ³)	132,23

Tabela B.2 - Propriedades geométricas e mecânicas dos pilares P2, P4, P10, P38, P39, P40 e P44

Identificação Planta	P2, P4, P10, P38, P39, P40, P44
Especificação Técnica	PSCX 300x380x6.30-2x2-φ12.5-C40
Parâmetros Básicos	
Ax (cm ²)	202,74
Iy (cm ⁴)	16.322,38
Iz (cm ⁴)	16.322,38
Dimensões	
bf (mm)	241,75
d (mm)	241,75
Vy (mm)	120,88
Vpy (mm)	120,88
Vz (mm)	120,88
Vpz (mm)	120,88
Propriedades Mecânicas	
Ay (cm ²)	168,95
Az (cm ²)	168,95
Ix (cm ⁴)	27.535,81
Wx (cm ³)	2.215,50
Wy (cm ³)	135,16
Wz (cm ³)	135,16

Tabela B.3 - Propriedades geométricas e mecânicas dos pilares P3, P5, P11, P18, P23 e P42

Identificação Planta	P3, P5, P11, P18, P23, P42
Especificação Técnica	PSCX 300x380x6.30-3x3-φ20.0-C40
Parâmetros Básicos	

Tabela B.4 - Propriedades geométricas e mecânicas dos pilares P6

Identificação Planta	P6
Especificação Técnica	PSCX 350x430x6.30-2x2-φ12.5-C40
Parâmetros Básicos	

Ax (cm ²)	220,94
Iy (cm ⁴)	17.733,52
Iz (cm ⁴)	17.733,52
Dimensões	
bf (mm)	243,32
d (mm)	243,32
Vy (mm)	121,66
Vpy (mm)	121,66
Vz (mm)	121,66
Vpz (mm)	121,66
Propriedades Mecânicas	
Ay (cm ²)	184,12
Az (cm ²)	184,12
Ix (cm ⁴)	29.916,40
Wx (cm ³)	2.408,07
Wy (cm ³)	147,30
Wz (cm ³)	147,30

Ax (cm ²)	262,42
Iy (cm ⁴)	27.641,64
Iz (cm ⁴)	27.641,64
Dimensões	
bf (mm)	276,26
d (mm)	276,26
Vy (mm)	138,13
Vpy (mm)	138,13
Vz (mm)	138,13
Vpz (mm)	138,13
Propriedades Mecânicas	
Ay (cm ²)	218,68
Az (cm ²)	218,68
Ix (cm ⁴)	46.630,35
Wx (cm ³)	3.280,52
Wy (cm ³)	174,95
Wz (cm ³)	174,95

Tabela B.5 - Propriedades geométricas e mecânicas dos pilares P7

Identificação Planta	P7
Especificação Técnica	PSCX 400x480x8.00-3x3-φ12.5-C40
Parâmetros Básicos	
Ax (cm ²)	356,18
Iy (cm ⁴)	50.212,10
Iz (cm ⁴)	50.212,10
Dimensões	
bf (mm)	319,99
d (mm)	319,99
Vy (mm)	160,00
Vpy (mm)	160,00
Vz (mm)	160,00
Vpz (mm)	160,00
Propriedades Mecânicas	
Ay (cm ²)	296,82
Az (cm ²)	296,82
Ix (cm ⁴)	84.707,66
Wx (cm ³)	5.150,34
Wy (cm ³)	237,45
Wz (cm ³)	237,45

Tabela B.6 - Propriedades geométricas e mecânicas dos pilares P8, P22 e P27

Identificação Planta	P8, P22, P27
Especificação Técnica	PSCX 350x430x6.30-3x3-φ12.5-C40
Parâmetros Básicos	
Ax (cm ²)	266,82
Iy (cm ⁴)	28.053,46
Iz (cm ⁴)	28.053,46
Dimensões	
bf (mm)	276,45
d (mm)	276,45
Vy (mm)	138,22
Vpy (mm)	138,22
Vz (mm)	138,22
Vpz (mm)	138,22
Propriedades Mecânicas	
Ay (cm ²)	222,35
Az (cm ²)	222,35
Ix (cm ⁴)	47.326,11
Wx (cm ³)	3.331,81
Wy (cm ³)	177,88
Wz (cm ³)	177,88

Tabela B.7 - Propriedades geométricas e mecânicas dos pilares P9 e P30

Identificação Planta	P9, P30
Especificação Técnica	PSCX 300x380x6.30-2x2- ϕ 20.0-C40
Parâmetros Básicos	
Ax (cm ²)	209,61
Iy (cm ⁴)	17.077,96
Iz (cm ⁴)	17.077,96
Dimensões	
bf (mm)	243,65
d (mm)	243,65
Vy (mm)	121,83
Vpy (mm)	121,83
Vz (mm)	121,83
Vpz (mm)	121,83
Propriedades Mecânicas	
Ay (cm ²)	174,68
Az (cm ²)	174,68
Ix (cm ⁴)	28.810,48
Wx (cm ³)	2.303,73
Wy (cm ³)	139,74
Wz (cm ³)	139,74

Tabela B.8 - Propriedades geométricas e mecânicas dos pilares P12 e P25

Identificação Planta	P12, P25
Especificação Técnica	PSCX 450x530x8.00-4x4- ϕ 20.0-C40
Parâmetros Básicos	
Ax (cm ²)	458,92
Iy (cm ⁴)	80.762,50
Iz (cm ⁴)	80.762,50
Dimensões	
bf (mm)	358,52
d (mm)	358,52
Vy (mm)	179,26
Vpy (mm)	179,26
Vz (mm)	179,26
Vpz (mm)	179,26
Propriedades Mecânicas	
Ay (cm ²)	382,43
Az (cm ²)	382,43
Ix (cm ⁴)	136.246,10
Wx (cm ³)	7.411,53
Wy (cm ³)	305,95
Wz (cm ³)	305,95

Tabela B.9 - Propriedades geométricas e mecânicas dos pilares P13, P26 e P28

Identificação Planta	P13, P26, P28
Especificação Técnica	PSCX 400x480x8.00-3x3- ϕ 20.0-C40
Parâmetros Básicos	
Ax (cm ²)	369,95
Iy (cm ⁴)	52.683,92
Iz (cm ⁴)	52.683,92
Dimensões	
bf (mm)	322,40
d (mm)	322,40
Vy (mm)	161,20
Vpy (mm)	161,20
Vz (mm)	161,20
Vpz (mm)	161,20
Propriedades Mecânicas	
Ay (cm ²)	308,29

Tabela B.10 - Propriedades geométricas e mecânicas dos pilares P14 e P15

Identificação Planta	P14, P15
Especificação Técnica	W150x22.5
Parâmetros Básicos	
Ax (cm ²)	28,58
Iy (cm ⁴)	1.211,23
Iz (cm ⁴)	387,93
Dimensões	
bf (mm)	152,15
d (mm)	152,15
Vy (mm)	76,07
Vpy (mm)	76,07
Vz (mm)	76,07
Vpz (mm)	76,07
Propriedades Mecânicas	
Ay (cm ²)	20,06

Az (cm ²)	308,29
Ix (cm ⁴)	88.877,62
Wx (cm ³)	5.374,87
Wy (cm ³)	246,64
Wz (cm ³)	246,64

Az (cm ²)	8,90
Ix (cm ⁴)	4,16
Wx (cm ³)	6,23
Wy (cm ³)	13,42
Wz (cm ³)	8,13

Tabela B.11 - Propriedades geométricas e mecânicas dos pilares P20

Identificação Planta	P20
Especificação Técnica	PSCX 500x580x8.00-6x6-φ20.0-C40
Parâmetros Básicos	
Ax (cm ²)	566,60
Iy (cm ⁴)	121.587,65
Iz (cm ⁴)	121.587,65
Dimensões	
bf (mm)	396,34
d (mm)	396,34
Vy (mm)	198,17
Vpy (mm)	198,17
Vz (mm)	198,17
Vpz (mm)	198,17
Propriedades Mecânicas	
Ay (cm ²)	472,16
Az (cm ²)	472,16
Ix (cm ⁴)	205.118,01
Wx (cm ³)	10.103,01
Wy (cm ³)	377,73
Wz (cm ³)	377,73

Tabela B.12 - Propriedades geométricas e mecânicas dos pilares P21

Identificação Planta	P21
Especificação Técnica	PSCX 400x480x8.00-4x4-φ20.0-C40
Parâmetros Básicos	
Ax (cm ²)	381,31
Iy (cm ⁴)	54.395,74
Iz (cm ⁴)	54.395,74
Dimensões	
bf (mm)	323,51
d (mm)	323,51
Vy (mm)	161,76
Vpy (mm)	161,76
Vz (mm)	161,76
Vpz (mm)	161,76
Propriedades Mecânicas	
Ay (cm ²)	317,76
Az (cm ²)	317,76
Ix (cm ⁴)	91.765,44
Wx (cm ³)	5.542,70
Wy (cm ³)	254,21
Wz (cm ³)	254,21

