

**ANÁLISE NUMÉRICO-EXPERIMENTAL DE VIBRAÇÕES INDUZIDAS  
PELO CAMINHAR HUMANO SOBRE PISOS MISTOS (AÇO-CONCRETO)**

Bárbara Elisa Ferreira


UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE ESTRUTURAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

**ANÁLISE NUMÉRICO-EXPERIMENTAL DE VIBRAÇÕES INDUZIDAS  
PELO CAMINHAR HUMANO SOBRE PISOS MISTOS (AÇO-CONCRETO)**

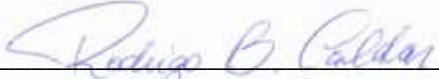
Bárbara Elisa Ferreira

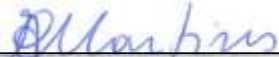
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Estruturas.

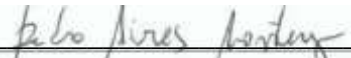
Comissão Examinadora:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Hermes Carvalho  
DEES – UFMG – (Orientador)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. José Guilherme Santos da Silva  
PGCIV – UERJ – (Coorientador)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Rodrigo Barreto Caldas  
DEES – UFMG

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Alexander Galvão Martins  
DEES – UFMG

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Pedro Aires Moreira Montenegro e Almeida  
FEUP – Universidade do Porto, Portugal

Belo Horizonte, 27 de maio de 2020.

F383a	<p>Ferreira, Bárbara Elisa. Análise numérico-experimental de vibrações induzidas pelo caminhar humano sobre pisos mistos (aço-concreto) [recurso eletrônico] / Bárbara Elisa Ferreira. - 2020. 1 recurso online (xviii, 187 f. : il., color.) : pdf.</p> <p>Orientador: Hermes Carvalho. Coorientador: José Guilherme Santos da Silva.</p> <p>Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.</p> <p>Apêndices: f. 124-187.</p> <p>Bibliografia: f. 115-123.</p> <p>Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.</p> <p>1. Engenharia de estruturas - Teses. 2. Construção mista - Teses. 3. Pisos - Teses. 4. Conforto humano - Teses. 5. Análise numérica - Teses. I. Carvalho, Hermes. II. Silva, José Guilherme Santos da. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 624(043)</p>
-------	--



ATA DA DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS Nº : 377 da aluna **Bárbara Elisa Ferreira**.

Às **13:00** horas do dia **27** do mês de **maio** de **2020**, reuniu-se, totalmente por videoconferência para atender aos novos protocolos de distanciamento social adotados pelo governo federal e pela prefeitura de Belo Horizonte, que integram medidas para combater o avanço da pandemia de Covid-19, provocada pelo novo coronavírus, a Comissão Examinadora indicada pelo Colegiado do Programa em **20 de abril de 2020**, para julgar a defesa da Dissertação de Mestrado intitulada "**Análise Numérico-Experimental de Vibrações Induzidas pelo Caminhar Humano sobre Pisos Mistos (Aço-Concreto)**", cuja aprovação é um dos requisitos para a obtenção do Grau de MESTRE EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS na área de ESTRUTURAS.

Abrindo a sessão, o Presidente da Comissão, **Prof. Dr. Hermes Carvalho**, após dar a conhecer aos presentes o teor das Normas Regulamentares passou a palavra à candidata para apresentação de seu trabalho. Seguiu-se a arguição pelos examinadores, com a respectiva defesa da candidata. Logo após, a Comissão se reuniu, sem a presença da candidata e do público, para julgamento e expedição do resultado final. Foram atribuídas as seguintes indicações: (Aprov./Repr.)

**Prof. Dr. Hermes Carvalho - DEES - UFMG (Orientador) Aprovada** \_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. José Guilherme Santos da Silva - UERJ (Coorientador) Aprovada** \_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Rodrigo Barreto Caldas – DEES - UFMG Aprovada** \_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Alexander Galvão Martins — CODEME Aprovada** \_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Pedro Aires Montenegro - University of Porto Aprovada** \_\_\_\_\_

Pelas indicações acima, a candidata foi considerada Aprovada, conforme pareceres em anexo.

O resultado final foi comunicado publicamente à candidata pelo Presidente da Comissão.

Nada mais havendo a tratar, o Presidente encenou a reunião e lavrou a presente ATA, que será assinada por todos os membros participantes da Comissão Examinadora. Belo Horizonte, 27 de maio de 2020.

*Hermes Carvalho*

*J. G. Santos da Silva*

*Rodrigo B. Caldas*

*Alexander Galvão Martins*

*Pedro Aires Montenegro*

Observações:

- 1) A aprovação da candidata na defesa da Dissertação de Mestrado não significa que a mesma tenha cumprido todos os requisitos necessários para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia de Estruturas;
- 2) Este documento não terá validade sem a assinatura e carimbo do Coordenador do Programa de Pós-Graduação.

## AGRADECIMENTOS

Gratidão é quanto a gente abraça Deus e agradece por todas as bênçãos dadas por Ele. Deixo aqui meu mais sincero agradecimento, tanto pelas coisas boas que aconteceram ao longo desse caminho, como também por aquelas que no final viraram lições.

Agradeço aos meus orientadores Prof. Hermes Carvalho e Prof. José Guilherme Santos da Silva, pela dedicação, incentivo entusiástico, por todas as oportunidades que me concederam e pelo apoio constante ao longo da minha trajetória. Além dos aspectos acadêmicos, gostaria de dizer que admiro muito ao tipo de ser humano que vocês são e agradeço pela generosidade, cuidado e amizade que transmitiram a mim durante esses dois anos.

Agradeço à CODEME Engenharia LTDA, que juntamente com o Prof. Dr. Alexander Martins, disponibilizou todas as informações referentes a estrutura investigada, bem como nos concedeu acesso a obra para realização dos ensaios. Sou grata também ao Prof. Dr. Rodrigo Caldas, Prof. Dr. Vecci, e aos colegas Jefferson Aguiar e Cássio Bragança que gentilmente me auxiliaram na realização dos ensaios experimentais.

Agradeço a todos os professores, funcionários e amigos do DEES, em especial ao meu querido Zé Filho, Carol Calisto, Elvys, Ari, Ruan e Livia, pela amizade, companheirismo, apoio, convivência e solidariedade.

Gratidão aos meus amigos, em especial à Pri, Nana, Matt, Cary, Adalberto, Jacque e Simone, por sempre terem uma palavra de incentivo para me dar e pela presença constante na minha vida. À querida Prof. Dra. Gláucia Nolasco que muito me inspira, por todos os ensinamentos, por sempre me encorajar na pesquisa, pela amizade e torcida.

Ao Gui, agradeço por ser sempre tão cuidadoso, por todo auxílio, companheirismo, aprendizado, por me desafiar a fazer mais e melhor e por me fazer enxergar as coisas sob novas perspectivas. Com toda certeza eu não teria chegado até aqui sem sua companhia.

Minha profunda gratidão à minha família, Ângela, Marcelo, Rafa e Pri, pela torcida constante, amor e encorajamento. A minha pequena Alice, agradeço por me encher de alegria e do amor mais puro e por fazer meus dias muito mais bonitos e mais leves.

Agradeço ao suporte financeiro fornecido pela CAPES que possibilitou a realização desse trabalho.

## RESUMO

Ferreira, Bárbara Elisa. **Análise numérico-experimental de vibrações induzidas pelo caminhar humano sobre pisos mistos (aço-concreto)**. 2020. 188. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Departamento de Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020.

Ao longo dos últimos anos, problemas relacionados à vibração excessiva de estruturas mistas de aço e concreto têm ocorrido com maior frequência em espaços destinados a atividades humanas. Tal fato pode ser associado à utilização de uma menor quantidade de materiais devido à maior resistência a estes atribuída, resultando em estruturas mais flexíveis, esbeltas e com menores frequências naturais, próximas às frequências de excitação provocadas pelas atividades humanas. Diante disso, o presente trabalho teve por objetivo avaliar experimentalmente e numericamente o comportamento dinâmico de pisos mistos (aço-concreto), sob o ponto de vista do conforto humano, quando submetidos ao caminhar humano. O modelo estrutural investigado foi um sistema de piso misto (aço-concreto) real e em construção, com área total aproximada de 1300 m<sup>2</sup>. Foi elaborado um modelo numérico preliminar visando nortear o posicionamento ideal da excitação e instrumentação a ser adotada no ensaio experimental *in loco*. A partir disso, foram realizados testes de vibração livre, para obtenção dos parâmetros modais da estrutura, e mais de 180 ensaios de vibração forçada, com excitação causada pelo caminhar de uma pessoa em diferentes frequências de passo e direções. Os resultados indicaram valores de acelerações de pico, oriundas do caminhar de uma pessoa sobre os pisos, inferiores ao valor limite recomendado por normas e guias de projeto, estando assim a estrutura conforme os critérios de conforto humano. Posteriormente, foi realizada uma análise da influência do número de pessoas na resposta dinâmica do piso, onde percebeu-se que o aumento da quantidade de usuários caminhando sobre o piso aumenta também o valor da aceleração de pico. Tal fato enfatiza a necessidade da realização de avaliações experimentais considerando a variação da quantidade de pessoas exercendo uma atividade sobre o piso, para representar de forma mais real as vibrações induzidas em situações de serviço da estrutura.

Palavras-chave: Pisos mistos (aço-concreto); Avaliação do conforto humano; Análise dinâmica experimental; Modelagem numérica.

***ABSTRACT***

Ferreira, Bárbara Elisa. **Numerical-Experimental analysis of induced human walking vibrations on composite floor (steel-concrete)**. 2020. 188. Dissertation (M.Sc. in Structural Engineering) – Department of Structural Engineering, School of Engineering, Federal University of Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020.

Over the past few years, problems related to the excessive vibration of composite steel and concrete structures have occurred more frequently in spaces intended for human activities. This fact can be associated with a smaller amount of materials use due to the greater resistance attributed to them, resulting in more flexible structures, slender and with lower natural frequencies, close to the excitation frequencies caused by human activities. With this in mind, the present work aimed to evaluate experimentally and numerically the dynamic behaviour of composite floors (steel-concrete), from a human comfort point of view, when submitted to human walking. The structural model investigated was a real floor system (steel-concrete) under construction, with a total area of approximately 1300 m<sup>2</sup>. A preliminary numerical model was developed to guide the excitation and instrumentation ideal positioning to be adopted in the on-site experimental test. Forthwith, free vibration tests were carried out, to obtain the structure modal parameters, and more than 180 forced vibration tests, with excitation caused by a person walking at different step frequencies and directions. The results indicated values of peak accelerations, coming from one person walking on the floors, below the limit value recommended by standards and design guides, thus being the structure in accordance with the human comfort criteria. Subsequently, an influence analysis of the number of people on the floor's dynamic response was carried out, where it was noticed that the increase in the number of users walking on the floor also increases the value of peak acceleration. This fact emphasizes the need to carry out experimental evaluations considering the variation in the number of people exercising an activity on the floor, in order to represent in a more real way the vibrations induced in service situations of the structure.

**Keywords:** Steel-concrete composite floor; Human comfort assessment; Experimental dynamic analysis; Numerical modeling.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplo de um edifício comercial executado com piso misto (aço-concreto). Fonte: do autor.....	19
Figura 2 - Componentes básicos de um sistema de piso misto. Fonte: Silva Junior, 2015. ....	20
Figura 3 – Escala modificada de Reither-Meister de sensibilidade humana as vibrações. Fonte: Allen e Murray, 1993. ....	25
Figura 4 – Direções de caminhada no piso. Fonte: Zhang e Xu (2020).....	30
Figura 5 – Sistemas de coordenadas para vibrações mecânicas em pessoas. Fonte: Adaptado de ISO 2631-1 (1997).....	35
Figura 6 – Curva limite para critérios de conforto em acelerações <i>RMS</i> no eixo z. Fonte: ISO 2631-2 (2003) .....	36
Figura 7 – Método do decremento logarítmico. Fonte: Nguyen (2013).....	38
Figura 8 – Maquete eletrônica da fachada do edifício.....	39
Figura 9 – Fachada do edifício em construção. ....	39
Figura 10 - Piso misto investigado: 8º pavimento [mm]. ....	40
Figura 11 – Dimensões e seções transversais dos perfis metálicos do Lado A [mm]. ....	41
Figura 12 – Dimensões e seções transversais dos perfis metálicos do Lado B [mm]. ....	42
Figura 13 – Vista dos pisos compreendidos entre os eixos 1' e 3'.....	43
Figura 14 – Vista dos pisos compreendidos entre os eixos A e C.....	43
Figura 15 – Elemento BEAM44 (Ansys, 2009). ....	45
Figura 16 – Elemento SHELL63 (Ansys, 2009). ....	45
Figura 17 – Vista superior do modelo em elementos finitos do piso misto. ....	46
Figura 18 – Vista isométrica do modelo em elementos finitos do piso misto.....	46
Figura 19 – Vigamento do modelo em elementos finitos do piso misto. ....	47
Figura 20 – Pisos escolhidos para análise experimental dos parâmetros modais.....	48
Figura 21 – Identificação dos pisos 1, 2 e 3. ....	49
Figura 22 – Identificação dos pisos 4 e 5. ....	49
Figura 23 – Pontos de instrumentação nos cinco pisos ensaiados.....	50
Figura 24 –Esquema de montagem dos ensaios típico para os pisos 1 a 3.....	50
Figura 25 – Esquema de montagem dos ensaios típico para os pisos 5 e 6.....	51
Figura 26 – Acelerômetro PCB Piezotronics. Fonte: PCB Piezotronics (2017). ....	51
Figura 27 – Sistema de aquisição de dados Bruel e Kjaer.....	52

Figura 28 – Resposta em frequência de diferentes tipos de montagem de acelerômetros. Fonte: Adaptado de PCB Piezotronics (2017). .....	53
Figura 29 – Fluxograma de fixação dos acelerômetros. ....	54
Figura 30 – Fluxograma das etapas de realização do ensaio de vibração livre. ....	55
Figura 31 - Ilustração da caminhada em trajetória perpendicular. ....	57
Figura 32 - Ilustração da caminhada em trajetória paralela.....	57
Figura 33 - Ilustração da caminhada em trajetória diagonal. ....	58
Figura 34 - Ilustração da caminhada em trajetória aleatória. ....	58
Figura 35 – Resposta de aceleração no domínio do tempo para ensaio de vibração livre. ....	59
Figura 36 – Exemplo de um sinal de aceleração no domínio do tempo.....	60
Figura 37 – Aceleração x tempo registrada pelo canal 2, localizado no centro da laje – Piso 1. ....	62
Figura 38 – Aceleração x tempo registrada pelo canal 2, localizado no centro da laje – Piso 2. ....	63
Figura 39 – Aceleração x tempo registrada pelo canal 2, localizado no centro da laje – Piso 3. ....	63
Figura 40 – Aceleração x tempo registrada pelo canal 2, localizado no centro da laje – Piso 4. ....	63
Figura 41 – Aceleração x tempo registrada pelo canal 2, localizado no centro da laje – Piso 5. ....	63
Figura 42 – 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) .....	64
Figura 43 – 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).....	65
Figura 44 – 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).....	65
Figura 45 – 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).....	66
Figura 46 – 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).....	66
Figura 47 – Amortecimento do primeiro modo de vibração. ....	68
Figura 48 – Amortecimento do segundo modo de vibração.....	69

Figura 49 – Amortecimento do terceiro modo de vibração.....	70
Figura 50 – Modos de vibração de flexão vertical dos pisos em estudo .....	71
Figura 51 – Resposta dinâmica do piso 1 para caminhada lenta em trajetória aleatória. ....	74
Figura 52 – Resposta dinâmica do piso 1 para caminhada lenta em trajetória diagonal.....	74
Figura 53 – Resposta dinâmica do piso 1 para caminhada lenta em trajetória paralela. ....	75
Figura 54 – Resposta dinâmica do piso 1 para caminhada lenta em trajetória perpendicular..	75
Figura 55 – Resposta dinâmica do piso 1 para caminhada normal em trajetória aleatória. ....	76
Figura 56 – Resposta dinâmica do piso 1 para caminhada normal em trajetória diagonal. ....	76
Figura 57 – Resposta dinâmica do piso 1 para caminhada normal em trajetória paralela. ....	77
Figura 58 – Resposta dinâmica do piso 1 para caminhada normal em trajetória perpendicular. .....	77
Figura 59 – Resposta dinâmica do piso 1 para caminhada rápida em trajetória aleatória.....	78
Figura 60 – Resposta dinâmica do piso 1 para caminhada rápida em trajetória diagonal.....	78
Figura 61 – Resposta dinâmica do piso 1 para caminhada rápida em trajetória paralela.....	78
Figura 62 – Resposta dinâmica do piso 1 para caminhada rápida em trajetória perpendicular. .....	79
Figura 63 – Resposta dinâmica do piso 2 para caminhada lenta em trajetória aleatória. ....	80
Figura 64 – Resposta dinâmica do piso 2 para caminhada lenta em trajetória diagonal.....	80
Figura 65 – Resposta dinâmica do piso 2 para caminhada lenta em trajetória paralela. ....	81
Figura 66 – Resposta dinâmica do piso 2 para caminhada lenta em trajetória perpendicular..	81
Figura 67 – Resposta dinâmica do piso 2 para caminhada normal em trajetória aleatória. ....	82
Figura 68 – Resposta dinâmica do piso 2 para caminhada normal em trajetória diagonal. ....	82
Figura 69 – Resposta dinâmica do piso 2 para caminhada normal em trajetória paralela. ....	82
Figura 70 – Resposta dinâmica do piso 2 para caminhada normal em trajetória perpendicular. .....	83
Figura 71 – Resposta dinâmica do piso 2 para caminhada rápida em trajetória aleatória.....	83
Figura 72 – Resposta dinâmica do piso 2 para caminhada rápida em trajetória diagonal.....	84
Figura 73 – Resposta dinâmica do piso 2 para caminhada rápida em trajetória paralela.....	84
Figura 74 – Resposta dinâmica do piso 2 para caminhada rápida em trajetória perpendicular. .....	84
Figura 75 – Resposta dinâmica do piso 3 para caminhada lenta em trajetória aleatória.....	86
Figura 76 – Resposta dinâmica do piso 3 para caminhada lenta em trajetória aleatória. ....	86
Figura 77 – Resposta dinâmica do piso 3 para caminhada lenta em trajetória paralela. ....	86

Figura 78 – Resposta dinâmica do piso 3 para caminhada lenta em trajetória perpendicular. .	86
Figura 79 – Resposta dinâmica do piso 3 para caminhada normal em trajetória aleatória. ....	87
Figura 80 – Resposta dinâmica do piso 3 para caminhada normal em trajetória diagonal. ....	88
Figura 81 – Resposta dinâmica do piso 3 para caminhada normal em trajetória paralela. ....	88
Figura 82 – Resposta dinâmica do piso 3 para caminhada normal em trajetória perpendicular. .....	88
Figura 83 – Resposta dinâmica do piso 3 para caminhada rápida em para trajetória aleatória. .....	89
Figura 84 – Resposta dinâmica do piso 3 para caminhada rápida em trajetória diagonal.....	89
Figura 85 – Resposta dinâmica do piso 3 para caminhada rápida em trajetória paralela.....	90
Figura 86 – Resposta dinâmica do piso 3 para caminhada rápida em trajetória perpendicular. .....	90
Figura 87 – Resposta dinâmica do piso 4 para caminhada lenta em trajetória aleatória. ....	92
Figura 88 – Resposta dinâmica do piso 4 para caminhada lenta em trajetória diagonal. ....	92
Figura 89 – Resposta dinâmica do piso 4 para caminhada lenta em trajetória paralela. ....	92
Figura 90 – Resposta dinâmica do piso 4 para caminhada lenta em trajetória perpendicular. .	92
Figura 91 – Resposta dinâmica do piso 4 para caminhada normal em trajetória aleatória. ....	93
Figura 92 – Resposta dinâmica do piso 4 para caminhada normal em trajetória diagonal. ....	94
Figura 93 – Resposta dinâmica do piso 4 para caminhada normal em trajetória paralela. ....	94
Figura 94 – Resposta dinâmica do piso 4 para caminhada normal em trajetória perpendicular. .....	94
Figura 95 – Resposta dinâmica do piso 4 para caminhada rápida em trajetória aleatória.....	95
Figura 96 – Resposta dinâmica do piso 4 para caminhada rápida em trajetória diagonal.....	95
Figura 97 – Resposta dinâmica do piso 4 para caminhada rápida em trajetória paralela.....	95
Figura 98 – Resposta dinâmica do piso 4 para caminhada rápida em trajetória perpendicular. .....	96
Figura 99 – Resposta dinâmica do piso 5 para caminhada lenta em trajetória aleatória. ....	97
Figura 100 – Resposta dinâmica do piso 5 para caminhada lenta em trajetória diagonal. ....	98
Figura 101 – Resposta dinâmica do piso 5 para caminhada lenta em trajetória paralela. ....	98
Figura 102 – Resposta dinâmica do piso 5 para caminhada lenta em trajetória perpendicular. .....	98
Figura 103 – Resposta dinâmica do piso 5 para caminhada normal em trajetória aleatória. ...	99
Figura 104 – Resposta dinâmica do piso 5 para caminhada normal em trajetória diagonal. ...	99

Figura 105 – Resposta dinâmica do piso 5 para caminhada normal em trajetória paralela. ..	100
Figura 106 – Resposta dinâmica do piso 5 para caminhada normal em trajetória perpendicular. .....	100
Figura 107 – Resposta dinâmica do piso 5 para caminhada rápida em trajetória aleatória....	101
Figura 108 – Resposta dinâmica do piso 5 para caminhada rápida em trajetória diagonal....	101
Figura 109 – Resposta dinâmica do piso 5 para caminhada rápida em trajetória paralela....	101
Figura 110 – Resposta dinâmica do piso 5 para caminhada rápida em trajetória perpendicular. .....	102
Figura 111 – Realização de ensaios complementares para a avaliação da influência do número de pessoas na resposta dinâmica do piso. ....	108
Figura 112 – Localização do acelerômetro utilizado nos ensaios. ....	108
Figura 113 – Resposta dinâmica do piso 1 para quatro pessoas caminhando com $f_p = 1,7$ Hz. .....	109
Figura 114 – Resposta dinâmica do piso 1 para quatro pessoas caminhando com $f_p = 2,0$ Hz. .....	109
Figura 115 – Resposta dinâmica do piso 1 para quatro pessoas caminhando com $f_p = 2,3$ Hz. .....	109

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Harmônicos da frequência de passo do caminhar humano.....	29
Tabela 2 - Frequências críticas para algumas estruturas submetidas à vibração pela ação de pessoas. Fonte: ABNT NBR 6118:2014 .....	32
Tabela 3 – Limites de tolerâncias recomendados para pisos. Fonte: Murray et al., 2016.....	34
Tabela 4 – Valores de amortecimento recomendados. Fonte: Murray et al., 2016.....	34
Tabela 5 – Faixa dos fatores de majoração para a avaliação de vibrações em edifícios referentes à resposta humana. Fonte: Traduzido de ISO 2631-2 (2003).....	36
Tabela 6 – Total de ensaios realizados por piso .....	57
Tabela 7 – Classificação do índice de confiabilidade de experimentos com base no CV. Fonte: Adaptado de Gomes, 2009. ....	60
Tabela 8 - Valores de amortecimento modais para os três primeiros modos de vibração do pavimento. ....	67
Tabela 9 – Comparação das frequências naturais do pavimento avaliado. ....	71
Tabela 10 – Máximas acelerações encontradas no ensaio de caminhada lenta no Piso 1 .....	74
Tabela 11 – Máximas acelerações encontradas no ensaio de caminhada normal no Piso 1 ....	76
Tabela 12 – Máximas acelerações encontradas no ensaio de caminhada rápida no Piso 1.....	78
Tabela 13 – Máximas acelerações encontradas no ensaio de caminhada lenta no Piso 2.....	80
Tabela 14 – Máximas acelerações encontradas no ensaio de caminhada normal no Piso 2 ....	82
Tabela 15 – Máximas acelerações encontradas no ensaio de caminhada rápida no Piso 2.....	83
Tabela 16 – Máximas acelerações encontradas no ensaio de caminhada lenta no Piso 3.....	85
Tabela 17 – Máximas acelerações encontradas no ensaio de caminhada normal no Piso 3 ....	87
Tabela 18 – Máximas acelerações encontradas no ensaio de caminhada rápida no Piso 3.....	89
Tabela 19 – Máximas acelerações encontradas no ensaio de caminhada lenta no Piso 4.....	91
Tabela 20 – Máximas acelerações encontradas no ensaio de caminhada normal no Piso 4 ....	93
Tabela 21 – Máximas acelerações encontradas no ensaio de caminhada rápida no Piso 4.....	95
Tabela 22 – Máximas acelerações encontradas no ensaio de caminhada lenta no Piso 5.....	97
Tabela 23 – Máximas acelerações encontradas no ensaio de caminhada normal no Piso 5 ....	99
Tabela 24 – Máximas acelerações encontradas no ensaio de caminhada rápida no Piso 5....	101
Tabela 25 – Comparação das acelerações obtidas no Piso 1 com limites normativos .....	104
Tabela 26 - Comparação das acelerações obtidas no Piso 2 com limites normativos.....	105
Tabela 27 - Comparação das acelerações obtidas no Piso 3 com limites normativos.....	105

Tabela 28 - Comparação das acelerações obtidas no Piso 4 com limites normativos.....	106
Tabela 29 - Comparação das acelerações obtidas no Piso 5 com limites normativos.....	106

## LISTA DE SÍMBOLOS

### Letras romanas minúsculas

$f_p$	Frequência de passo
$f_n$	Frequência natural
$f_{crítica}$	Frequência crítica
$g$	Aceleração da gravidade
$a_p$	Aceleração de pico
$a_{eff}$	Aceleração efetiva
$f_{ck}$	Resistência característica à compressão do concreto
$f_y$	Resistência de escoamento do aço

### Letras romanas maiúsculas

$P_0$	Amplitude da força aplicada
$W$	Peso efetivo do painel da viga secundária, principal ou um painel combinado
$B$	Largura efetiva
$L$	Vão do elemento
$T$	Período de tempo no qual a aceleração efetiva é medida
$X_0$	Amplitude do primeiro pico
$X_n$	Amplitude do segundo pico
$E_c$	Módulo de elasticidade do concreto
$E_s$	Módulo de elasticidade do aço
$E_a$	Módulo de elasticidade da alvenaria

### Letras gregas minúsculas

$\beta$	Amortecimento estrutural
$\gamma$	Peso por unidade de área
$\xi$	Taxa de amortecimento modal
$\delta$	Decremento logarítmico
$\nu_c$	Coefficiente de Poisson do concreto
$\gamma_c$	Peso específico do concreto
$\nu_s$	Coefficiente de Poisson do aço
$\gamma_s$	Peso específico do aço

$\nu_a$	Coeficiente de Poisson da alvenaria
$\gamma_a$	Peso específico da alvenaria

**Letras gregas maiúsculas**

$\Delta_j$	Flecha no meio do vão da viga
$\Delta_g$	Flecha no meio do vão da viga principal
$\Delta_c$	Flecha no meio do vão da viga secundária

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AC	Acelerômetro
AISC	<i>American Institute of Construction</i>
CV	Coefficiente de Variação
DG	<i>Design Guide</i>
ELS	Estado Limite de Serviço
ELU	Estado Limite Último
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
FRF	<i>Frequency Response Function</i>
Hz	<i>Hertz</i>
ISO	<i>International Standard Organization</i>
MEF	Método dos Elementos Finitos
NBR	Norma Brasileira
RMS	Root Mean Square
SIMO	<i>Single Input Multiple Output</i>

# SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO .....	19
1.1 Objetivos .....	21
1.2 Justificativa .....	22
1.3 Metodologia .....	22
2 REFERENCIAL TEÓRICO .....	24
2.1 Aspectos Gerais .....	24
2.2 Ações dinâmicas induzidas pelo caminhar humano .....	28
2.2.1 Trajetória da caminhada .....	29
2.3 Critérios de conforto humano .....	30
2.3.1 Norma ABNT NBR 8800:2008 .....	31
2.3.2 Norma ABNT NBR 6118:2014 .....	32
2.3.3 <i>Design Guide 11 AISC</i> (2016).....	33
2.3.4 ISO 2631-1 e ISO 2631-2 .....	34
2.4 Amortecimento estrutural .....	37
3 MODELO ESTRUTURAL SOB INVESTIGAÇÃO .....	39
4 METODOLOGIA NUMÉRICA.....	44
4.1 Elementos finitos .....	44
4.2 Hipóteses simplificadoras .....	47
5 METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	48
5.1 Projeto de monitoramento.....	48
5.2 Especificação e instalação dos equipamentos.....	51
5.2.1 Especificação dos equipamentos.....	51
5.2.2 Fixação dos acelerômetros .....	52
5.3 Análise modal experimental .....	54
5.4 Análise dinâmica experimental.....	56
5.5 Processamento e tratamento dos dados.....	58
5.5.1 Determinação da taxa de amortecimento modal .....	59
5.5.2 Determinação da aceleração de pico e <i>RMS</i> .....	60

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	62
6.1 Vibração livre .....	62
6.1.1 Determinação das frequências naturais e taxas de amortecimento .....	62
6.1.2 Comparação dos resultados experimentais com numéricos.....	70
6.2 Resultados de vibração forçada de uma pessoa caminhando sobre o piso .....	73
6.2.1 Piso 1 .....	73
6.2.2 Piso 2.....	79
6.2.3 Piso 3.....	85
6.2.4 Piso 4.....	91
6.2.5 Piso 5.....	96
6.3 Análise do conforto humano.....	102
6.3.1 Avaliação dos níveis de vibração da estrutura segundo as normas brasileiras (NBR 6118:2014 e NBR 8800:2008) .....	103
6.3.2 Avaliação dos níveis de aceleração segundo AISC/CISC DG 11 e ISO 2631-2.....	104
6.4 Análise da influência do número de pessoas sobre o piso na resposta dinâmica .....	107
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	111
7.1 Conclusões .....	111
7.2 Sugestões para trabalhos futuros.....	114
8 REFERÊNCIAS.....	115
APÊNDICE A – PLANTA DO PAVIMENTO INVESTIGADO.....	124
APÊNDICE B – RESPOSTAS DE ACELERAÇÃO NO DOMÍNIO DO TEMPO E DA FREQUÊNCIA.....	126

# 1

## INTRODUÇÃO

A construção mista (aço e concreto) vem se consolidando como uma forte alternativa tecnológica no cenário da construção civil brasileira, sendo cada vez mais adotada em edifícios comerciais, residenciais e de estacionamento. A Fig. 1 ilustra um exemplo de sistema tradicional de piso misto usado em edifícios comerciais, característico pela presença de grandes vãos livres, propiciando uma maior flexibilização do pavimento.



Figura 1 – Exemplo de um edifício comercial executado com piso misto (aço-concreto).  
Fonte: do autor.

As primeiras estruturas mistas foram introduzidas no Brasil na década de 50, porém começaram a ter relevância apenas em 1986, após a primeira versão da ABNT NBR 8800 que começou a prever dimensionamento de elementos mistos. As vantagens em utilizar os sistemas misto de aço e concreto são bem difundidas e vêm do 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. O sistema tradicional de piso misto de

aço e concreto é composto por vigas metálicas, laje de concreto (ou mista de aço e concreto) e conectores de cisalhamento (Fig. 2). Os conectores são inseridos entre a viga e a laje e tem a função de 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 (SILVA JUNIOR, 2015).

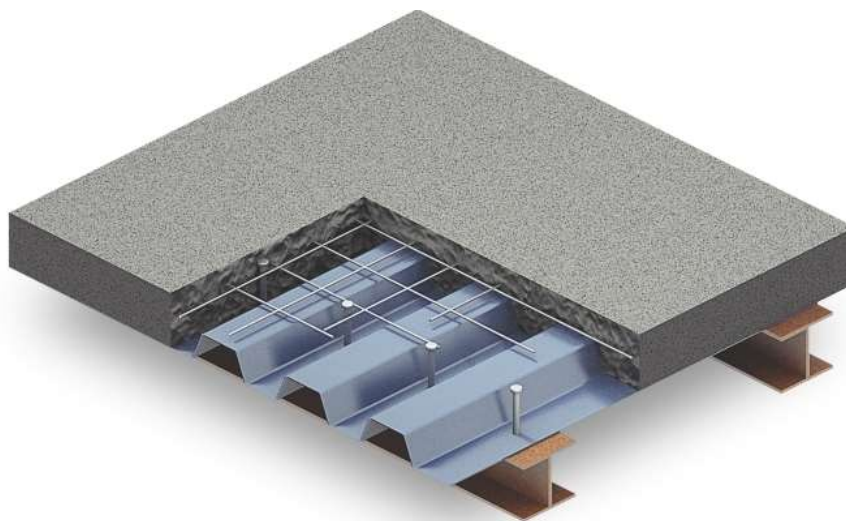


Figura 2 - Componentes básicos de um sistema de piso misto. Fonte: Silva Junior, 2015.

Porém, com base no emprego de materiais mais leves e de alta resistência, no aprimoramento das técnicas e processos construtivos e no desenvolvimento de estruturas a partir de computadores cada vez mais eficientes, tornou-se possível a execução de sistemas estruturais de pisos mistos (aço-concreto) cada vez mais esbeltos. Em adição, observa-se a concepção de sistemas estruturais com baixos níveis de amortecimento estrutural, relacionado aos tipos de materiais empregados, tipologia da construção, presença de elementos não estruturais, idade e qualidade da obra. Estes fatos corroboram para o projeto de pisos com frequências naturais cada vez mais baixas e mais susceptíveis à elevados níveis de vibração (ZHANG e XU, 2020; SILVA JUNIOR, 2015).

Outro ponto importante diz respeito à multifuncionalidade que o mercado tem exigido dos projetos atuais de engenharia, com base na utilização de edificações destinadas para uso comum de espaços residenciais, escritórios e academias de ginástica. Tal fato tem contribuído para que os pisos destes edifícios sejam mais susceptíveis à vibrações excessivas oriundas, principalmente, de atividades humanas, tais como: caminhada, saltos, dança, ginástica rítmica, entre outras, gerando perturbações ao usuário no que tange ao conforto humano (AGUIAR, 2017).

A excitação dinâmica produzida pelo caminhar de pessoas ocorre essencialmente em baixas frequências com a componente na direção vertical entre 1,6 Hz e 2,4 Hz, podendo ser adotados valores médios de 2 Hz (Nguyen, 2013). Estruturas esbeltas estão sujeitas ao fenômeno da ressonância que pode ocorrer devido à proximidade entre a frequência de excitação, o caminhar humano, e as frequências naturais do piso. Vibrações de pisos em níveis que causam desconforto aos usuários devido a caminhada humana têm sido observadas com mais frequência nos últimos anos, como mostrado nos trabalhos desenvolvidos por Murray et al (2003), Willford e Young (2006), Feldmann et al. (2009), Smith et al. (2009), Hicks e Smith (2011) e Nguyen (2013). O desconforto humano e o comprometimento estrutural também podem ser atribuídos a validade da aplicação das metodologias correntes empregadas em projetos que consideram, de forma simplificada, as ações dinâmicas como ações estáticas equivalentes limitadas à estados limites de utilização, ao invés de análises dinâmicas das estruturas na fase de projeto.

Alguns trabalhos sobre o comportamento de pisos mistos foram desenvolvidos por Williams e Waldron (1994), Allen (1990), Da Silva et al. (2003) e El-Dardiry e Ji (2005). Esses autores estudaram o comportamento estrutural desses pisos através do Método dos Elementos Finitos (MEF), quando submetidos a atividades induzidas pelo homem. As diretrizes baseadas em algumas dessas pesquisas são fornecidas em publicações do *American Institute of Construction* (AISC) e *International Standard Organization* (ISO), que apresentam limites de aceleração para a perceptibilidade humana para vários níveis de ocupações sob diferentes cargas dinâmicas induzidas pelo homem.

## 1.1 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo estudar a resposta dinâmica de um piso misto real, localizado na cidade de Belo Horizonte, quando submetido a ações oriundas do caminhar humano. São determinadas as propriedades modais da estrutura via análise experimental e numérica, com posterior comparação entre estas. Na análise experimental do piso, diferentes ações dinâmicas são avaliadas permitindo assim a determinação das acelerações de pico da estrutura, bem como a dependência dessas respostas com as excitações impostas à estrutura. Por fim, este trabalho também apresenta o objetivo de avaliar os níveis de conforto humano do piso quanto aos limites aceitáveis de vibração.

## 1.2 Justificativa

Com o surgimento de materiais com maior resistência, torna-se cada vez mais viável reduzir a altura total de um sistema de piso misto (aço-concreto), buscando um maior aproveitamento do espaço útil. Contudo, essa tendência implica em redução de rigidez do sistema, tornando essas estruturas cada vez mais suscetíveis aos efeitos causados por carregamentos dinâmicos, causando desconforto aos usuários e até mesmo problemas estruturais. Apesar da grande importância do assunto, o efeito das vibrações e os critérios de conforto humano ainda não são amplamente discutidos nas normas de estruturas e nos cursos de graduação em engenharia civil no Brasil.

No geral, as normas brasileiras apresentam procedimento de cálculo simplificado para avaliação das características dinâmicas dessas estruturas, onde geralmente as ações dinâmicas são aproximadas por estáticas equivalentes através de coeficiente de majoração de ações, levando a estruturas superdimensionadas ou imprecisões quanto ao comportamento dinâmico real, tanto em relação ao Estado Limite de Serviço (ELS), quanto ao Estado Limite Último (ELU).

Diante disso, vários autores passaram a desenvolver trabalhos com investigações mais consistentes e qualificadas no que diz respeito a consideração de ações dinâmicas no dimensionamento de estruturas para avaliação do conforto humano, objetivando evitar problemas associados à ocorrência de vibrações excessivas em pisos mistos (Pavic e Reynolds, 2002; Varela, 2004; Homem, 2014; Berczynky, 2010; Nguyen, 2013). O monitoramento experimental de estruturas existentes tem se mostrado bastante presente nesses trabalhos devido ao grande desenvolvimento da informática e dos sistemas de aquisição de sinais. A realização de ensaios dinâmicos se mostra conveniente para a avaliação de estruturas existentes ou em fase de construção devido ao seu caráter não-destrutivo, permitindo a obtenção de parâmetros modais reais em múltiplas regiões. A partir de valores reais para tais parâmetros, a avaliação da estrutura em relação aos níveis de vibração aceitáveis é realizada com maior confiabilidade.

## 1.3 Metodologia

Para alcançar os objetivos propostos neste trabalho, as seguintes etapas são realizadas:

- a) Levantamento do estado da arte relacionado à análise dinâmica de estruturas mistas (aço-concreto), com foco nas submetidas à ações decorrentes de atividades humanas.
- b) Identificação das normas e guias de projeto nacionais e internacionais que apresentam recomendações relacionadas aos limites de vibração aceitáveis para atendimento dos critérios de conforto humano;
- c) Desenvolvimento de um modelo numérico em elementos finitos utilizado para embasar o desenvolvimento do projeto experimental e posicionamento da instrumentação na estrutura.
- d) Estudo e determinação dos procedimentos para realização dos ensaios dinâmicos *in loco*, bem como o processamento e tratamento dos resultados obtidos.
- e) Calibração e comparação dos resultados dos modelos numéricos desenvolvidos com os parâmetros modais experimentais;
- f) Avaliação do desempenho dos pisos estudados quanto aos critérios de conforto humano proposto por normas e guias de projeto.