Tabela B.13 - Propriedades geométricas e mecânicas dos pilares P29 e P43

Identificação Planta	P29, P43
Especificação Técnica	PSCX 350x430x6.30-3x3-φ20.0-C40
Parâmetros Básicos	
Ax (cm ²)	280,57
Iy (cm ⁴)	29.816,58
Iz (cm ⁴)	29.816,58
Dimensões	
bf (mm)	278,91

Tabela B.14 - Propriedades geométricas e mecânicas dos pilares P32

Identificação Planta	P32
Especificação Técnica	PSCX 250x330x6.30-0x0-φ0.0-C40
Parâmetros Básicos	
Ax (cm ²)	146,24
Iy (cm ⁴)	8.472,87
Iz (cm ⁴)	8.472,87
Dimensões	
bf (mm)	205,12

d (mm)	278,91
Vy (mm)	139,46
Vpy (mm)	139,46
Vz (mm)	139,46
Vpz (mm)	139,46
Propriedades Mecânicas	
Ay (cm ²)	233,81
Az (cm ²)	233,81
Ix (cm ⁴)	50.300,48
Wx (cm ³)	3.520,63
Wy (cm ³)	187,05
Wz (cm ³)	187,05

d (mm)	205,12
Vy (mm)	102,56
Vpy (mm)	102,56
Vz (mm)	102,56
Vpz (mm)	102,56
Propriedades Mecânicas	
Ay (cm ²)	121,87
Az (cm ²)	121,87
Ix (cm ⁴)	14.293,71
Wx (cm ³)	1.355,68
Wy (cm ³)	97,50
Wz (cm ³)	97,50

Tabela B.15 - Propriedades geométricas e mecânicas dos pilares P34 e P36

Identificação Planta	P34, P36
Especificação Técnica	PSCX 300x380x6.30-3x3-φ12.5-C40
Parâmetros Básicos	
Ax (cm ²)	207,14
Iy (cm ⁴)	16.594,22
Iz (cm ⁴)	16.594,22
Dimensões	
bf (mm)	241,71
d (mm)	241,71
Vy (mm)	120,86
Vpy (mm)	120,86
Vz (mm)	120,86
Vpz (mm)	120,86
Propriedades Mecânicas	
Ay (cm ²)	172,62
Az (cm ²)	172,62
Ix (cm ⁴)	27.994,39
Wx (cm ³)	2.257,30
Wy (cm ³)	138,09
Wz (cm ³)	138,09

Tabela B.16 - Propriedades geométricas e mecânicas dos pilares P35

Identificação Planta	P35
Especificação Técnica	PSCX 350x430x6.30-2x2-φ20.0-C40
Parâmetros Básicos	
Ax (cm ²)	269,29
Iy (cm ⁴)	28.813,56
Iz (cm ⁴)	28.813,56
Dimensões	
bf (mm)	278,68
d (mm)	278,68
Vy (mm)	139,34
Vpy (mm)	139,34
Vz (mm)	139,34
Vpz (mm)	139,34
Propriedades Mecânicas	
Ay (cm ²)	224,41
Az (cm ²)	224,41
Ix (cm ⁴)	48.608,39
Wx (cm ³)	3.392,58
Wy (cm ³)	179,53
Wz (cm ³)	179,53

II- VIGAS:

Tabela B.17 - Propriedades geométricas e mecânicas das vigas V399x140

Identificação Planta	V399x140
Especificação Técnica	W410x38.8
Parâmetros Básicos	
Ax (cm ²)	49,55
Iy (cm ⁴)	12.528,57
Iz (cm ⁴)	399,17
Dimensões	
bf (mm)	139,70
d (mm)	398,53
Vy (mm)	69,85
Vpy (mm)	69,85
Vz (mm)	199,26
Vpz (mm)	199,26
Propriedades Mecânicas	
Ay (cm ²)	24,52
Az (cm ²)	25,29
Ix (cm ⁴)	10,82
Wx (cm ³)	12,29
Wy (cm ³)	16,39
Wz (cm ³)	22,52

Tabela B.18 - Propriedades geométricas e mecânicas das vigas V450x150-1

Identificação Planta	V450x150-1
Especificação Técnica	PS450x150-150x8,00-9,50x6,30
Parâmetros Básicos	
Ax (cm ²)	53,50
Iy (cm ⁴)	16.982,20
Iz (cm ⁴)	493,09
Dimensões	
bf (mm)	150,00
d (mm)	450,00
Vy (mm)	75,00
Vpy (mm)	75,00
Vz (mm)	233,71
Vpz (mm)	216,29
Propriedades Mecânicas	
Ay (cm ²)	26,25
Az (cm ²)	27,25
Ix (cm ⁴)	10,16
Wx (cm ³)	10,56
Wy (cm ³)	17,56
Wz (cm ³)	25,99

Tabela B.19 - Propriedades geométricas e mecânicas das vigas V450x150-2

Identificação Planta	V450x150-2
Especificação Técnica	PS450x150-150x6,3-9,50x6,30
Parâmetros Básicos	
Ax (cm ²)	51,05
Iy (cm ⁴)	15.668,23
Iz (cm ⁴)	445,28
Dimensões	
bf (mm)	150,00
d (mm)	450,00
Vy (mm)	75,00
Vpy (mm)	75,00

Tabela B.20 - Propriedades geométricas e mecânicas das vigas V450x150-3

Identificação Planta	V450x150-3
Especificação Técnica	PS450x150-150x6,30-12,50x6,30
Parâmetros Básicos	
Ax (cm ²)	55,37
Iy (cm ⁴)	17.171,31
Iz (cm ⁴)	529,65
Dimensões	
bf (mm)	150,00
d (mm)	450,00
Vy (mm)	75,00
Vpy (mm)	75,00

Vz (mm)	244,55
Vpz (mm)	205,45
Propriedades Mecânicas	
Ay (cm ²)	23,70
Az (cm ²)	27,35
Ix (cm ⁴)	8,92
Wx (cm ³)	9,25
Wy (cm ³)	15,86
Wz (cm ³)	27,68

Vz (mm)	259,69
Vpz (mm)	190,31
Propriedades Mecânicas	
Ay (cm ²)	28,20
Az (cm ²)	27,17
Ix (cm ⁴)	14,03
Wx (cm ³)	10,92
Wy (cm ³)	18,87
Wz (cm ³)	30,63

Tabela B.21 - Propriedades geométricas e mecânicas das vigas V450x150-4

Identificação Planta	V450x150-4
Especificação Técnica	PS450x150-150x6,30-6,30x6,30
Parâmetros Básicos	
Ax (cm ²)	46,46
Iy (cm ⁴)	13.696,07
Iz (cm ⁴)	355,29
Dimensões	
bf (mm)	150,00
d (mm)	400,00
Vy (mm)	75,00
Vpy (mm)	75,00
Vz (mm)	225,00
Vpz (mm)	225,00
Propriedades Mecânicas	
Ay (cm ²)	18,90
Az (cm ²)	27,56
Ix (cm ⁴)	6,05
Wx (cm ³)	9,37
Wy (cm ³)	12,65
Wz (cm ³)	21,49

Tabela B.22 - Propriedades geométricas e mecânicas das vigas V450x150-5

Identificação Planta	V450x150-5
Especificação Técnica	PS450x150-150x8,00-12,50x6,30
Parâmetros Básicos	
Ax (cm ²)	57,81
Iy (cm ⁴)	18.663,52
Iz (cm ⁴)	577,46
Dimensões	
bf (mm)	150,00
d (mm)	450,00
Vy (mm)	75,00
Vpy (mm)	75,00
Vz (mm)	249,02
Vpz (mm)	200,98
Propriedades Mecânicas	
Ay (cm ²)	30,75
Az (cm ²)	27,06
Ix (cm ⁴)	15,27
Wx (cm ³)	11,91
Wy (cm ³)	20,57
Wz (cm ³)	28,83

Tabela B.23 - Propriedades geométricas e mecânicas das vigas V450x200-1

Identificação Planta	V450x200-1
Especificação Técnica	PS450x200-200x8,00-12,50x6,30
Parâmetros Básicos	
Ax (cm ²)	68,06

Tabela B.24 - Propriedades geométricas e mecânicas das vigas V450x200-2

Identificação Planta	V450x200-2
Especificação Técnica	PS450x200-200x8,00-16,00x6,30
Parâmetros Básicos	
Ax (cm ²)	74,84

ly (cm ⁴)	23.427,67
Iz (cm ⁴)	1.367,56
Dimensões	
bf (mm)	200,00
d (mm)	450,00
Vy (mm)	100,00
Vpy (mm)	100,00
Vz (mm)	252,50
Vpz (mm)	197,50
Propriedades Mecânicas	
Ay (cm ²)	41,00
Az (cm ²)	27,06
Ix (cm ⁴)	19,38
Wx (cm ³)	15,37
Wy (cm ³)	27,38
Wz (cm ³)	29,80

ly (cm ⁴)	25.498,01
Iz (cm ⁴)	1.600,89
Dimensões	
bf (mm)	200,00
d (mm)	450,00
Vy (mm)	100,00
Vpy (mm)	100,00
Vz (mm)	269,10
Vpz (mm)	180,90
Propriedades Mecânicas	
Ay (cm ²)	48,00
Az (cm ²)	26,84
Ix (cm ⁴)	32,77
Wx (cm ³)	20,56
Wy (cm ³)	32,05
Wz (cm ³)	32,78

Tabela B.25 - Propriedades geométricas e mecânicas das vigas V450x200-3

Identificação Planta	V450x200-3
Especificação Técnica	PS450x200-200x9,50-9,50x12,60
Parâmetros Básicos	
Ax (cm ²)	92,31
ly (cm ⁴)	26.843,30
Iz (cm ⁴)	1.273,85
Dimensões	
bf (mm)	200,00
d (mm)	450,00
Vy (mm)	100,00
Vpy (mm)	100,00
Vz (mm)	225,00
Vpz (mm)	225,00
Propriedades Mecânicas	
Ay (cm ²)	38,00
Az (cm ²)	54,31
Ix (cm ⁴)	39,30
Wx (cm ³)	30,61
Wy (cm ³)	25,58
Wz (cm ³)	47,57

Tabela B.26 - Propriedades geométricas e mecânicas das vigas V450x200-4

Identificação Planta	V450x200-4
Especificação Técnica	PS450x200-200x9,50-12,50x6,30
Parâmetros Básicos	
Ax (cm ²)	70,96
ly (cm ⁴)	25.083,32
Iz (cm ⁴)	1.467,56
Dimensões	
bf (mm)	200,00
d (mm)	450,00
Vy (mm)	100,00
Vpy (mm)	100,00
Vz (mm)	242,52
Vpz (mm)	207,48
Propriedades Mecânicas	
Ay (cm ²)	44,00
Az (cm ²)	26,96
Ix (cm ⁴)	21,59
Wx (cm ³)	17,13
Wy (cm ³)	29,38
Wz (cm ³)	28,22

Tabela B.27 - Propriedades geométricas e mecânicas das vigas V303x101

Identificação Planta	V303x101
Especificação Técnica	W310x21
Parâmetros Básicos	
Ax (cm ²)	26,84
Iy (cm ⁴)	3.687,81
Iz (cm ⁴)	98,23
Dimensões	
bf (mm)	100,84
d (mm)	302,51
Vy (mm)	50,42
Vpy (mm)	50,42
Vz (mm)	151,26
Vpz (mm)	151,26
Propriedades Mecânicas	
Ay (cm ²)	11,55
Az (cm ²)	15,35
Ix (cm ⁴)	2,91
Wx (cm ³)	5,08
Wy (cm ³)	7,74
Wz (cm ³)	13,42

Tabela B.28 - Propriedades geométricas e mecânicas das vigas V251x101

Identificação Planta	V251x101
Especificação Técnica	W250x17,9
Parâmetros Básicos	
Ax (cm ²)	22,84
Iy (cm ⁴)	2.239,33
Iz (cm ⁴)	90,74
Dimensões	
bf (mm)	100,58
d (mm)	250,70
Vy (mm)	50,29
Vpy (mm)	50,29
Vz (mm)	125,35
Vpz (mm)	125,35
Propriedades Mecânicas	
Ay (cm ²)	10,71
Az (cm ²)	12,13
Ix (cm ⁴)	2,08
Wx (cm ³)	3,93
Wy (cm ³)	7,16
Wz (cm ³)	10,77

Tabela B.29 - Propriedades geométricas e mecânicas das vigas V349x127

Identificação Planta	V349x127
Especificação Técnica	W360x32,9
Parâmetros Básicos	
Ax (cm ²)	41,87
Iy (cm ⁴)	8.283,01
Iz (cm ⁴)	291,36
Dimensões	
bf (mm)	127,00
d (mm)	349,00
Vy (mm)	63,50
Vpy (mm)	63,50
Vz (mm)	174,50
Vpz (mm)	174,50
Propriedades Mecânicas	

Tabela B.30 - Propriedades geométricas e mecânicas das vigas V403x140

Identificação Planta	V403x140
Especificação Técnica	W410x46,1
Parâmetros Básicos	
Ax (cm ²)	58,84
Iy (cm ⁴)	15.608,68
Iz (cm ⁴)	516,13
Dimensões	
bf (mm)	140,34
d (mm)	403,35
Vy (mm)	70,17
Vpy (mm)	70,17
Vz (mm)	201,68
Vpz (mm)	201,68
Propriedades Mecânicas	

Ay (cm ²)	21,61
Az (cm ²)	20,39
Ix (cm ⁴)	8,74
Wx (cm ³)	10,32
Wy (cm ³)	14,45
Wz (cm ³)	18,32

Ay (cm ²)	31,35
Az (cm ²)	28,19
Ix (cm ⁴)	19,15
Wx (cm ³)	17,21
Wy (cm ³)	21,03
Wz (cm ³)	25,10

Tabela B.31 - Propriedades geométricas e mecânicas das vigas V305x101

Identificação Planta	V305x101
Especificação Técnica	W310x28,3
Parâmetros Básicos	
Ax (cm ²)	30,39
Iy (cm ⁴)	4.287,18
Iz (cm ⁴)	117,38
Dimensões	
bf (mm)	101,35
d (mm)	304,55
Vy (mm)	50,67
Vpy (mm)	50,67
Vz (mm)	152,27
Vpz (mm)	152,27
Propriedades Mecânicas	
Ay (cm ²)	13,61
Az (cm ²)	17,63
Ix (cm ⁴)	4,16
Wx (cm ³)	6,23
Wy (cm ³)	9,16
Wz (cm ³)	14,90

Tabela B.32 - Propriedades geométricas e mecânicas das vigas V600x200-1

Identificação Planta	V600x200-1
Especificação Técnica	PS600x200-200x9,50-22,40x8,00
Parâmetros Básicos	
Ax (cm ²)	109,25
Iy (cm ⁴)	61.660,02
Iz (cm ⁴)	2.129,09
Dimensões	
bf (mm)	200,00
d (mm)	600,00
Vy (mm)	100,00
Vpy (mm)	100,00
Vz (mm)	364,40
Vpz (mm)	235,60
Propriedades Mecânicas	
Ay (cm ²)	63,80
Az (cm ²)	45,45
Ix (cm ⁴)	84,79
Wx (cm ³)	37,43
Wy (cm ³)	42,65
Wz (cm ³)	56,60

Tabela B.33 - Propriedades geométricas e mecânicas das vigas V600x200-2

Identificação Planta	V600x200-2
Especificação Técnica	PS600x200-200x16,00-16,00x6,30
Parâmetros Básicos	
Ax (cm ²)	99,78
Iy (cm ⁴)	64.203,26
Iz (cm ⁴)	2.134,52
Dimensões	

Tabela B.34 - Propriedades geométricas e mecânicas das vigas V500x150

Identificação Planta	V500x150
Especificação Técnica	PS500x150-150x6,30-8,00x6,30
Parâmetros Básicos	
Ax (cm ²)	52,05
Iy (cm ⁴)	18.969,21
Iz (cm ⁴)	403,20
Dimensões	

bf (mm)	200,00
d (mm)	600,00
Vy (mm)	100,00
Vpy (mm)	100,00
Vz (mm)	300,00
Vpz (mm)	300,00
Propriedades Mecânicas	
Ay (cm ²)	64,00
Az (cm ²)	35,78
Ix (cm ⁴)	56,56
Wx (cm ³)	35,61
Wy (cm ³)	42,73
Wz (cm ³)	34,03

bf (mm)	150,00
d (mm)	500,00
Vy (mm)	75,00
Vpy (mm)	75,00
Vz (mm)	261,40
Vpz (mm)	238,60
Propriedades Mecânicas	
Ay (cm ²)	21,45
Az (cm ²)	30,60
Ix (cm ⁴)	7,71
Wx (cm ³)	9,43
Wy (cm ³)	14,36
Wz (cm ³)	28,57