# 2

## REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Aspectos Gerais

Os efeitos dinâmicos sobre pisos mistos (aço-concreto) é um assunto estudado e em constante evolução desde o século XIX. Um dos primeiros casos que se tem registro de colapso estrutural devido a ações dinâmicas induzidas por pessoas foi de uma ponte localizada na Inglaterra no ano de 1831 (*Broughton Suspension Bridge*). No evento em questão, em torno de sessenta soldados marchavam na estrutura quando esta entrou em ressonância e desabou, deixando 20 feridos (TILLY et. al, 1984 e FERNANDES, 2007). A partir disso, Tilden (1913) desenvolveu estudos considerando atividades humanas como ação dinâmica, chegando à conclusão que movimentos de multidões, sincronizados ou aleatórios, poderiam gerar forças resultantes de elevada intensidade, causando o comprometimento da estrutura.

Um dos primeiros critérios de rigidez estrutural surgiu quando Tredgold (1875) mostrou em seu trabalho que vigas com grandes vãos deveriam possuir uma altura suficiente para evitar o inconveniente de serem capazes de se mover junto com a estrutura. Em 1966, Lenzen (1966) percebeu, porém, que a rigidez não era o fator mais importante, e sim a massa e o amortecimento, os quais passaram a ser os mais relevantes na prevenção de vibrações excessivas causadas por ações humanas. Bachmann e Ammann (1987) apresentam em seu livro as distinções do carregamento humano entre caminhar, correr, pular e dançar. No caso do caminhar e correr, os autores mostram que a excitação dinâmica sobre o piso é dominada pela frequência de passo.

Allen e Murray (1993) apresentaram um critério de cálculo para vibrações devido ao caminhar humano, baseado na resposta dinâmica da estrutura sujeitas a essas excitações, bem como na sensibilidade e percepção dos usuários. Após a análise de vários pisos mistos, os autores sugeriram que estruturas com taxa de amortecimento entre 4% e 10% que estivessem acima da linha média da região de distintamente perceptível (conforme escala modificada de

Reither-Meister apresentada na Fig. 3, gerariam desconforto aos usuários e os que se situassem na faixa fortemente perceptível seriam considerados como inaceitáveis para os ocupantes.

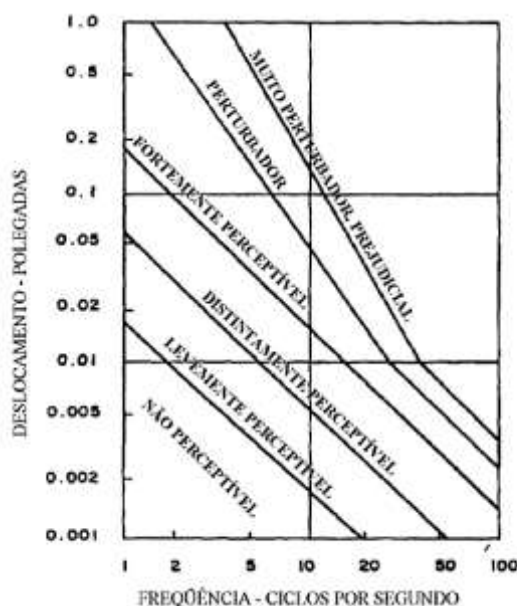


Figura 3 – Escala modificada de Reither-Meister de sensibilidade humana às vibrações. Fonte: Allen e Murray, 1993.

McCormick (1974) realizou um estudo experimental em pisos de escritórios objetivando encontrar critérios e testes dinâmicos mais convenientes para aplicação em um projeto de duas torres construídas em pórticos metálicos. Como conclusão, o autor definiu como aceitável uma taxa de amortecimento superior a 3% para pisos mistos. Hanagan (2005) verificou a influência de elementos arquitetônicos na contribuição ou não da taxa de amortecimento estrutural através da análise de cinco casos reais, onde foram encontrados níveis de vibração excessivas devido ao caminhar humano. As avaliações e recomendações relativas à avaliação das vibrações, conforme o autor, ainda geram resistência por parte dos projetistas e em consequência disso, o custo de reparo tem se mostrado muito maior. Battista e Varela (2002) constataram que problemas relacionados a vibração excessiva em pisos mistos causam desconforto aos usuários mesmo quando atendem aos critérios estabelecidos em normas de projeto estrutural. Dallard et. al (2001) discute em seu trabalho que uma vibração estrutural excessiva perturba os usuários em suas atividades e que as estruturas podem ser até inutilizadas ou consideradas inseguras devido ao pânico provocado entre as pessoas devido às vibrações.

A sincronização entre as pessoas com a movimentação da estrutura é um caso de interação humana-estrutura e este comportamento tem sido estudado em diferentes épocas

como reportado por Fujino et. al (1993), Fujino et. al (1993), Ji et. al (1994), Bachmann (2002), Petersen (2010), Bachmann (2002), Nakamura et. al (2008) e Matsumoto e Griffin (2000). Matsumoto e Griffin (2000) comparam a maneira que a vibração é transmitida pela estrutura ao corpo humano, quando este encontra-se na posição ereta ou sentada.

Mello (2005) analisou numericamente um piso misto submetido a quatro tipos de ações simulando o caminhar humano, visando analisar o conforto humano. Chegou-se à conclusão de que a avaliação do conforto pelas acelerações filtradas *RMS* se mostram mais racionais e econômicas quando comparadas com a avaliação através das acelerações de pico, proposta pelo *Design Guide* do AISC.

Mello et. al (2007) investigaram a influência do tamanho do vão livre da laje no valor da frequência natural, através do estudo de pisos mistos variando os vãos de 5 metros a 10 metros. Os autores notaram que o valor da frequência natural dos pisos diminui, sensivelmente, com o aumento do vão das vigas, tornando esses pisos ainda mais suscetíveis às excitações dinâmicas induzidas pelos seres humanos. A maioria dos estudos e normas relatam que o desconforto humano ocorre em estruturas com frequência natural inferior a 8 Hz, porém, Brownjohn e Middleton (2008) analisaram em seu estudo que estruturas com frequência superior a 10 Hz também apresentam respostas dinâmicas significativas. Araújo e da Costa (2005) também chegaram a constatações semelhantes. Os autores estudaram o comportamento dinâmico de três lajes de concreto e perceberam que, apesar dos deslocamentos encontrados nessas estruturas atenderem as recomendações da ABNT NBR 6118:2014, as acelerações de pico para os modelos com frequência natural superior a 10 Hz excederam os limites impostos para conforto humano. Estes fatos demonstram que a influência e contribuição dos harmônicos mais altos do caminhar humano não devem ser subestimados no que concerne ao conforto humano.

Mendes e Oliveira (2008), demonstram a importância da realização de ensaios experimentais para avaliação do comportamento dinâmico de pisos mistos em conjunto com a elaboração de modelos numéricos. Varela (2004) constatou experimentalmente que problemas devidos a excitações dinâmicas produzidas por atividades humanas são mais agudos e frequentes em painéis de laje contínuos, por esses apresentarem multimodos de vibração. Setareh (2010) realizou medições experimentais em um escritório suscetível a vibração

excessiva, para comparação das respostas obtidas com o modelo numérico, onde constataram uma defasagem do segundo e terceiro modos de vibração. O autor concluiu que a defasagem ocorreu devido ao número insuficiente de pontos de medição devido ao grande porte da estrutura.

Díaz et. al (2012) apresentaram um estudo evidenciando o crescente aumento do número de pisos mistos submetidos a atividades humanas com níveis de vibração superior aos limites recomendados por normas e guias de projeto. A fim de amenizar tais efeitos, os autores propuseram a utilização de um sistema de controle ativo na minimização das vibrações, de forma a atender os critérios relativos ao conforto humano. Varela e Battista (2011) analisaram experimentalmente um protótipo 1:1 de um piso misto em laboratório, através de ações dinâmicas provocadas pelo caminhar humano de forma aleatória. Foi instalado na estrutura um sistema de controle passivo de modo a atenuar as vibrações indesejadas. Os resultados obtidos foram comparados em termos de aceleração do piso com e sem controle, mostrando a eficiência do uso do sistema de controle passivo ao reduzir significativamente as vibrações no piso. Assim os autores propõem seu uso na fase de construção, devido a sua eficiência atrelada ao baixo custo de aquisição e manutenção.

Shahabpoor et. al (2016) analisaram a influência da presença humana na alteração dos parâmetros modais da estrutura, chegando à conclusão que as ações exercidas pelas pessoas, como caminhar, correr, pular, geralmente aumentam consideravelmente o amortecimento da estrutura, entretanto acarretam alterações pequenas nas frequências naturais. Os autores constataram também que a alteração dos parâmetros modais da estrutura se torna mais significativo à medida que se aumentam o número de pessoas envolvidas nas atividades.

Ma et. al (2018) realizaram um estudo experimental para investigar a percepção dos usuários sobre as vibrações induzidas por humanos em pisos. Durante o experimento, a estrutura foi imposta a excitações senoidais com diferentes amplitudes e frequências, com o objetivo determinar a influência desses fatores na percepção dos usuários. Com base nos dados coletados, os autores propuseram escalas de percepção as vibrações compreendendo cinco níveis dependentes da amplitude da aceleração e da frequência. Por fim, Ma et. al (2018) realizaram uma comparação entre as escalas propostas e os critérios de conforto existentes na literatura, normas e guias de projeto.

Gaspar (2018), avaliou experimentalmente a influência da flexibilidade do sistema estrutural durante a prática de atividades rítmicas (saltos), no que tange ao conforto humano, realizando ensaios sobre pisos rígidos e flexíveis. O autor notou que, como esperado, as acelerações no tempo tendem a diminuir na medida que ocorria o afastamento das frequências de atividade e seus respectivos harmônicos em relação à frequência fundamental do piso. Porém, os valores encontrados para esses casos foram superiores aos limites de conforto humano impostos na literatura, indicando que a avaliação do conforto para frequências mais afastadas da ressonância não deve ser negligenciada.

Campista (2019), estudou o comportamento estrutural dinâmico de pisos de edificações, quando submetidos a atividades humanas rítmicas, com base em testes experimentais e modelagem numérica, com emprego de modelos biodinâmicos, focando na avaliação do conforto humano. Os resultados encontrados pela autora, mostram reduções significativas referentes aos valores das acelerações de pico, quando os sistemas biodinâmicos são considerados na análise, em comparação com os resultados fornecidos pelos modelos matemáticos de força dura.

A avaliação do comportamento dinâmico do piso também deve ser cuidadosamente realizada quando houver alteração da destinação do uso da estrutura em relação àquela assumida no projeto. De Paula e Queiroz (1998) avaliaram um sistema de piso misto inicialmente projetado para funcionar como um escritório e posteriormente submetido a atividades humanas rítmicas. O estudo foi realizado através de análises experimentais e numéricas, sendo constatada a necessidade de execução de reforço na estrutura com base nos novos níveis de acelerações e tensões impostos pela nova ação humana.

## **2.2 Ações dinâmicas induzidas pelo caminhar humano**

As solicitações dinâmicas induzidas por atividades humanas se fazem presentes em praticamente todo tipo de estruturas e podem ser separadas em dois grupos: quando ocorre perda de contato com a estrutura, como correr e pular, e quando não há perda de contato, como caminhar. Enquanto caminha, um ser humano produz uma força dinâmica, pela aceleração e desaceleração do corpo, que varia ao longo do tempo, com componentes em três direções: vertical, lateral e longitudinal. A componente vertical tem sido a mais estudada por ter grande magnitude em comparação com as demais (NGUYEN, 2013).

A frequência de passo, conforme Bachmann e Ammann (1987), pode variar entre 1,7 Hz e 2,3 Hz e, em geral, a amplitude de força tende a aumentar com o aumento desta frequência de excitação. Assim, para uma frequência de passo relativamente mais alta, uma resposta dinâmica maior será induzida. Além disso, se a frequência natural do piso for coincidente com algum harmônico da frequência de passo (Tab. 1), a resposta de ressonante da estrutura pode ser tornar mais evidente e representativa.

Tabela 1 – Harmônicos da frequência de passo do caminhar humano.

Harmônico	Caminhada $f_p$ (Hz)
1	1,6 a 2,2
2	3,2 a 4,6
3	4,8 a 6,6
4	6,4 a 8,8

Como as amplitudes de vibração excessivas são decorrentes da proximidade entre a frequência natural do piso com um dos harmônicos da frequência do passo, alguns estudos sugerem que, simplificadamente, o problema poderia ser evitado mantendo essas frequências afastadas umas das outras. Assim, como os harmônicos acima do quarto harmônico do caminhar apresentam uma contribuição mínima para a resposta do piso, poderia ser estipulada como frequência de “corte”, acima da qual o acúmulo de resposta ressonante não é significativo, como quatro vezes a frequência de passo máxima esperada para o piso (WILLFORD et. al, 2007). Desta forma, sistemas de piso com frequência natural acima de 8,8 Hz (quarto harmônico do caminhar) não apresentariam problemas relacionados à vibração.

Porém, Zivanovic e Pavic (2009) argumentaram que o método de frequência de “corte” deve ser usado com cautela, uma vez que pode levar a erros consideráveis em algumas circunstâncias. Testando pisos com frequência natural acima e abaixo de 10 Hz, esses autores perceberam que as respostas medidas devido à caminhada humana foram mais altas nos pisos com frequência acima de 10 Hz que os de frequência abaixo desse valor.

### 2.2.1 Trajetória da caminhada

Os usuários de uma estrutura podem andar aleatoriamente e mudar a direção da trajetória com frequência, o que pode ser inesperado ou previsto. Por uma questão de simplicidade, segundo Zhang e Xu (2020), presume-se que os usuários andem pelas estruturas ao longo de

um caminho específico e adequado para produzir respostas máximas, embora esse tipo de situação raramente seja encontrado na vida cotidiana. Zhang e Xu (2020) realizaram um estudo paramétrico com o objetivo de determinar a diferença das respostas do piso associadas a quatro percursos pedestres: paralelos e perpendiculares às vigas do piso, percurso diagonal e percurso circular, como mostra a Fig. 4. Neste estudo foi concluído que o caminho que leva às maiores respostas depende das condições de vinculação do piso.

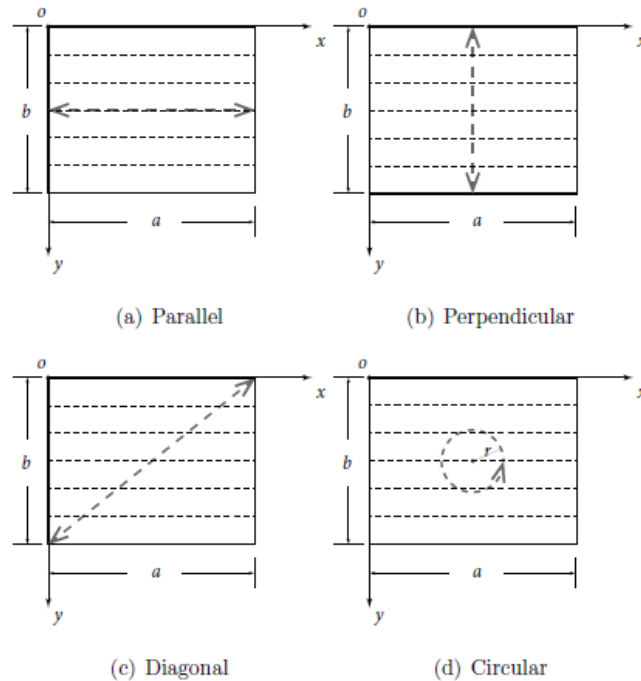


Figura 4 – Direções de caminhada no piso. Fonte: Zhang e Xu (2020).

## 2.3 Critérios de conforto humano

A área de percepção humana à vibração foi e tem sido bastante estudada por diversos pesquisadores nos últimos anos (REIHER e MEISTER, 1931; FAÍSCA, 2003; PAVIC et. al., 2004; CRAIG e KURDILA, 2006; IBRAHIM e REYNOLDS, 2008 e SILVA, 2011). As respostas humanas as vibrações são comumente divididas em cinco categorias: iniciando com a percepção, seguida de desconforto, interferência nas atividades desenvolvidas, mal-estar e problemas de saúde. Vários fatores podem influenciar a percepção humana às vibrações, dentre eles: a posição em que a pessoa se encontra (em pé, deitada ou sentada), a hora do dia e a natureza da atividade desenvolvida, sendo a intensidade da percepção diretamente influenciada pela amplitude de aceleração e de velocidade, frequência de vibração e duração da exposição (VARELA, 2004).

Em relação a frequência de vibração, estudos de conforto mostram que sistemas biológicos podem ser influenciados por vibrações em qualquer frequência, sendo observado que as pessoas reagem de forma especialmente adversa para valores situados na faixa de 4 a 8 Hz. Isso é justificado pelo fato dos órgãos humanos internos, como coração, fígado, rins e bexiga possuírem frequências naturais nesse intervalo (MURRAY et. al, 1981).

Apesar da sensibilidade humana à vibração ser algo subjetivo, ou seja, variar de indivíduo para indivíduo, foram criados critérios nacionais e internacionais estipulando valores médios aceitáveis de conforto mínimo baseados nas acelerações determinadas a partir da análise dinâmica das estruturas, de forma a garantir as condições de serviço para edificações considerando o conforto dos usuários. Os critérios de conforto humano são definidos por limites de acelerações máximas ou por critérios que estabelecem frequências mínimas. As principais normas e guias de projeto que são utilizadas para avaliar o conforto humano em edificações e sistemas de piso submetidos a atividade humanas, observando suas relevâncias no cenário nacional, mundial e contexto histórico, são: ABNT NBR 8800:2008, ABNT NBR 6118:2014, ISO 2631-1:1997, ISO 2631-2:2003 AISC Design Guide 11 (2016).

### **2.3.1 Norma ABNT NBR 8800:2008**

A norma ABNT NBR 8800:2008 determina os requisitos básicos que devem ser respeitados nos projetos de estruturas de aço e mistas de aço e concreto de edificações. Em relação a verificação do estado limite de serviço referente as vibrações de pisos, o item 11.4.1 estabelece o dimensionamento da estrutura, tais como grandes áreas que não possuem divisórias ou outros elementos de amortecimento, de modo a se evitar o aparecimento de vibrações transientes indesejáveis pelo caminhar humano e outras fontes, conforme o anexo L (NBR 8800, 2008, p.161). Segundo o anexo L, estruturas sujeitas a ações constantes de caminhada tais como escritórios, residências e estruturas similares, a norma indica uma avaliação simplificada limitando a menor frequência natural a 4 Hz e o deslocamento vertical causado pelas ações permanentes e variáveis inferior a 20 mm. Porém, ressalta-se que, segundo a ABNT NBR 8800:2008, esses critérios partem do pressuposto de uma avaliação simplificada de vibração gerada por atividades humanas, podendo não representar uma solução ideal para o problema de conforto humano em edificações.

Assim, para uma análise mais criteriosa, recomenda-se que os projetos estruturais sejam avaliados por meio de uma análise dinâmica considerando as características e a natureza das excitações dinâmicas (o caminhar humano e atividades rítmicas), os limites para o conforto humano em função do uso e ocupação das áreas do piso, as frequências fundamentais da estrutura do piso, a razão de amortecimento modal e a massa real da estrutura.

### 2.3.2 Norma ABNT NBR 6118:2014

A norma ABNT NBR 6188:2014 estabelece os requisitos básicos exigidos em projetos de estrutura de concreto simples, armado e protendido, excluindo os que empregam concreto leve, pesado ou outros especiais. A análise das vibrações excessivas é baseada apenas no critério de frequência fundamental mínima da estrutura. Assim, com o intuito de evitá-las e de 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 ( $f_{crítica}$ ), dada pela Tab. 2. A Eq. (2.1) representa a relação entre essas duas frequências.

$$f_n > 1,2 f_{crítica} \quad (2.1)$$

Tabela 2 - Frequências críticas para algumas estruturas submetidas à vibração pela ação de pessoas. Fonte: ABNT NBR 6118:2014

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

O critério estabelecido pela NBR 6118:2014 parte da prerrogativa de que afastar a frequência natural da estrutura da frequência crítica é suficiente para evitar vibrações excessivas na estrutura e, conseqüentemente minimizar o desconforto humano. Analisando a Tab. 2, percebe-se que, tomando como exemplo o caso de escritórios, procura-se evitar o fenômeno da ressonância com os dois primeiros harmônicos do caminhar humano, considerando ser da faixa da atividade ser de 1,5 Hz a 2,2 Hz. Porém, como mostrado no item 2.1 deste trabalho, e também

em Varela (2004), a ressonância também pode ocorrer em umas das frequências da estrutura com o quarto harmônico do caminhar, portanto, a frequência crítica para escritórios deveria ser de no mínimo 8,8 Hz.

Diante disso fica claro que uma análise baseada somente em frequências mínimas não é aconselhável, uma vez que estruturas mesmo sem apresentar ressonância com a frequência da excitação ou seu primeiro harmônico pode apresentar níveis de vibrações indesejáveis (VARELA, 2004). Por fim, a ABNT NBR 6118:2014 indica que, em casos especiais onde as suas prescrições não puderem ser atendidas, uma análise dinâmica mais acurada deve ser realizada, conforme estabelecida em recomendações internacionais, enquanto não existir normatização brasileira específica.

### 2.3.3 Design Guide 11 AISC (2016)

O guia de projeto *Design Guide 11* do *American Institute of Steel Construction* (AISC, 2016) apresenta várias recomendações para o Estado Limite de Serviço (ELS) de pisos levando-se em conta critérios de vibrações. Inicialmente, o cálculo analítico da frequência fundamental dos pisos pode ser feito com base no uso da Eq. (2.2), em que  $f_n$  é a frequência fundamental do piso;  $g$  é a aceleração da gravidade;  $\Delta_j$  é a flecha no meio do vão da viga secundária;  $\Delta_g$  é a flecha no meio do vão da viga principal e  $\Delta_c$  é a deformação axial das colunas.

$$f_n = 0,18 \sqrt{\frac{g}{\Delta_j + \Delta_g + \Delta_c}} \quad (2.2)$$

Por outro lado, considerando-se a atividade humana de caminhar humano, o guia de projeto apresenta a solução analítica para o cálculo da aceleração de pico. O critério recomendado para pisos de baixa frequência é satisfatório se a aceleração de pico ( $a_p$ ) para excitação do caminhar humano em relação à gravidade ( $g$ ), conforme Eq. (2.3), não exceder os limites de acordo com a ocupação, conforme Tab. 3. Em relação a Eq. (2.3),  $a_p$  é a aceleração de pico;  $g$  é a aceleração da gravidade;  $P_0$  é a amplitude da força aplicada;  $f_n$  é a frequência fundamental do piso;  $\beta$  é o amortecimento estrutural, definido com base na Tab. 4; e  $W$  é o peso efetivo do painel da viga secundária, viga principal ou um painel combinado.

$$\frac{a_p}{g} = \frac{P_0 e^{-0,35f_n}}{\beta W} \quad (2.3)$$

De forma geral, os pesos efetivos do painel de uma viga principal ou do painel de uma viga secundária podem ser calculados pela Eq. (2.4), onde  $\gamma$  é o peso por unidade de área;  $L$  é o vão do elemento; e  $B$  é a largura efetiva.

$$W = \gamma BL \quad (2.4)$$

O guia de projeto apresenta o procedimento para obtenção dos pesos efetivos da viga secundária e principal e o peso efetivo para o painel do piso. Além do passo a passo para o cálculo aproximado, apresentam-se tabelas com taxas de amortecimento a serem utilizadas no cálculo e os limites de tolerância, conforme tabelas a seguir.

Tabela 3 – Limites de tolerâncias recomendados para pisos. Fonte: Murray et al., 2016.

Ocupação	Aceleração limite $a_0/g$ (%)
Escritórios, residências, igrejas e áreas tranquilas	0,50
Shopping centers	1,50

Tabela 4 – Valores de amortecimento recomendados. Fonte: Murray et al., 2016.

Componente	Amortecimento crítico $\beta_i$
Sistema estrutural	0,01
Forros e dutos	0,01
Igrejas, escolas e shoppings	0,00
Divisórias de <i>dry wall</i> (do piso ao teto)	0,02 a 0,05

### 2.3.4 ISO 2631-1 e ISO 2631-2

A norma ISO 2631-1 (1997) – *Evaluation of Human Exposure to Whole Body Vibrations* - da *International Standard Organization* é aplicada para caso de vibrações em direções ortogonais (Fig. 5), abrangendo vibrações aleatórias, de choque e harmônicas. A faixa de frequências coberta é de 1 a 80 Hz e o critério é expresso em relação às acelerações efetivas medidas (*RMS*). Essa norma apresenta três diferentes níveis de desconforto humano às vibrações: o limite de redução de conforto, em que as atividades como ler, escrever ou comer são perturbadas; o limite do decréscimo da eficiência, onde se aplica um nível de vibrações

recorrentes que cause fadiga ao trabalhador com consequente redução da eficiência nas atividades desenvolvidas; e o limite de exposição à vibração, o qual define o tempo máximo que uma pessoa deve ficar exposta a uma perturbação sem que cause algum dano à sua saúde e a sua segurança.

O critério se dá na forma gráfica tanto para as vibrações verticais (eixo z da Fig. 5), quanto para as vibrações transversais (eixos x e y da Fig. 5), sendo destacados os fatores que mais influenciam o nível de percepção e sensibilidade dos indivíduos à vibração como o tempo de exposição, as características do piso e da fonte de excitação e o tipo de atividade desempenhada.

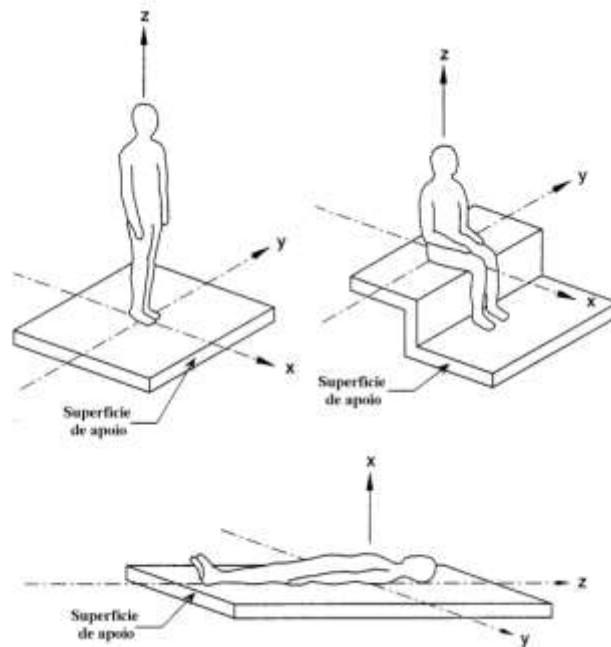


Figura 5 – Sistemas de coordenadas para vibrações mecânicas em pessoas. Fonte: Adaptado de ISO 2631-1 (1997)

Para o caso de vibrações em edifícios aplica-se o critério de acelerações efetivas (*RMS*) máximas, dada pela Eq. (2.5), da ISO 2631-2 (2003) - *Human exposure to continuous and shock-induced vibrations in buildings*, apresentada na Fig. 6 para aceleração no eixo z, multiplicada pelos valores de ponderação da Tab. 5 em função do período do dia, tipo de vibração e utilização da estrutura.

$$a_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a^2(t) dt} \quad (2.5)$$

Em que  $T$  é o período de tempo no qual a aceleração efetiva é medida. Por simplificação, a aceleração efetiva pode ser determinada pelo valor da aceleração de pico dividido por raiz quadrada de dois.

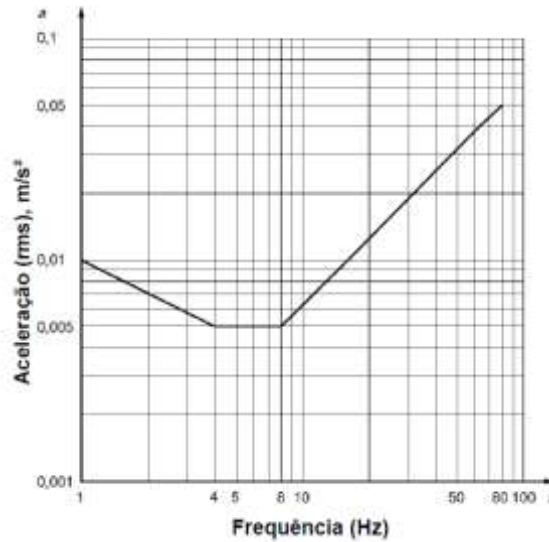


Figura 6 – Curva limite para critérios de conforto em acelerações *RMS* no eixo *z*. Fonte: ISO 2631-2 (2003)

Tabela 5 – Faixa dos fatores de majoração para a avaliação de vibrações em edifícios referentes à resposta humana. Fonte: Traduzido de ISO 2631-2 (2003)

Local	Tempo	Vibrações contínuas ou intermitentes	Vibrações por excitação transiente com várias ocorrências ao dia
Áreas de trabalho críticas (salas de operação de hospitais, laboratórios de precisão, etc.)	Dia Noite	1	1
Residências	Dia	2 a 4	30 a 90
	Noite	1,4	1,4 a 20
Escritórios em geral (escolas, etc.)	Dia	4	60 a 128
	Noite	4	60 a 128
Salões de conferências e oficinas	Dia	8	90 a 128
	Noite	8	90 a 128

## 2.4 Amortecimento estrutural

O amortecimento estrutural refere-se à capacidade da estrutura em dissipar energia associada à sua vibração. Resultados de ensaios dinâmicos de sistemas de piso demonstraram que a massa e o amortecimento têm uma influência significativa nas vibrações induzidas pelo homem (HARITOS et al, 2005). O aumento do amortecimento pode reduzir a magnitude da vibração em condições ressonantes, atenuar a transmissão de energia vibratória, aprimorar o isolamento sonoro e acelerar o decaimento da vibração livre (UNGAR, 1988). Assim, nota-se que a correta estimativa da taxa de amortecimento leva a um projeto estrutural otimizado, garantindo a segurança e conforto dos usuários.

O amortecimento inerente de um piso vem não apenas de elementos estruturais, mas também de elementos não estruturais ou componentes arquitetônicos. Tipo de material, tipo de construção, detalhes da ligação, espessura da laje, proteção contra incêndio, divisórias, forros de teto, mesas, armários, estantes de livros, dutos, encanamentos, entre outros, afetam a taxa de amortecimento de um sistema de piso. Em muitos casos, o amortecimento da estrutura vazia é menor do que o amortecimento adicional referente aos elementos não estruturais, móveis e ocupantes. Como resultado, diferentes sistemas de piso construídos com o mesmo material podem ter taxas muito diferentes de amortecimento (HEWITT e MURRAY, 2004).

Em geral, a massa estrutural e a rigidez são parâmetros de fácil avaliação, seja por simples consideração física ou por expressões generalizadas. Porém, até os dias atuais, não existe um conhecimento claro acerca dos fenômenos físicos reais e dos mecanismos que causam amortecimento, sendo precária sua determinação através de expressões generalizadas. Dessa forma, na maioria das vezes, a taxa de amortecimento de uma estrutura deve ser determinada através de análises experimentais, dadas no domínio do tempo ou da frequência. (PAVIC e REYNOLDS, 2002; CLOUGH e PENZIEN, 1993).

O método do decremento logarítmico pode ser usado para determinar o amortecimento a partir do gráfico de resposta no tempo, enquanto o método de largura de banda de meia potência é usado na determinação do amortecimento através do gráfico da resposta no domínio da frequência. O método do decremento logarítmico (Clough e Penzien, 1993) baseia-se 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 (Fig. 7). Assim, quanto maior for o

amortecimento, maior será a taxa de decréscimo da vibração. O decaimento da amplitude de vibração, definido como o logaritmo natural da razão do tamanho de dois picos ( $X_0$  e  $X_n$ ), separados de  $n$  ciclos, é estimado através da Eq. 2.6, e a taxa de amortecimento ( $\xi$ ) pode ser encontrada pela Eq. 2.7.

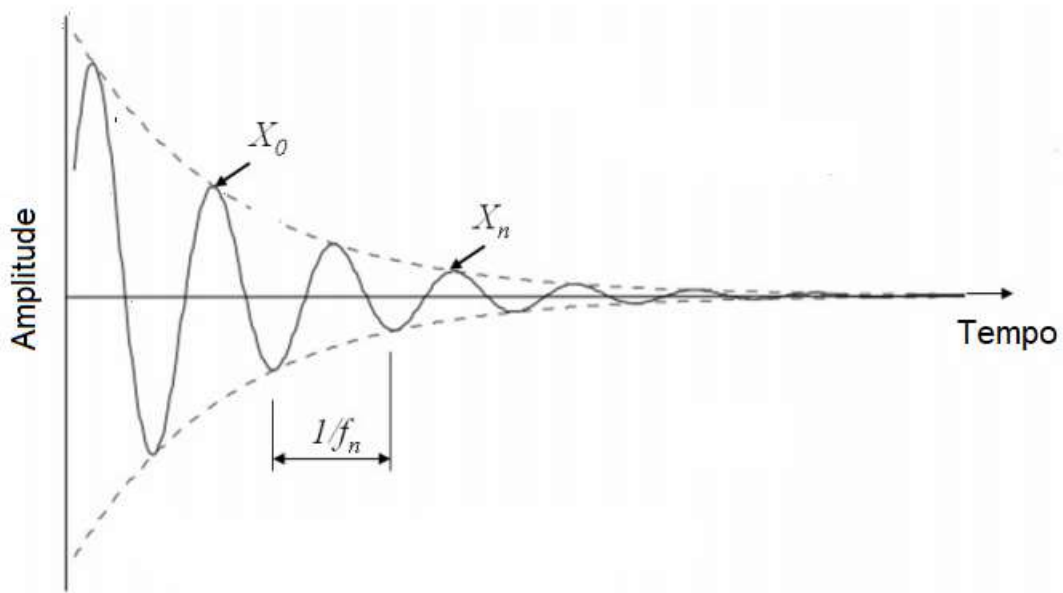


Figura 7 – Método do decaimento logarítmico. Fonte: Nguyen (2013)

$$\delta = \frac{1}{n} \ln \frac{X_0}{X_n} \quad (2.6)$$

$$\xi = \frac{\delta}{2\pi} \quad (2.7)$$

Segundo Varela (2004), a taxa de amortecimento de uma estrutura não é constante para os diversos modos de vibração, tendo um valor específico para cada modo. Ressaltando também o fato de que o ensaio de vibração livre excita vários modos ao mesmo tempo, conclui-se que para a aplicação do método do decaimento logarítmico na determinação do amortecimento estrutural de pisos é necessário selecionar somente as acelerações de uma determinada faixa de frequência, através da utilização de filtros passa banda.

# 3

## MODELO ESTRUTURAL SOB INVESTIGAÇÃO

O modelo estrutural investigado corresponde a um edifício real e existente, o qual se encontra em fase de construção e foi projetado para ser um hospital escola de uma universidade particular da cidade de Belo Horizonte/MG, Brasil. Seu sistema estrutural é baseado em pisos mistos (aço-concreto), compostos por lajes de concreto apoiadas em vigas metálicas, possuindo um total de doze pavimentos. Apresenta-se na Fig. 8 a maquete eletrônica da fachada do edifício e na Fig. 9 a estrutura executada no momento da realização deste estudo.

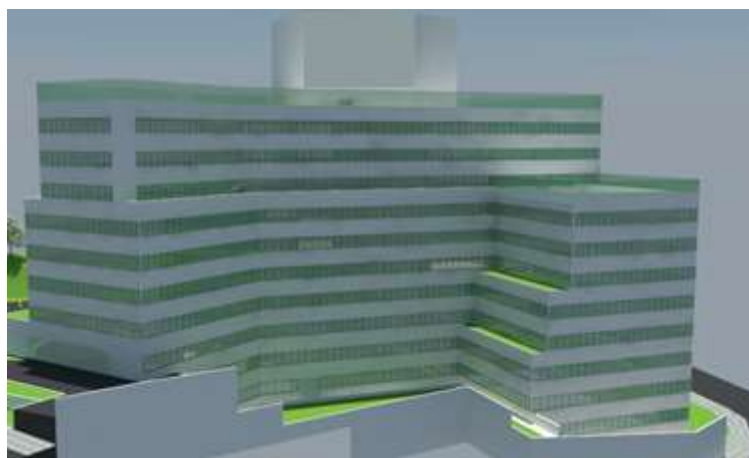


Figura 8 – Maquete eletrônica da fachada do edifício.



Figura 9 – Fachada do edifício em construção.



( $E_s$ ) de 200 GPa, coeficiente de Poisson ( $\nu_s$ ) igual a 0,3 e peso específico ( $\gamma_s$ ) de 7.849,05 kgf/m<sup>3</sup>, sendo todas essas características extraídas dos projetos estruturais da obra.