Tabela B.35 - Propriedades geométricas e mecânicas das vigas V400x150

Identificação Planta	V400x150
Especificação Técnica	PS400x150-150x6,30-6,30x6,30
Parâmetros Básicos	
Ax (cm ²)	43,31
Iy (cm ⁴)	10.376,74
Iz (cm ⁴)	355,18
Dimensões	
bf (mm)	150,00
d (mm)	400,00
Vy (mm)	75,00
Vpy (mm)	75,00
Vz (mm)	200,00
Vpz (mm)	200,00
Propriedades Mecânicas	
Ay (cm ²)	18,90
Az (cm ²)	24,41
Ix (cm ⁴)	5,63
Wx (cm ³)	8,73
Wy (cm ³)	12,65
Wz (cm ³)	21,49

Tabela B.36 - Propriedades geométricas e mecânicas das vigas V250x200

Identificação Planta	V250x200
Especificação Técnica	PS250x200-200x6,30-6,30x12,60
Parâmetros Básicos	
Ax (cm ²)	55,11
Iy (cm ⁴)	5.147,24
Iz (cm ⁴)	843,96
Dimensões	
bf (mm)	200,00
d (mm)	250,00
Vy (mm)	100,00
Vpy (mm)	100,00
Vz (mm)	125,00
Vpz (mm)	125,00
Propriedades Mecânicas	
Ay (cm ²)	25,20
Az (cm ²)	29,91
Ix (cm ⁴)	18,57
Wx (cm ³)	14,60
Wy (cm ³)	16,95
Wz (cm ³)	26,77

ANEXO C - INSTRUÇÕES NORMATIVAS E DE PROJETO

C.1 Introdução

Este anexo visa apresentar, de forma simplificada, as principais normas nacionais e internacionais que versam sobre o tema de vibrações de pisos e conforto humano. Este anexo também inclui guias de projeto, como os guias do *The Steel Construction Institute (SCI)/2009* e *American Institute of Steel Construction (AISC)/2016*.

C.2 Norma brasileira NBR 8.800 (2008)

A norma determina os requisitos básicos que devem ser respeitados nos projetos de estruturas de aço e mistas de aço e concreto de edificações.

Em se tratando da verificação do estado limite de serviço referente às vibrações de pisos, o item 11.4.1 estabelece o dimensionamento da estrutura, tais como grandes áreas que não possuem divisórias ou outros elementos de amortecimento, de modo a se evitar o aparecimento de vibrações transientes indesejáveis pelo caminhar humano e outras fontes, conforme o anexo L (NBR 8800, 2008, p.110).

O item 11.4.2, pertinente aos equipamentos mecânicos que possam produzir vibrações indesejáveis, é recomendado o isolamento para reduzir ou eliminar tais vibrações na estrutura.

Esses tipos de vibrações, que incluem veículos e atividades humanas rítmicas como aeróbica, devem ser verificados também em relação ao estado limite último (ELU), incluindo fadiga. O anexo K e L pertencentes a este item descrevem, respectivamente, as verificações de fadiga e estado limite de serviço (ELS).

No Anexo L, item L.1.2 (NBR 8800, 2008), instituiu-se que a frequência natural da estrutura deve ser superior a 3 Hz. Já no item L.2, os projetos estruturais devem avaliar os problemas de vibrações de pisos por meio da realização de uma análise dinâmica, levando em conta as características e a natureza das excitações dinâmicas,

por exemplo, o caminhar humano e atividades rítmicas; os critérios de aceitação para o conforto humano em função do uso e ocupação das áreas do piso; a frequência natural fundamental da estrutura do piso; a razão de amortecimento modal; os pesos efetivos do piso. Este item recomenda a avaliação mais precisa utilizando os procedimentos e métodos contidos nas bibliografias no item S.4 (NBR 8800, 2008, p. 236).

Apesar do item anterior ter recomendado análises mais criteriosas, no item L.3 ficou estabelecido uma “avaliação simplificada para atividades humanas normais”, na qual a NBR 8800 assegura que “a opção por este tipo de avaliação fica a critério do projetista e pode não constituir uma solução adequada para o problema” (NB 8800, 2008, p.161). Deste modo, foram desenvolvidas duas regras para esta avaliação, descritas nos itens L.3.2 e L.3.3.

O item L.3.2, que trata de sistemas estruturais de pisos destinados ao caminhar humano constante, como residência e escritório, a frequência natural não deve ser inferior a 4 Hz e deslocamento vertical do piso causado pelas ações permanentes e variáveis abaixo de 20 mm.

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

C.3 Norma brasileira NBR 6118 (2014)

Esta norma estabelece os requisitos básicos exigíveis para o projeto de estruturas de concreto simples, armado e protendido, excluídas aquelas em que se empregam concreto leve, pesado ou outros especiais.

A verificação do estado limite de serviço, nesta norma, é baseada no item 13.3 (NBR 6118, 2014, p. 76), avaliando os limites estabelecidos de deslocamento da

estrutura mediante os valores práticos contidos na tabela 13.3 (NBR 6118, 2014, p. 77). Esta tabela indica valores relacionados a quatro tipos de efeito a analisar, onde o utilizado será referente à aceitabilidade sensorial em relação a vibrações de pisos. De acordo com a tabela referida, o deslocamento estático limite é considerado a $L/350$, onde “L” é o menor vão do piso, e o deslocamento estático considerado é aquele devido à parcela de cargas acidentais.

A análise das vibrações excessivas, pelo item 23.3, é realizada em regime linear no caso de estruturas usuais. Com o intuito de evitá-las, e assim garantir um comportamento satisfatório das estruturas sujeitas à vibração, é necessário o maior afastamento possível da frequência natural da estrutura (f_n) da frequência crítica ($f_{crítica}$) (NBR 6118, 2014, p. 192). A equação (C.1) representa a relação da frequência natural da estrutura (f_n) e crítica ($f_{crítica}$).

$$f_n > 1,2f_{crítica} \quad (C.1)$$

A equação (C.1) é analisada de forma que, afastando a frequência natural da estrutura da frequência crítica, busca-se evitar o fenômeno da ressonância entre a estrutura e a ação dinâmica atuante e, conseqüentemente, minimizar o desconforto humano devido às vibrações excessivas. Na falta de valores determinados experimentalmente, adota-se os valores indicados na Tabela C.1 para a $f_{crítica}$.

Tabela C.1 - Frequência crítica para vibrações verticais para alguns casos especiais de estruturas submetidas a vibrações pela ação de pessoas (NBR 6118, 2007, p. 193)

Caso	$f_{crítica}$ (Hz)
Ginásio de esportes e academias de ginástica	8
Sala de dança ou de concertos sem cadeiras fixas	7
Passarelas de pedestres ou ciclistas	4,5
Escritórios	4
Salas de concertos com cadeiras	3,5

Nos casos especiais, em que as prescrições anteriores não puderem ser atendidas, deve ser feita uma análise dinâmica mais acurada, conforme estabelecido em normas internacionais, enquanto não existir norma brasileira específica.

C.4 Norma ISO 10.137 (2007)

A norma ISO 10.137 (2007) da *International Organization for Standardization* provê recomendações para a avaliação das vibrações de edifícios e passarelas, abrangendo a recepção destas vibrações a ocupação humana em edifícios e passarelas e, também, o conteúdo e estrutura da edificação.

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

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

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

No item C.1.1.2 (ISO 10.137, 2007, p. 33), as vibrações são analisadas usualmente pela aceleração, entretanto, a percepção a diferentes níveis de intensidade ocorre também pela frequência do movimento e posicionamento do indivíduo (em pé, sentado ou deitado), portanto é necessário que as acelerações sejam filtradas. Esses filtros ou parâmetros de ponderação de frequência são apresentados na ISO 2.631-1 (1997) para situações em que a direção da vibração crítica é especificada ou se utiliza a ISO 2.631-2 (2007) quando o sentido crítico é desconhecido. A norma ISO 2.631-2 (2003) não oferece uma orientação sobre os critérios de aceitação, entretanto a ISO 2.631-2 (1989) permite a utilização de parte

relevantes desta edição para serem utilizados como critérios para vibrações em edifícios, sendo assim, reproduzidas em um formato no anexo C da ISO 10137 (2007). É importante ressaltar que a faixa de frequência coberta é de 1 a 80 Hz. A Figura 1 representa o posicionamento do indivíduo diante das vibrações.

O valor limite da aceleração (RMS) é determinado pela multiplicação dos coeficientes fornecidos na Tabela B.2, em função do uso da estrutura, do período do dia e do tipo de vibração, pelos valores das curvas-base (Figuras B.2, B.3 e B.4), em função da direção das acelerações.