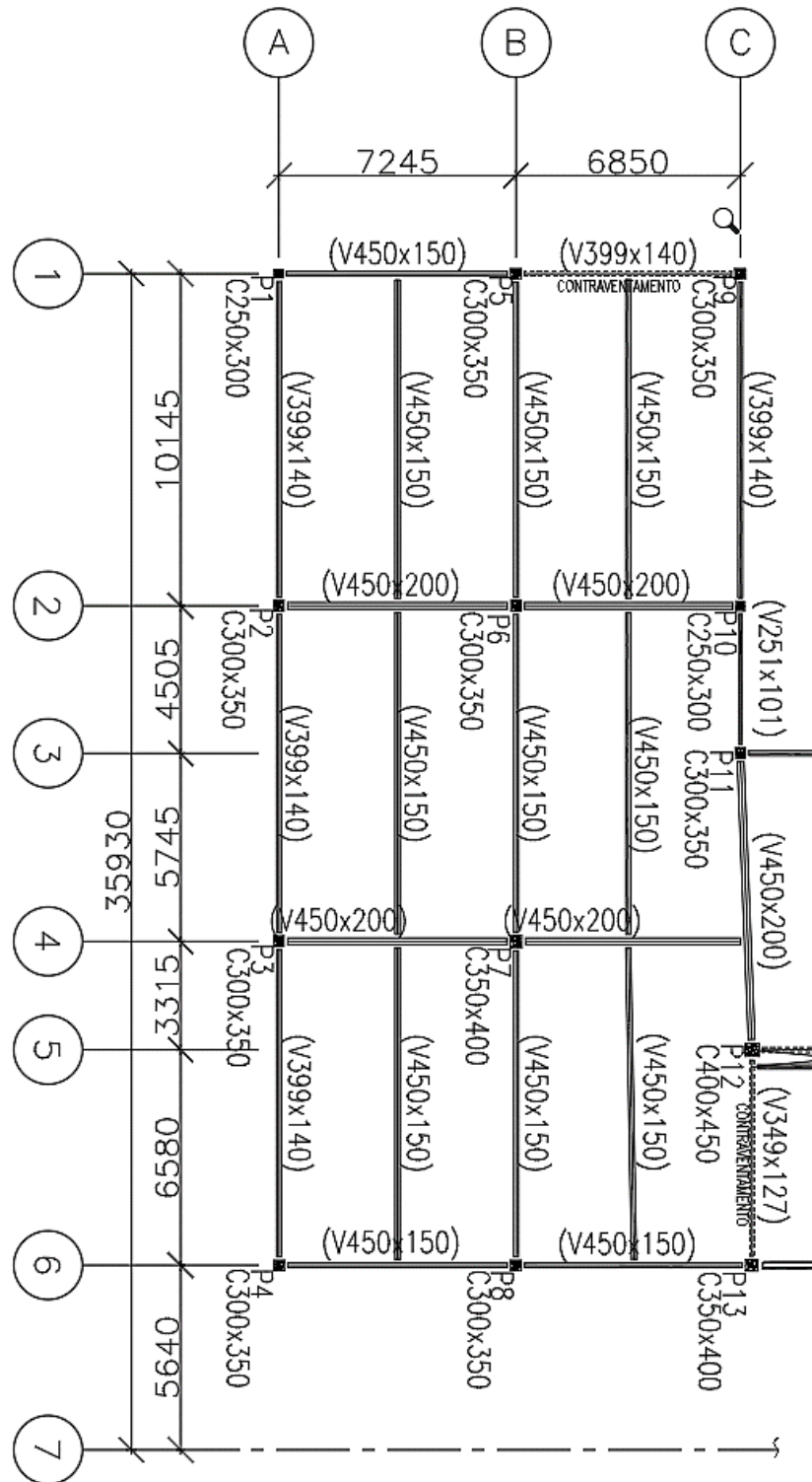


Figura 11 – Dimensões e seções transversais dos perfis metálicos do Lado A [mm].





Figura 13 – Vista dos pisos compreendidos entre os eixos 1' e 3'.



Figura 14 – Vista dos pisos compreendidos entre os eixos A e C.

# 4

## METODOLOGIA NUMÉRICA

### 4.1 Elementos finitos

Um modelo numérico do pavimento foi elaborado visando identificar as frequências naturais e respectivos modos de vibração da estrutura, necessários para o desenvolvimento do projeto de monitoramento dos pisos. Neste projeto são identificados o posicionamento da instrumentação bem como das fontes de excitação dos ensaios experimentais *in loco*.

O modelo numérico desenvolvido para análise dinâmica do piso misto investigado foi gerado através do programa ANSYS (2009) via emprego de técnicas usuais de discretização associadas ao Método dos Elementos Finitos (MEF). Deste modo, na modelagem numérica do sistema, as vigas e as colunas de aço foram representadas por elementos finitos tridimensionais BEAM44, onde são considerados os efeitos de flexão e torção. O elemento finito BEAM44, apresentado na Fig. 15, corresponde a um elemento uniaxial composto por dois nós e cada nó com seis graus de liberdade: translações e rotações em X, Y e Z. 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. Esta excentricidade é considerada na modelagem, pois afeta diretamente os valores das frequências naturais da estrutura.

As lajes de concreto armado foram simuladas por meio de elementos finitos de casca tipo SHELL63, ilustrado na Fig. 16, baseado na teoria de placa fina e definido por quatro nós com seis graus de liberdade em cada nó, sendo três de translação e três de rotação nas direções X, Y e Z.

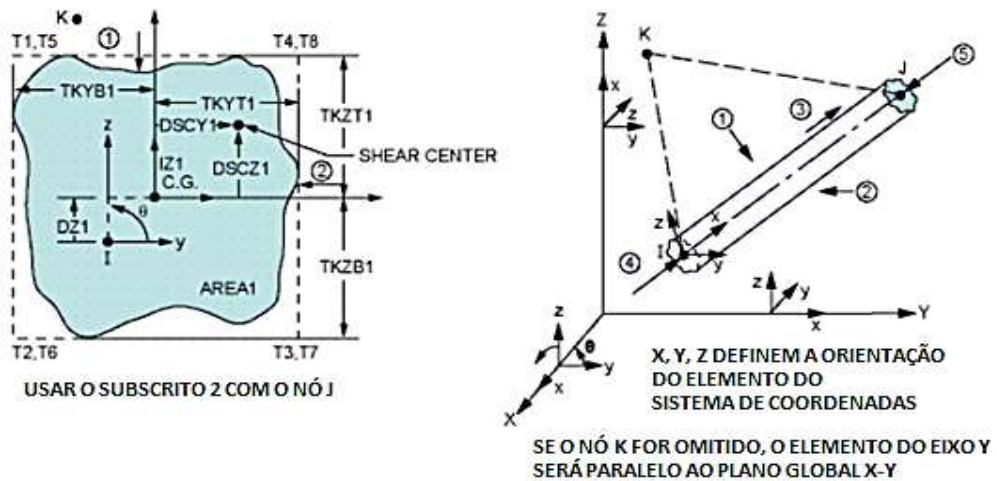


Figura 15 – Elemento BEAM44 (Ansys, 2009).

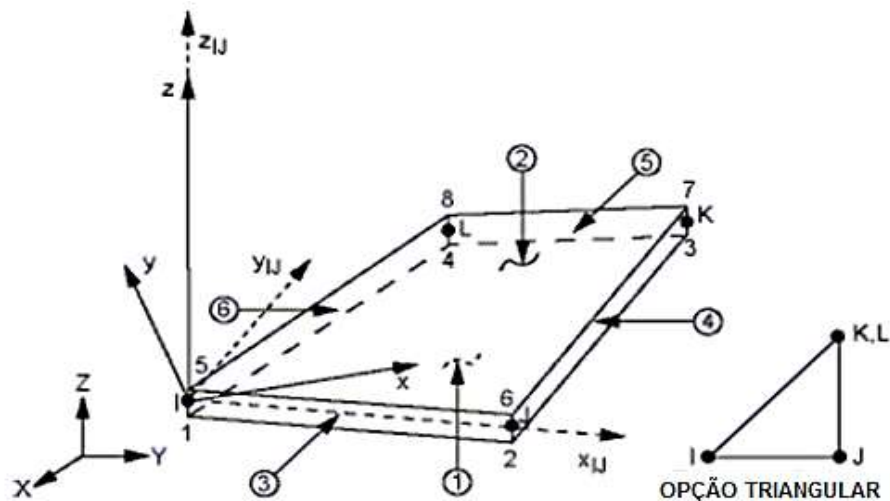


Figura 16 – Elemento SHELL63 (Ansys, 2009).

As Figs. 17, 18 e 19 apresentam o modelo numérico do piso. Visando simular de forma mais realista as condições encontradas na obra no momento dos ensaios experimentais, foi modelada uma alvenaria de 1,5 metros de altura em torno de todo o pavimento, das caixas de escada e das caixas de elevadores, que pode ser vista nas Figs. 13 e 14. Trata-se de uma alvenaria estrutural, construída com bloco cerâmico estrutural de 14x19x29 cm e preenchida com graute e barras de aço, além de cintamento de concreto.

As alvenarias foram simuladas através do elemento SHELL63, descrito anteriormente. Adotou-se um módulo de elasticidade longitudinal ( $E_a$ ) de 20 GPa, coeficiente de Poisson ( $\nu_a$ )

igual a 0,15 e peso específico ( $\gamma_a$ ) de 1250,00 kgf/m<sup>3</sup>, conforme critérios estabelecidos pela norma ABNT NBR 15812-1: 2010 - Alvenaria Estrutural – Blocos cerâmicos Parte 1, quando da ausência de ensaios ou informações precisas acerca das características do bloco.

Desta forma, o modelo resultou em 8089 nós, 1788 elementos de viga, 7550 elementos de casca e 48294 graus de liberdade. Ressalta-se que as vigas, colunas e as lajes possuem discretização de 0,50 metros.

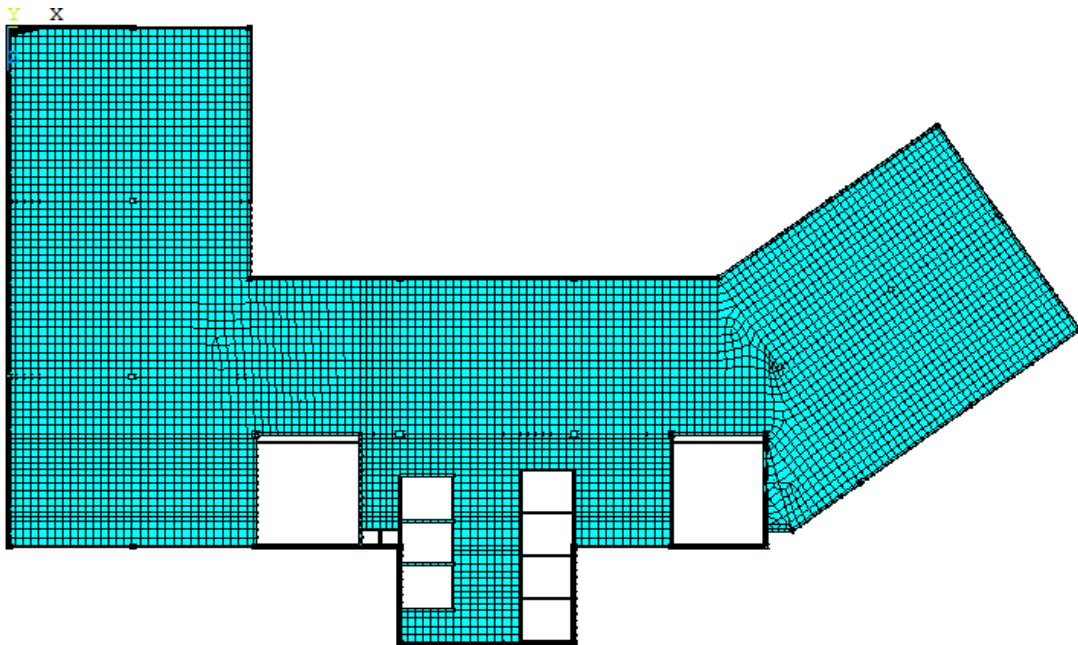


Figura 17 – Vista superior do modelo em elementos finitos do piso misto.

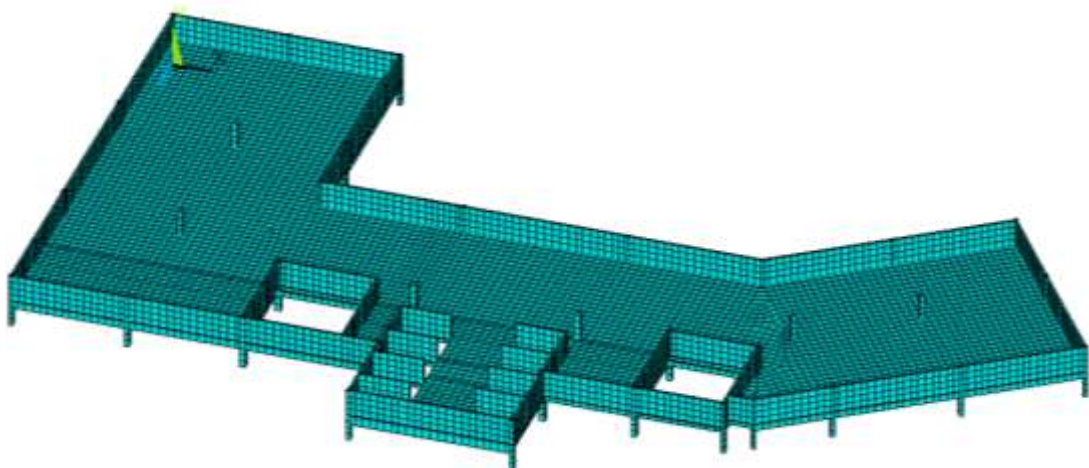


Figura 18 – Vista isométrica do modelo em elementos finitos do piso misto.

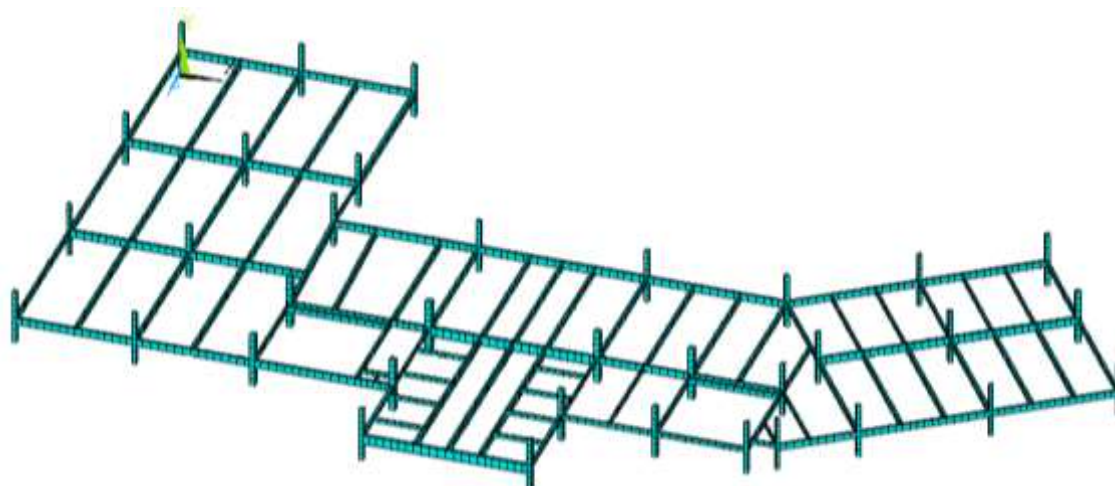


Figura 19 – Vigamento do modelo em elementos finitos do piso misto.

## 4.2 Hipóteses simplificadoras

Foram adotadas algumas hipóteses simplificadoras visando a implementação computacional de um modelo matemático, mediante o emprego de elementos finitos, que representasse mais realisticamente o efeito da interação aço-concreto e das ligações viga-viga. Assim, a interação completa entre as lajes de concreto e as vigas de aço foi considerada no estudo através do acoplamento dos nós dos elementos de casca e de viga tridimensionais, simulando o comportamento de um sistema estrutural misto.

Considerou-se que os materiais aço e concreto possuem comportamento linear, elástico e isotrópico, e todas as seções do modelo estrutural permanecem planas no estado deformado. As condições de contorno consideradas restringem os nós da base e do topo dos pilares que estão meio pé direito acima e abaixo do pavimento analisado, de modo que os mesmos estejam impedidos de se deslocarem translacionalmente, no plano horizontal e na vertical. Os nós de ligação das vigas secundárias com as vigas principais foram modelados como nós rígidos.

# 5

## METODOLOGIA EXPERIMENTAL

### 5.1 Projeto de monitoramento

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 (Fig. 20) 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.

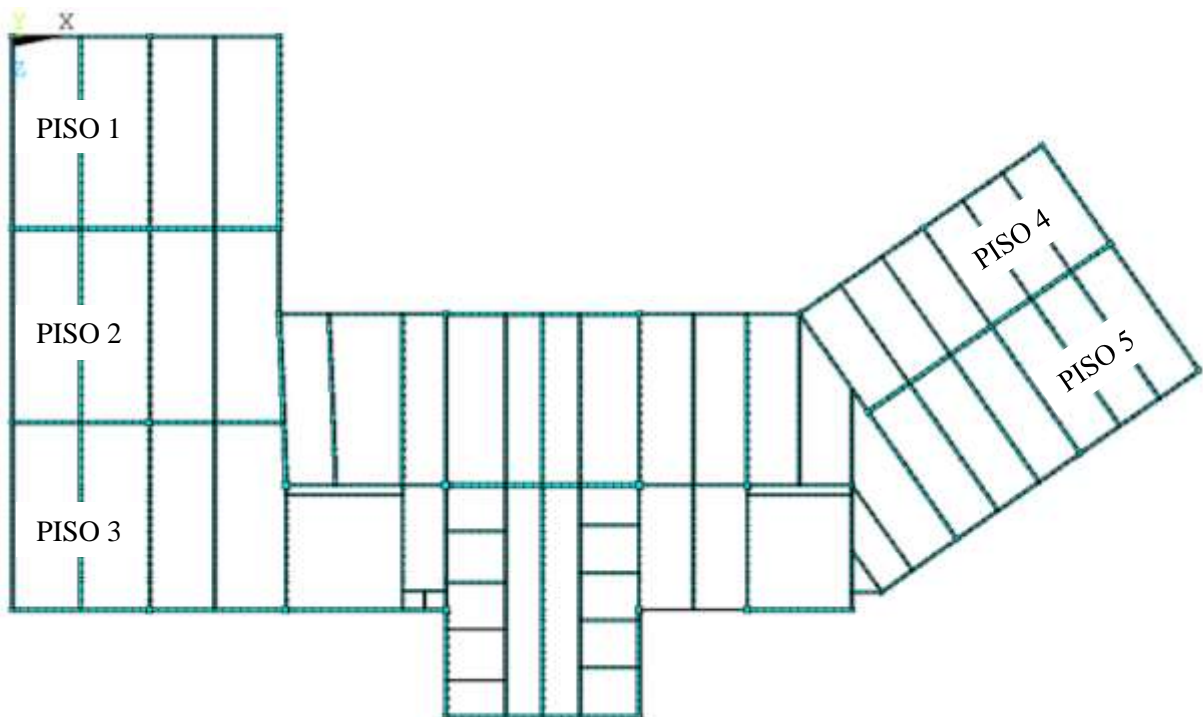


Figura 20 – Pisos escolhidos para análise experimental dos parâmetros modais.



Figura 21 – Identificação dos pisos 1, 2 e 3.



Figura 22 – Identificação dos pisos 4 e 5.

Nos ensaios foram determinados cinco pontos de interesse por piso, identificados nas Figs. 23, 24 e 25 pelos Canais (C) 1 a 5, referente aos cinco acelerômetros. 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 apresentados no capítulo 6. Os sensores foram instalados de forma a captar os modos fundamentais de vibração, em especial os três primeiros modos.

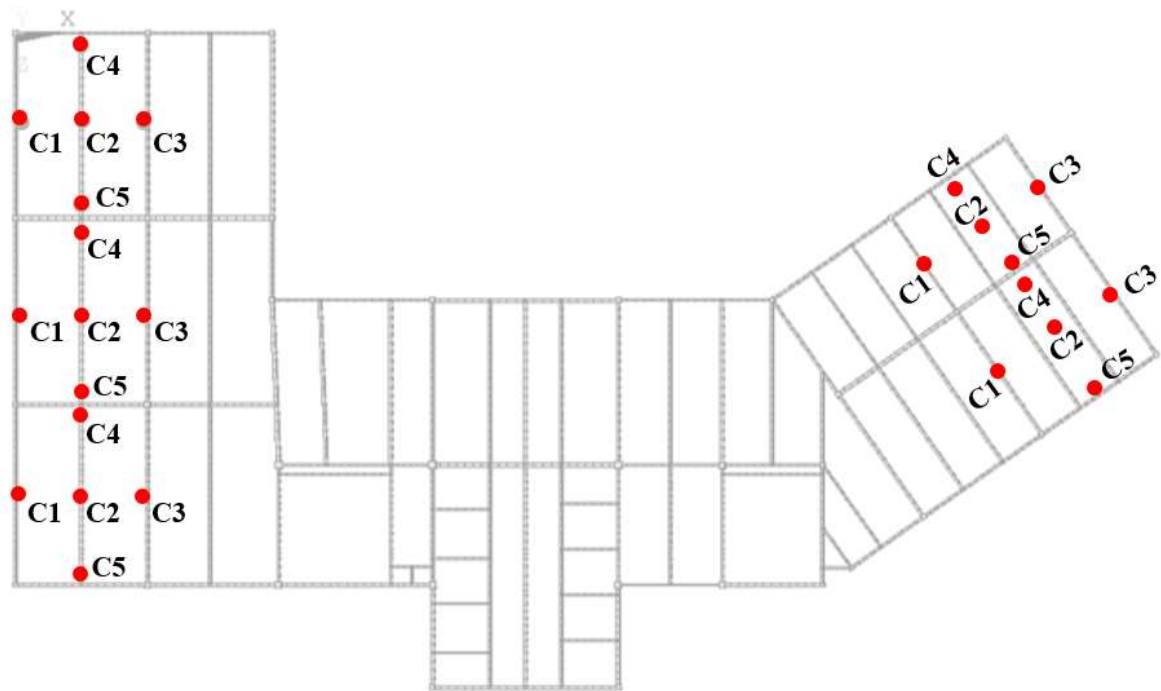


Figura 23 – Pontos de instrumentação nos cinco pisos ensaiados

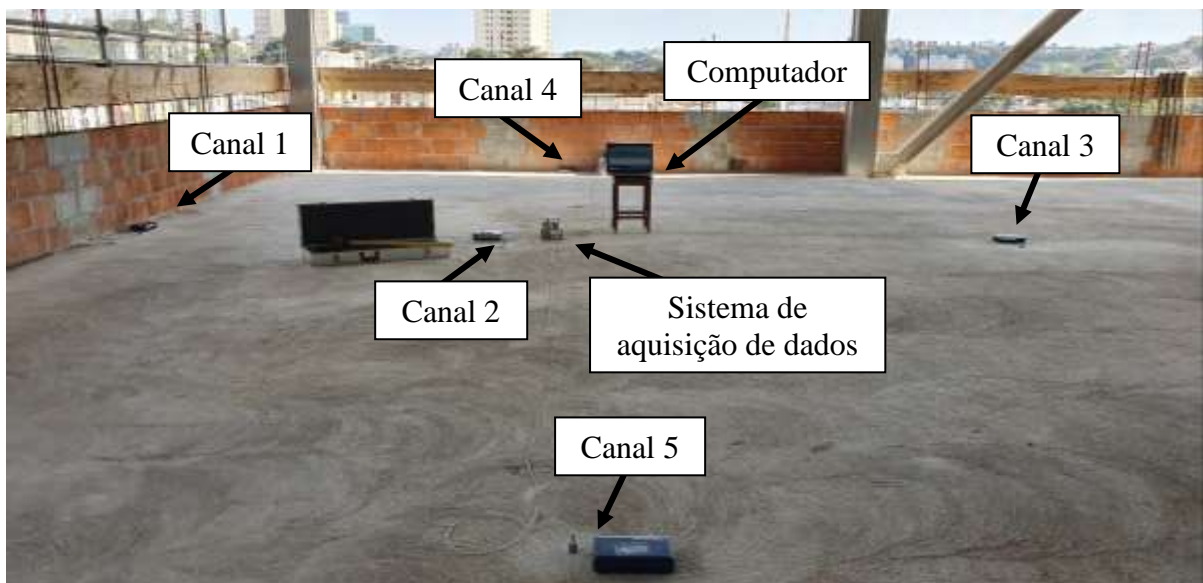


Figura 24 –Esquema de montagem dos ensaios típicos para os pisos 1 a 3.

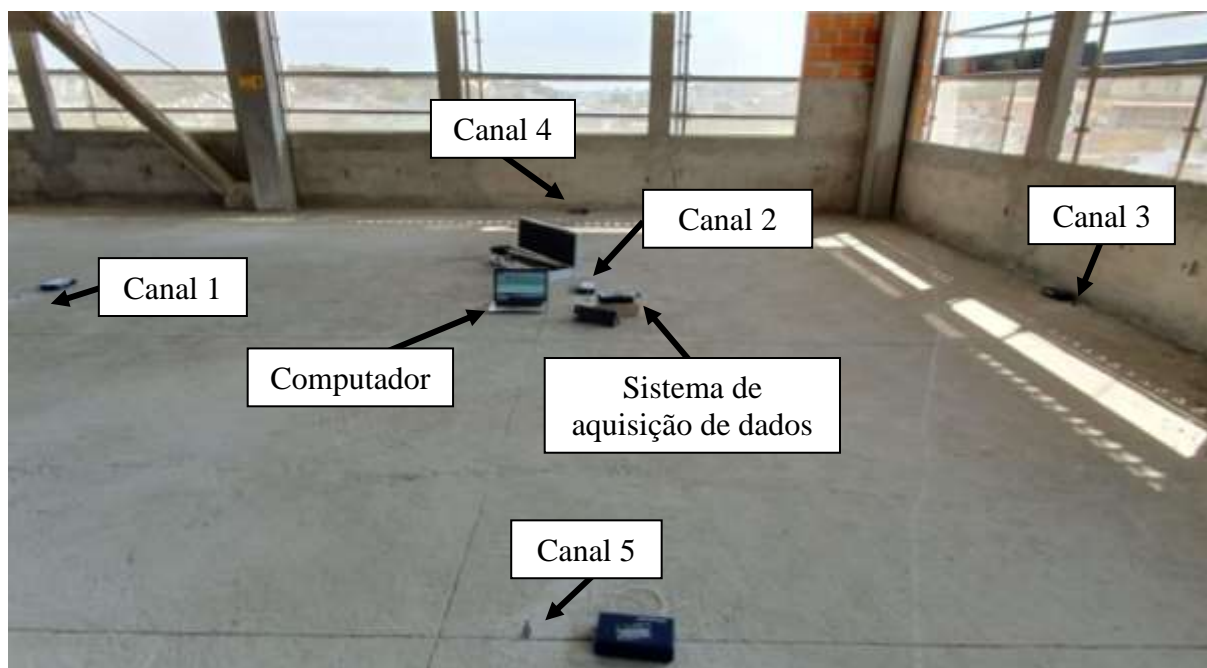


Figura 25 – Esquema de montagem dos ensaios típicos para os pisos 5 e 6.

## 5.2 Especificação e instalação dos equipamentos

### 5.2.1 Especificação dos equipamentos

Para o desenvolvimento deste trabalho de pesquisa foram utilizados os equipamentos do Laboratório de Análise Dinâmica e Acústica Estrutural da UFMG (LADAE). Para a realização do monitoramento experimental dinâmico foram utilizados 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  $\pm 5$  g e sensibilidade de 1000 mV/g, ilustrado na Fig. 26.



Figura 26 – Acelerômetro PCB Piezotronics. Fonte: PCB Piezotronics (2017).

Os acelerômetros foram conectados a um sistema de aquisição de dados, responsável por coletar e armazenar as respostas das acelerações obtidas nos ensaios experimentais. Neste trabalho foi utilizado um sistema de aquisição da marca Bruel Kjaer, modelo 3050-A-060, com seis canais de entrada, apresentado na Fig. 27. 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.



Figura 27 – Sistema de aquisição de dados Bruel e Kjaer.

### 5.2.2 Fixação dos acelerômetros

O sistema de montagem dos acelerômetros exerce influência na resposta em frequência, uma vez que o mesmo não constitui parte integrante do dispositivo cuja aceleração se pretende medir. Segundo a norma ISO 5349-2 (2001), o método de montagem deve proporcionar uma resposta em frequência linear ao longo da gama de frequências a medir, ou seja, não deve atenuar ou amplificar e não deve gerar quaisquer ressonâncias nesta gama de frequências.

A fixação do acelerômetro gera um sistema com um grau de liberdade ao qual está associada uma frequência natural, também conhecida como frequência de ressonância da montagem. Busca-se, então, que a montagem seja de forma a garantir que se trabalhe na zona rígida desta função, assegurando assim que o valor medido pelo sensor seja igual ao valor em que o corpo onde está montado está sujeito.

Os acelerômetros podem ser fixados à estrutura de diferentes maneiras, cada uma delas apresentando vantagens e limitações. A Fig. 28, adaptada do manual da PCB Piezotronics

(2017), ilustra seis tipos de fixação e a alteração que cada uma delas exerce na resposta do acelerômetro.

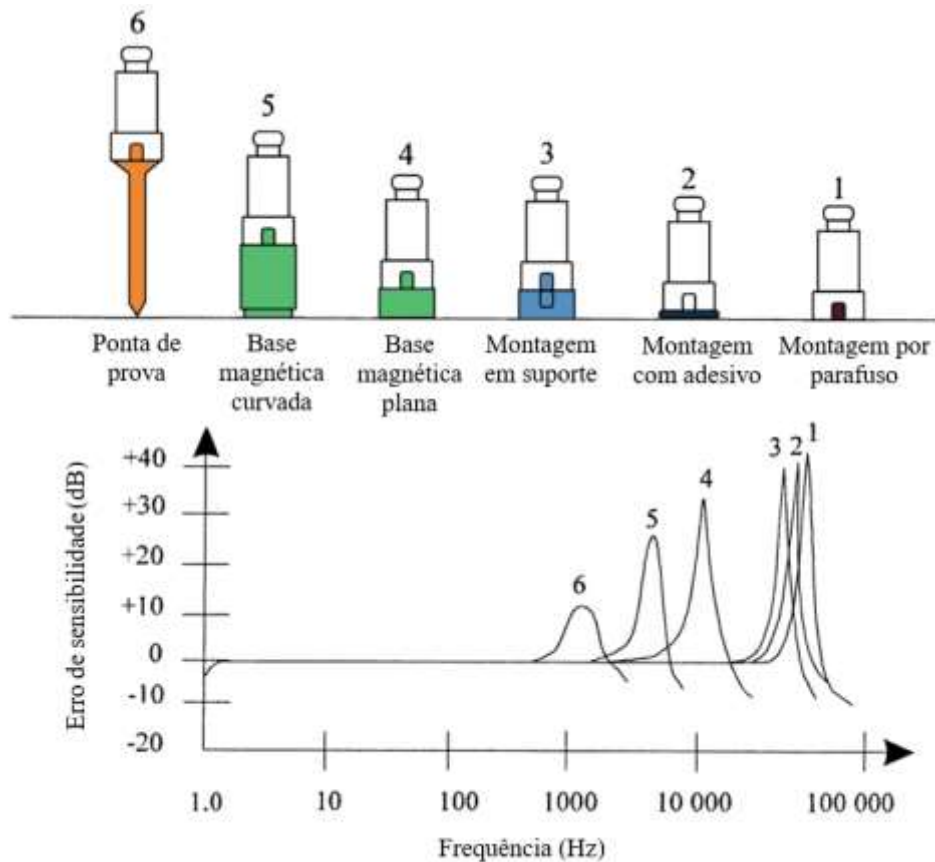


Figura 28 – Resposta em frequência de diferentes tipos de montagem de acelerômetros. Fonte: Adaptado de PCB Piezotronics (2017).

Nota-se que, para medições de baixas frequências, os seis tipos de montagem especificados pelo fabricante dos acelerômetros utilizados neste trabalho mostram-se adequados. Desta forma, visando uma otimização no processo de remoção do sensor e sua realocação nos outros pontos de medida, optou-se por fixá-los através do procedimento de colagem por adesivo, tipo 2 da Fig. 28. O manual da PCB Piezotronics (2017) especifica que cola quente ou cera são adesivos mais adequados para instalações temporárias, enquanto que epóxis e colas de ligação rápida (*Superbond*) fornecem uma instalação mais permanente. Dessa forma, optou-se por utilizar a cera para fixação dos acelerômetros.

Neste tipo de montagem, a primeira etapa consiste no preparo da superfície que receberá o acelerômetro que, segundo o manual da PCB Piezotronics (2017), 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 Fig. 29 ilustra o esquema de montagem executado.



a) Regularização da base



b) Limpeza da superfície



c) Aplicação da cera no sensor



d) Colagem do acelerômetro

Figura 29 – Fluxograma de fixação dos acelerômetros.

### 5.3 Análise modal experimental

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 m, utilizando botas com solado macio, pulando em seus respectivos centros a uma altura de 0,48 m. Cada piso foi excitado por três impactos, com intervalos de tempo suficientes entre cada um para amortecer as vibrações nos modos dominantes. Cada procedimento de ensaio foi repetido três

vezes em cada piso, totalizando quinze ensaios em todo o pavimento. A Fig. 30 ilustra a execução do salto.



a) 1ª Etapa: pessoa inicialmente parada.



b) 2ª Etapa: início do salto.



c) 3ª Etapa: Impacto da pessoa no piso.

Figura 30 – Fluxograma das etapas de realização do ensaio de vibração livre.

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 Fig. 23.

## 5.4 Análise dinâmica experimental

A sincronização da frequência de passo de mais de uma pessoa em ensaios dinâmicos é uma tarefa complexa e de difícil controle, sendo tal fato um fator importante para a resposta dinâmica da estrutura. Por esse motivo e devido ao fato do pavimento em estudo ser uma estrutura complexa, optou-se por realizar todos os ensaios com apenas uma pessoa excitando os pisos de interesse, de forma a se obter resultados mais controlados. Assim, as respostas dinâmicas dos pavimentos foram obtidas quando da excitação do caminhar de uma pessoa sobre a estrutura, com frequências de passo controladas em direções previamente definidas ou aleatórios. O objetivo desses ensaios foi simular o caminhar de usuários sobre a estrutura estudada, visando obter respostas de aceleração para 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.

Foi utilizado um metrônomo para controlar a frequência do passo e manter o ritmo do caminhar humano sobre a estrutura. A unidade representativa do metrônomo é o “bpm” (batidas por minuto). Assim, 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. Nota-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 ( $f_{p(3^{\text{ª}}h)} = 3 \times 2,0 \text{ Hz} = 6,0 \text{ Hz}$ ).

Cada uma dessas frequências de passo foi executada em ensaios nas seguintes direções: paralela, perpendicular, diagonal e de maneira aleatória, como ocorre normalmente durante a utilização da estrutura. Cada uma dessas trajetórias foi executada três vezes em cada piso, sendo uma execução completa caracterizada por três idas e voltas. A Tab. 6 resume os ensaios realizados, sendo executados 36 ensaios por piso e 180 ensaios no pavimento. As Figs. 31, 32, 33 e 34 ilustram um exemplo de cada uma das trajetórias descritas na Tab. 6 realizadas nos pisos em estudo.

Tabela 6 – Total de ensaios realizados por piso

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



Figura 31 - Ilustração da caminhada em trajetória perpendicular.



Figura 32 - Ilustração da caminhada em trajetória paralela.



Figura 33 - Ilustração da caminhada em trajetória diagonal.



Figura 34 - Ilustração da caminhada em trajetória aleatória.

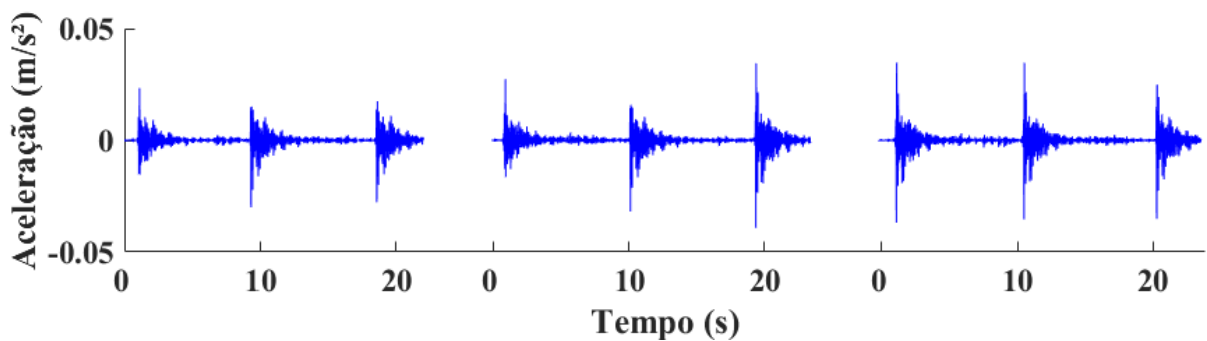
## 5.5 Processamento e tratamento dos dados

Os ensaios de vibração livre de estruturas complexas apresentam nas repostas de aceleração no domínio do tempo não só resultados das excitações induzidas, como também ruídos provenientes de interferências externas, que provocam vibrações em frequências superiores às frequências naturais do sistema estrutural. Outro fato a se observar é que, conforme apresentado no item 2.4 deste trabalho, o amortecimento modal se altera de acordo com a frequência analisada, e com isso, torna-se de extrema importância eliminar do sinal as acelerações provocadas por agentes externos.

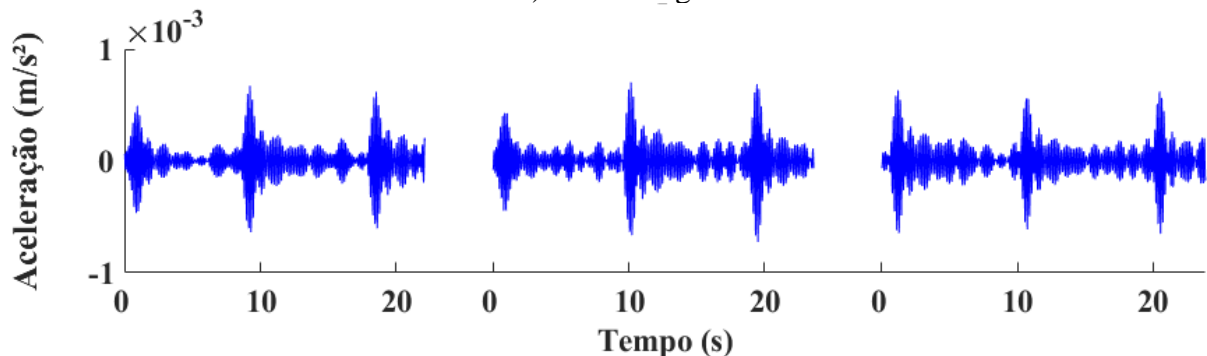
Desta forma, resultados obtidos nos ensaios experimentais *in loco* de vibração livre e forçada foram processados e tratados com auxílio do programa MatLab, onde foram aplicados filtros de sinais recomendados pelas normas ISO 2631-1 (1997) e ISO 2631-2 (2003).

### 5.5.1 Determinação da taxa de amortecimento modal

Para determinação da taxa de amortecimento modal foram filtradas as frequências referentes ao primeiro, segundo e terceiro modos de vibração dos pisos. Para isso foi implementado um filtro passa banda no MatLab onde foram definidos os limites superiores ( $f_1$ ) e inferiores ( $f_2$ ) de forma que o sinal resultante fosse correspondente à aceleração da estrutura apenas na frequência do modo desejado. A Fig. 35 apresenta um exemplo de um sinal de resposta no domínio do tempo sem filtro e com filtro.



a) Sinal original.



b) Sinal filtrado em torno do modo de interesse.

Figura 35 – Resposta de aceleração no domínio do tempo para ensaio de vibração livre.

A partir disso, o amortecimento modal foi determinado através da média dos decrementos logarítmicos obtidos para os nove ensaios de impactos realizados em cada piso (três ensaios com três impactos em cada). Foram calculados também o desvio padrão e o coeficiente de variação (CV). 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 (2009), apresentadas na Tab. 7. Conforme Varela (2004) e Brito et. al (2010),

resultados obtidos para taxa de amortecimento modal com CV de 10 a 20% podem ser considerados como de boa precisão.

Tabela 7 – Classificação do índice de confiabilidade de experimentos com base no CV. Fonte: Adaptado de Gomes, 2009.

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

### 5.5.2 Determinação da aceleração de pico e *RMS*

Um exemplo genérico de uma resposta de aceleração no domínio do tempo é apresentado na Fig. 36. Este resultado foi tratado mediante o emprego de filtros passa banda, conforme recomendações da ISO 2631-1 (2003), para uma melhor apresentação do sinal no tempo, eliminando “ruídos” e possíveis interferências externas. Após a aplicação desse filtro, foram determinadas as acelerações de pico e em termos de *RMS*.

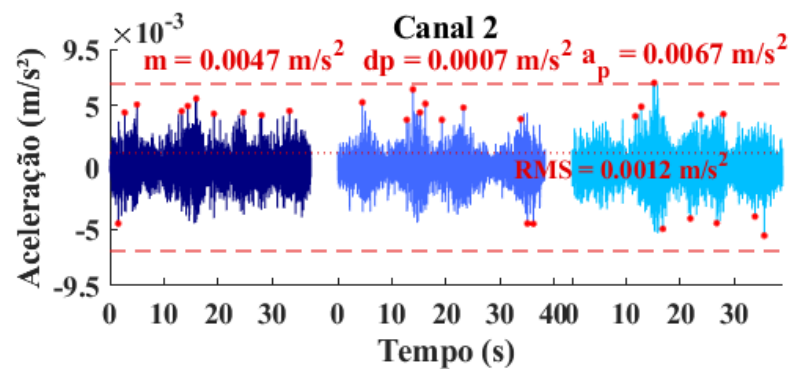


Figura 36 – Exemplo de um sinal de aceleração no domínio do tempo

Foram realizados três ensaios para cada direção e frequência de passo, conforme explicado no item 5.3. Os tons de azul apresentados na Fig. 36 representam cada um dos três ensaios executados a uma mesma frequência de passo, em uma determinada trajetória, com duração de aproximadamente 30 segundos cada. A máxima aceleração de pico que poderia ocorrer em cada piso, para cada direção e frequência de passo, foi determinada a partir de uma análise probabilística, considerando um nível de confiança igual a 99,7% ( $3\sigma$ ).

Para o cálculo da aceleração de pico média foram utilizados os dez maiores valores obtidos em cada ensaio (em módulo), totalizando trinta valores, identificados na Fig. 36 pelos pontos vermelhos, seguido pelo cálculo do desvio padrão. O resultado encontrado para média e desvio padrão são apresentados nos gráficos acima da linha tracejada vermelha. As linhas tracejadas vermelhas na Fig. 36 indicam o intervalo de confiança de  $3\sigma$ , representando desta forma que em 99,7% dos casos a aceleração de pico máxima ocorreria dentro desta faixa. Essas metodologias foram adotadas nas análises e tratamento dos 180 resultados obtidos através dos ensaios experimentais *in loco*.

As acelerações *RMS* foram calculadas conforme equação 2.5. As acelerações de pico probabilísticas e em termos de *RMS* para cada caso de estudo são apresentadas no item 6.2 e são comparadas com valores limites de conforto humano propostos por normas e guias de projeto no item 6.3.

# 6

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.1 Vibração livre

#### 6.1.1 Determinação das frequências naturais e taxas de amortecimento

Os parâmetros modais da estrutura – frequências naturais, modos de vibração e taxa de amortecimento modal – foram determinados através do processamento dos sinais de aceleração vertical nos cinco pontos monitorados (Fig. 23) nos ensaios experimentais de vibração livre, executado de forma que a estrutura fosse excitada através do impacto de uma pessoa com massa de 102,6 kg pulando no centro dos pisos a uma altura de 0,48 metros.

Conforme descrito no item 5.4, foram realizados três baterias de ensaios de vibração livre por piso, com três impactos em cada ensaio, totalizando nove excitações por piso. As nove respostas foram agrupadas e são apresentadas no domínio do tempo nas Figs. 37, 38, 39, 40 e 41 para os pisos 1 a 5, respectivamente. Observa-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.

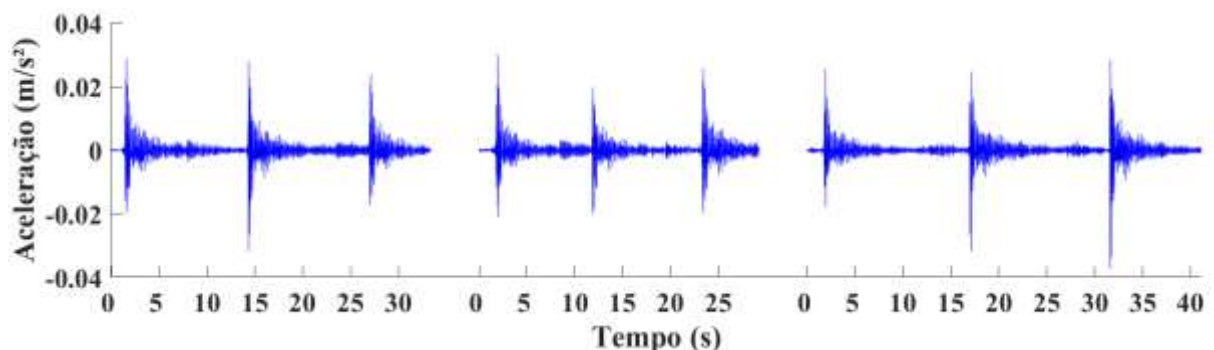


Figura 37 – Aceleração x tempo registrada pelo canal 2, localizado no centro da laje – Piso 1.

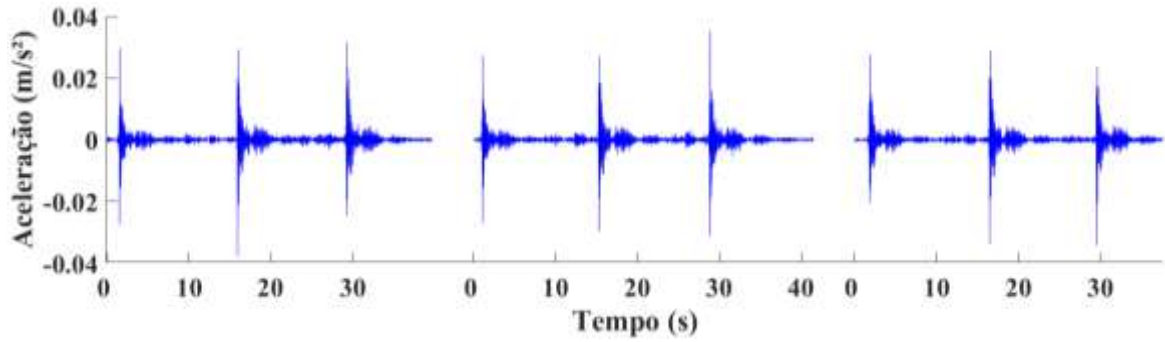


Figura 38 – Aceleração x tempo registrada pelo canal 2, localizado no centro da laje – Piso 2.

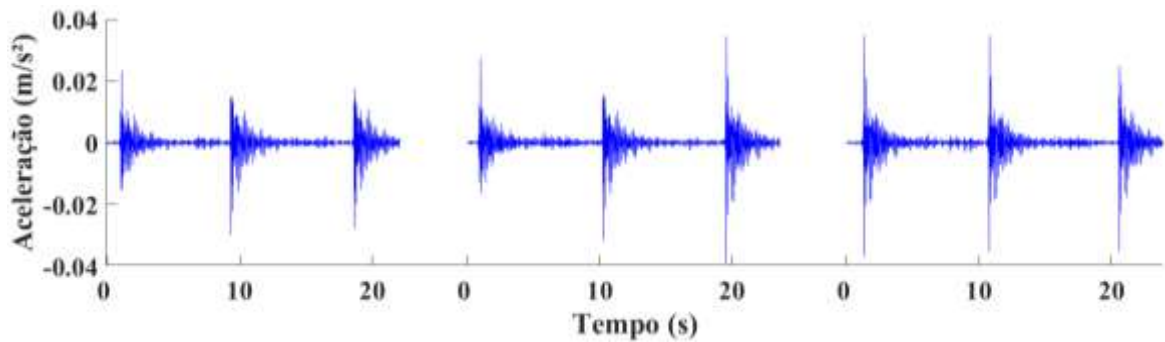


Figura 39 – Aceleração x tempo registrada pelo canal 2, localizado no centro da laje – Piso 3.

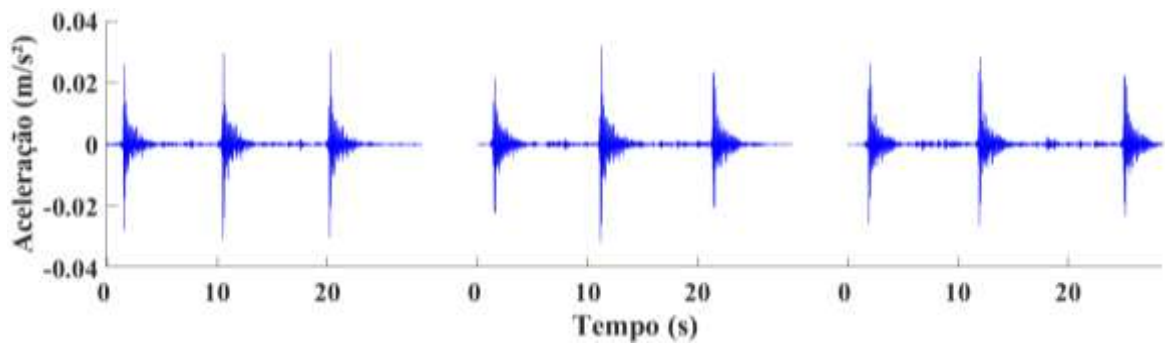


Figura 40 – Aceleração x tempo registrada pelo canal 2, localizado no centro da laje – Piso 4.

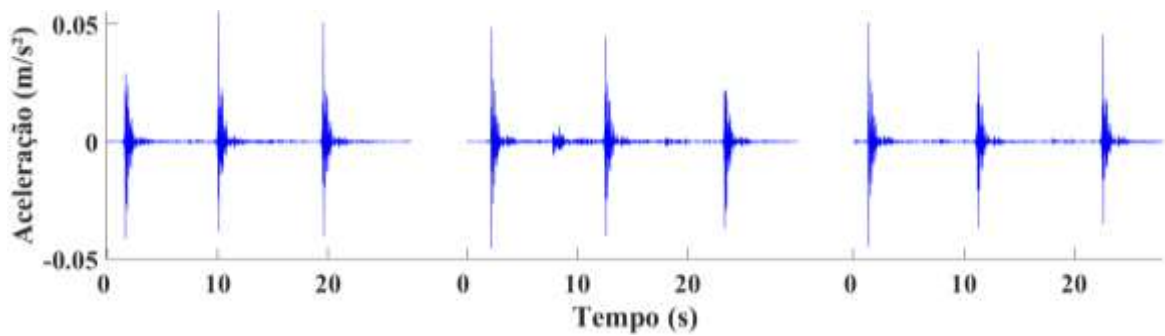


Figura 41 – Aceleração x tempo registrada pelo canal 2, localizado no centro da laje – Piso 5.

As Figs. 42, 43, 44, 45 e 46 apresentam 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. É importante ressaltar que uma vez que a força de impacto do pulso 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.

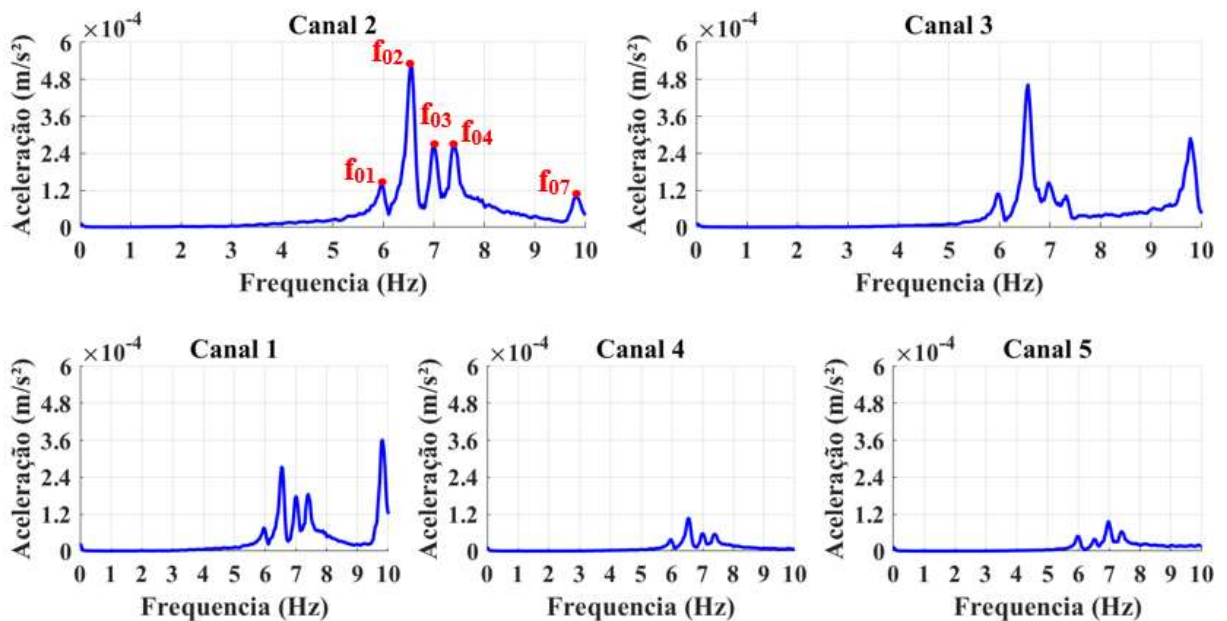


Figura 42 – Espectros de frequências naturais da estrutura obtidos via medição experimental para impactos no centro do piso 1 ( $f_{01} = 5,9$  Hz;  $f_{02} = 6,5$  Hz;  $f_{03} = 6,9$  Hz;  $f_{04} = 7,3$  Hz;  $f_{07} = 9,7$  Hz)

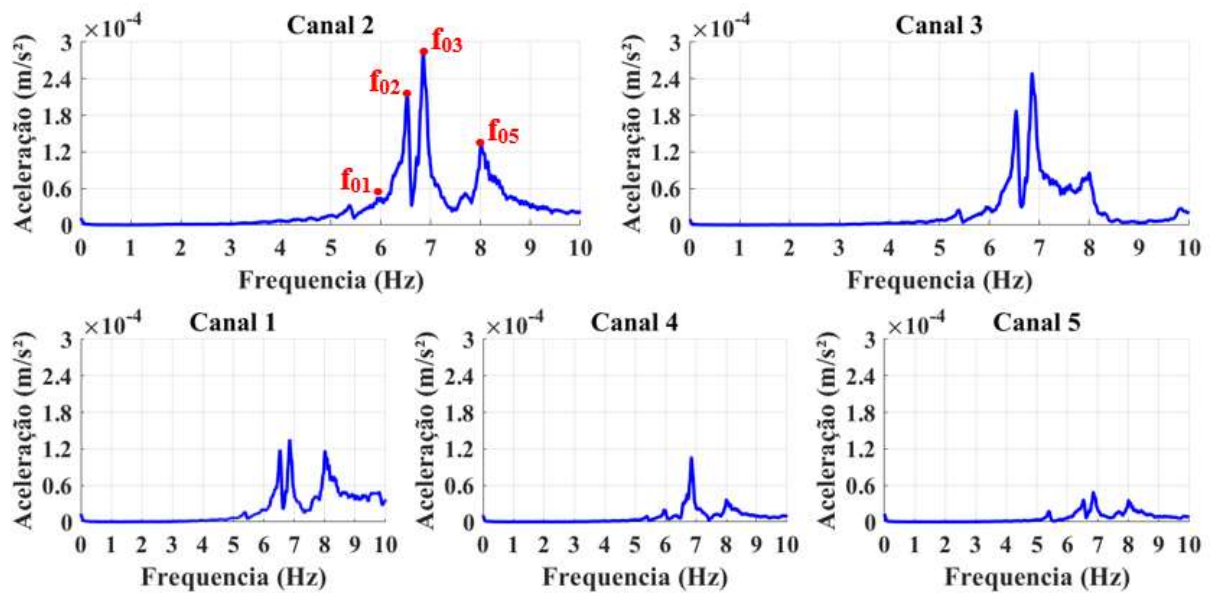


Figura 43 – Espectros de frequências naturais da estrutura obtidos via medição experimental para impactos no centro do piso 2 ( $f_{01} = 5,9$  Hz;  $f_{02} = 6,5$  Hz;  $f_{03} = 6,9$  Hz;  $f_{05} = 8,0$  Hz)

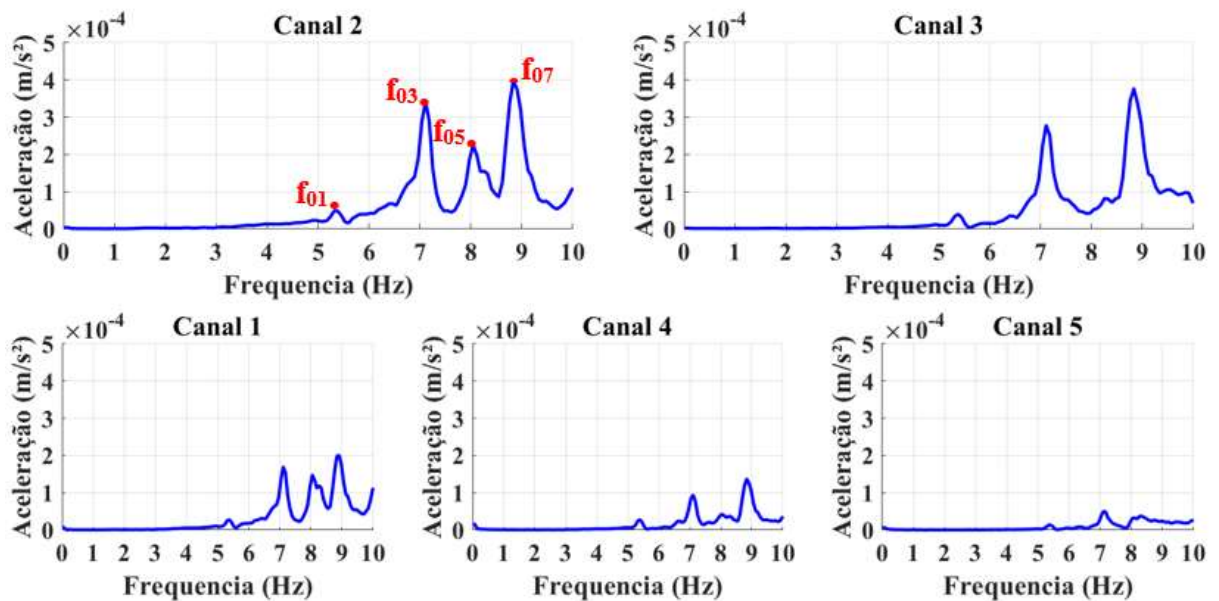


Figura 44 – Espectros de frequências naturais da estrutura obtidos via medição experimental para impactos no centro do piso 3 ( $f_{01} = 5,3$  Hz;  $f_{03} = 7,1$  Hz;  $f_{05} = 8,0$  Hz;  $f_{07} = 8,8$  Hz)

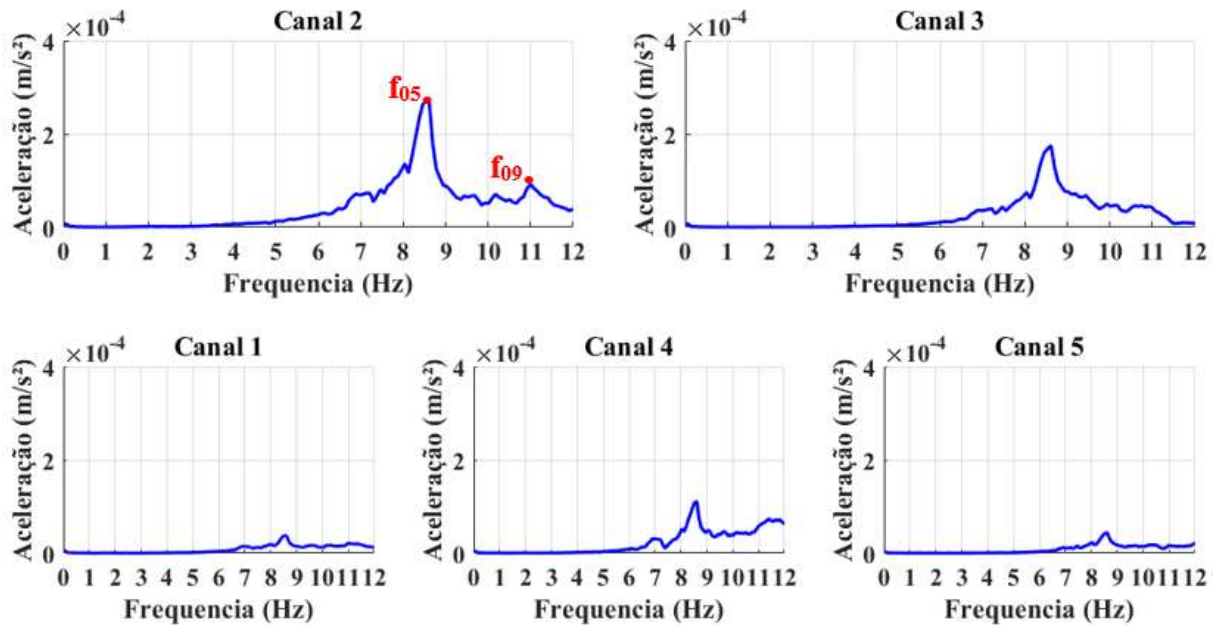


Figura 45 – Espectros de frequências naturais da estrutura obtidos via medição experimental para impactos no centro do piso 4 ( $f_{06} = 8,5$  Hz;  $f_{09} = 11,0$  Hz)

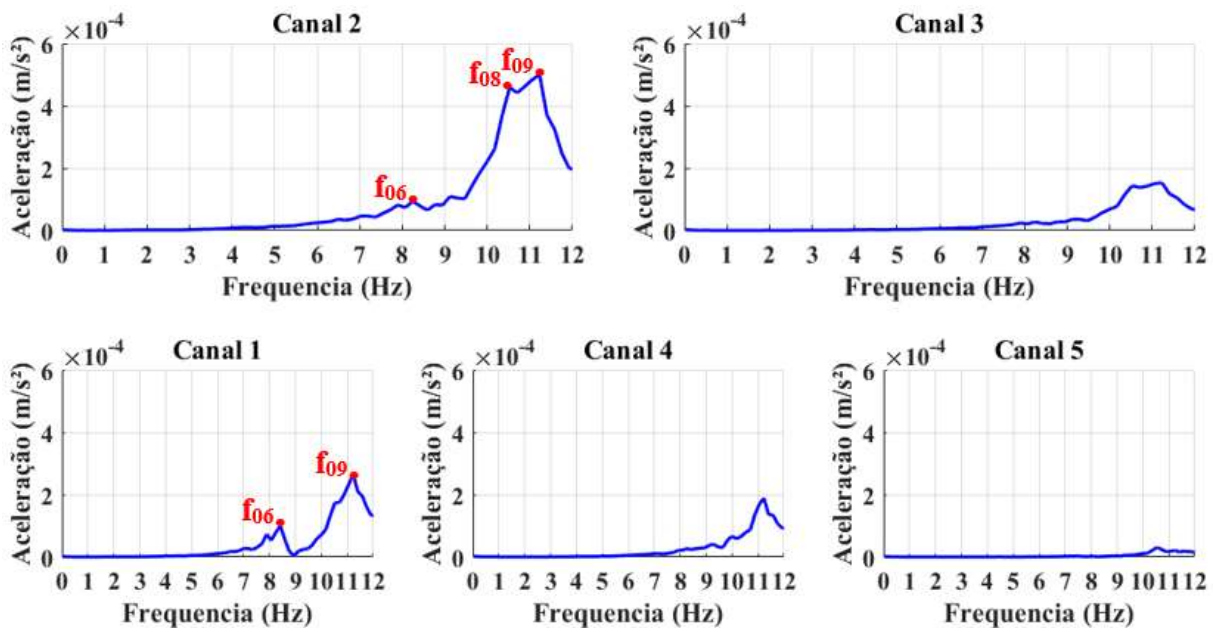


Figura 46 – Espectros de frequências naturais da estrutura obtidos via medição experimental para impactos no centro do piso 5 ( $f_{06} = 8,4$  Hz;  $f_{08} = 10,6$  Hz;  $f_{09} = 11,2$  Hz)

Analisando os resultados apresentados nos gráficos das Figs. 42, 43, 44, 45 e 46, verifica-se que as três primeiras frequências naturais correspondentes ao primeiro, segundo e terceiros modos verticais de vibração da estrutura, são respectivamente 5,9 Hz, 6,5 Hz e 6,9 Hz.

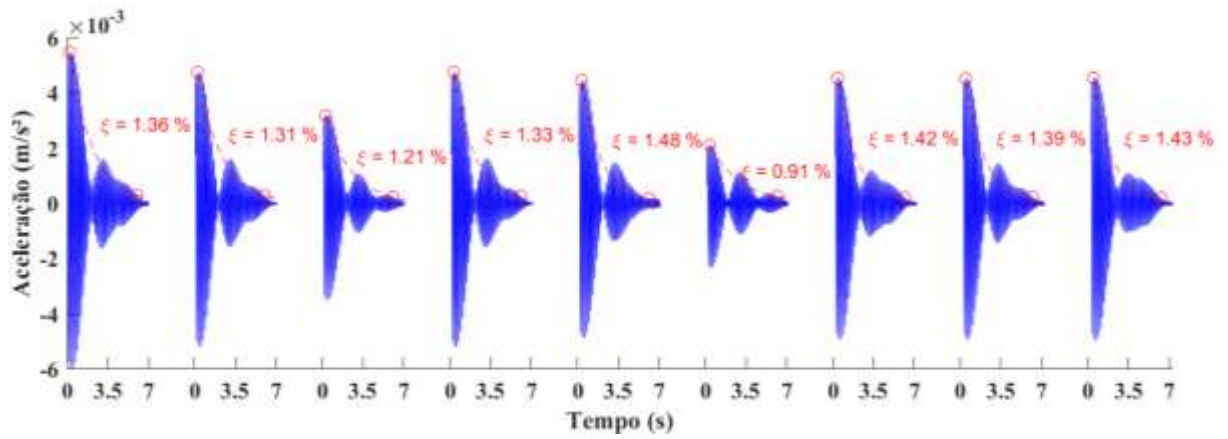
Vale ressaltar que, as três primeiras frequências naturais do pavimento encontram-se dentro da faixa de 5 Hz a 8 Hz, que conforme estudos experimentais relacionados a sensibilidade humana é o intervalo que as pessoas reagem de forma especialmente adversa às vibrações. Além disso, a faixa de frequências fundamentais do caminhar humano apresenta valores entre 1,7 Hz e 2,3 Hz, portanto o terceiro ou quarto harmônicos do caminhar poderiam coincidir ou ficar bastante próximos das três primeiras frequências naturais do piso, levando à amplificação das amplitudes de vibração. Desse modo fica evidente a importância de 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.

Nas Figs. 47, 48 e 49 são apresentadas 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 (apresentados na Tab. 8) a partir do método do decremento logarítmico.

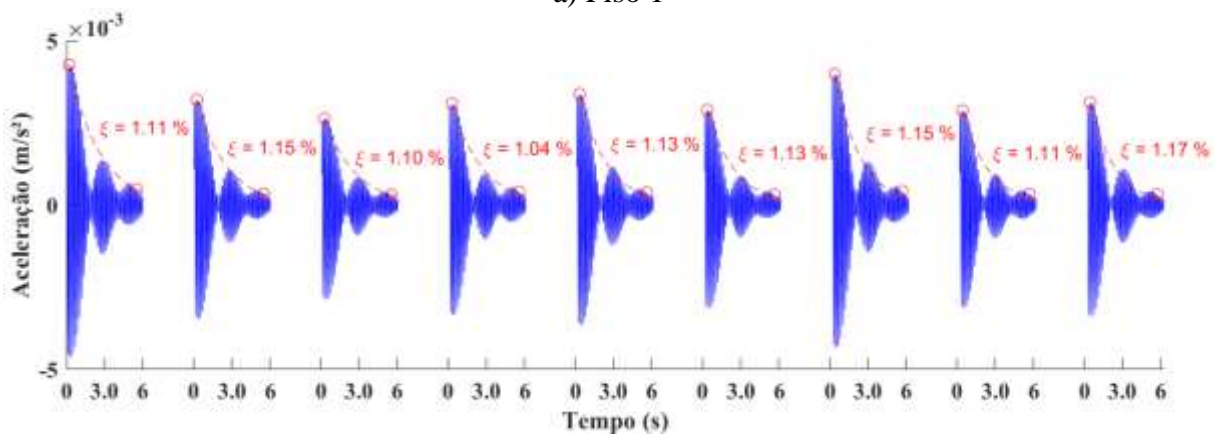
Tabela 8 - Valores de amortecimento modais para os três primeiros modos de vibração do pavimento.

<b>Modo</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio padrão</b>	<b>Coefficiente de Variação (CV)</b>
1°	1,26%	0,13%	10%
2°	1,03%	0,19%	19%
3°	1,19%	0,21%	18%

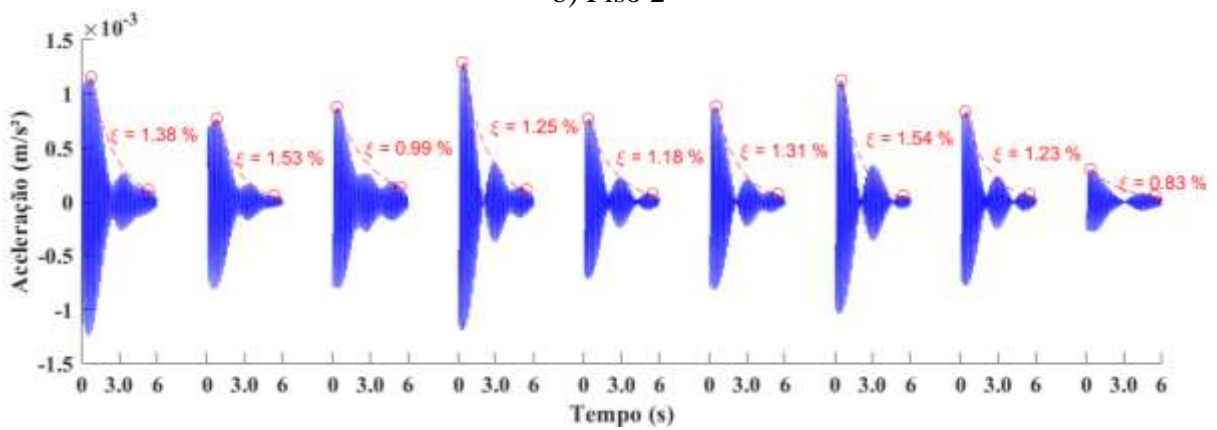
A maioria das normas, guias de projeto e trabalhos relevantes da literatura estimam que a taxa de amortecimento de pisos mistos seja da ordem de 2% a 5% (Murray et al. 2016, Willford e Young 2006, Smith et al. 2009). As taxas de amortecimento estimadas para o pavimento em estudo foi encontrada fora dessa faixa, o que já era esperado e 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, como: janelas, divisórias, móveis, revestimentos, entre outros. Analisando os valores encontrados para o CV, pode-se inferir que as estimativas das taxas de amortecimento modal apresentam boa confiabilidade, apresentando coeficientes de variação situados dentro da faixa de 10% a 20%, conforme indicações da Tab. 7.



a) Piso 1

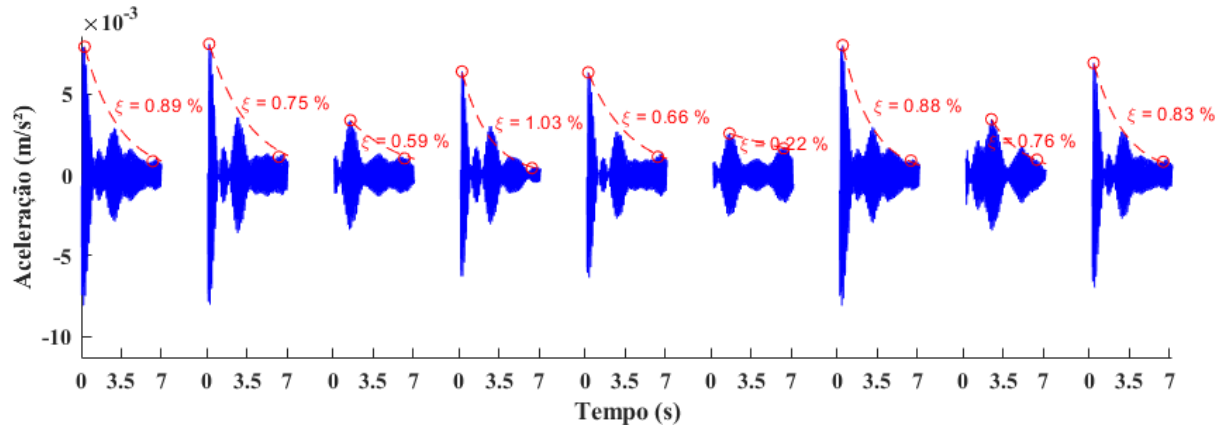


b) Piso 2

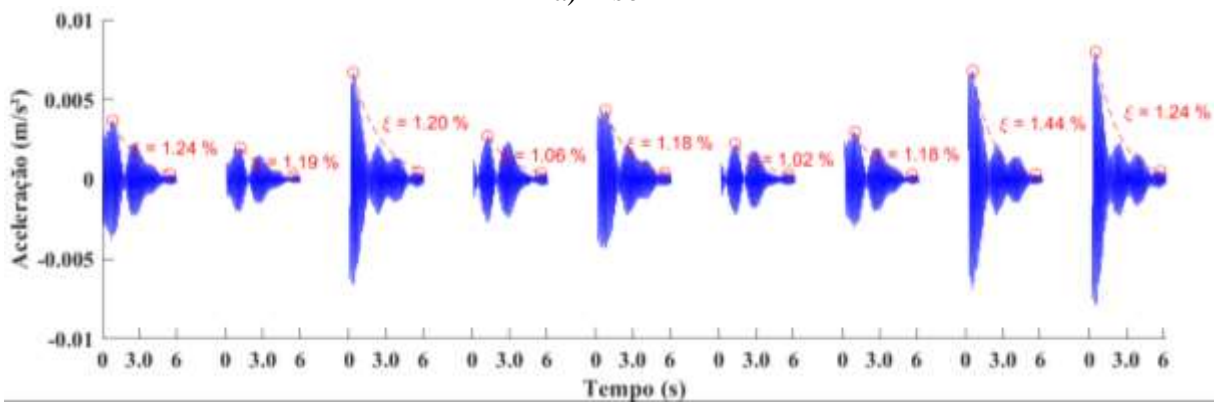


c) Piso 3

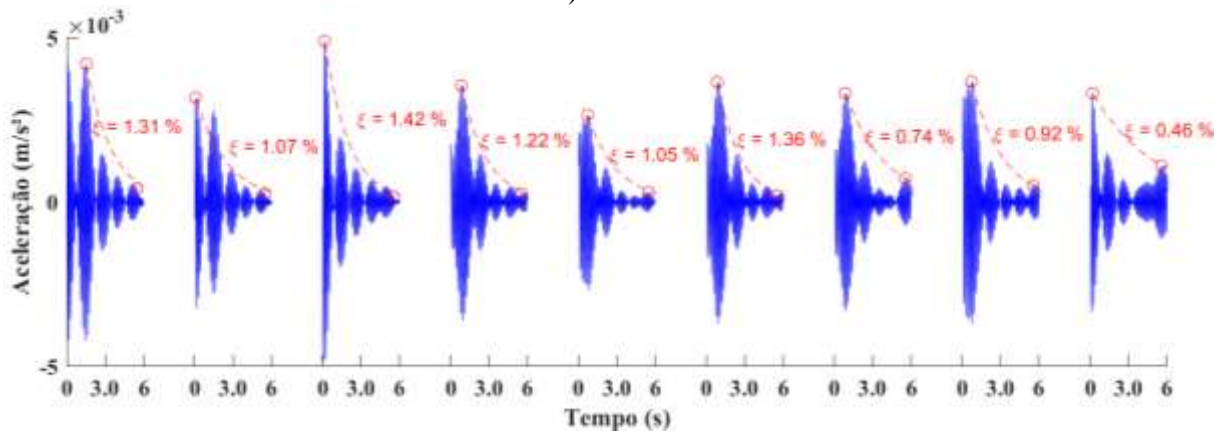
Figura 47 – Amortecimento do primeiro modo de vibração.



a) Piso 1

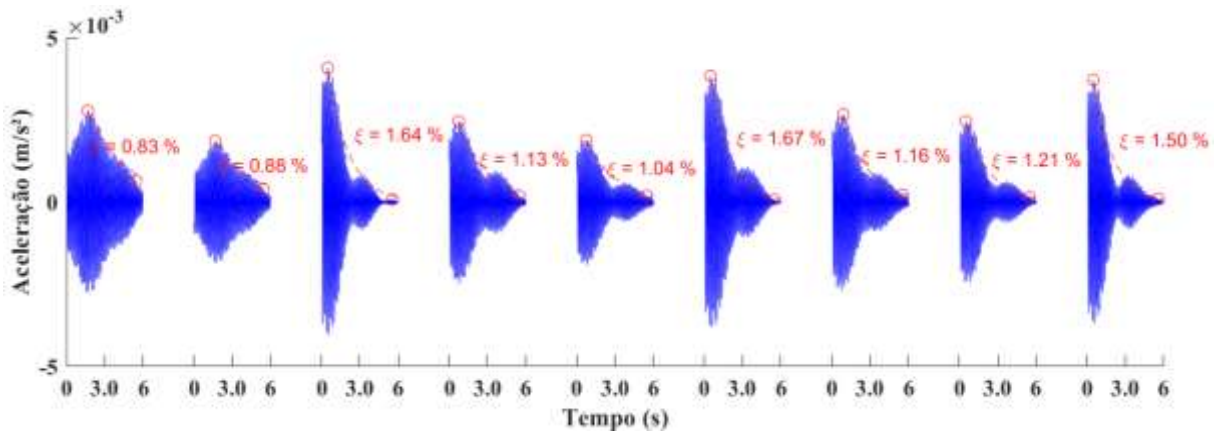


b) Piso 2

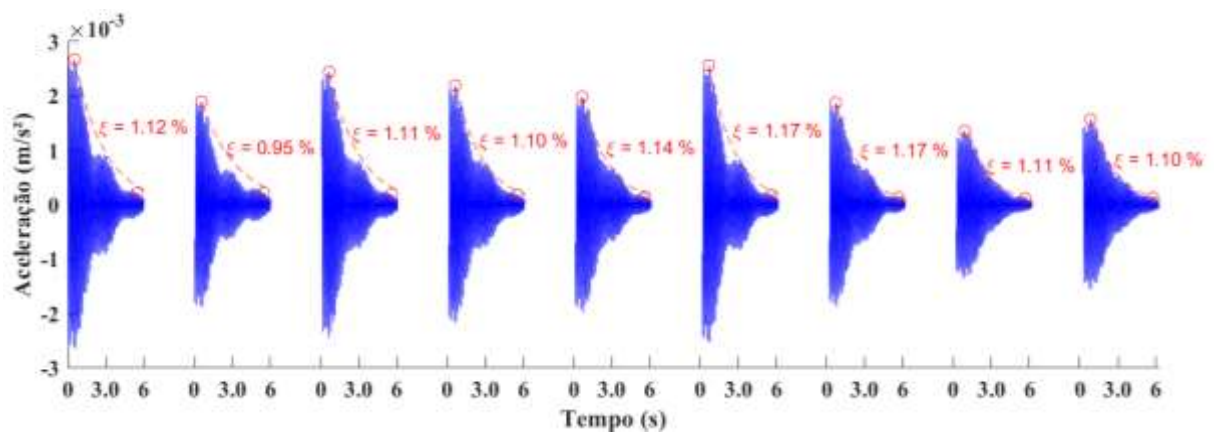


c) Piso 3

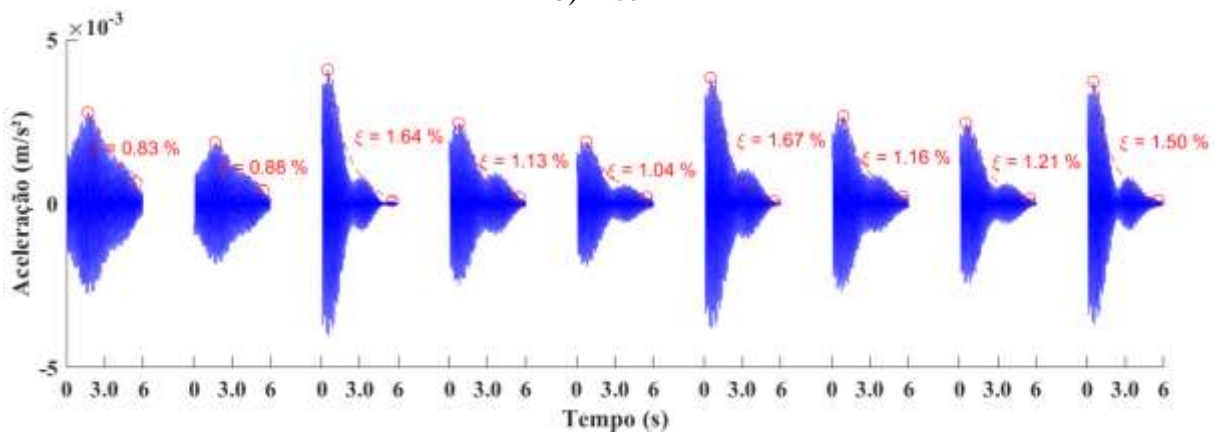
Figura 48 – Amortecimento do segundo modo de vibração



a) Piso 1



b) Piso 2



c) Piso 3

Figura 49 – Amortecimento do terceiro modo de vibração

### 6.1.2 Comparação dos resultados experimentais com numéricos

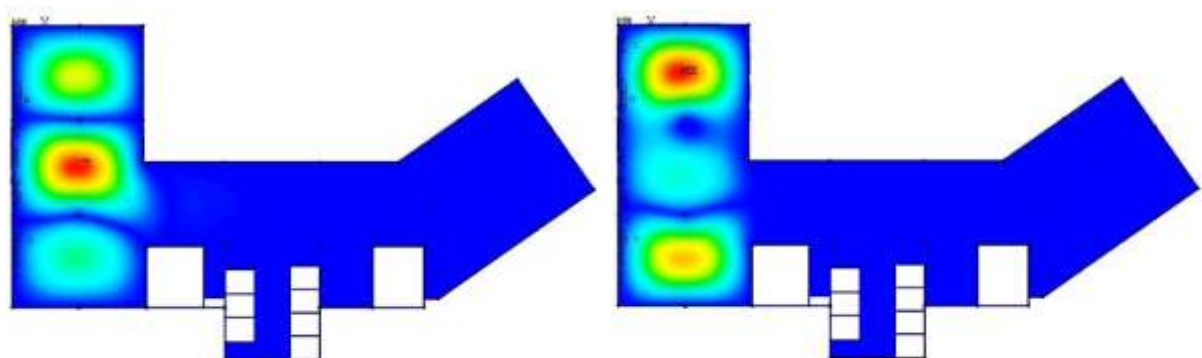
A Fig. 50 ilustra, respectivamente, os nove primeiros modos de vibração dos pisos obtidos através do modelo em elementos finitos. Observa-se que os pisos 1, 2 e 3, por se tratarem de uma estrutura com lajes contínuas, apresentam alguns modos de vibração similares

e frequências naturais com valores muito próximos, o que dificulta a identificação destes nos resultados experimentais.