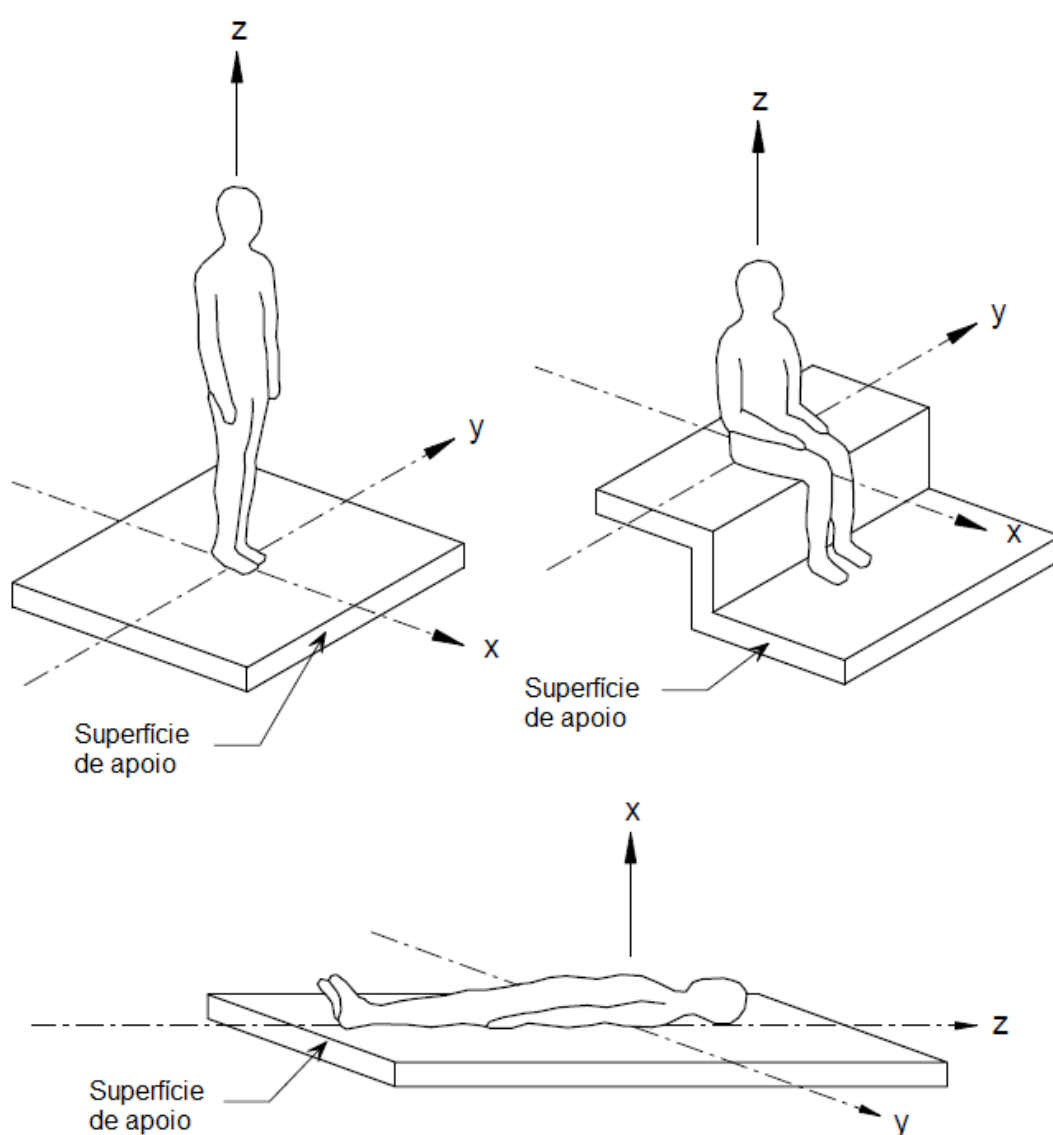


Figura C.1 - Direções das vibrações (ISO 2.631-1, 1997)

A aceleração da aceleração RMS ponderada (*the weighted RMS acceleration*) é calculada pela equação (C.2), conforme a ISO 2.631-1 (1997):

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

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

Tabela C.2 - Faixas dos fatores de multiplicação usados em muitos países para magnitudes satisfatórias específicas de vibrações de edifícios com respeito à resposta humana (ISO 10.137, 2007, p. 34)

Local	Tempo	Fatores de multiplicação para a curva base (Figura B.2, Figura B.3 e Figura B.4) ^(a)	
		Vibração contínua e intermitente ^(b)	Vibrações por excitação transiente com várias ocorrências ao dia
Áreas de trabalho críticas (salas de operação de hospitais, laboratórios de precisão, etc.)	Dia	1	1
	Noite	1	1 ^(c)
Residências (apartamentos, casas e hospitais)	Dia	2 a 4 ^(d)	30 a 90 ^{(d), (e), (f)}
	Noite	1,4	1,4 a 20
Escritórios "silenciosos" (calmos)	Dia	2	60 a 128 ^(g)
	Noite	2	60 a 128
Escritórios em geral (escolas, etc.)	Dia	4	60 a 128 ^(g)
	Noite	4	60 a 128
Salões de conferências e oficinas	Dia	8	90 a 128 ^(g)
	Noite	8	90 a 128

NOTA 1: Para avaliar os efeitos de um sinal de vibração contendo dois ou mais componentes de frequência discretos, o método do valor médio a quarta potência (*the root-mean-quad; (rmq)*) pode ser empregado (ver ISO 2.631-2:1989, Anexo B)

NOTA 2: Esta tabela foi adaptada a partir da ISO 2.631-2:1989, Anexo A.

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

(b) Dobrar as magnitudes de vibração sugeridas pode resultar em reações adversas, e isto pode aumentar significativamente se as magnitudes forem quadruplicadas (quando disponível, as curvas de dose/resposta podem ser consultadas). "Vibrações contínuas" são aquelas com uma duração de mais de 30 min por 24 h; "vibrações intermitentes" são aquelas com mais de 10 acontecimentos por 24 h.

(c) Magnitudes de choque impulsivo em salas de operação (hospitais) e áreas críticas de trabalho referem-se a períodos de tempo em que as operações estão em andamento ou o trabalho crítico está sendo realizados. Em outros horários,

magnitudes tão elevadas como aquelas para residências são satisfatórias desde que exista devido acordo e aviso.

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

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

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

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

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

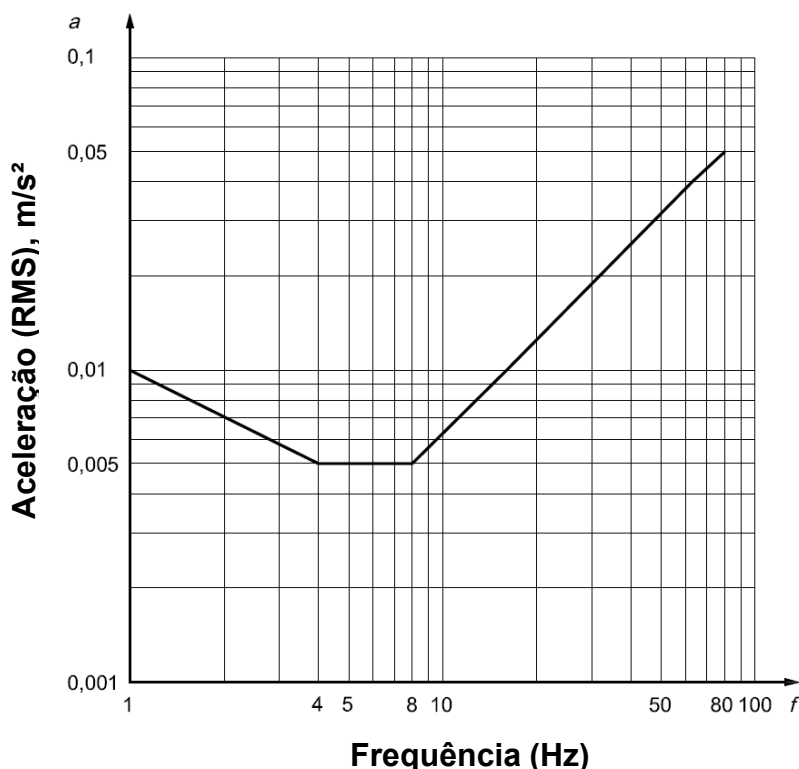


Figura C.2 - Curva básica de vibrações de edifícios para aceleração no eixo z (ISO 10.137, 2007, p. 37)