A Tab. 9 apresenta a comparação entre as frequências naturais da estrutura real ensaiada e do respectivo modelo numérico. Nota-se que os resultados experimentais obtidos para os cinco pisos apresentam uma concordância satisfatória entre si, bem como quando comparados aos resultados numéricos, o que indica que o modelo estrutural em estudo se encontra bem calibrado e capaz de representar o comportamento da estrutura.

Tabela 9 – Comparação das frequências naturais do pavimento avaliado.

Modo	Frequência (Hz)		Diferença (%)
	Modelo Numérico	Teste experimental	
1º	5,71	5,90	3,2
2º	6,49	6,50	0,2
3º	6,87	6,97 ( $\pm 0,12$ )	1,4
4º	7,61	7,67 ( $\pm 0,35$ )	0,7
5º	8,17	8,45 ( $\pm 0,21$ )	3,3
6º	8,71	8,40 ( $\pm 0,57$ )	3,7
7º	9,24	9,75 ( $\pm 0,07$ )	5,2
8º	10,08	10,40 ( $\pm 0,28$ )	3,1
9º	10,69	11,10 ( $\pm 0,14$ )	3,7



a) 1º modo (flexão vertical):  $f_{01} = 5,71$  Hz

b) 2º modo (flexão vertical):  $f_{02} = 6,49$  Hz

Figura 50 – Modos de vibração de flexão vertical dos pisos em estudo

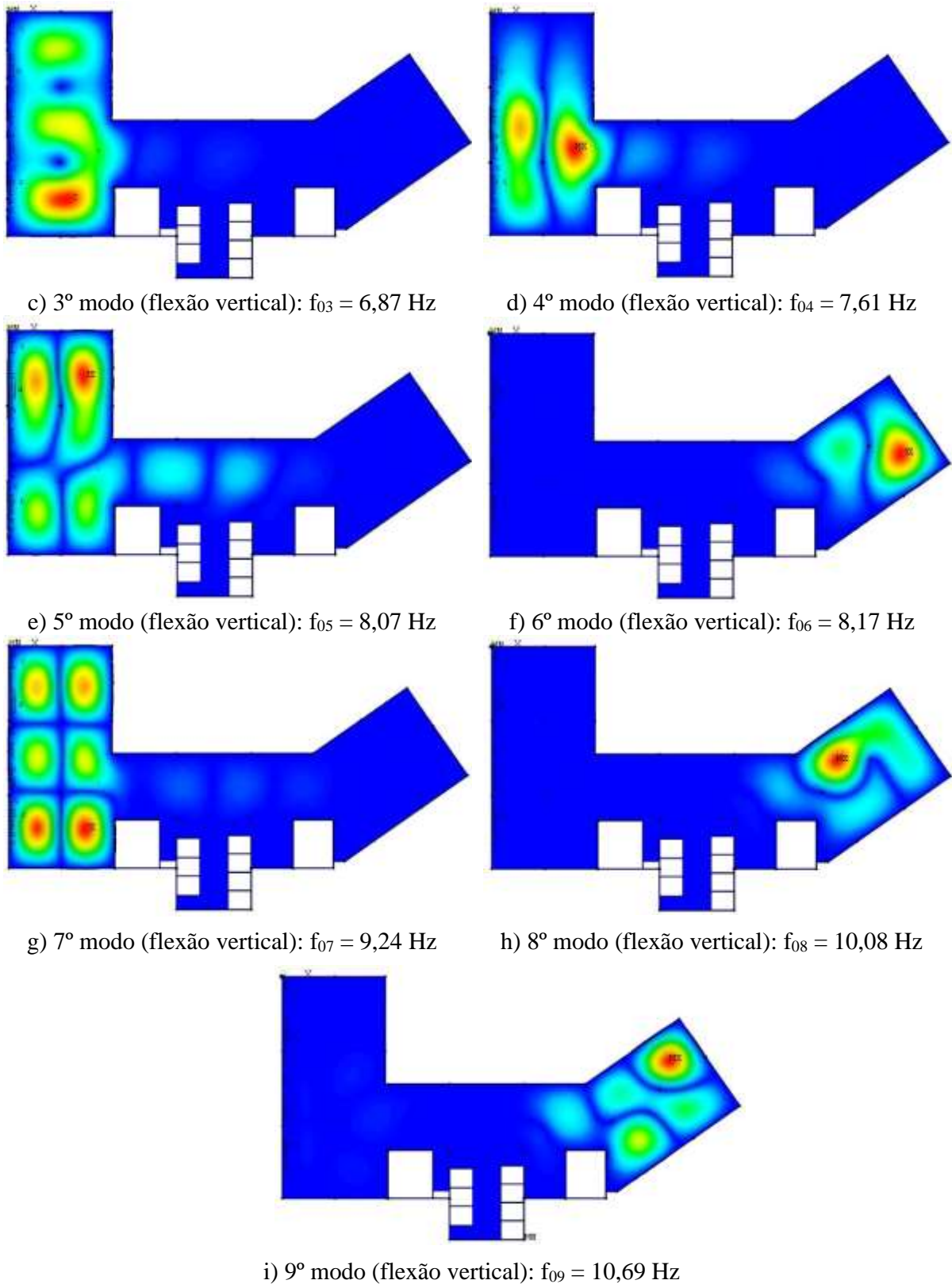


Figura 50 – Modos de vibração de flexão vertical dos pisos em estudo (continuação)

## 6.2 Resultados de vibração forçada de uma pessoa caminhando sobre o piso

Além dos ensaios de vibração livre foram realizados cento e oitenta ensaios de vibração forçada com ação dinâmica decorrente do caminhar de uma pessoa sobre os pisos, com frequência de passos variáveis e em direções previamente determinadas ou aleatórias. 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 o nível de conforto estipulados por normas e guias de projeto. Ressalta-se 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.

Os pisos 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) nas direções paralela, perpendicular, diagonal e aleatória. Cada frequência de passo foi repetida três vezes em cada direção, totalizando trinta e seis ensaios por piso. Os resultados obtidos no domínio do tempo e da frequência são apresentados a seguir.

### 6.2.1 Piso 1

#### 6.2.1.1 Caminhada lenta ( $f_p = 1,7$ Hz)

As Figs 51, 52, 53 e 54 apresentam as respostas dinâmicas típicas, em termos da aceleração vertical, registradas nos pontos de maior amplitude, para a estrutura do piso 1 sendo excitada pelo caminhar de uma pessoa com frequência de passo igual a 1,7 Hz simulando as atividades dos futuros usuários do edifício. As respostas registradas pelos demais canais podem ser vistas no Apêndice B.

Analisando as respostas obtidas de maneira qualitativa, nota-se que a parcela mais significativa de transferência de energia refere-se à contribuição da segunda frequência natural do pavimento, associada ao segundo modo de vibração de flexão vertical ( $f_{02} = 6,50$  Hz). Destaca-se que na trajetória de caminhada paralela houve também grande contribuição do terceiro e quarto modos de vibração de flexão vertical ( $f_{03} = 6,97$  Hz e  $f_{04} = 7,30$  Hz). Nas direções aleatória e diagonal é possível notar também um pequeno pico de vibração em 5,90 Hz, associado ao primeiro modo de vibração da estrutura. Por fim, pode-se concluir que a

estrutura está sendo fortemente excitada pelo quarto harmônico do caminhar ( $4 \times 1,7 \text{ Hz} = 6,8 \text{ Hz}$ ).

Observa-se, também, que os picos provenientes do segundo, terceiro e quinto harmônicos do caminhar ( $f_{p(2^a h)} = 3,4 \text{ Hz}$ ,  $f_{p(3^a h)} = 5,1 \text{ Hz}$  e  $f_{p(5^a h)} = 8,5 \text{ Hz}$ ) estão presentes na resposta da estrutura, apesar de apresentarem amplitudes baixas em relação aos picos associados aos modos naturais de vibração do pavimento.

As acelerações máximas encontradas nesse ensaio são apresentadas na Tab. 10 em valores de pico e *RMS*. Nota-se que a máxima aceleração de pico foi de  $0,019 \text{ m/s}^2$  e a máxima aceleração *RMS* foi de  $0,002 \text{ m/s}^2$ , obtidas através da caminhada na direção diagonal.

Tabela 10 – Máximas acelerações encontradas no ensaio de caminhada lenta no Piso 1

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

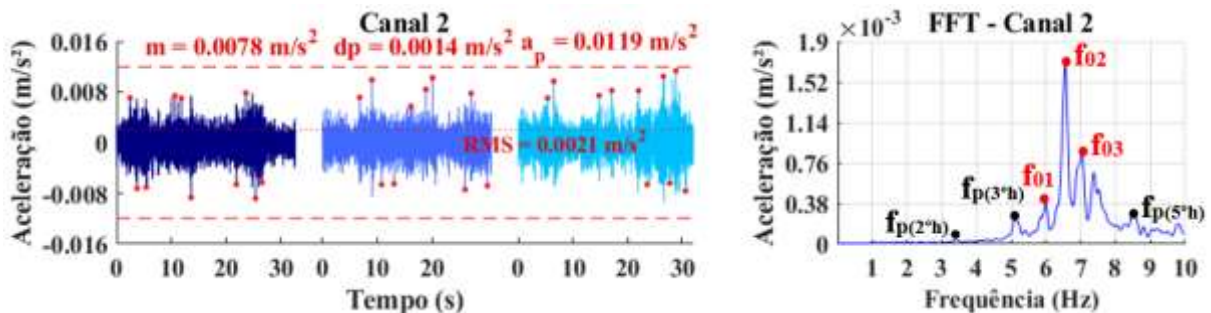


Figura 51 – Resposta dinâmica do piso 1 para caminhada lenta em trajetória aleatória.

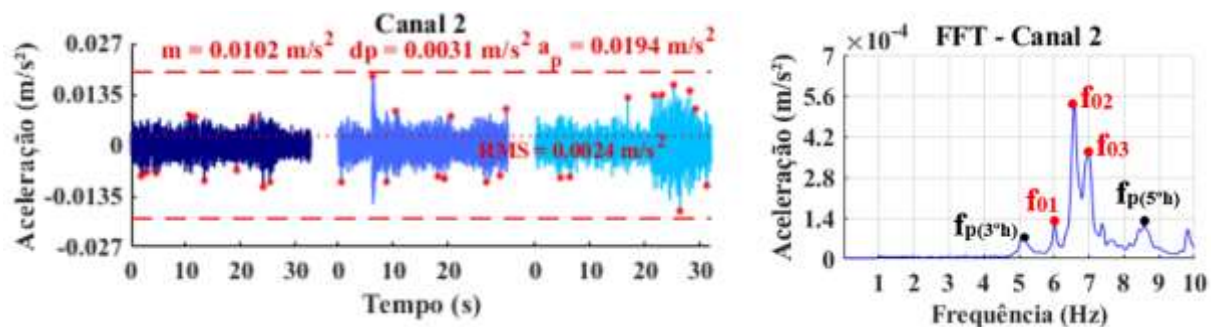


Figura 52 – Resposta dinâmica do piso 1 para caminhada lenta em trajetória diagonal.

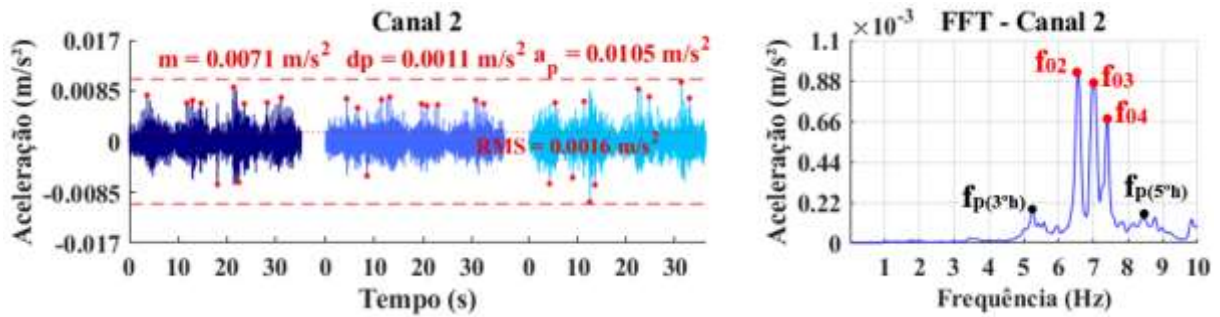


Figura 53 – Resposta dinâmica do piso 1 para caminhada lenta em trajetória paralela.

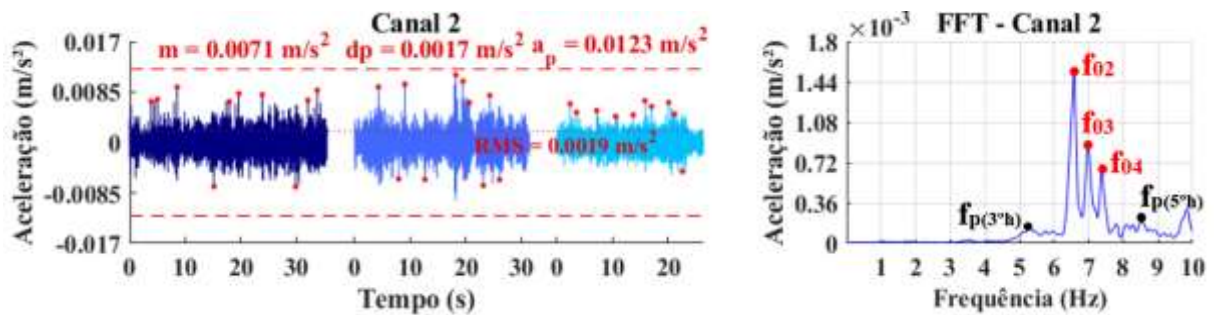


Figura 54 – Resposta dinâmica do piso 1 para caminhada lenta em trajetória perpendicular.

#### 6.2.1.2 Caminhada normal ( $f_p = 2,0 \text{ Hz}$ )

As Figs 55, 56, 57 e 58 apresentam as acelerações no domínio do tempo e da frequência registradas nos pontos de maior amplitude para o piso 1, excitado pelo caminhar de uma pessoa com frequência de passo igual a 2,0 Hz. As respostas registradas pelos demais canais podem ser vistas no Apêndice B.

Analisando as respostas obtidas de maneira qualitativa, nota-se que a parcela mais significativa de transferência de energia refere-se à contribuição da primeira e segunda frequência natural do pavimento, associadas aos dois primeiros modos de vibração de flexão vertical ( $f_{01} = 5,90 \text{ Hz}$  e  $f_{02} = 6,50 \text{ Hz}$ ), correspondentes a ressonância da estrutura com a frequência do terceiro harmônico de excitação ( $f_{p(3^{\text{ª}h})} = 3 \times 2,0 = 6,0 \text{ Hz}$ ). Observa-se também uma pequena contribuição do sexto modo de vibração de flexão vertical ( $f_{06} = 8,00 \text{ Hz}$ ) devido ao quarto harmônico de excitação ( $f_{p(4^{\text{ª}h})} = 4 \times 2,0 = 8,0 \text{ Hz}$ ).

Os picos provenientes do primeiro, segundo e quarto harmônicos do caminhar ( $f_{p(1^{\text{ª}h})} = 2,0 \text{ Hz}$ ,  $f_{p(2^{\text{ª}h})} = 4,0 \text{ Hz}$  e  $f_{p(4^{\text{ª}h})} = 8,0 \text{ Hz}$ ) também estão presentes na resposta da estrutura,

apesar de apresentarem amplitudes baixas em relação aos picos associados aos modos naturais de vibração do pavimento.

As acelerações máximas encontradas nesse ensaio são apresentadas na Tab. 11 em valores de pico e *RMS*. Nota-se que a máxima aceleração de pico foi de  $0,022 \text{ m/s}^2$  e a máxima aceleração *RMS* foi de  $0,003 \text{ m/s}^2$ , adquiridas por meio da trajetória aleatória.

Tabela 11 – Máximas acelerações encontradas no ensaio de caminhada normal no Piso 1

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

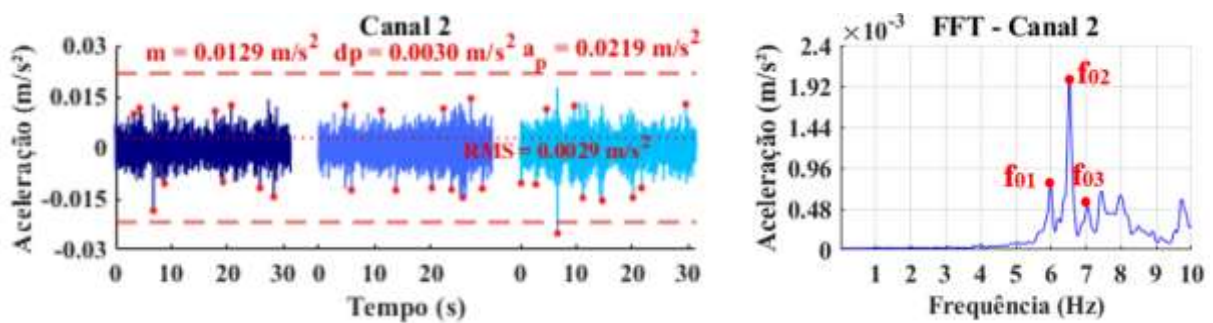


Figura 55 – Resposta dinâmica do piso 1 para caminhada normal em trajetória aleatória.

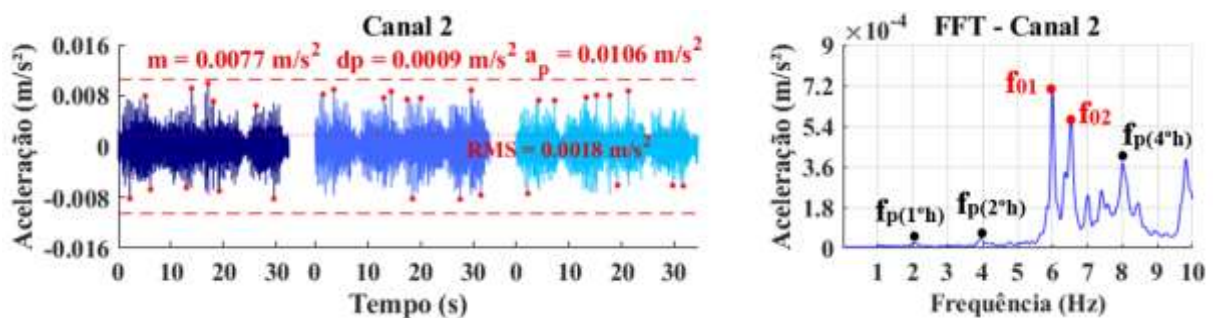


Figura 56 – Resposta dinâmica do piso 1 para caminhada normal em trajetória diagonal.

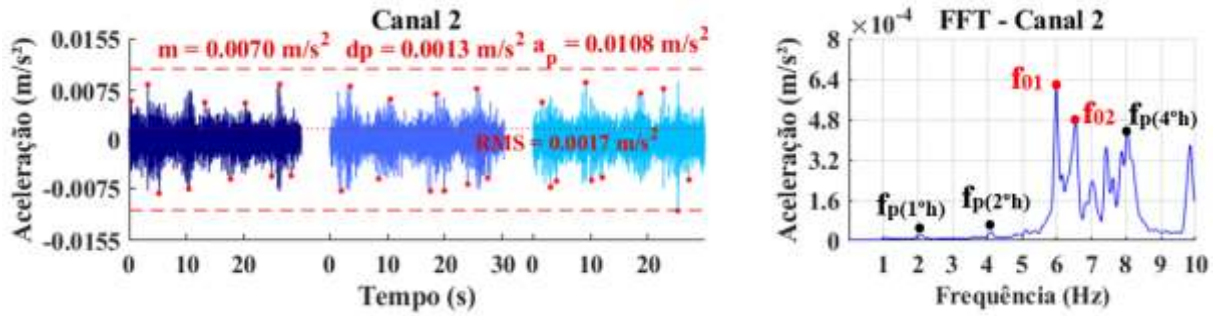


Figura 57 – Resposta dinâmica do piso 1 para caminhada normal em trajetória paralela.

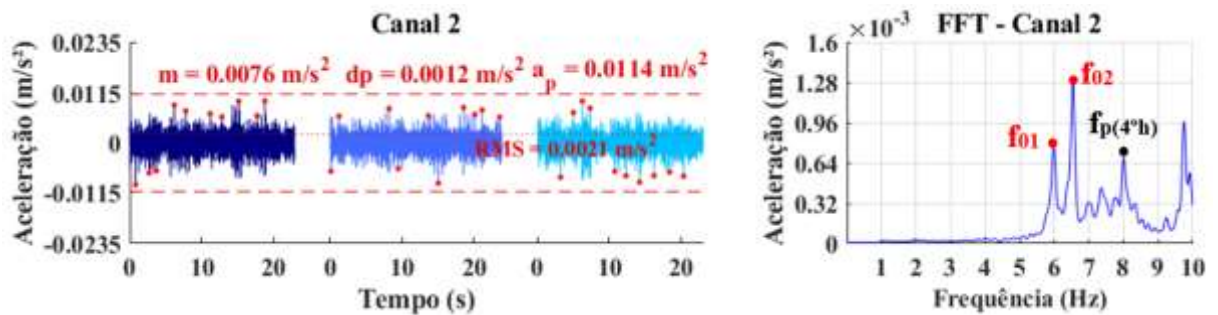


Figura 58 – Resposta dinâmica do piso 1 para caminhada normal em trajetória perpendicular.

### 6.2.1.3 Caminhada rápida ( $f_p = 2,3$ Hz)

As Figs 59, 60, 61 e 62 apresentam as respostas dinâmicas típicas, em termos da aceleração vertical, registradas nos pontos de maior amplitude, para a estrutura do piso 1 sendo excitada pelo caminhar de uma pessoa com frequência de passo de 2,3 Hz. As respostas registradas pelos demais canais podem ser vistas no Apêndice B.

Observa-se nas respostas da estrutura no domínio da frequência que o segundo, terceiro e sétimo modos de vibração da estrutura são os mais excitados ( $f_{02} = 6,50$  Hz,  $f_{03} = 6,97$  Hz e  $f_{07} = 9,75$  Hz). Isto se deve à proximidade desses modos com o terceiro e quarto harmônico do caminhar ( $f_{p(3ªh)} = 3 \times 2,3 = 6,9$  Hz e  $f_{p(4ªh)} = 4 \times 2,3 = 9,2$  Hz), resultando em valores elevados das acelerações.

As acelerações máximas encontradas nesse ensaio são apresentadas na Tab. 12 em valores de pico e *RMS*. Nota-se que a máxima aceleração de pico foi de  $0,028$  m/s<sup>2</sup> e a máxima aceleração *RMS* foi de  $0,003$  m/s<sup>2</sup>, adquiridas por meio da trajetória aleatória, excitando com maior amplitude a segunda, terceira e sétima frequência natural do pavimento ( $f_{02}$ ,  $f_{03}$  e  $f_{07}$ ).

Tabela 12 – Máximas acelerações encontradas no ensaio de caminhada rápida no Piso 1

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

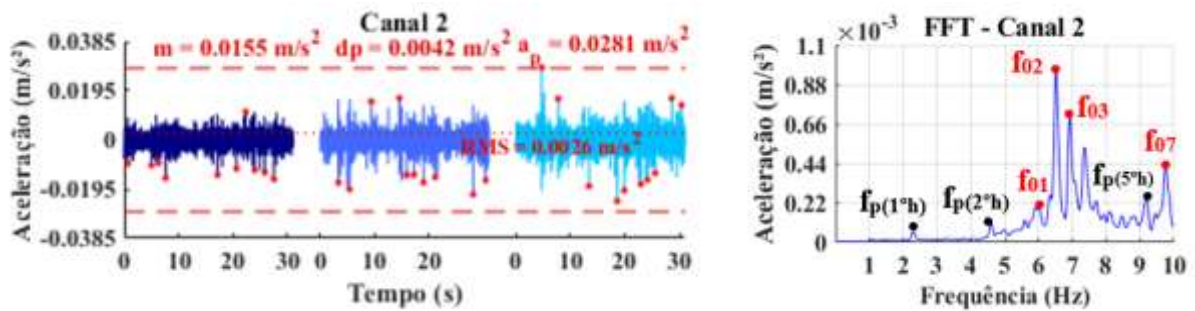


Figura 59 – Resposta dinâmica do piso 1 para caminhada rápida em trajetória aleatória.

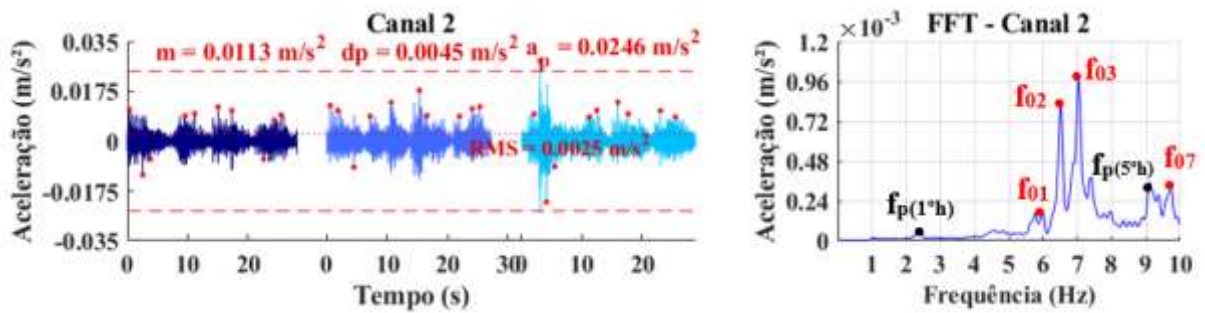


Figura 60 – Resposta dinâmica do piso 1 para caminhada rápida em trajetória diagonal.

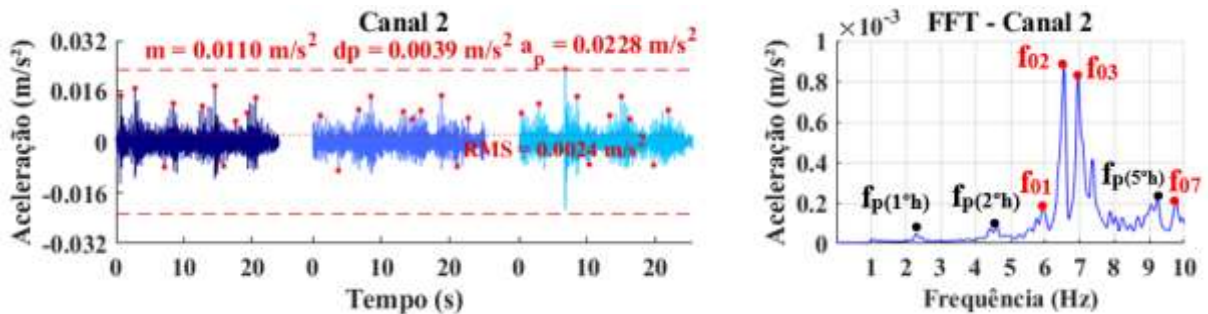


Figura 61 – Resposta dinâmica do piso 1 para caminhada rápida em trajetória paralela.

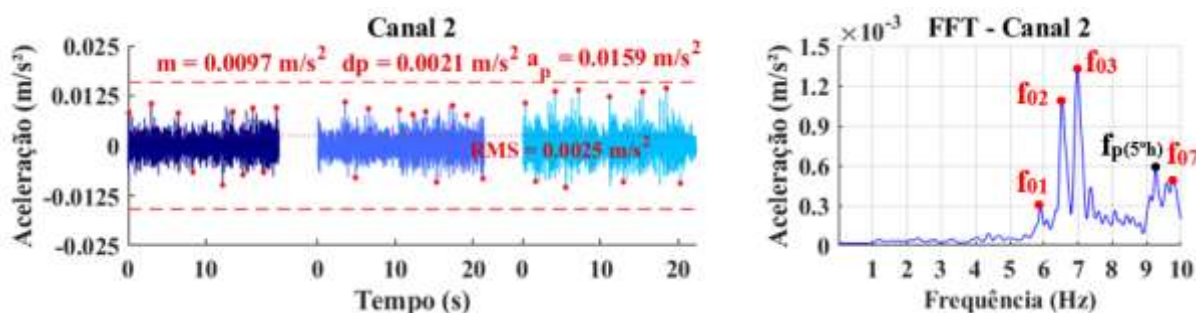


Figura 62 – Resposta dinâmica do piso 1 para caminhada rápida em trajetória perpendicular.

Como pode ser visto, os resultados mais significativos obtidos ao longo dos ensaios de vibração forçada para os três tipos de caminhar (lenta, normal e rápida), no que diz respeito aos valores das acelerações de pico, ocorreram quando o usuário se encontrava caminhando sobre o piso em ressonância no terceiro harmônico da frequência de passo de 2,3 Hz com o terceiro modo de vibração da estrutura (6,9 Hz) e próximo a segunda frequência natural (6,5 Hz) - aceleração de pico de 0,03 m/s<sup>2</sup>. Este caso foi mais crítico do que a excitação causada pela ressonância no terceiro harmônico da frequência de passo de 2 Hz com a frequência fundamental do piso (5,9 Hz), que levou a uma aceleração de pico de 0,022 m/s<sup>2</sup>. Isso mostra que uma previsão de resposta baseada na primeira frequência natural subestimaria a resposta crítica do piso.

Da análise do primeiro piso conclui-se que a frequência ressonante mais baixa de um sistema estrutural com pisos interconectados contínuos não é necessariamente a frequência natural associada ao primeiro modo de vibração, como acontece no geral em pisos isolados.

## 6.2.2 Piso 2

### 6.2.2.1 Caminhada lenta ( $f_p = 1,7$ Hz)

As Figs. 63, 64, 65 e 66 apresentam os gráficos de aceleração no domínio do tempo e da frequência para situação de uma pessoa caminhando com frequência de passo de 1,7 Hz, no ponto de leitura de maior amplitude da resposta dinâmica. As respostas registradas pelos demais canais podem ser vistas no Apêndice B.

Notam-se claramente nesses espectros que a parcela mais significativa de transferência de energia ocorre na resposta do piso 2 para uma pessoa andando em caminhada lenta e refere-

se à contribuição do terceiro modo de vibração de flexão vertical ( $f_{03} = 6,97$  Hz) em ressonância com o quarto harmônico de excitação ( $f_{p(4^a h)} = 4 \times 1,7 = 6,8$  Hz).

As acelerações máximas encontradas nesse ensaio são apresentadas na Tab. 13 em valores de pico e *RMS*. Nota-se que a máxima aceleração de pico foi de  $0,018$   $m/s^2$  e a máxima aceleração *RMS* foi de  $0,002$   $m/s^2$ , obtidas com o caminhar na trajetória aleatória.

Tabela 13 – Máximas acelerações encontradas no ensaio de caminhada lenta no Piso 2

Direção	Aceleração de pico ( $m/s^2$ )	Aceleração <i>RMS</i> ( $m/s^2$ )
Aleatória	0,018	0,002
Diagonal	0,009	0,002
Paralela	0,009	0,001
Perpendicular	0,010	0,001

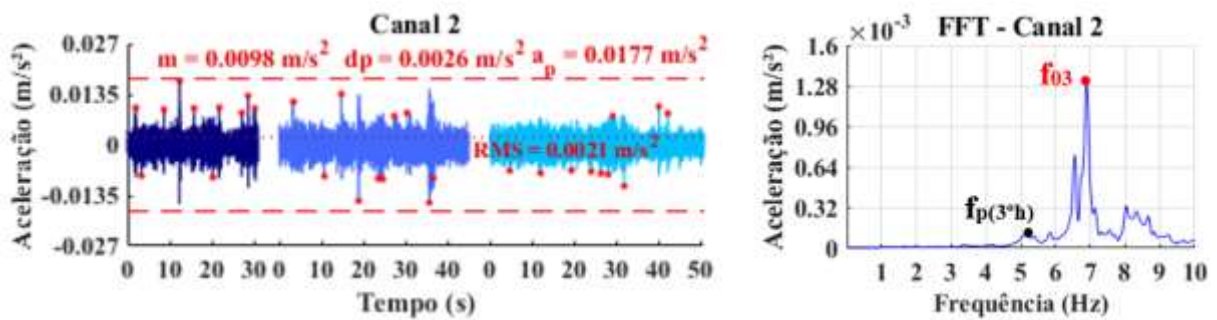


Figura 63 – Resposta dinâmica do piso 2 para caminhada lenta em trajetória aleatória.

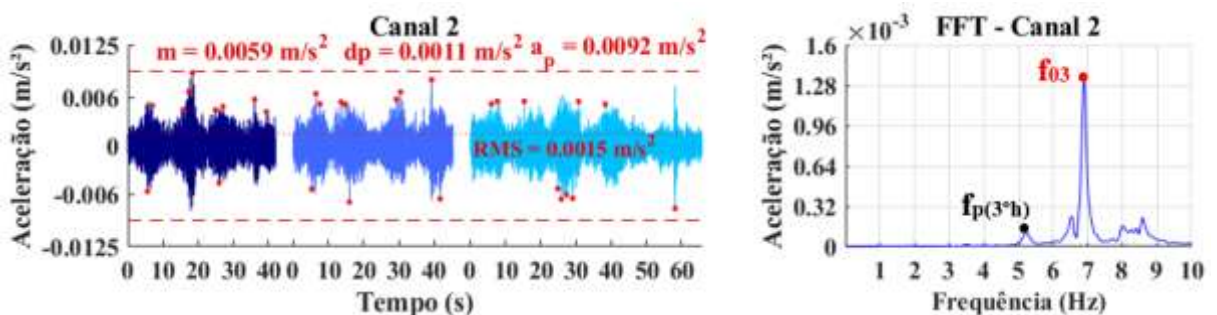


Figura 64 – Resposta dinâmica do piso 2 para caminhada lenta em trajetória diagonal.

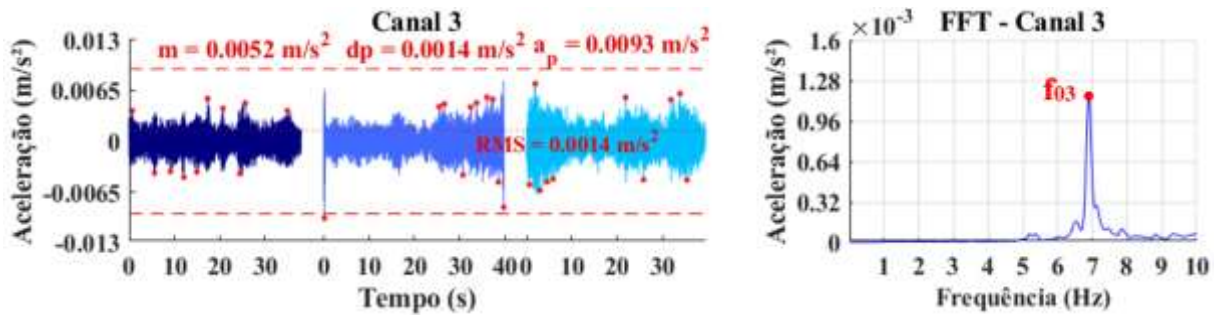


Figura 65 – Resposta dinâmica do piso 2 para caminhada lenta em trajetória paralela.

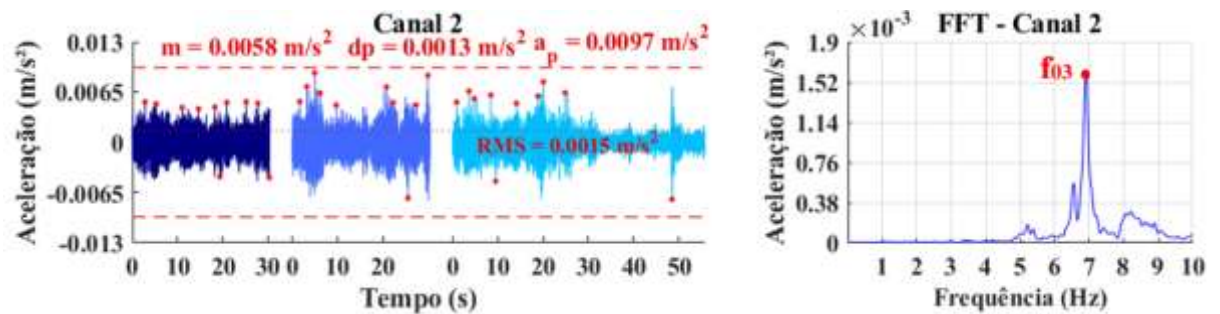


Figura 66 – Resposta dinâmica do piso 2 para caminhada lenta em trajetória perpendicular.

#### 6.2.2.2 Caminhada normal ( $f_p = 2,0$ Hz)

As Figs. 67, 68, 69 e 70 apresentam a aceleração no domínio do tempo e da frequência para situação de uma pessoa caminhando com frequência de passo de 2,0 Hz, no ponto de leitura de maior amplitude. As respostas registradas pelos demais canais podem ser vistas no Apêndice B.

Notam-se claramente nesses que a parcela mais significativa de transferência de energia refere-se à contribuição do sexto modo de vibração de flexão vertical ( $f_{06} = 8,0$  Hz) em ressonância com a frequência do quarto harmônico de excitação ( $f_{p(4^o h)} = 4 \times 2,0 = 8,0$  Hz). Observou-se também uma pequena contribuição do primeiro modo de vibração ( $f_{01} = 5,90$  Hz), devido à proximidade com o terceiro harmônico do caminhar ( $f_{p(3^o h)} = 3 \times 2,0 = 6,0$  Hz).

As acelerações máximas encontradas nesse ensaio são apresentadas na Tab. 14 em pico e *RMS*. Nota-se que a máxima aceleração de pico foi de 0,021 m/s<sup>2</sup> e a máxima aceleração *RMS* foi de 0,002 m/s<sup>2</sup>, obtidas com o caminhar na trajetória aleatória.

Tabela 14 – Máximas acelerações encontradas no ensaio de caminhada normal no Piso 2

Direção	Aceleração de pico (m/s <sup>2</sup> )	Aceleração <i>RMS</i> (m/s <sup>2</sup> )
Aleatória	0,021	0,002
Diagonal	0,009	0,002
Paralela	0,014	0,002
Perpendicular	0,009	0,002

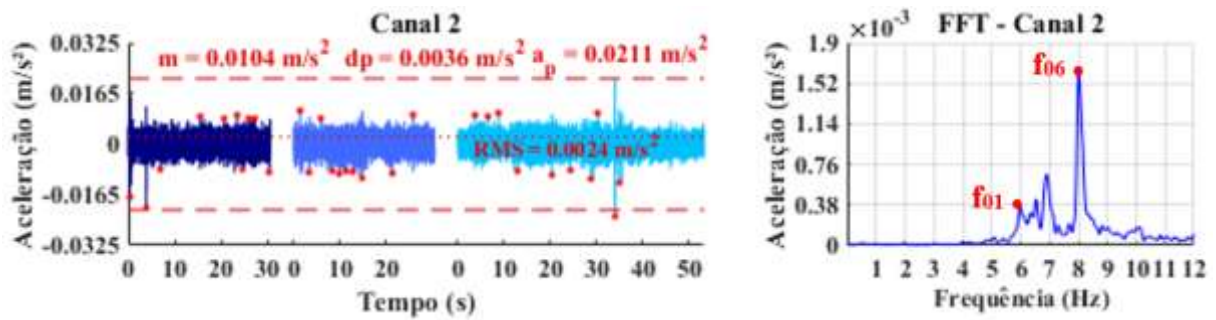


Figura 67 – Resposta dinâmica do piso 2 para caminhada normal em trajetória aleatória.

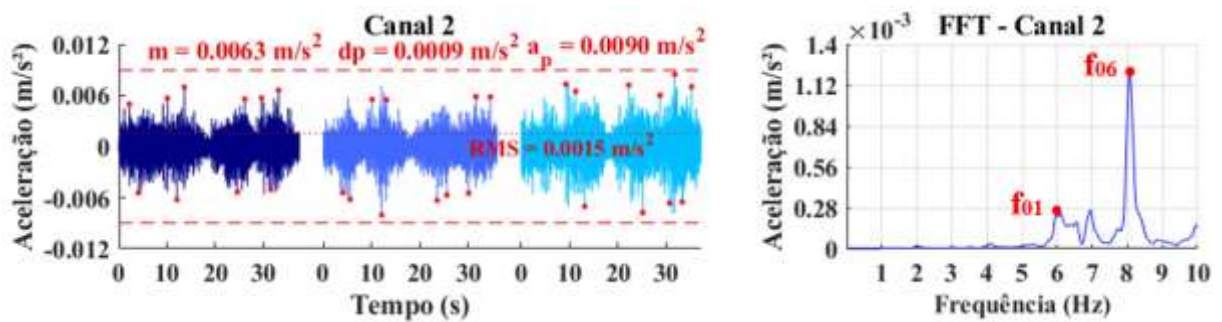


Figura 68 – Resposta dinâmica do piso 2 para caminhada normal em trajetória diagonal.

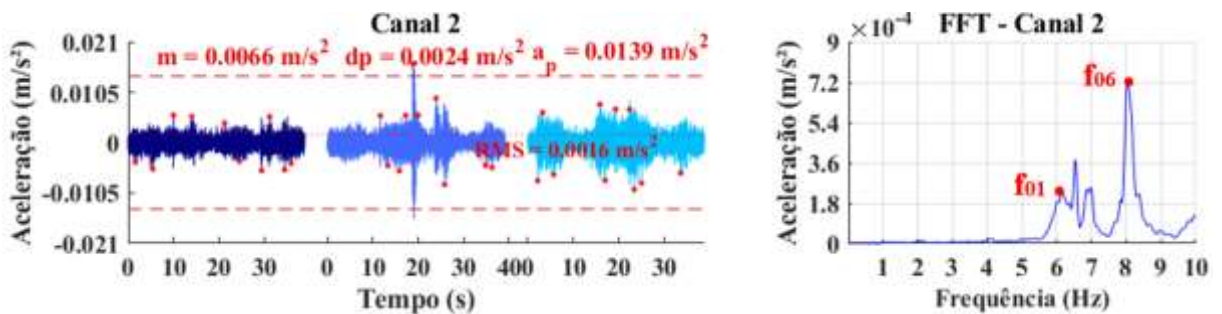


Figura 69 – Resposta dinâmica do piso 2 para caminhada normal em trajetória paralela.

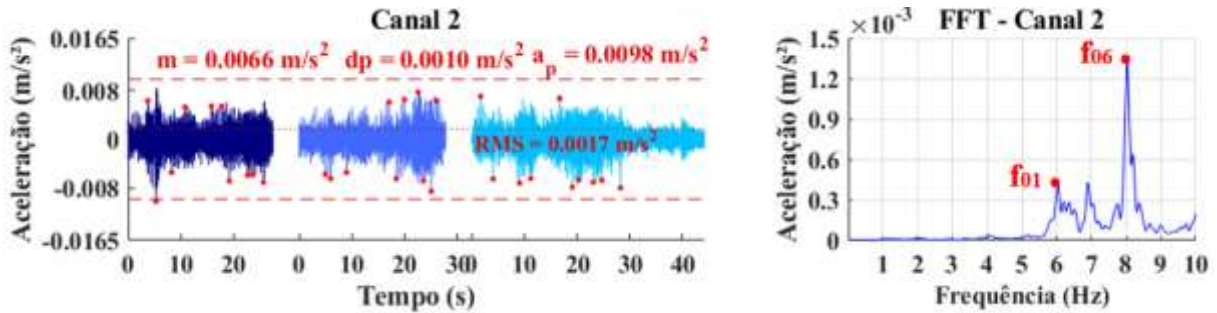


Figura 70 – Resposta dinâmica do piso 2 para caminhada normal em trajetória perpendicular.

### 6.2.2.3 Caminhada rápida ( $f_p = 2,3$ Hz)

As Figs 71, 72, 73 e 74 apresentam as respostas dinâmicas típicas, em termos da aceleração vertical, registradas nos pontos de maior amplitude, para a estrutura do piso 2 sendo excitada pelo caminhar de uma pessoa com frequência de passo de 2,3 Hz. As respostas registradas pelos demais canais podem ser vistas no Apêndice B.

Observa-se que houve a predominância de excitação da terceira frequência natural do pavimento ( $f_{03} = 6,97$  Hz), correspondente a ressonância do modelo estrutural com o terceiro harmônico de excitação ( $f_{p(3^{th})} = 3 \times 2,3 = 6,9$  Hz). A máxima aceleração de pico foi de 0,031 m/s<sup>2</sup> e a máxima aceleração *RMS* foi de 0,003 m/s<sup>2</sup>, adquirida por meio da caminhada na trajetória aleatória, como pode ser visto na Tab. 15.

Tabela 15 – Máximas acelerações encontradas no ensaio de caminhada rápida no Piso 2

Direção	Aceleração de pico (m/s <sup>2</sup> )	Aceleração <i>RMS</i> (m/s <sup>2</sup> )
Aleatória	0,031	0,003
Diagonal	0,014	0,002
Paralela	0,001	0,002
Perpendicular	0,016	0,002

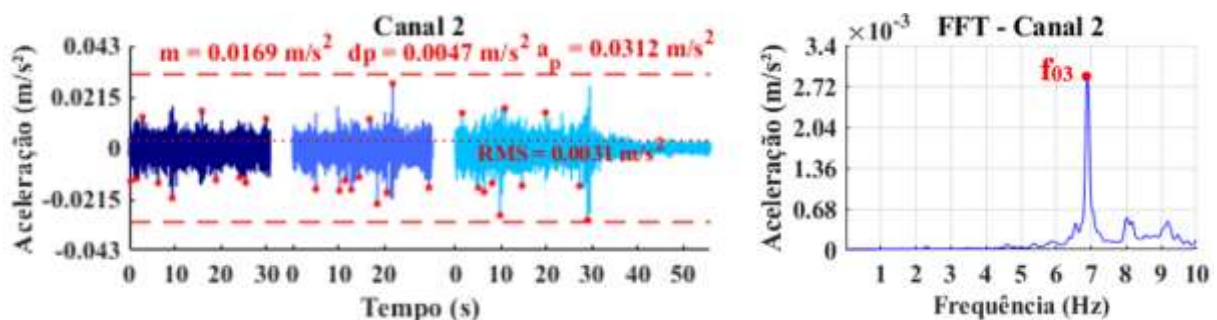


Figura 71 – Resposta dinâmica do piso 2 para caminhada rápida em trajetória aleatória.

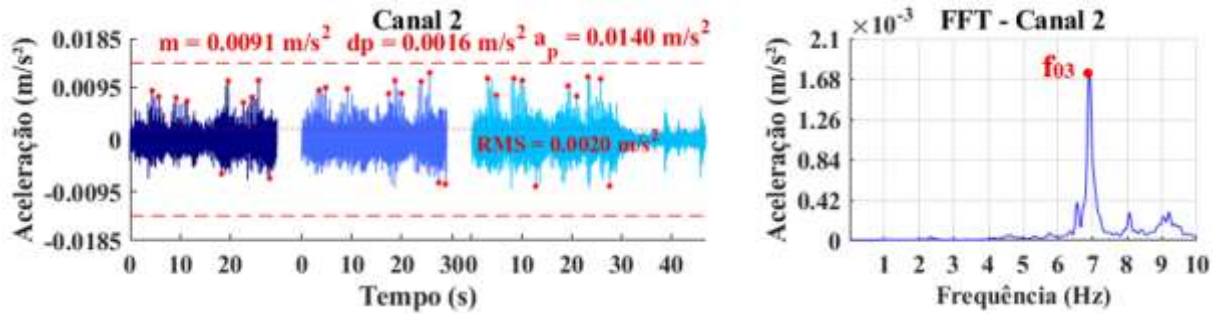


Figura 72 – Resposta dinâmica do piso 2 para caminhada rápida em trajetória diagonal.

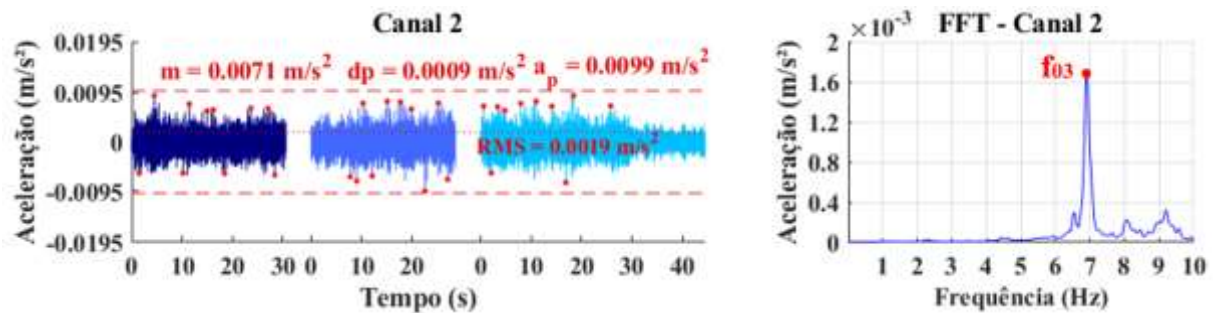


Figura 73 – Resposta dinâmica do piso 2 para caminhada rápida em trajetória paralela.

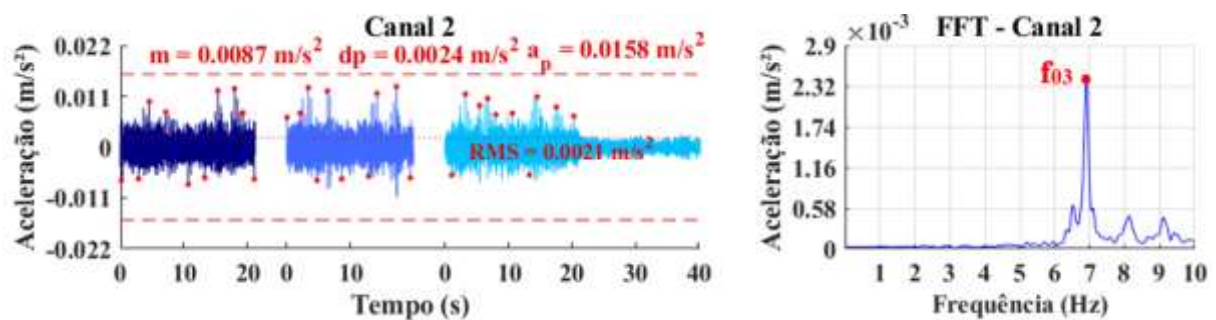


Figura 74 – Resposta dinâmica do piso 2 para caminhada rápida em trajetória perpendicular.

Analisando todas as respostas dinâmicas obtidas no piso 2 para os três tipos de caminhada (lenta, normal e rápida), no que tange as acelerações de pico, nota-se que os resultados mais significativos, ocorreram quando o usuário se encontrava caminhando sobre o piso em ressonância no terceiro harmônico da frequência de passo de 2,3 Hz com o terceiro modo de vibração da estrutura (6,9 Hz) – aceleração de pico de 0,031 m/s<sup>2</sup>. Este caso foi mais crítico do que a excitação causada pela ressonância no terceiro harmônico da frequência de passo de 2 Hz com à frequência fundamental do piso (5,9 Hz), que levou a uma aceleração de pico de 0,021 m/s<sup>2</sup>. Isso mostra que uma previsão de resposta baseada na primeira frequência natural subestimaria a resposta crítica do piso.

Assim, da análise do segundo piso, conclui-se que a frequência ressonante mais baixa de um sistema estrutural com pisos interconectados contínuos, não é necessariamente a frequência natural associada ao primeiro modo de vibração, como acontece no geral em pisos isolados. É importante ressaltar que dificilmente uma pessoa consegue manter uma frequência de caminhar constante por muitos passos, muito menos quando o valor de frequência é relativamente alto (2,3 Hz – caminhada rápida).

### 6.2.3 Piso 3

#### 6.2.3.1 Caminhada lenta ( $f_p = 1,7$ Hz)

As Figs 75, 76, 77 e 78 apresentam as respostas dinâmicas típicas, em termos da aceleração vertical, registradas nos pontos de maior amplitude, para a estrutura do piso 3 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 Apêndice B.

As acelerações máximas encontradas nesse ensaio são apresentadas na Tab. 16 em termos de pico e *RMS*. Nota-se que a máxima aceleração de pico foi de 0,013 m/s<sup>2</sup> e a máxima aceleração *RMS* foi de 0,002 m/s<sup>2</sup>, adquiridas através do caminhar na trajetória aleatória.

Analisando as respostas obtidas de um ponto de vista qualitativo, nota-se que a parcela mais significativa de transferência de energia que ocorre nas respostas refere-se à contribuição da terceira e sétima frequências naturais do pavimento associadas ao terceiro e sétimo modos de vibração de flexão vertical, respectivamente ( $f_{03} = 6,97$  Hz e  $f_{07} = 8,80$  Hz, excitados pelo quarto e quinto harmônicos do caminhar ( $f_{p(4^{\text{th}})} = 4 \times 1,7 = 6,8$  Hz e  $f_{p(5^{\text{th}})} = 5 \times 1,7 = 8,5$  Hz).

Tabela 16 – Máximas acelerações encontradas no ensaio de caminhada lenta no Piso 3

<b>Direção</b>	<b>Aceleração de pico (m/s<sup>2</sup>)</b>	<b>Aceleração <i>RMS</i> (m/s<sup>2</sup>)</b>
Aleatória	0,013	0,002
Diagonal	0,008	0,001
Paralela	0,007	0,001
Perpendicular	0,011	0,002

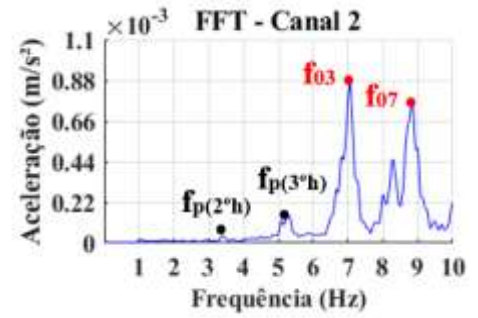
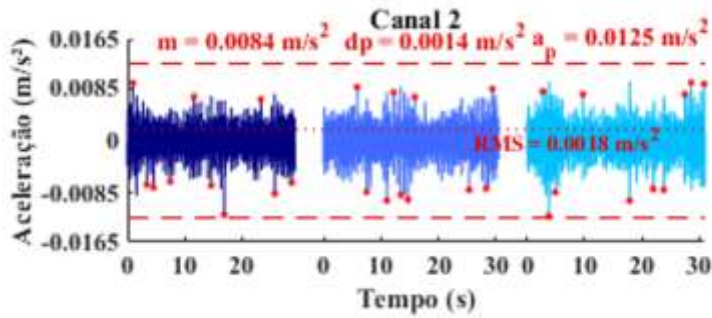


Figura 75 – Resposta dinâmica do piso 3 para caminhada lenta em trajetória aleatória.

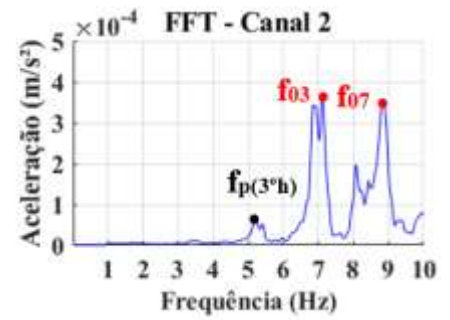
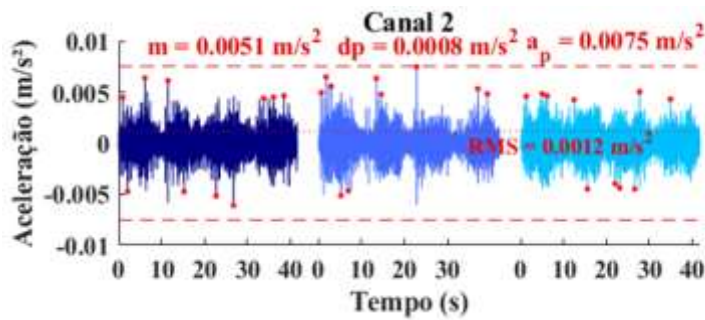


Figura 76 – Resposta dinâmica do piso 3 para caminhada lenta em trajetória aleatória.

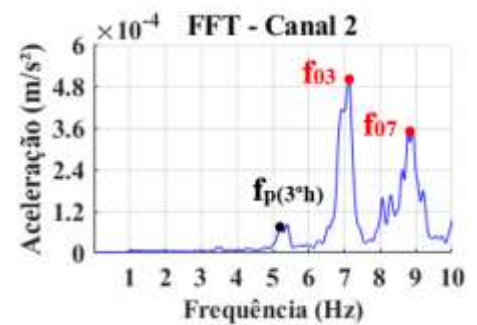
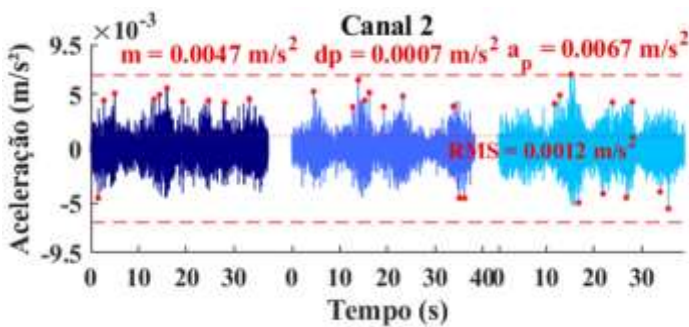


Figura 77 – Resposta dinâmica do piso 3 para caminhada lenta em trajetória paralela.

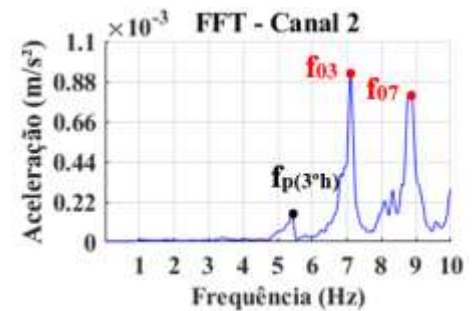
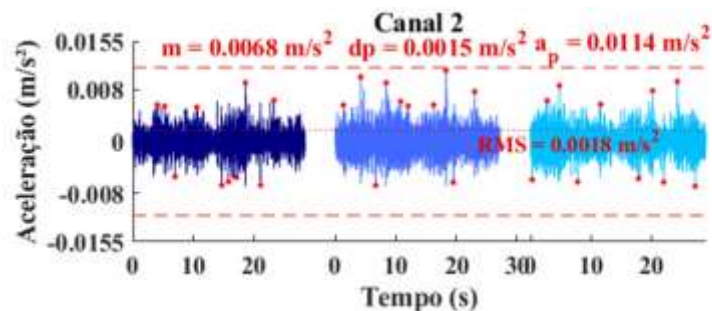


Figura 78 – Resposta dinâmica do piso 3 para caminhada lenta em trajetória perpendicular.

### 6.2.3.2 Caminhada normal ( $f_p = 2,0$ Hz)

As Figs 79, 80, 81 e 82 apresentam as respostas dinâmicas de aceleração no domínio do tempo e da frequência registradas nos pontos de maior amplitude para o piso 3 sendo excitado pelo caminhar de uma pessoa com frequência de passo igual a 2,0 Hz simulando as atividades dos futuros usuários do edifício. As respostas registradas pelos demais canais podem ser vistas no Apêndice B.

Observa-se que, de maneira geral, para caminhada de uma pessoa em ritmo normal ( $f_p = 2,0$  Hz), a parcela mais significativa de transferência de energia refere-se à contribuição da sexta frequência natural ( $f_{06} = 8,00$  Hz) do pavimento associada ao sexto modo de vibração de flexão vertical, correspondente a ressonância da estrutura com a frequência do quarto harmônico de excitação ( $f_{p(4^{\text{th}})} = 4 \times 2,0 = 8,0$  Hz).

As acelerações máximas encontradas nesse ensaio são apresentadas na Tab. 17 em termos de pico e *RMS*. Nota-se que a máxima aceleração de pico foi de 0,016 m/s<sup>2</sup> e a máxima aceleração em *RMS* foi de 0,002 m/s<sup>2</sup>, adquiridas por meio da trajetória aleatória.

Tabela 17 – Máximas acelerações encontradas no ensaio de caminhada normal no Piso 3

Direção	Aceleração de pico (m/s <sup>2</sup> )	Aceleração em <i>RMS</i> (m/s <sup>2</sup> )
Aleatória	0,016	0,002
Diagonal	0,009	0,001
Paralela	0,009	0,002
Perpendicular	0,013	0,002

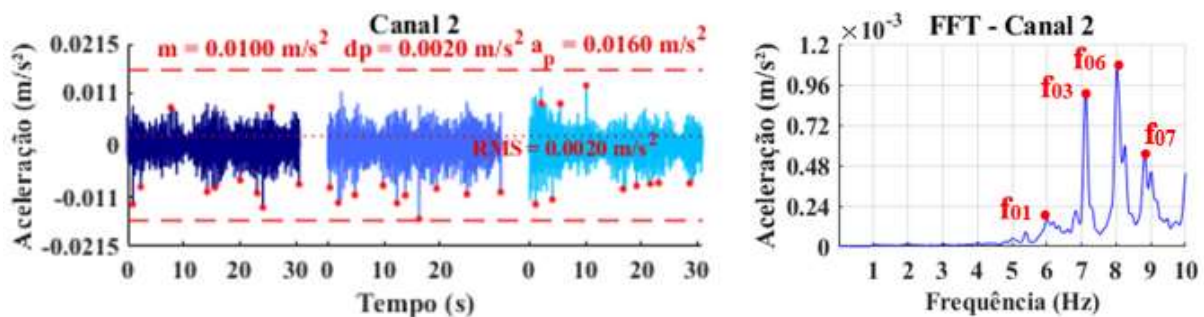


Figura 79 – Resposta dinâmica do piso 3 para caminhada normal em trajetória aleatória.

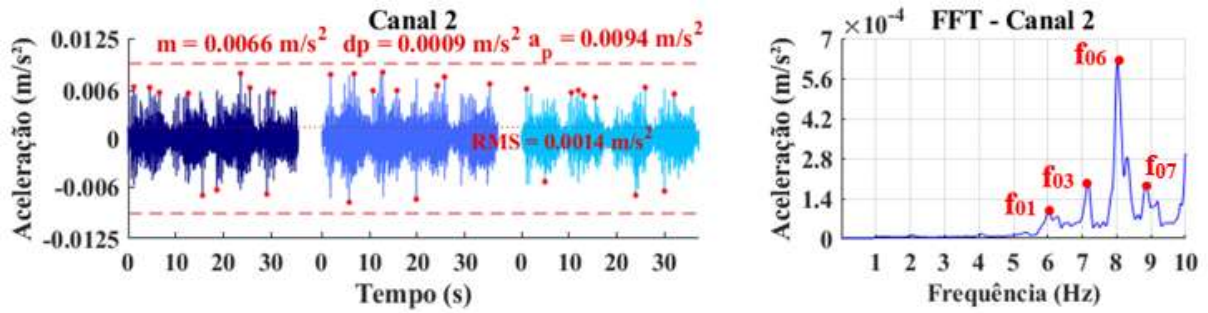


Figura 80 – Resposta dinâmica do piso 3 para caminhada normal em trajetória diagonal.

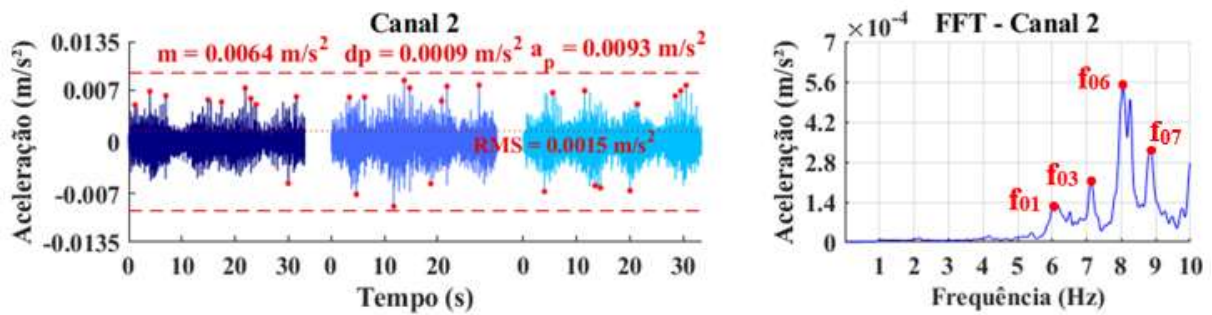


Figura 81 – Resposta dinâmica do piso 3 para caminhada normal em trajetória paralela.

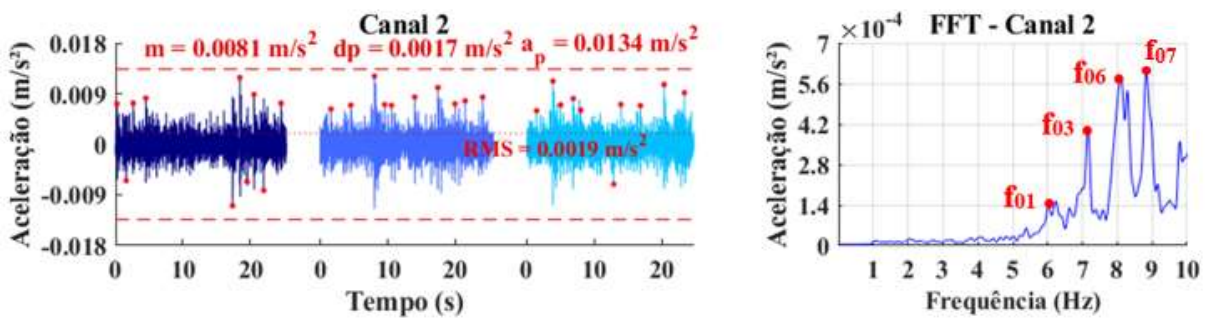


Figura 82 – Resposta dinâmica do piso 3 para caminhada normal em trajetória perpendicular.

### 6.2.3.3 Caminhada rápida ( $f_p = 2,3$ Hz)

As Figs. 83, 84, 85 e 86 apresentam as respostas dinâmicas típicas, em termos da aceleração vertical, registradas nos pontos de maior amplitude, para a estrutura do piso 3 sendo excitada pelo caminhar de uma pessoa com frequência de passo de 2,3 Hz. As respostas registradas pelos demais canais podem ser vistas no Apêndice B.

As acelerações máximas encontradas nesse ensaio são apresentadas na Tab. 18 em termos de pico e *RMS*. Nota-se que a máxima aceleração de pico foi de 0,024 m/s<sup>2</sup> e a máxima aceleração *RMS* foi de 0,002 m/s<sup>2</sup>, adquiridas por meio do caminhar na trajetória aleatória.

Observa-se nas respostas da estrutura no domínio da frequência que o terceiro e sétimo modos de vibração da estrutura são os mais excitados ( $f_{03} = 6,97$  Hz e  $f_{07} = 8,8$  Hz). Isto se deve à proximidade desses modos com o terceiro e quarto harmônico do caminhar ( $f_{p(3^{\text{º}h})} = 3 \times 2,3 = 6,9$  Hz e  $f_{p(4^{\text{º}h})} = 4 \times 2,3 = 9,2$  Hz).

Tabela 18 – Máximas acelerações encontradas no ensaio de caminhada rápida no Piso 3

Direção	Aceleração de pico (m/s <sup>2</sup> )	Aceleração RMS (m/s <sup>2</sup> )
Aleatória	0,024	0,002
Diagonal	0,019	0,002
Paralela	0,011	0,001
Perpendicular	0,002	0,002

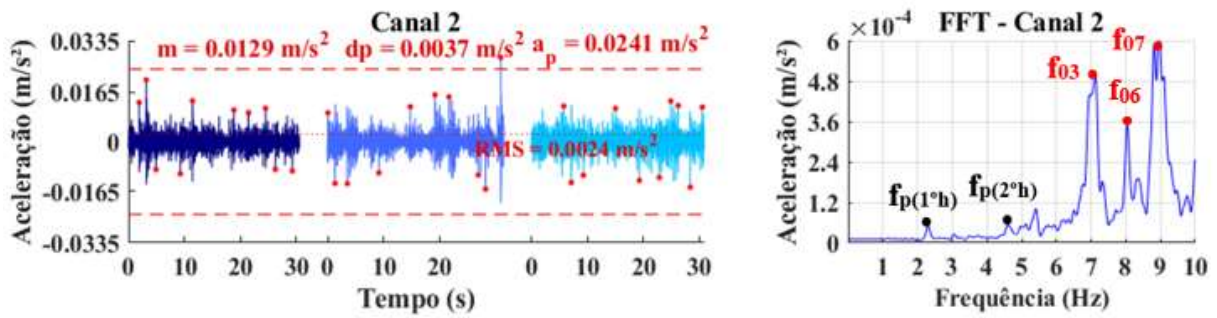


Figura 83 – Resposta dinâmica do piso 3 para caminhada rápida em para trajetória aleatória.

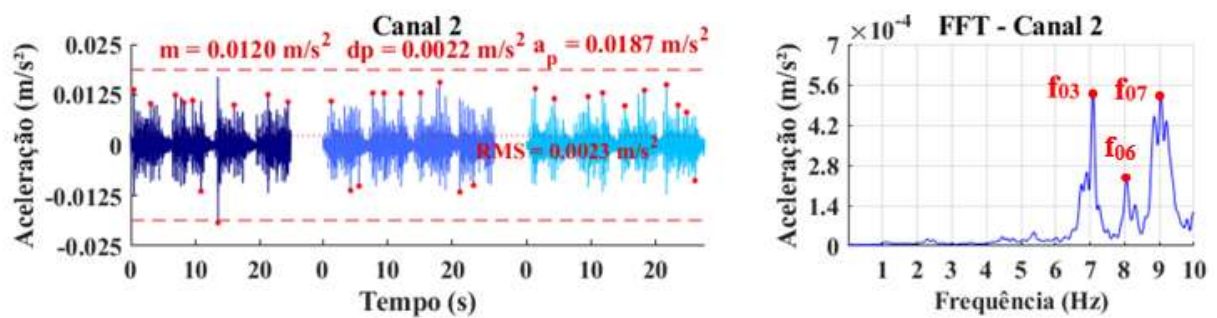


Figura 84 – Resposta dinâmica do piso 3 para caminhada rápida em trajetória diagonal.

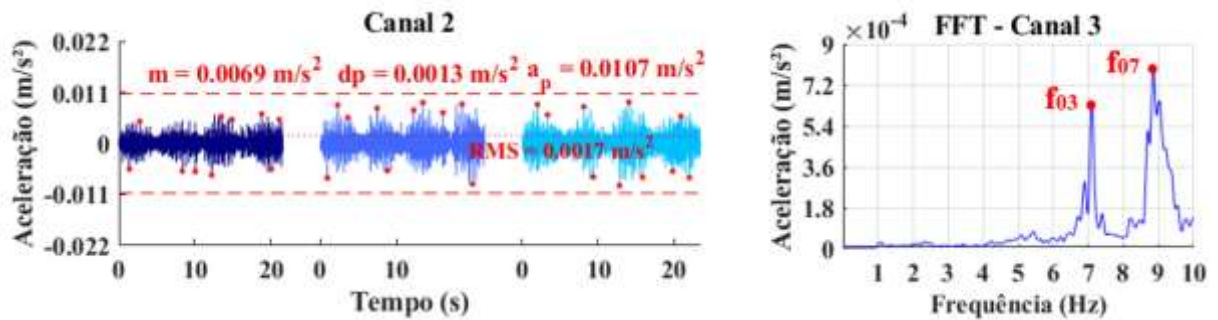


Figura 85 – Resposta dinâmica do piso 3 para caminhada rápida em trajetória paralela.

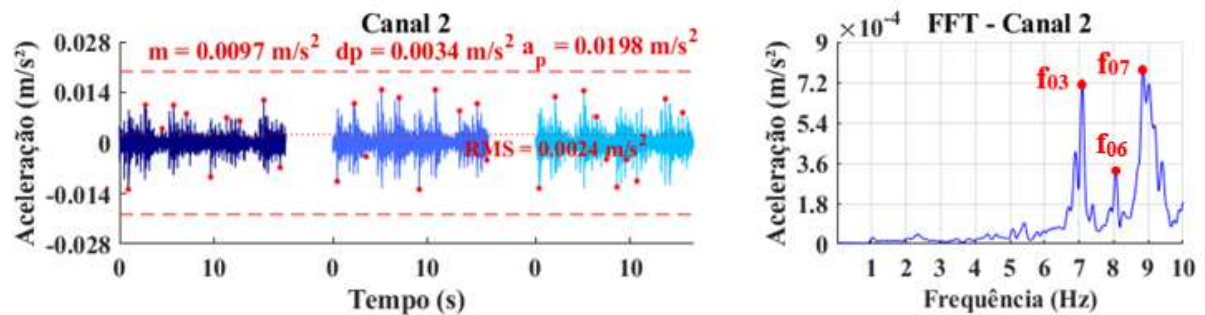


Figura 86 – Resposta dinâmica do piso 3 para caminhada rápida em trajetória perpendicular.