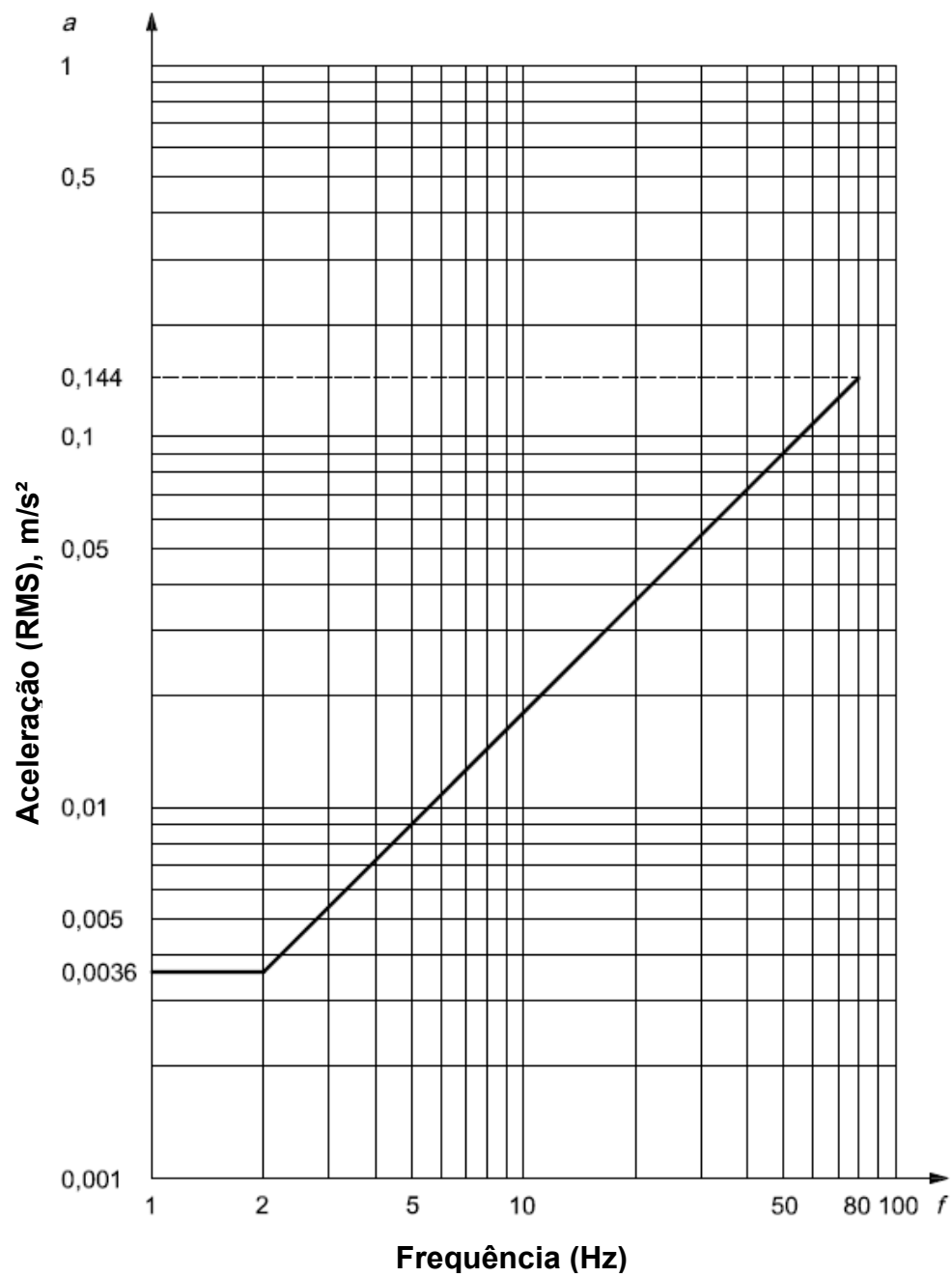


Figura C.3 - Curva básica de vibrações de edifícios para aceleração nos eixos x e y (ISO 10.137, 2007, p. 38)

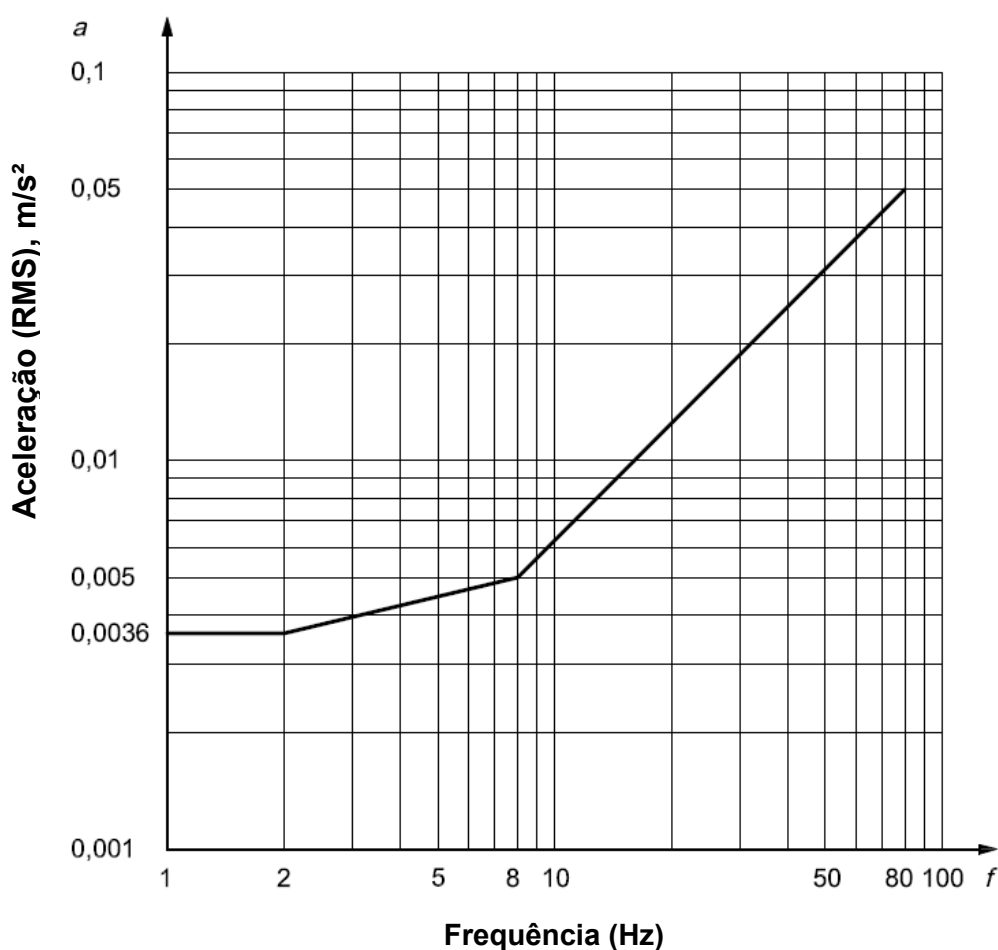


Figura C.4 - Curva básica de vibrações de edifícios para aceleração em direção combinada nos eixos x, y, z (ISO 10.137, 2007, p. 39)

A norma estabelece que as acelerações devam ser avaliadas em valores de dose de vibração (*Vibration Dose Values*) - VDV - em casos em que a relação entre o valor de pico e o valor RMS exceder mais que seis. A equação (C.3) apresenta a aceleração VDV, conforme a ISO 2.631-1 (1997).

$$VDV = \left[\int_0^T [a_w(t)]^4 dt \right]^{1/4} \quad (C.3)$$

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

Embora os valores de dose de vibração (VDV) não sejam ainda usados amplamente, eles têm sido empregados em alguns países quando a relação entre o valor de pico e o valor RMS excederem seis (ISO 10.137, 2007). Na Tabela C.3 estão

representados os valores limites de VDV em função do grau de sensibilidade e local investigado.

Tabela C.3 - Valores de dose de vibração ($m/s^{1.75}$) acima dos quais vários níveis de comentários adversos podem ser esperados em edifícios residenciais
(ISO 10.137, 2007, p. 35)

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

É necessário ressaltar que, os fatores de multiplicação fornecidos na Tabela C.2 são aplicáveis também no caso da avaliação de vibrações em VDV.

O item C.2.3 da norma considera que a avaliação dos efeitos das vibrações pelas pessoas varia conforme o movimento realizado, logo a percepção de uma pessoa parada e outra se movimentando é diferenciada. Avaliam-se estas vibrações considerando dois critérios, sendo o primeiro pelas pessoas paradas em meio a um público, onde o limite de vibração vertical na ausência de informações é obtido na Figura C.2 com um fator de multiplicação de 200. O segundo critério é a segurança do público em geral, de forma a prevenir casos extremos de vibração que possam gerar pânico, onde o limite considerado é um fator de multiplicação de até 400 para ser aplicado nas curvas básicas das Figuras B.2, B.3 e B.4.

Em relação à resposta dinâmica de pisos submetidos a atividades humanas rítmicas, a ISO 10.137 (2007) recomenda a avaliação proposta por Murray et al. (2003) e Wyatt (1989).