Como pode ser visto, os resultados mais significativos obtidos ao longo dos ensaios de vibração forçada para os três tipos de caminhar (lenta, normal e rápida), no que diz respeito aos valores das acelerações de pico, ocorreram quando o usuário se encontrava caminhando sobre o piso em ressonância no terceiro harmônico da frequência de passo de 2,3 Hz com o terceiro modo de vibração da estrutura (6,9 Hz) e próximo a segunda frequência natural (6,5 Hz) – aceleração de pico de 0,024 m/s<sup>2</sup>. Este caso foi mais crítico do que a excitação causada pela ressonância no terceiro harmônico da frequência de passo de 2 Hz com a frequência fundamental do piso (5,9 Hz), que levou a uma aceleração de pico de 0,016 m/s<sup>2</sup>. Isso mostra que uma previsão de resposta baseada na primeira frequência natural subestimaria a pior resposta do piso.

Da análise do terceiro piso conclui-se que a frequência ressonante mais baixa de um sistema estrutural com pisos interconectados contínuos não é necessariamente a frequência natural associada ao primeiro modo de vibração, como acontece no geral em pisos isolados.

## 6.2.4 Piso 4

### 6.2.4.1 Caminhada lenta ( $f_p = 1,7$ Hz)

As Figs. 87, 88, 89 e 90 apresentam as respostas dinâmicas típicas, em termos da aceleração vertical, registradas nos pontos de maior amplitude, para a estrutura do piso 4 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 Apêndice B.

As acelerações máximas encontradas nesse ensaio são apresentadas na Tab. 19 em termos de pico e *RMS*. Nota-se que a máxima aceleração de pico foi de 0,017 m/s<sup>2</sup> e a máxima aceleração *RMS* foi de 0,002 m/s<sup>2</sup>, adquiridas através do caminhar na trajetória aleatória.

Notam-se nesses espectros os picos de frequência de vibração em 8,2 Hz, 10,4 Hz e 11,1 Hz, associados ao quinto, oitavo e nono modos de vibração do pavimento, devido à proximidade com o quinto e sexto harmônicos do caminhar ( $f_{p(5^{\text{th}})} = 8,5$  Hz e  $f_{p(6^{\text{th}})} = 10,2$  Hz). Observa-se, também, que os picos provenientes do terceiro e quarto harmônicos do caminhar ( $f_{p(3^{\text{th}})} = 5,1$  Hz e  $f_{p(4^{\text{th}})} = 6,8$  Hz) estão presentes na resposta da estrutura, apesar de apresentarem amplitudes baixas em relação aos picos associados aos modos naturais de vibração do pavimento.

Tabela 19 – Máximas acelerações encontradas no ensaio de caminhada lenta no Piso 4

<b>Direção</b>	<b>Aceleração de pico (m/s<sup>2</sup>)</b>	<b>Aceleração <i>RMS</i> (m/s<sup>2</sup>)</b>
Aleatória	0,017	0,002
Diagonal	0,009	0,001
Paralela	0,013	0,002
Perpendicular	0,012	0,002

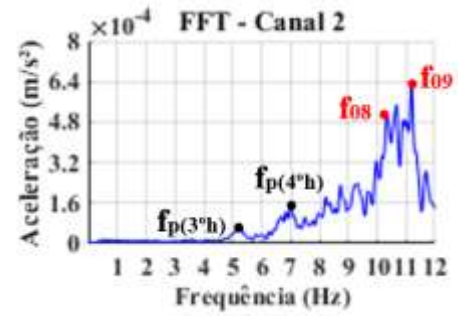
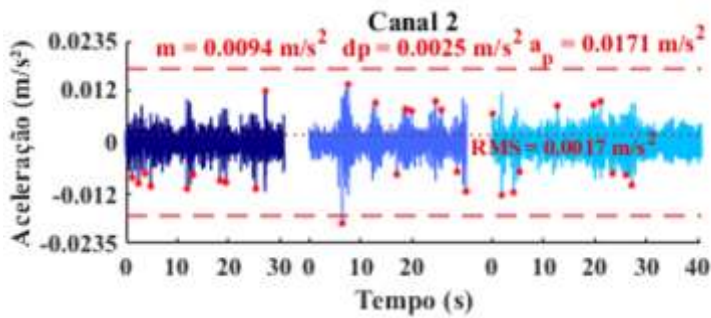


Figura 87 – Resposta dinâmica do piso 4 para caminhada lenta em trajetória aleatória.

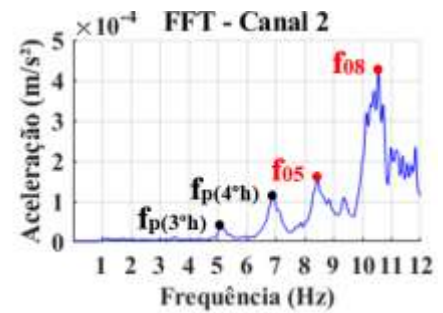
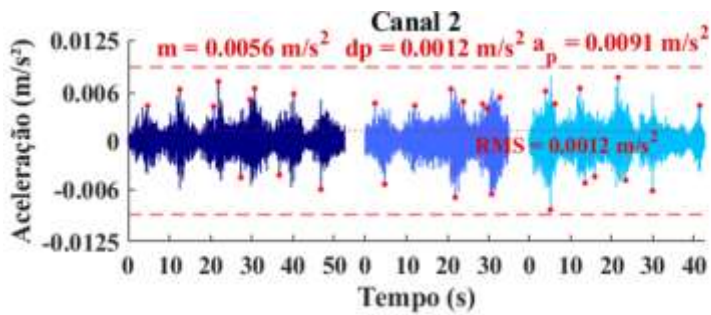


Figura 88 – Resposta dinâmica do piso 4 para caminhada lenta em trajetória diagonal.

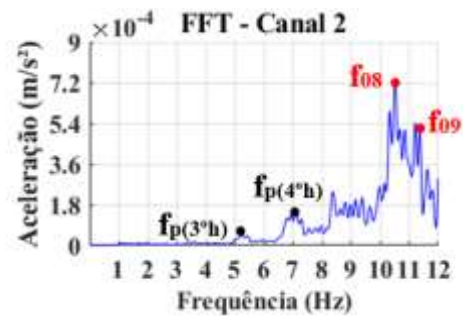
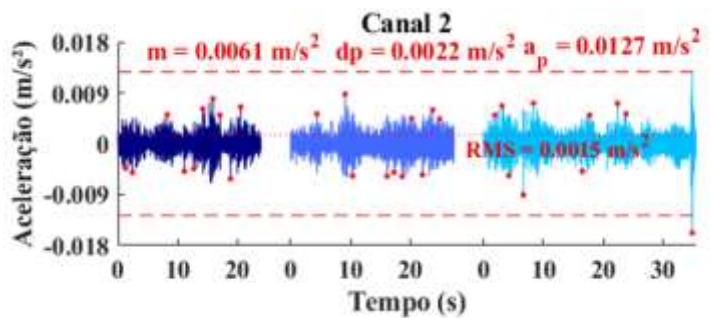


Figura 89 – Resposta dinâmica do piso 4 para caminhada lenta em trajetória paralela.

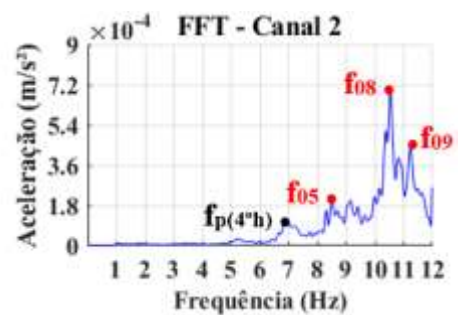
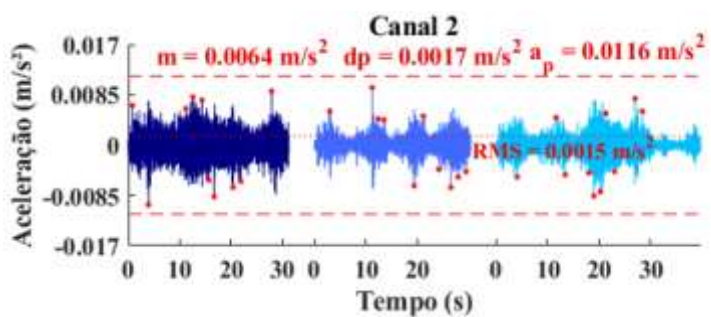


Figura 90 – Resposta dinâmica do piso 4 para caminhada lenta em trajetória perpendicular.

#### 6.2.4.2 Caminhada normal ( $f_p = 2,0$ Hz)

As Figs. 91, 92, 93 e 94 apresentam os gráficos de aceleração no domínio do tempo e da frequência para situação de uma pessoa caminhando com frequência de passo de 2,0 Hz, no ponto de leitura de maior amplitude da resposta dinâmica. As respostas registradas pelos demais canais podem ser vistas no Apêndice B.

As acelerações máximas encontradas nesse ensaio são apresentadas na Tab. 20 em termos de pico e *RMS*. A máxima aceleração de pico foi de 0,023 m/s<sup>2</sup> e a máxima aceleração *RMS* foi de 0,002 m/s<sup>2</sup> obtidas por meio do caminhar na trajetória aleatória.

Notam-se claramente nesses que a parcela mais significativa de transferência de energia refere-se à contribuição da oitava frequência natural do pavimento associada ao oitavo modo de vibração de flexão vertical ( $f_{08} = 10,2$  Hz), correspondente a proximidade desta com a frequência do quinto harmônico de excitação ( $f_{p(5^{\circ}h)} = 5 \times 2,0 = 10,0$  Hz). Observa-se, também, que os picos provenientes do terceiro e quarto harmônicos do caminhar ( $f_{p(3^{\circ}h)} = 6,0$  Hz e  $f_{p(4^{\circ}h)} = 8,0$  Hz) estão presentes na resposta da estrutura, apesar de apresentarem amplitudes baixas em relação aos picos associados aos modos naturais de vibração do pavimento.

Tabela 20 – Máximas acelerações encontradas no ensaio de caminhada normal no Piso 4

Direção	Aceleração de pico (m/s <sup>2</sup> )	Aceleração <i>RMS</i> (m/s <sup>2</sup> )
Aleatória	0,023	0,002
Diagonal	0,012	0,002
Paralela	0,016	0,002
Perpendicular	0,014	0,002

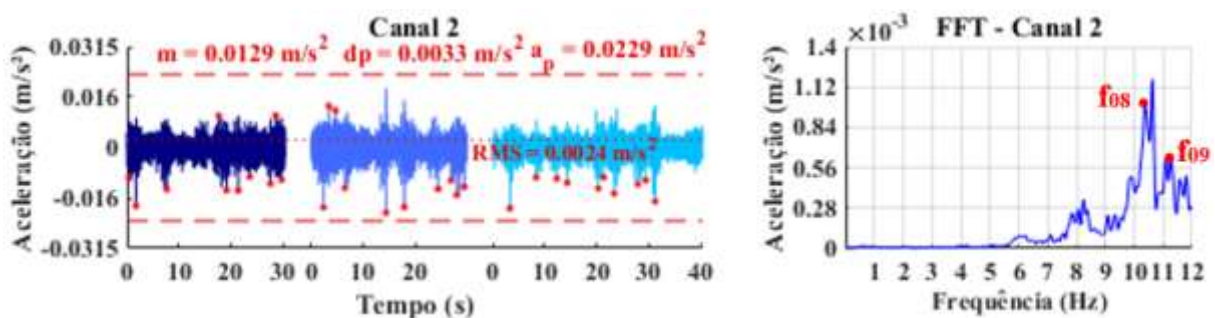


Figura 91 – Resposta dinâmica do piso 4 para caminhada normal em trajetória aleatória.

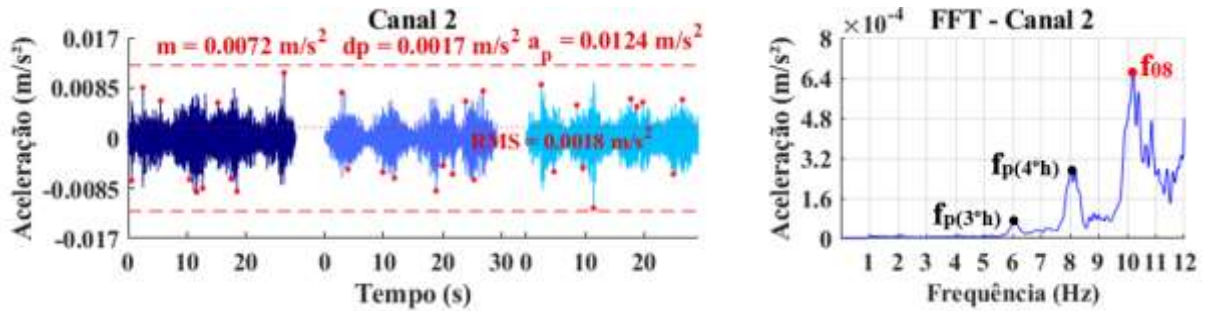


Figura 92 – Resposta dinâmica do piso 4 para caminhada normal em trajetória diagonal.

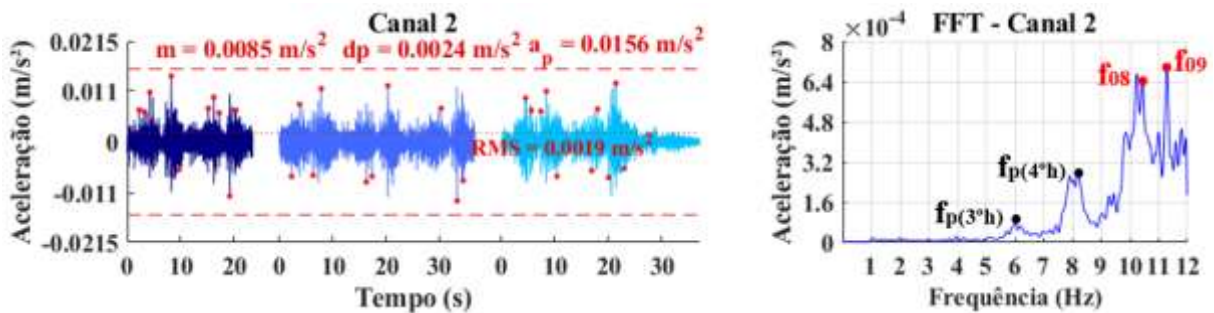


Figura 93 – Resposta dinâmica do piso 4 para caminhada normal em trajetória paralela.

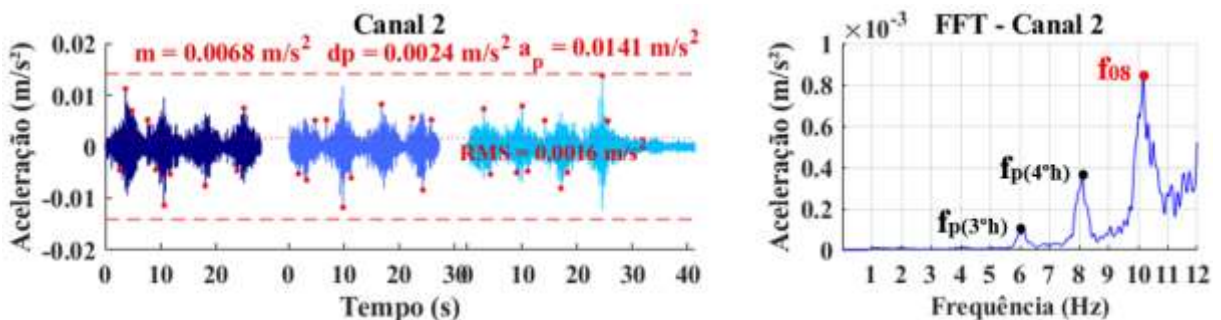


Figura 94 – Resposta dinâmica do piso 4 para caminhada normal em trajetória perpendicular.

#### 6.2.4.3 Caminhada rápida ( $f_p = 2,3$ Hz)

As Figs. 95, 96, 97 e 98 apresentam as respostas dinâmicas típicas, em termos da aceleração vertical, registradas nos pontos de maior amplitude, para a estrutura do piso 4 sendo excitada pelo caminhar de uma pessoa com frequência de passo de 2,3 Hz. As respostas registradas pelos demais canais podem ser vistas no Apêndice B.

A Tab. 21 apresenta as acelerações máximas encontradas nesse ensaio em termos de pico e RMS. A máxima aceleração de pico foi de  $0,029 \text{ m/s}^2$  e a máxima aceleração RMS foi de  $0,004 \text{ m/s}^2$  adquiridas por meio da caminhada na trajetória aleatória.

Observa-se que houve a predominância de excitação da nona frequência natural do pavimento ( $f_{09} = 11,1$  Hz), devido à proximidade desta com a frequência do quinto harmônico de excitação ( $f_{p(5^a h)} = 11,5$  Hz).

Tabela 21 – Máximas acelerações encontradas no ensaio de caminhada rápida no Piso 4

Direção	Aceleração de pico (m/s <sup>2</sup> )	Aceleração RMS (m/s <sup>2</sup> )
Aleatória	0,029	0,004
Diagonal	0,021	0,003
Paralela	0,018	0,003
Perpendicular	0,020	0,003

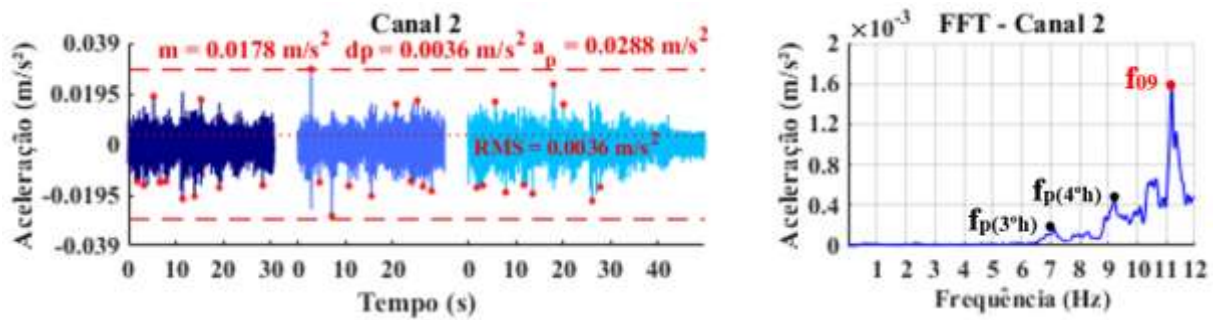


Figura 95 – Resposta dinâmica do piso 4 para caminhada rápida em trajetória aleatória.

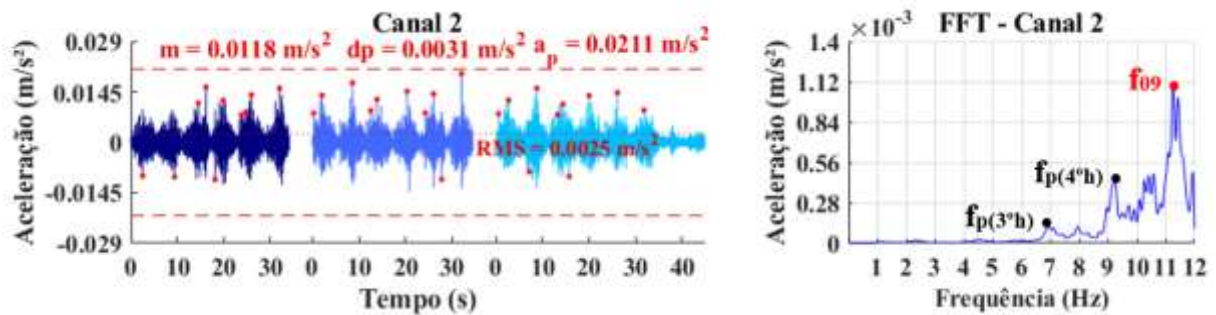


Figura 96 – Resposta dinâmica do piso 4 para caminhada rápida em trajetória diagonal.

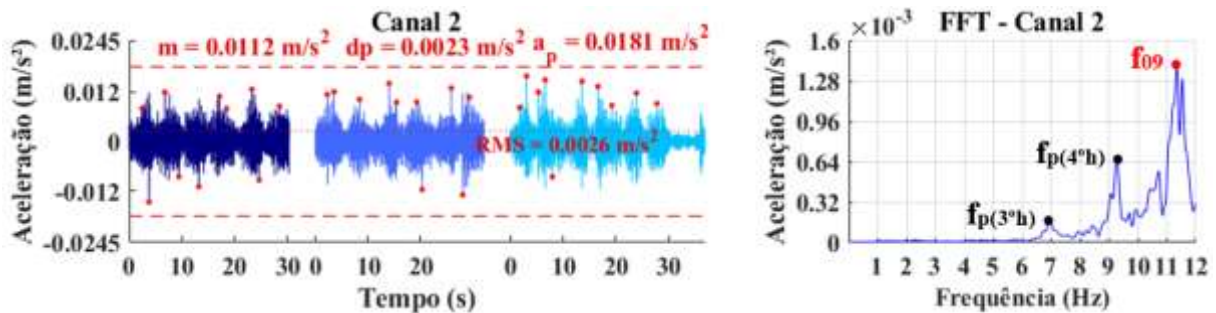


Figura 97 – Resposta dinâmica do piso 4 para caminhada rápida em trajetória paralela.

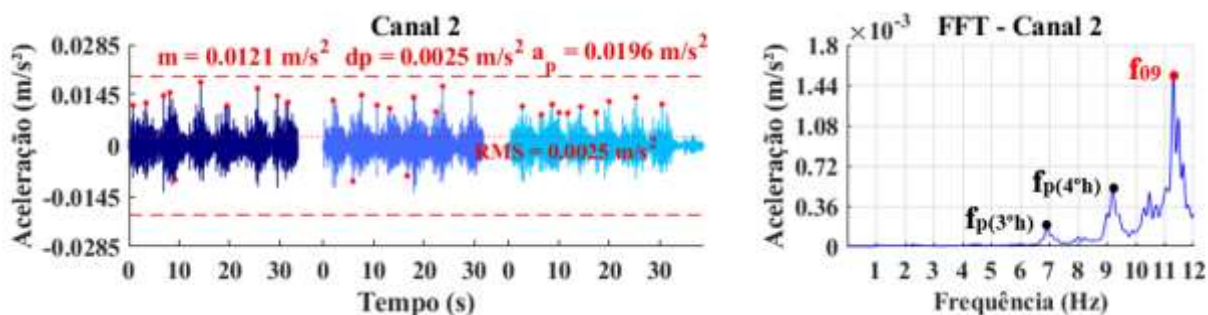


Figura 98 – Resposta dinâmica do piso 4 para caminhada rápida em trajetória perpendicular.

Analisando todas as respostas dinâmicas obtidas no piso 4 para os três tipos de caminhada (lenta, normal e rápida), no que tange as acelerações de pico, nota-se que os resultados mais significativos, ocorreram quando o usuário se encontrava caminhando sobre o piso em ressonância no terceiro harmônico da frequência de passo de 2,3 Hz com o terceiro modo de vibração da estrutura (6,9 Hz) – aceleração de pico de 0,029 m/s<sup>2</sup>. Este caso foi mais crítico do que a excitação causada pela ressonância no terceiro harmônico da frequência de passo de 2 Hz com a frequência fundamental do piso (5,9 Hz), que levou a uma aceleração de pico de 0,023 m/s<sup>2</sup>. Isso mostra que uma previsão de resposta baseada na primeira frequência natural subestimaria a pior resposta do piso.

Assim, da análise do quarto piso conclui-se que a frequência ressonante mais baixa de um sistema estrutural com pisos interconectados contínuos, não é necessariamente a frequência natural associada ao primeiro modo de vibração, como acontece no geral para pisos isolados. É importante ressaltar que dificilmente uma pessoa consegue manter uma frequência de caminhar constante por muitos passos, muito menos quando o valor de frequência é relativamente alto (2,3 Hz – caminhada rápida).

## 6.2.5 Piso 5

### 6.2.5.1 Caminhada lenta ( $f_p = 1,7$ Hz)

As Figs. 99, 100, 101 e 102 apresentam as respostas dinâmicas típicas, em termos da aceleração vertical, registradas nos pontos de maior amplitude, para a estrutura do piso 5 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 Apêndice B.

Analisando as respostas obtidas de maneira qualitativa, nota-se que a parcela mais significativa de transferência de energia refere-se à contribuição da quinta frequência natural do pavimento associada ao quinto modo de vibração de flexão vertical ( $f_{05} = 8,3$  Hz). Isso ocorre devido à proximidade da quinta frequência natural com o quinto harmônico do caminhar ( $f_{p(5^{\circ}h)} = 8,5$  Hz).

As acelerações máximas encontradas nesse ensaio são apresentadas na Tab. 22 em termos de pico e *RMS*. Nota-se que a máxima aceleração de pico foi de  $0,015$   $m/s^2$ , obtida através da caminhada na direção aleatória, e a máxima aceleração *RMS* foi de  $0,003$   $m/s^2$ , adquirida na trajetória perpendicular.

Observa-se, também, que os picos provenientes do terceiro, quarto e sexto harmônicos do caminhar ( $f_{p(3^{\circ}h)} = 5,1$  Hz,  $f_{p(4^{\circ}h)} = 6,8$  Hz e  $f_{p(6^{\circ}h)} = 10,2$  Hz) estão presentes na resposta da estrutura, apesar de apresentarem amplitudes baixas em relação aos picos associados aos modos naturais de vibração do pavimento. Apesar do sexto harmônico do caminhar se aproximar da frequência referente ao oitavo modo de vibração do piso ( $10,4$  Hz), este não possui energia suficiente para excitá-lo, como pode ser observado a partir da baixa amplitude gerada para essa frequência.

Tabela 22 – Máximas acelerações encontradas no ensaio de caminhada lenta no Piso 5

Direção	Aceleração de pico ( $m/s^2$ )	Aceleração <i>RMS</i> ( $m/s^2$ )
Aleatória	0,015	0,002
Diagonal	0,012	0,002
Paralela	0,009	0,002
Perpendicular	0,016	0,003

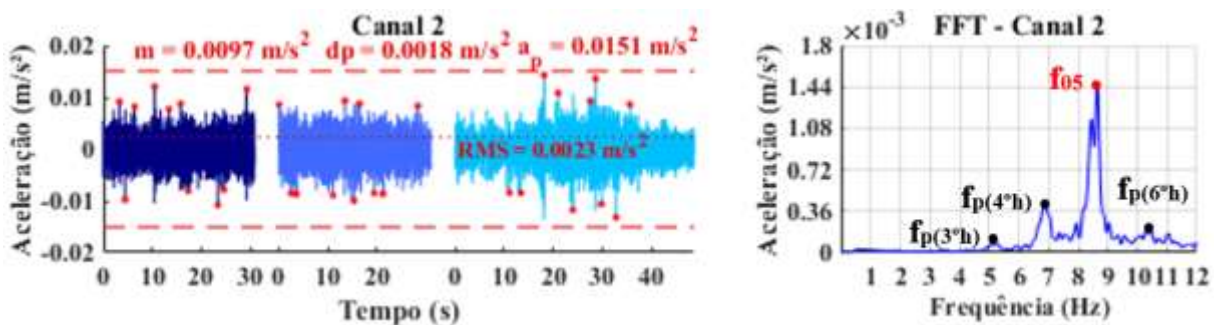


Figura 99 – Resposta dinâmica do piso 5 para caminhada lenta em trajetória aleatória.

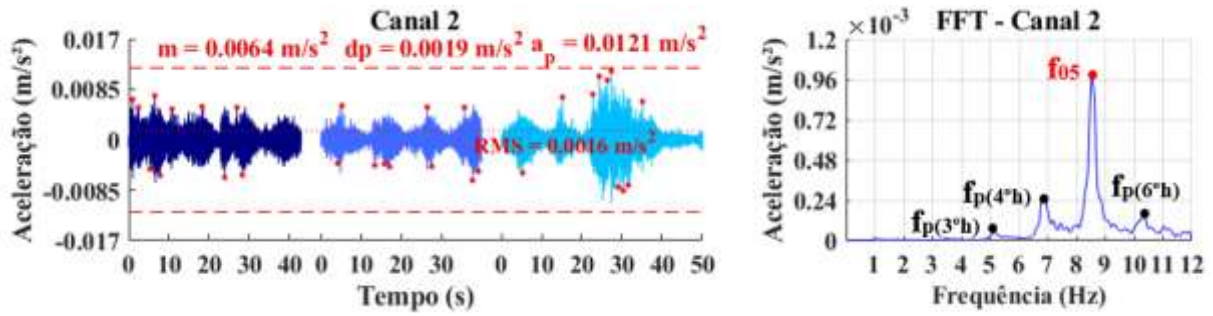


Figura 100 – Resposta dinâmica do piso 5 para caminhada lenta em trajetória diagonal.

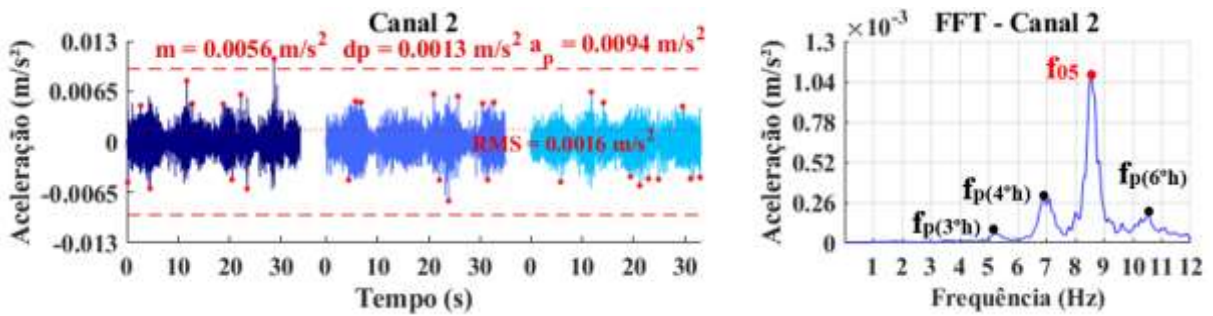


Figura 101 – Resposta dinâmica do piso 5 para caminhada lenta em trajetória paralela.

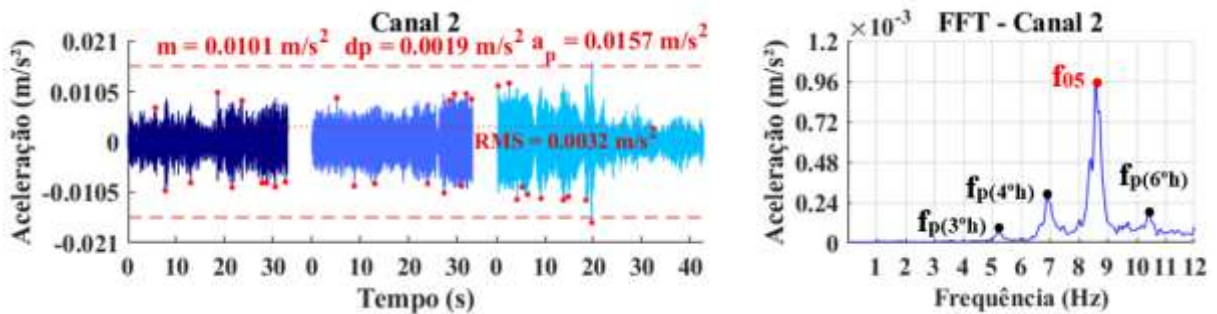


Figura 102 – Resposta dinâmica do piso 5 para caminhada lenta em trajetória perpendicular.

#### 6.2.5.2 Caminhada normal ( $f_p = 2,0$ Hz)

As Figs. 103, 104, 105 e 106 apresentam os gráficos de aceleração no domínio do tempo e da frequência para situação de uma pessoa caminhando com frequência de passo de 2,0 Hz, no ponto de leitura de maior amplitude da resposta dinâmica. As respostas registradas pelos demais canais podem ser vistas no Apêndice B.

As acelerações máximas encontradas nesse ensaio são apresentadas na Tab. 23 em termos de pico e *RMS*. Nota-se que a máxima aceleração de pico foi de 0,021 m/s<sup>2</sup> e a máxima aceleração *RMS* foi de 0,0032 m/s<sup>2</sup> adquiridas por meio do caminhar na trajetória aleatória.

Notam-se claramente nesses espectros que a parcela mais significativa de transferência de energia refere-se à contribuição da quinta frequência natural do pavimento associada ao sexto modo de vibração de flexão vertical ( $f_{05} = 8,3 \text{ Hz}$ ), correspondente a proximidade com a frequência do quarto harmônico de excitação ( $f_{p(4^{\text{th}})} = 4 \times 2,0 = 8,0 \text{ Hz}$ ).

Tabela 23 – Máximas acelerações encontradas no ensaio de caminhada normal no Piso 5

Direção	Aceleração de pico ( $\text{m/s}^2$ )	Aceleração <i>RMS</i> ( $\text{m/s}^2$ )
Aleatória	0,021	0,002
Diagonal	0,014	0,002
Paralela	0,013	0,002
Perpendicular	0,011	0,002

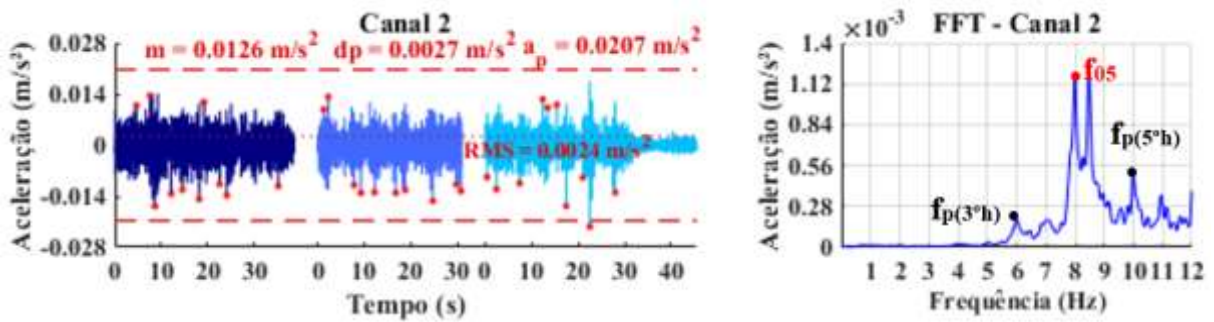


Figura 103 – Resposta dinâmica do piso 5 para caminhada normal em trajetória aleatória.

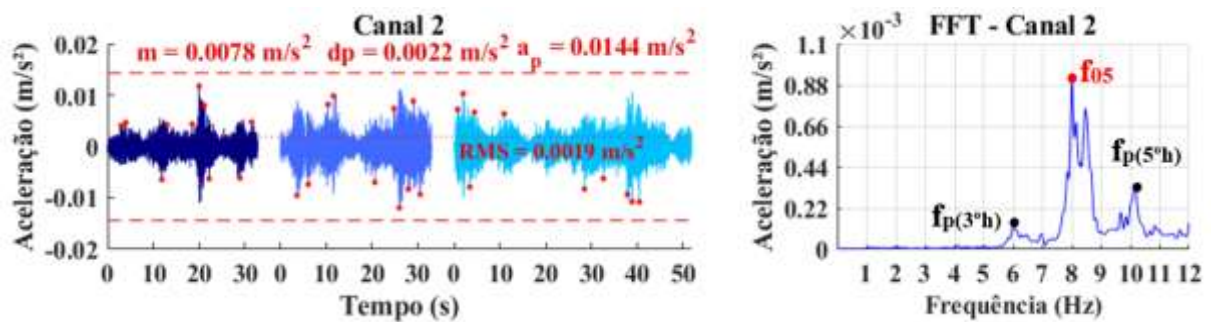


Figura 104 – Resposta dinâmica do piso 5 para caminhada normal em trajetória diagonal.

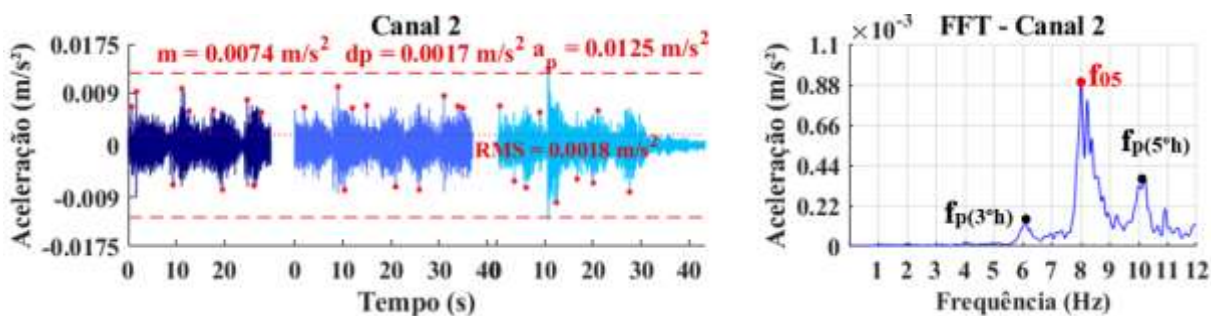


Figura 105 – Resposta dinâmica do piso 5 para caminhada normal em trajetória paralela.

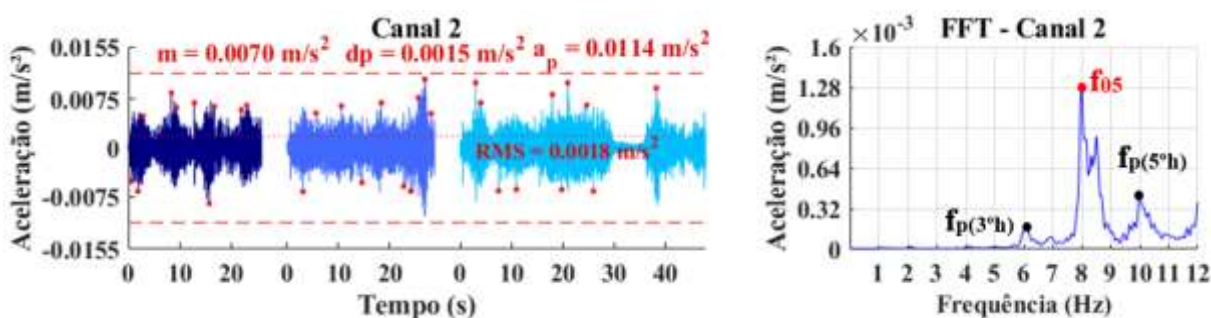


Figura 106 – Resposta dinâmica do piso 5 para caminhada normal em trajetória perpendicular.

### 6.2.5.3 Caminhada rápida ( $f_p = 2,3$ Hz)

As Figs 107, 108, 109 e 110 apresentam as respostas dinâmicas típicas, em termos da aceleração vertical, registradas nos pontos de maior amplitude, para a estrutura do piso 5 sendo excitada pelo caminhar de uma pessoa com frequência de passo de 2,3 Hz. As respostas registradas pelos demais canais podem ser vistas no Apêndice B.

A Tab. 24 apresenta as acelerações máximas encontradas nesse ensaio em termos de pico e RMS. A máxima aceleração de pico foi de 0,032 m/s<sup>2</sup> e a máxima aceleração RMS foi de 0,004 m/s<sup>2</sup> adquiridas através da caminhada na trajetória aleatória.