C.5 Norma inglesa BS 6.472-1 (2008)

Esta norma apresenta um guia para avaliar a exposição humana a vibrações em edifícios. Vale ressaltar que a norma ISO 10.137 (2007) também considera a atuação de diversos fatores que interferem na percepção humana as vibrações. Os

fatores a ser avaliados são os seguintes: atividade exercida na estrutura, fatores sociais e culturais, além da frequência e a direção da vibração. Pela norma, as vibrações podem ser classificadas em contínuas, intermitentes e ocasionais. Observe-se no item 3.2.1 da BS 6.472-1 (2008) que a faixa de frequência considerada varia de 0,5 Hz a 80 Hz.

Devem-se filtrar as acelerações através dos coeficientes de ponderação (“W_b” para acelerações verticais e “W_d” para acelerações horizontais) nesta norma e, adicionalmente, na norma BS 6.841 (1987), baseado nos fatores que influenciam na percepção dos indivíduos as vibrações. De acordo com o item 3.2.2 da BS 6472-1 (2008), a sensibilidade do indivíduo a vibração vertical é mais perceptível na faixa de frequência de 4 a 12,5 Hz, bem como na vibração horizontal atua na frequência de 1 a 2 Hz.

Segundo a norma, o limite de percepção da vibração contínua pelos indivíduos é variável, assim os estudos apontam que metade das pessoas de uma população típica pode perceber uma aceleração de pico de 0,015 m/s² quando estão sentadas ou em pé. Um quarto dessa população pode perceber um valor de 0,01 m/s², e o último quarto da população percebe um valor de 0,02 m/s² ou maior. Estes limites podem ser ligeiramente maiores quando as vibrações tem um período de duração menor que 1 segundo.

Em relação aos efeitos das vibrações dos edifícios sobre um indivíduo, a norma estabelece a utilização dos valores de dose de vibração (VDV) para melhor avaliação de tais efeitos. Tal método conduz a uma avaliação consistente de vibrações contínuas, intermitentes, ocasionais e impulsivas e se correlaciona bem com as respostas subjetivas. O valor de dose de vibração (VDV) é representado pela equação (C.4), conforme a BS 6.472-1 (2008).

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

Onde:

VDV_{b/d, dia/noite}: valor de dose de vibração (em m/s^{1,75}), sendo que o subscrito “dia/noite” se refere ao período de 16 horas para o dia (por exemplo, das 7h às 23h) e ao período de 8 horas para a noite (por exemplo, das 23h às 7h);

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

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

Quando a vibração é constante e com regulares repetições, a medição é realizada utilizando apenas uma amostra representativa, de “ τ ” segundos. Se o valor de dose de vibração for “ $VDV_{b/d, \tau}$ ”, logo o valor total de dose de vibração para o dia, “ $VDV_{b/d, dia}$ ”, é fornecido pela equação (C.5):

$$VDV_{b/d, dia} = \left(\frac{t_{day}}{t_{\tau}} \right)^{0,25} \times VDV_{b/d, \tau} \quad (C.5)$$

Onde “ t_{day} ” (em s) é a duração de exposição por dia. É importante ressaltar que o valor de dose de vibração (VDV) tem maior influência da magnitude da vibração do que sua duração.

Se, durante qualquer período de avaliação, existir um total de “ n ” episódios de vibração de várias durações (t_n), cada um com um valor de dose de vibração de “ $VDV_{b/d, t_n}$ ”, o valor total de dose de vibração para o período do dia ou noite, é dado pela equação (C.6):

$$VDV_{b/d, dia /noite} = \left(\sum_{n=1}^{n=N} VDV_{b/d, t_n}^4 \right)^{0,25} \quad (C.6)$$

Em casos de vibração contínua, onde se caracteriza pela amplitude constante e relação entre a aceleração de pico e RMS é de, aproximadamente, 3 a 6; uma aproximação do valor de dose de vibração pode ser feita, sendo esta denominada de valor de dose de vibração estimado (eVDV), de acordo com a equação (C.7). A aplicação do eVDV não é recomendado para vibrações com características variáveis ao longo do tempo ou choques (BS 6.472-1, 2008, p. 16).

$$eVDV = 1,4 \times a(t)_{rms} \times t^{0,25} \quad (C.7)$$

No que diz respeito às fontes de vibrações dos pisos, a BS 6.472-1 (2008) distingue os pisos de baixa e alta frequência, baseando-se nas respostas dinâmicas e a excitação humana.

Os pisos com frequências naturais menores que a faixa de variação de 7 a 10 Hz são denominados como estrutura de baixa frequência, sendo mais susceptível a ressonância proveniente de atividades humanas. Quando tais pisos possuem frequências naturais maiores que a faixa de variação de 7 a 10 Hz, são considerados como piso de alta frequência. Logo, a probabilidade de serem excitados em ressonância com a atividade humana praticada sobre eles é bem menor. Na Tabela C.4 estão apresentados os valores de dose de vibração (VDV), com a finalidade de avaliar as vibrações baseado no conforto humano.

Tabela C.4 - Valores de dose de vibração ($m/s^{1.75}$) que podem resultar na probabilidade de reações adversas em edifícios residenciais (BS 6.472-1, 2008)

Local	Baixa probabilidade de reações adversas ⁽¹⁾	Possíveis reações adversas	Prováveis reações adversas ⁽²⁾
Edifícios residenciais 16 horas diurnas	0,2 a 0,4	0,4 a 0,8	0,8 a 1,6
Edifícios residenciais 8 horas noturnas	0,1 a 0,2	0,2 a 0,4	0,4 a 0,8
(1) Comentários adversos não são esperados para valores abaixo desses limites.			
(2) Comentários adversos são provavelmente esperados para valores acima desses limites.			

Em locais como escritórios e oficinas, fatores de multiplicação de 2 a 4, respectivamente, devem ser aplicados nos valores da Tabela C.4 para 16 horas diurnas. Os valores da Tabela C.4 representam o melhor julgamento sobre a sensibilidade humana às vibrações e podem ser usados tanto para vibrações horizontais quanto para vibrações verticais, contanto que os valores em VDV sejam corretamente ponderados. Fatores externos, segundo a norma, como ruídos, estalos e efeitos visuais, exercem influência sobre a sensibilidade humana as vibrações. A norma BS 6.472-1 (2008) considera que há uma imprecisão da aceitabilidade sensorial dos indivíduos as vibrações, mesmo que se utilizem os melhores métodos de obtenção de tais limites.

C.6 Guia do *The Steel Construction Institute* (SCI, 2009)

Este guia fornece orientação para o projeto de pisos submetidos a vibrações, através da publicação P354 concebida pelo *The Steel Construction Institute* (SCI). Neste guia, a avaliação das vibrações, no que tange a percepção humana, é medida em termos de aceleração RMS, visto que representa melhor a vibração ao longo tempo do que a aceleração de pico. Os critérios de obtenção da aceleração RMS são os mesmos utilizados pela norma ISO 10.137 (2007) e a BS 6.472-1 (2008), no qual influem a frequência e direção da vibração. Portanto, os coeficientes de ponderação utilizados para filtrar as acelerações são aqueles fornecidos nas normas BS 6.841 (1987) e ISO 2.631-1 (1997).

Com relação às vibrações intermitentes, como atividade de caminhar, por exemplo, o guia SCI (2009) indica o uso de valores de dose de vibração (VDV) para a avaliação de vibrações conforme as normas ISO 10.137 (2007) e BS 6.472 (1992). Já para o caso de atividades rítmicas praticadas em pisos, o guia não apresenta, sob o ponto de vista do conforto humano, um consenso em relação aos valores limites de aceleração. Em virtude de tal situação, o guia recomenda seguir as orientações fornecidas pelo guia prático do AISC.

C.7 Guia prático do *American Institute of Steel Construction* (AISC, 2016)

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

A segunda edição do guia, lançada em maio de 2016, pelos pesquisadores Murray, Ungar, Allen e Davis, traz atualizações como a força de aplicação, consideração dos efeitos de multidões e uma abordagem mais aprofundada sobre o Método dos Elementos Finitos (MEF) aplicado na avaliação das vibrações.

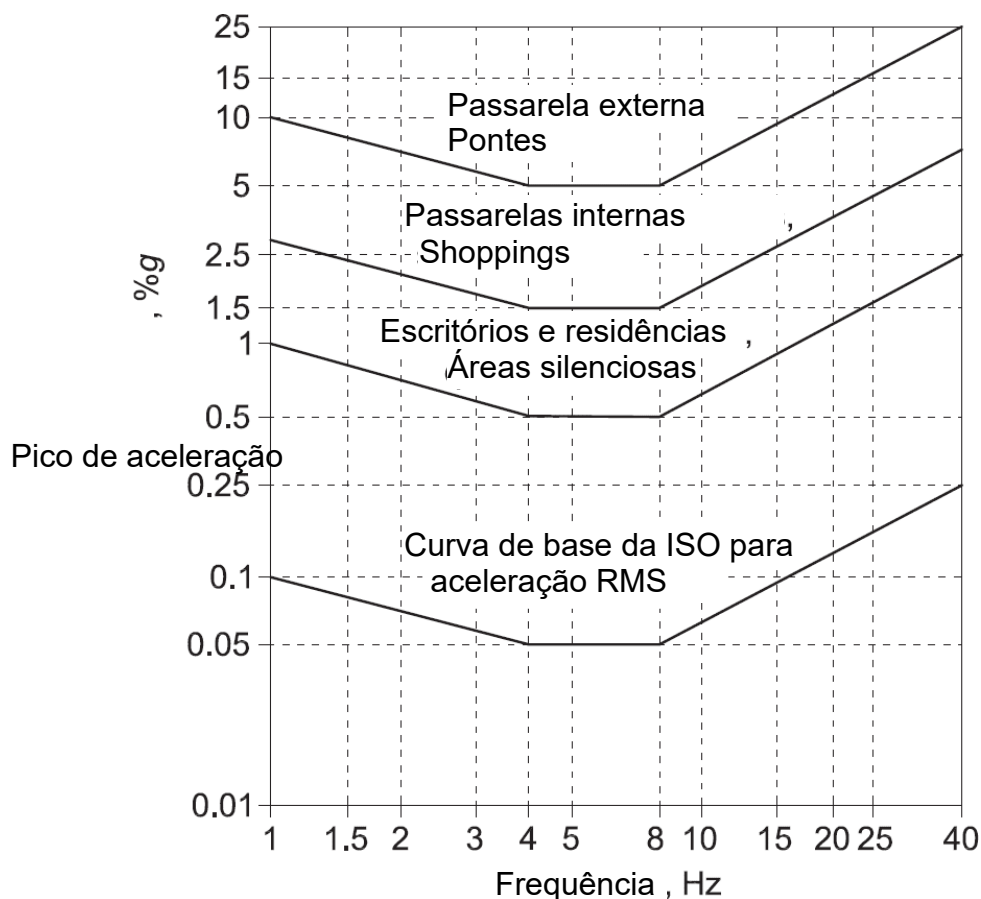


Figura C.5 - Valores de aceleração de pico recomendados para o conforto humano devido a atividades humanas (AISC, 2016, p. 12)

O critério de avaliação das estruturas neste guia baseia-se na aceleração de pico, através da relação a_p/g . Estes valores são comparados aos limites recomendados pela curva base da ISO 2.631/2 (1989), ilustrada na Figura C.5, fornecidos pela norma *International Standard Organization* (ISO), que representa o limite no qual as acelerações verticais passam a ser perceptíveis. Nas áreas onde as pessoas estão participando da atividade, os valores limites apresentados podem ser aceitáveis faixa de 10 a 30 vezes maiores que os valores recomendados (AISC, 2016). Vale ressaltar que os valores mínimos de aceitabilidade estão na faixa de frequência de 4 a 8 Hz, a qual corresponde a frequência dos órgãos internos de uma pessoa.

Para vibrações laterais em passarelas, segundo o guia, há exigência de frequência natural mínima de 1,3 Hz, porém não há indicação de aceleração máxima de pico para este caso no guia.

Na Tabela C.5 são apresentados valores da frequência do passo da atividade (f_p) e coeficientes dinâmicos (α_i) associados aos diversos tipos de atividades rítmicas.

Tabela C.5 - Faixas de frequências de atividades rítmicas e coeficientes dinâmicos (AISC, 2016, p. 11)

Harmônico, i	Dança		Shows		Atividade aeróbica	
	f _p (Hz)	α _i	f _p (Hz)	α _i	f _p (Hz)	α _i
1	1,5 a 2,7	0,5	1,5 a 2,7	1,25	2,0 a 2,75	1,5
2	3,0 a 5,4	0,05	3,0 a 5,4	0,026	4,0 a 5,5	0,6
3	-	-	-	-	6,0 a 8,25	0,1

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

A aceleração de pico das atividades rítmicas é determinada em duas etapas básicas, sendo a primeira etapa referente à aceleração de pico devido a um harmônico da força rítmica, $if_{excitação}$, que é obtido da equação (C.8), no qual o movimento do piso é advindo apenas de um modo de vibração com frequência f_n . A equação (B.8) está modificada usando um fator de 1,3 devido a massa e o carregamento estarem distribuídos uniformemente sobre o vão, o mesmo deformando seguindo a equação de meia senoidal.

$$\frac{a_{p,i}}{g} = \frac{1,3\alpha_i w_p / w_t}{\sqrt{\left[\left(\frac{f_n}{if_{excitação}} \right)^2 - 1 \right]^2 + \left(\frac{2\xi f_n}{if_{excitação}} \right)^2}} \quad (C.8)$$

Onde:

$a_{p,i}/g$: razão entre a aceleração de pico e a aceleração da gravidade associada ao i ésimo harmônico;

f_n : frequência fundamental, Hz;

$f_{excitação}$: frequência da atividade sobre o piso, Hz;

i : número do harmônico;

w_p : carregamento da atividade rítmica com participantes distribuídos sobre o vão inteiro, Pa;

w_t : carregamento total suportado, incluindo carregamentos permanentes e superposição de ocupantes e participantes da atividade distribuídos sobre o vão inteiro, Pa;

α_i : coeficiente de Fourier associado ao i ésimo harmônico da atividade; e

ξ : taxa de amortecimento, adotada normalmente como 0,06.

Segundo o guia do AISC, a aplicação do fator de 1,3 na equação (C.8) aplica-se somente a vãos e vigamentos simples, não se aplicando para situações em balanço.

A razão da aceleração de pico, a_p/g , considerando todos os harmônicos, é estimada da regra de combinação de potência de 1,5, mostrada na equação (C.9).

$$\frac{a_p}{g} = \frac{(\sum a_{p,i}^{1,5})^{1,5}}{g} \leq \frac{a_o}{g} \quad (C.9)$$

Onde a_o/g é a razão limite tolerada de aceleração obtida na Tabela C.6.

A recomendação tolerada de aceleração limite para atividades rítmicas depende da “ocupação afetada”, ou seja, ocupação no vão da atividade e em vãos próximos que possam ser afetados diretamente pela vibração.

Tabela C.6 - Carregamento estimado durante atividades rítmicas (AISC, 2016, p. 58)

Ocupação afetada	Aceleração limite tolerada, a_o , %g
Residencial ou escritório	0,5
Jantar	1,5-2,5
Musculação	1,5-2,5
Somente atividade rítmica	4,0-7,0

Para atividades rítmicas o guia se limita a pisos e varandas, para grandes vãos em estádio, por exemplo, o guia indica outra leitura, como *Dynamic Performance Requirements for Permanent Grandstands Subject to Crowd Motion* (IStructE, 2008). Conforme Tabela C.6, o guia também fornece os parâmetros a serem utilizados para o caso de excitações rítmicas.

Os valores de α_i e w_p são apresentados na Tabela C.7 em função da atividade rítmica realizada sobre a estrutura. O guia apresenta, também, uma estimativa para a frequência fundamental do piso demonstrada na equação (C.10):

$$f_n = 0,18 \sqrt{\frac{g}{\Delta_j + \Delta_g + \Delta_c}} \quad (C.10)$$

Onde:

Δ_c : deslocamento devido a compressão axial das colunas de suporte do piso;

$\Delta_{j,g}$: deslocamento das vigas principais e secundárias calculadas como descrito no Capítulo 3 do guia de projeto.

Tabela C.7 - Carregamento estimado durante atividades rítmicas (AISC, 2016, p. 58)

Atividade	Frequência da atividade, f (Hz)	Peso dos participantes* (w_p)		Coeficiente dinâmico (α_i)
		kPa	psf	
<i>Dança:</i>				
<i>Primeiro Harmônico</i>	1,5-2,7	0,6	12,5 (2,3 m ² por casal)	0,50
<i>Segundo Harmônico</i>	3,0-5,4			0,05
<i>Concertos (assentos fixos):</i>				
<i>Primeiro harmônico</i>	1,5-2,7	1,5	31,0 (0,45 m ² por pessoa)	0,25
<i>Segundo harmônico</i>	3,0-5,4			0,05
<i>Aeróbica:</i>				
<i>Primeiro harmônico</i>	2,00-2,75	0,2	4,2 (3,25 m ² por pessoa)	1,5
<i>Segundo harmônico</i>	4,00-5,50			0,6
<i>Terceiro harmônico</i>	6,00-8,25			0,1
*Com base na maior densidade de participantes para condições comumente encontradas. A densidade dos participantes pode ser maior para eventos especiais.				

O guia salienta ainda a importância da precisão no cálculo das frequências do piso para atividades rítmicas e indica que uma análise de elementos finitos como é o método mais preciso para a obtenção das características modais da estrutura e futuras respostas dinâmicas da estrutura construída.