Observa-se que houve a excitação da quinta e nona frequência natural do pavimento ( $f_{05} = 8,45$  Hz e  $f_{09} = 11,1$  Hz), devido à proximidade destas com a frequência do quarto e quinto harmônicos do caminhar ( $f_{p(4^o h)} = 9,2$  Hz e  $f_{p(5^o h)} = 11,5$  Hz).

Tabela 24 – Máximas acelerações encontradas no ensaio de caminhada rápida no Piso 5

Direção	Aceleração de pico (m/s <sup>2</sup> )	Aceleração e RMS (m/s <sup>2</sup> )
Aleatória	0,032	0,004
Diagonal	0,015	0,002
Paralela	0,020	0,003
Perpendicular	0,018	0,002

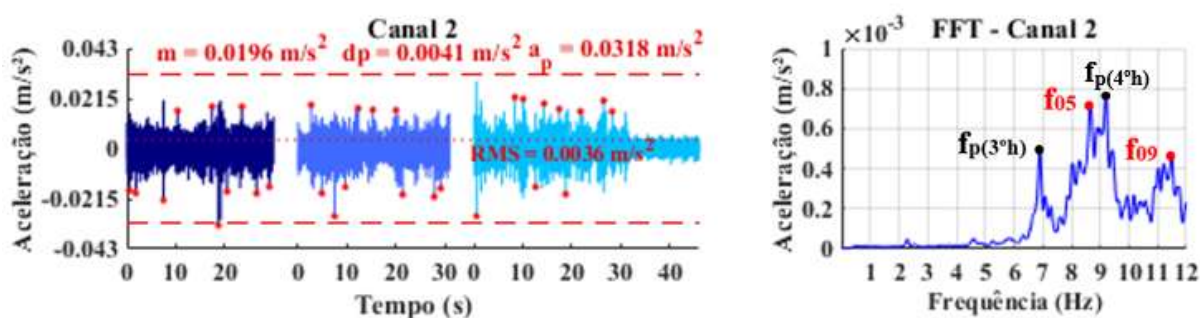


Figura 107 – Resposta dinâmica do piso 5 para caminhada rápida em trajetória aleatória.

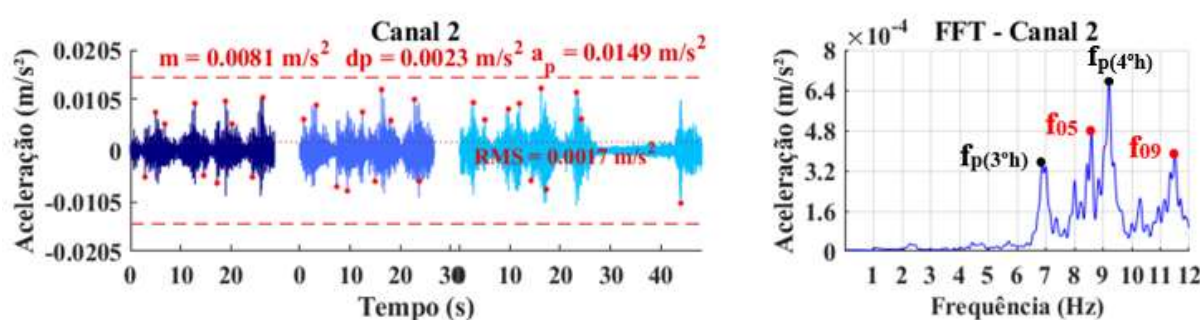


Figura 108 – Resposta dinâmica do piso 5 para caminhada rápida em trajetória diagonal.

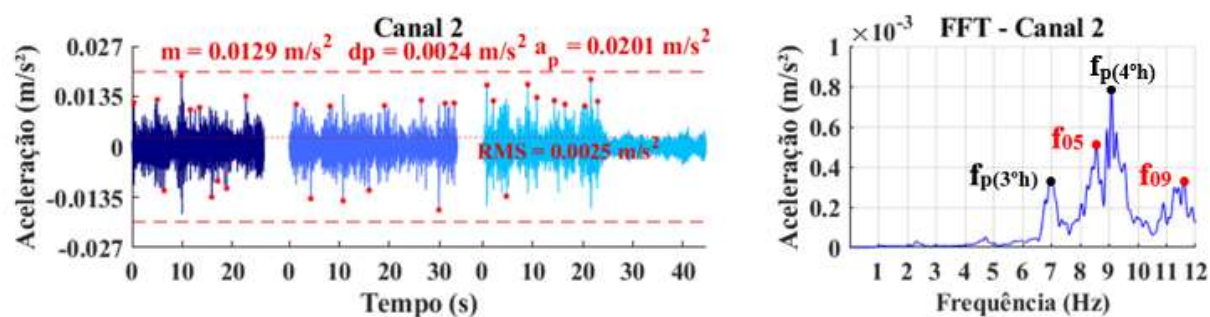


Figura 109 – Resposta dinâmica do piso 5 para caminhada rápida em trajetória paralela.

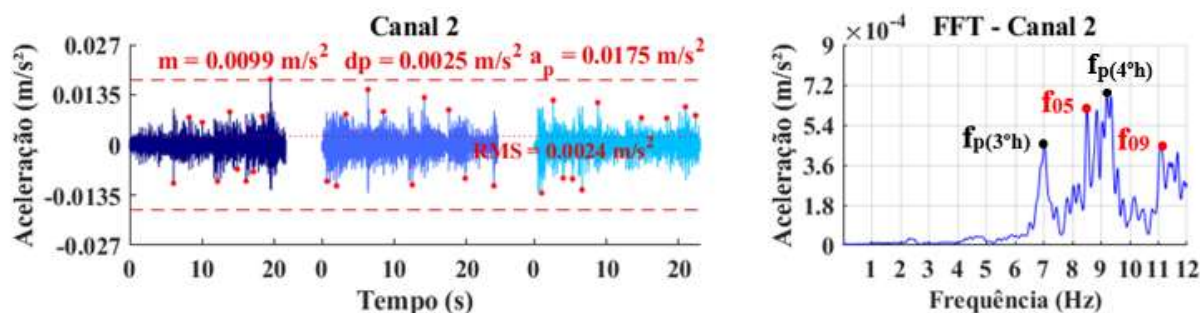


Figura 110 – Resposta dinâmica do piso 5 para caminhada rápida em trajetória perpendicular.

Como pode ser visto, os resultados mais significativos obtidos ao longo dos ensaios de vibração forçada para os três tipos de caminhar (lenta, normal e rápida), no que diz respeito aos valores das acelerações de pico, ocorreram quando o usuário se encontrava caminhando sobre o piso em ressonância no terceiro harmônico da frequência de passo de 2,3 Hz com o terceiro modo de vibração da estrutura (6,9 Hz) e próximo a segunda frequência natural (6,5 Hz) – aceleração de pico de 0,032 m/s<sup>2</sup>. Este caso foi mais crítico do que a excitação causada pela ressonância no terceiro harmônico da frequência de passo de 2 Hz com a frequência fundamental do piso (5,9 Hz), que levou a uma aceleração de pico de 0,021 m/s<sup>2</sup>. Isso mostra que uma previsão de resposta baseada na primeira frequência natural subestimaria a pior resposta do piso.

Assim, da análise do quinto piso conclui-se que a frequência ressonante mais baixa de um sistema estrutural com pisos interconectados contínuos não é necessariamente a primeira frequência natural associada ao primeiro modo de vibração, como acontece no geral para pisos isolados. É importante ressaltar que dificilmente uma pessoa consegue manter uma frequência de caminhar constante por muitos passos, muito menos quando o valor de frequência é relativamente alto (2,3 Hz – caminhada rápida).

### 6.3 Análise do conforto humano

Verificou-se a adequabilidade do pavimento em estudo quando submetidos ao caminhar humano de uma pessoa, no que tange ao desconforto relacionado a vibrações. Deste modo, as respostas dinâmicas encontradas na análise dinâmica experimental para os cinco pisos foram comparadas com os valores limites propostos pela literatura técnica do AISC/CISC DG 11 (2016), da ISO 2631-2 (2003) e das normas brasileiras ABNT NBR 8800:2008 e ABNT NBR 6118:2014.

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

### **6.3.1 Avaliação dos níveis de vibração da estrutura segundo as normas brasileiras (NBR 6118:2014 e NBR 8800:2008)**

Conforme as recomendações da ABNT NBR 8800:2008, os níveis de vibração devem ser verificados quanto a um estado limite de serviço. Para o caso de estruturas sujeitas a ações constantes de caminhada como escritórios e estruturas similares, indica-se o valor de 4 Hz como o limite inferior para a frequência fundamental do piso. Desta forma, como a primeira frequência natural do pavimento é 5,90 Hz, conclui-se que essa estrutura atende aos critérios adotados por essa norma. Porém, ressalta-se que, segundo a própria ABNT NBR 8800:2008, esses critérios partem do pressuposto de uma avaliação simplificada de vibração gerada por atividades humanas, podendo não representar uma solução ideal para o problema. Assim, recomenda-se que os projetos estruturais avaliem os problemas de vibrações de pisos por meio de uma análise dinâmica, que leve em consideração as características e a natureza das excitações dinâmicas, limites para o conforto humano em função do uso e ocupação das áreas do piso, a frequência fundamental da estrutura do piso, a razão de amortecimento modal e os pesos efetivos do piso.

Apesar da estrutura em análise neste trabalho se tratar de um sistema misto, avaliou-se também o critério recomendado pela norma ABNT NBR 6118:2014, específica para estruturas de concreto. Para estruturas destinadas a ocupação de escritórios, caso mais compatível com a destinação dos pisos em estudo, essa norma recomenda que a frequência fundamental da estrutura seja afastada em 20% da frequência crítica (4 Hz). Assim, como a primeira frequência natural do pavimento é 5,90 Hz, conclui-se que essa estrutura atende aos critérios recomendados por essa norma. O critério recomendado pela ABNT NBR 6118:2014 parte do pressuposto que afastar a primeira frequência natural da estrutura da ressonância com os dois primeiros harmônicos do caminhar humano é suficiente. Porém, casos de ressonância até mesmo com o quarto harmônico do caminhar são observados, conforme concluído por outros autores. Assim, a frequência crítica para o caso de escritórios, por exemplo, deveria ser de no mínimo 8Hz.

Ressalta-se também que um método de avaliação de vibração excessiva baseado somente em análise de frequências mínimas não é aconselhável, pois a estrutura pode apresentar vibrações incômodas aos seus usuários mesmo que não ocorra ressonância com a fonte de excitação (Varela, 2004). Dessa forma, a estrutura em estudo foi também avaliada segundo normas e guias de projeto internacionais, baseados em limites de aceleração.

### 6.3.2 Avaliação dos níveis de aceleração segundo AISC/CISC DG 11 e ISO 2631-2

O AISC/CISC DG 11 (2016) recomenda que as acelerações de pico em um piso sejam limitadas a 0,5% g (0,049 m/s<sup>2</sup>) e, a ISO 2631-2 (2003), sugere um limite para a aceleração *RMS* igual a 0,02 m/s<sup>2</sup>. Em ambos os códigos foram escolhidos os limites referentes à ocupação de escritório, uma vez que esta é a atividade que mais se assemelha a futura destinação do edifício. Os resultados de aceleração de pico e *RMS* encontrados para os cinco pisos são apresentados nas Tabs. 25, 26, 27, 28 e 29, onde são comparados aos limites propostos pelos códigos citados.

Tabela 25 – Comparação das acelerações obtidas no Piso 1 com limites normativos

Piso	Frequência de passo (Hz)	Trajatória	Aceleração de Pico (m/s <sup>2</sup> )	Conforto Humano AISC	Aceleração <i>RMS</i> (m/s <sup>2</sup> )	Conforto Humano ISO 2631-2
1	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
	2,16	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

Tabela 26 - Comparação das acelerações obtidas no Piso 2 com limites normativos

<b>Piso</b>	<b>Frequência de passo (Hz)</b>	<b>Trajectoria</b>	<b>Aceleração de Pico (m/s<sup>2</sup>)</b>	<b>Conforto Humano AISC</b>	<b>Aceleração RMS (m/s<sup>2</sup>)</b>	<b>Conforto Humano ISO 2631-2</b>
2	1,7	Aleatória	0,018	Atende	0,002	Atende
		Diagonal	0,009	Atende	0,002	Atende
		Paralela	0,009	Atende	0,001	Atende
		Perpendicular	0,010	Atende	0,001	Atende
	2	Aleatória	0,021	Atende	0,002	Atende
		Diagonal	0,009	Atende	0,002	Atende
		Paralela	0,014	Atende	0,002	Atende
		Perpendicular	0,009	Atende	0,002	Atende
	2,3	Aleatória	0,031	Atende	0,003	Atende
		Diagonal	0,014	Atende	0,002	Atende
		Paralela	0,001	Atende	0,002	Atende
		Perpendicular	0,016	Atende	0,002	Atende

Tabela 27 - Comparação das acelerações obtidas no Piso 3 com limites normativos

<b>Piso</b>	<b>Frequência de passo (Hz)</b>	<b>Trajectoria</b>	<b>Aceleração de Pico (m/s<sup>2</sup>)</b>	<b>Conforto Humano AISC</b>	<b>Aceleração RMS (m/s<sup>2</sup>)</b>	<b>Conforto Humano ISO 2631-2</b>
3	1,7	Aleatória	0,013	Atende	0,002	Atende
		Diagonal	0,008	Atende	0,001	Atende
		Paralela	0,007	Atende	0,001	Atende
		Perpendicular	0,011	Atende	0,002	Atende
	2	Aleatória	0,016	Atende	0,002	Atende
		Diagonal	0,009	Atende	0,001	Atende
		Paralela	0,009	Atende	0,002	Atende
		Perpendicular	0,013	Atende	0,002	Atende
	2,3	Aleatória	0,024	Atende	0,002	Atende
		Diagonal	0,019	Atende	0,002	Atende
		Paralela	0,011	Atende	0,001	Atende
		Perpendicular	0,002	Atende	0,002	Atende

Tabela 28 - Comparação das acelerações obtidas no Piso 4 com limites normativos

Piso	Frequência de passo (Hz)	Trajétória	Aceleração de Pico (m/s <sup>2</sup> )	Conforto Humano AISC	Aceleração RMS (m/s <sup>2</sup> )	Conforto Humano ISO 2631-2
4	1,7	Aleatória	0,023	Atende	0,002	Atende
		Diagonal	0,009	Atende	0,001	Atende
		Paralela	0,017	Atende	0,002	Atende
		Perpendicular	0,012	Atende	0,002	Atende
	2	Aleatória	0,029	Atende	0,004	Atende
		Diagonal	0,012	Atende	0,002	Atende
		Paralela	0,016	Atende	0,002	Atende
		Perpendicular	0,014	Atende	0,002	Atende
	2,3	Aleatória	0,029	Atende	0,004	Atende
		Diagonal	0,021	Atende	0,003	Atende
		Paralela	0,018	Atende	0,003	Atende
		Perpendicular	0,020	Atende	0,003	Atende

Tabela 29 - Comparação das acelerações obtidas no Piso 5 com limites normativos

Piso	Frequência de passo (Hz)	Trajétória	Aceleração de Pico (m/s <sup>2</sup> )	Conforto Humano AISC	Aceleração RMS (m/s <sup>2</sup> )	Conforto Humano ISO 2631-2
5	1,7	Aleatória	0,015	Atende	0,002	Atende
		Diagonal	0,012	Atende	0,002	Atende
		Paralela	0,009	Atende	0,002	Atende
		Perpendicular	0,016	Atende	0,003	Atende
	2	Aleatória	0,021	Atende	0,002	Atende
		Diagonal	0,014	Atende	0,002	Atende
		Paralela	0,013	Atende	0,002	Atende
		Perpendicular	0,011	Atende	0,002	Atende
	2,3	Aleatória	0,032	Atende	0,004	Atende
		Diagonal	0,015	Atende	0,002	Atende
		Paralela	0,020	Atende	0,003	Atende
		Perpendicular	0,018	Atende	0,002	Atende

As maiores acelerações de pico e *RMS* encontradas para os cinco pisos foram  $a_p = 0,030$  m/s<sup>2</sup> ( $a_{p\_rms} = 0,004$  m/s<sup>2</sup>) para o piso 1,  $a_p = 0,031$  m/s<sup>2</sup> ( $a_{p\_rms} = 0,003$  m/s<sup>2</sup> em *RMS*) para o piso 2,  $a_p = 0,024$  m/s<sup>2</sup> ( $a_{p\_rms} = 0,002$  m/s<sup>2</sup> em *RMS*) para o piso 3,  $a_p = 0,029$  m/s<sup>2</sup> ( $a_{p\_rms} = 0,004$  m/s<sup>2</sup> em *RMS*) para o piso 4 e  $a_p = 0,032$  m/s<sup>2</sup> ( $a_{p\_rms} = 0,004$  m/s<sup>2</sup> em *RMS*) para o piso 5, todas referente a excitação causada por uma pessoa caminhando com frequência de passo de 2,3 Hz (caminhada rápida) em trajetória aleatória.

Em termos do comportamento geral, observando os resultados das Tabs. 25, 26, 27, 28 e 29 para os cinco pisos estudados, todas as acelerações de pico e *RMS* foram inferiores aos limites estabelecidos pelo AISC/CISC DG 11 (2016) e ISO 2631-2 (2003). Assim, pode-se inferir que o sistema estrutural investigado, em função do caminhar humano de uma pessoa, não apresentará problemas de conforto humano. Ressalta-se que critérios baseados em valores de aceleração de pico são considerados conservadores, visto que um pico isolado de aceleração dificilmente comprometerá o conforto de pessoas sobre o piso. A principal crítica ao uso do valor *RMS* baseia-se 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*. Assim, fica evidente a importância de analisar a estrutura segundo os diferentes critérios, dando atenção aos valores máximos de aceleração ocorridos durante ensaios com a sua correspondente frequência e os valores *RMS*.

#### **6.4 Análise da influência do número de pessoas sobre o piso na resposta dinâmica**

A fim de avaliar a influência da quantidade de pessoas caminhando sobre o piso na resposta dinâmica, foi realizado o monitoramento do piso 1 considerando o caminhar de quatro pessoas (ver Fig. 111), com distintos biotipos e pesos, em frequência de passo lenta ( $f_p = 1,7$  Hz), normal ( $f_p = 2,0$  Hz) e rápida ( $f_p = 2,3$  Hz). Todos os tipos de caminhada se deram em trajetória aleatória, por ser o tipo de direção que apresentou os maiores resultados de aceleração de pico nos ensaios de vibração forçada considerando o caminhar de uma pessoa e por representar melhor a situação de uso cotidiano.

O acelerômetro foi fixado no ponto de maior amplitude dos modos fundamentais de vibração do piso 1, em especial os três primeiros modos, identificado através das repostas dos ensaios de vibração forçada considerando uma pessoa. A Fig. 112 indica a localização do acelerômetro utilizado. Os resultados obtidos a partir dos ensaios foram expressos em termos de aceleração de pico e *RMS* e podem ser vistos nas Figs. 113, 114 e 115. Essas respostas foram comparadas com as obtidas para o piso 1 excitado por apenas uma pessoa e utilizadas na avaliação em serviço do pavimento no que tange ao conforto humano, através da aplicação do AISC/CISC DG 11 (2016) e ISO 2631-2 (2003).



Figura 111 – Realização de ensaios complementares para a avaliação da influência do número de pessoas na resposta dinâmica do piso.

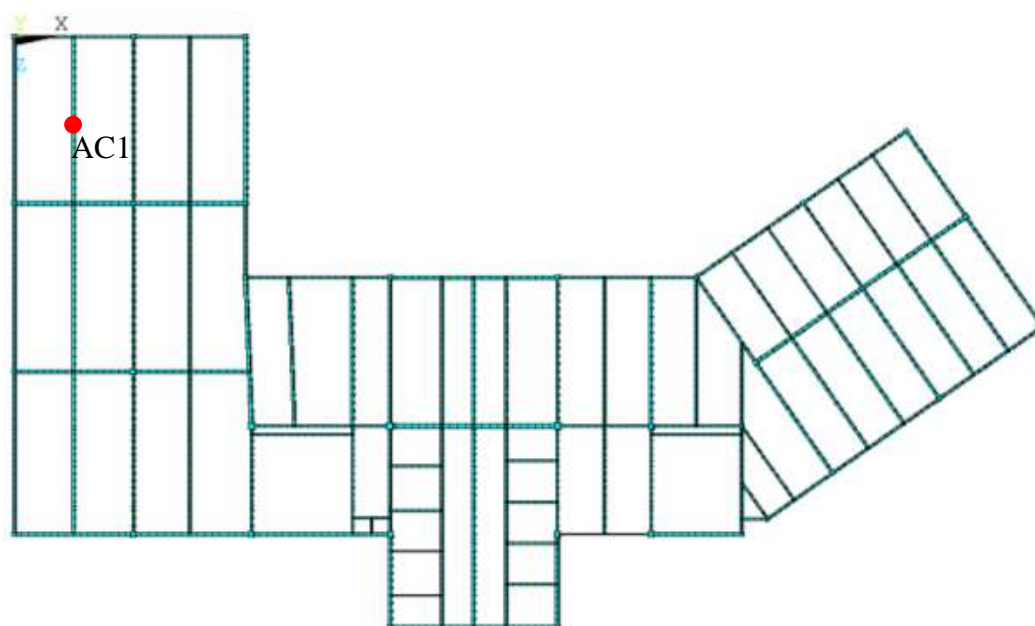


Figura 112 – Localização do acelerômetro utilizado nos ensaios.

A máxima aceleração de pico que poderia ocorrer no piso 1 considerando a excitação causada por quatro pessoas foi determinada a partir de uma análise probabilística calculando-se a média, o desvio padrão. Para o cálculo da aceleração de pico média, foram utilizados os dez maiores valores obtidos em cada ensaio, identificados nas Figs. 113, 114 e 115 pelos pontos vermelhos, com indicação de média e respectivo desvio padrão dos valores. As linhas tracejadas em vermelho indicam o intervalo de confiança de  $3\sigma$ , indicando que em 99,7% dos casos a aceleração de pico máxima ocorreria dentro desta faixa.

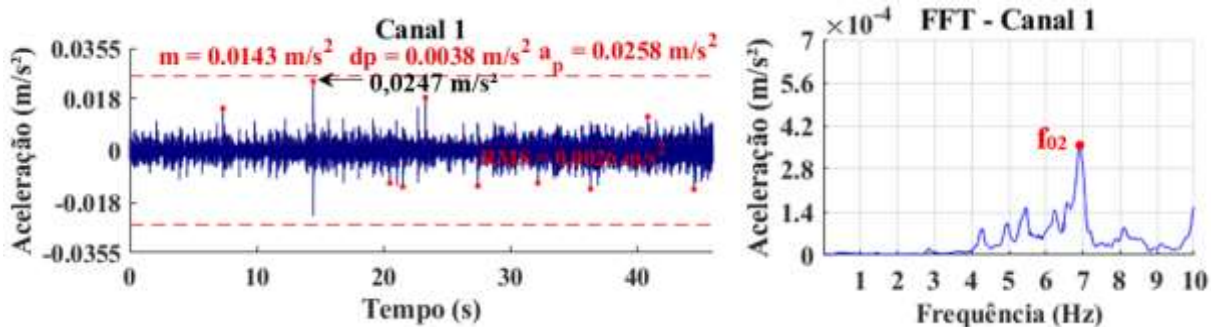


Figura 113 – Resposta dinâmica do piso 1 para quatro pessoas caminhando com  $f_p = 1,7$  Hz.

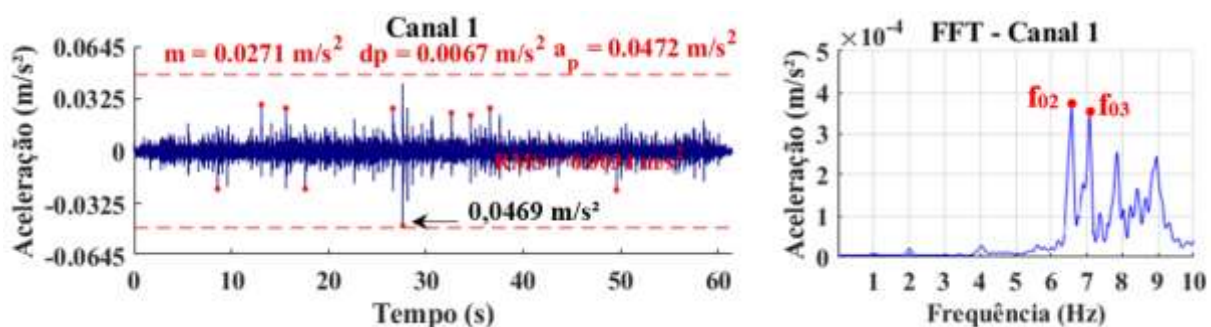


Figura 114 – Resposta dinâmica do piso 1 para quatro pessoas caminhando com  $f_p = 2,0$  Hz.

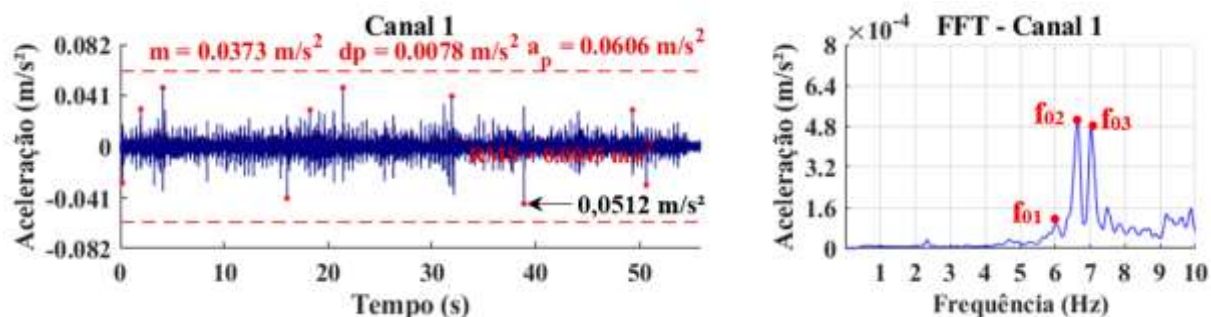


Figura 115 – Resposta dinâmica do piso 1 para quatro pessoas caminhando com  $f_p = 2,3$  Hz.

Nota-se que o maior resultado obtido para aceleração de pico ocorreu quando as quatro pessoas se encontravam caminhando sobre o piso em ressonância com o terceiro modo de vibração da estrutura ( $f_{03} = 6,97$  Hz) em relação ao terceiro harmônico da frequência de passo rápida ( $f_{p(3^{\text{ª}}h)} = 3 \times 2,3 = 6,9$  Hz), levando a uma aceleração máxima de  $a_p = 0,061 m/s^2$ . Os demais ensaios de vibração forçada realizados que conduziram a outros valores de aceleração de pico, em ordem decrescente de resposta são referente à caminhada normal ( $f_p = 2,0$  Hz), com  $a_p = 0,047 m/s^2$ , e à caminhada lenta ( $f_p = 1,7$  Hz), com  $a_p = 0,026 m/s^2$ .

Os picos nas frequências de vibração em 5,9 Hz, 6,5 Hz, 6,97 Hz são notórios, associados aos três primeiros modos de flexão vertical do piso 1, respectivamente, que

dominam as respostas dinâmicas. Em relação as acelerações *RMS*, foram obtidos os valores de  $a_{p\_rms} = 0,0026 \text{ m/s}^2$  para caminhada lenta,  $a_{p\_rms} = 0,0034 \text{ m/s}^2$  para caminhada normal e  $a_{p\_rms} = 0,0045 \text{ m/s}^2$  para caminhada rápida.

Pode-se observar que o caminhar de quatro pessoas em frequência de 2,3 Hz apresentou uma aceleração de pico de  $0,061 \text{ m/s}^2$ , acima do limite recomendado pelo AISC/CISC DG11 (2016), enquanto que no ensaio com uma pessoa caminhando no piso 1 nessa mesma frequência e mesma trajetória o valor encontrado foi de  $0,030 \text{ m/s}^2$ . Porém, em relação as acelerações *RMS* os valores foram inferiores ao estipulado como limite pela ISO 2631-2 (2003). Desta análise conclui-se que o aumento do número de pessoas caminhando ocasionam o aumento das amplitudes de aceleração de pico. O aumento, para o piso 1, excedeu o limite estabelecido pelo AISC/CISC DG 11 (2016) para o conforto humano.

Fica evidente que a quantidade de usuários que compõem o carregamento afeta de forma significativa a resposta dinâmica dos pisos mistos investigados neste trabalho. Desta forma fica clara a relevância da realização de ensaios considerando a variação da quantidade de pessoas sobre o piso de forma que essa atividade seja o mais próximo possível da real situação de utilização da estrutura. Tal fato deve ser também levado em consideração no projeto de estruturas desse tipo.

Vale ressaltar que todos os resultados analisados são referentes ao comportamento da estrutura durante a fase de construção e dessa forma o fator de amortecimento encontrado nos ensaios não é o final e será modificado devido a introdução dos elementos não estruturais como forros e divisórias internas. Outro fator que contribuirá para essa alteração é o conhecimento do layout da arquitetura, uma vez que este delimita o caminho que os usuários irão percorrer dentro da estrutura, sendo importante para o desenvolvimento da excitação e análise com base nessas informações.

# 7

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 7.1 Conclusões

O presente trabalho teve como objetivo a avaliação da resposta dinâmica experimental de um sistema de piso misto real, situado na cidade de Belo Horizonte/MG e em fase de construção, quando submetido a excitações dinâmicas oriundas de atividades humanas. Foram instrumentados cinco pisos de um pavimento típico da edificação com área total de 1300 m<sup>2</sup>, que finalizada será utilizada como um hospital escola de uma faculdade de medicina. Diversos estudos mostram que excitações provocadas por atividades humanas, na maioria dos casos, provocam vibrações em pisos mistos e por isso as acelerações críticas (pico e *RMS*) devem ser avaliadas segundo normas e guias de projeto sob o ponto de vista do conforto humano.

Inicialmente foi elaborado um modelo numérico preliminar em elementos finitos, através do programa ANSYS, onde foram extraídas as frequências naturais do pavimento e seus respectivos modos de vibração. Tal embasamento é importante para a definição dos pontos de monitoramento e excitação dos ensaios experimentais. Foi efetuada uma análise modal onde se identificaram frequências entre 5,71 Hz e 10,69 Hz para os modos predominantemente verticais.

Em seguida foi realizado um extenso programa experimental com mais de 180 ensaios experimentais *in loco* de vibração livre e forçada. Através dos ensaios de vibração livre foram determinadas as frequências naturais associadas ao pavimento e as taxas de amortecimento modal dos três primeiros modos de vibração. Para sistemas de múltiplos pisos (vários painéis de laje) com uma distribuição de rigidez relativamente uniforme, caso em estudo, notou-se que as primeiras frequências naturais são muito próximas, mostrando o fenômeno da concentração de modo, facilmente excitadas sob ação de caminhadas. Os componentes de vibração dos modos mais altos são significativos e não devem ser ignorados em uma avaliação da resposta à vibração do piso.

A determinação do amortecimento modal pelo método do decremento logarítmico levou à obtenção de valores de 1,26% para o primeiro modo, 1,03% para o segundo modo e 1,19% para o terceiro modo, inferiores aos encontrados na literatura técnica (2% a 5%). Os valores inferiores são justificados pela fase de construção em que a edificação se encontrava no momento da realização dos ensaios experimentais, uma vez que a adição dos elementos não estruturais contribui sensivelmente para o aumento do amortecimento do piso.

Visando representar de forma mais realista as solicitações dinâmicas induzidas pelas atividades humanas, foram realizados ensaios de vibração forçada, onde cada um dos cinco pisos foi excitado por caminhadas com três tipos de frequências de passo (1,7 Hz, 2,0 Hz e 2,3 Hz) e em diferentes direções, a fim de garantir a variabilidade das trajetórias possíveis na futura utilização do pavimento pelos ocupantes.

As respostas dinâmicas mais severas para um piso de baixa frequência geralmente estão associadas a proximidade das frequências fundamentais da estrutura e um harmônico da frequência do passo (ressonância). Para pisos de baixa frequência, a escolha da frequência de passo crítica é baseada na frequência fundamental. Porém, para sistemas de múltiplos pisos (vários painéis de laje), o primeiro modo associado ao pavimento não é necessariamente o mais crítico. Nesse estudo, a maior transmissão de energia na resposta do sistema da maioria dos pisos investigados se deu no segundo modo de vibração. Assim, nota-se a importância de estudar cuidadosamente as várias formas modais obtidas através da análise modal (experimental ou numérica) para correta identificação do modo que produz maior contribuição na resposta dinâmica.

Os cinco pisos sob estudo foram avaliados conforme as recomendações da ABNT NBR 8800:2208 e ABNT 6118:2014 e apresentam-se dentro dos limites recomendados. Entretanto, tais critérios são muito simplificados e, neste trabalho, sugere-se que sejam utilizados somente para avaliações iniciais e projetos conceituais de pisos sujeitos a atividades humanas. Para o projeto executivo, recomenda-se que os pisos sujeitos a atividade humana sejam avaliados por meio de análises dinâmicas considerando as características e a natureza das excitações, limites para o conforto humano em função do uso e ocupação, frequências fundamentais da estrutura, a razão de amortecimento modal e massa efetiva.

Considerando a excitação provocada pelo caminhar de uma pessoa, nenhum dos pisos do pavimento analisado violou os critérios de conforto humano propostos pelo AISC/CISC DG 11 (2016) e ISO 2631-2 (2003). Como não existem critérios normativos para a definição das ações dinâmicas de pessoas sobre os pisos, foi avaliada também uma situação com múltiplos indivíduos caminhando sobre a estrutura. Assim, o piso 1 foi submetido a ação dinâmica de um grupo de quatro pessoas em diferentes passos, o que resultou no aumento sensível dos valores de aceleração de pico e *RMS* e indicando que vibrações induzidas por um número maior de pessoas podem gerar vibrações excessivas. Neste caso, os limites de conforto humano do AISC/CISC DG 11 (2016) não foram respeitados. Desta forma fica evidente a dependência dos resultados com o número de pessoas e a relevância da realização de ensaios com múltiplas pessoas. Entretanto a definição do número de pessoas bem como a caracterização das ações (caminhada, atividade rítmica, entre outros) devem reproduzir uma situação real de utilização da estrutura, afim de resultar em avaliações de conforto representativas. Vale ressaltar que a estrutura se encontra em fase de construção e fatores como o fator de amortecimento devido aos elementos não estruturais contribuirão para melhorar o comportamento da estrutura depois de pronta.

De modo geral, a análise de conforto em termos de aceleração de pico pode levar a valores conservadores, uma vez que um pico isolado de aceleração pode comprometer um piso que, na verdade, durante toda a excitação, dificilmente será submetido a esse pico de vibração por muitas vezes. Porém, considerando a futura utilização da edificação em estudo como um hospital escola, é importante destacar que para pisos em que se precisa ter um alto grau de conforto, como salas de operação e salas de instrumento de precisão, a aceleração de pico apresentaria um efeito adverso e considerável.

Por fim, entende-se que os valores de aceleração de pico e *RMS* apresentam especificidades vantajosas para cada tipo de situação, e com isso são considerados critérios válidos e ambos devem ser satisfeitos para garantir o conforto dos ocupantes de uma edificação. Ressalta-se que o estudo apresentado é instrutivo e não tem como objetivo afirmar que um guia de projeto ou outro é mais preciso. Apresenta-se aqui uma contribuição para avaliar o comportamento estrutural de pisos mistos submetidos a excitações dinâmicas associadas ao caminhar de pessoas. Finalmente, ressalta-se a importância de o projetista de estruturas possuir o conhecimento da atividade a ser desempenhada sobre o sistema estrutural, visando o

desenvolvimento de um projeto racional e otimizado, de acordo com procedimentos correntes previstos nas normas e recomendações de projeto baseados em critérios de conforto humano.

## **7.2 Sugestões para trabalhos futuros**

No presente estudo, um vasto estudo experimental foi realizado visando analisar a resposta dinâmica de cinco pisos mistos quando submetido a ações provenientes do caminhar humano em diferentes direções e frequências de passo. A seguir são apresentadas sugestões para futuras pesquisas que possam dar continuidade nos temas aqui tratados:

Desenvolver análises dinâmicas forçadas através do modelo numérico desenvolvido nesse trabalho, para comparação com os valores obtidos experimentalmente;

Desenvolver análises numéricas usando modelos biodinâmicos, que descrevem o movimento do corpo humano e sua biomecânica interna – e propriedades de massa, rigidez e amortecimento de várias partes do corpo – para representar a interação pessoa-estrutura;

Realizar novos ensaios nos pisos depois de finalizados, analisando a evolução da taxa de amortecimento e da resposta dinâmica da estrutura à medida que as etapas construtivas avançam;

Estudar e propor critérios de projeto baseados conjuntamente em aceleração de pico e *RMS*, no que tange ao conforto humano;

Estudar e propor critérios para avaliação da ação dinâmica induzida por múltiplas pessoas sobre o piso.

# 8

## REFERÊNCIAS

AGUIAR, J. V. *Modelagem do comportamento estrutural dinâmico e avaliação dos critérios de projeto para conforto humano de edifícios submetidos a ações humanas rítmicas sobre os pisos*. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

ALLEN, D. E. Floor vibration from aerobics. *Can J. Civ. Eng.*, vol. 17, p. 771–779, 1990.

ALLEN, D. E.; MURRAY, T. M. Design Criterion for Vibrations to Walking. *Engineering Journal of American Institute of Steel Construction*, 4th quarter, pp. 117- 129, 1993.

ANSYS Swanson Analysis Systems Inc. (2009), Theory Reference (versão 12.1).

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.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS ABNT NBR 15812-1: Alvenaria estrutural – Blocos cerâmicos. Parte 1: Projetos. Rio de Janeiro. 41 p, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118 – Projeto de estruturas de concreto. Rio de Janeiro. 2014.

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

BACHMANN, H., Lively Footbridges a Real Challenge. *In: PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE DESIGN AND DYNAMIC BEHAVIOR OF FOOTBRIDGES*, Paris: 2002, p. 18-30.

BACHMANN, H.; AMMANN, W. Vibrations in structures: induced by man and machines. IABSE-AIPC-IVBH, Zurich, Switzerland, 1987.

BATTISTA, R. C.; VARELA, W. D. Medidas corretivas para vibrações de painéis contínuos de lajes de edifícios. *In: XXX JORNADAS SUL-AMERICANAS DE ENGENHARIA ESTRUTURAL*, Brasília, 2002.

BERCZYNSKY, S.; WROBLEWSKI, T. Experimental Verification of Natural Vibration Models of Steel-concrete Composite Beams. *Journal of Vibration Control*, v. 16, p. 2057-2081, 2010.

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.

BROWNJOHN J.M.W. and MIDDLETON C. Efficient Dynamic Performance Assessment of a Footbridge. *Bridge Engineering*, p. 185-192, 2005.

BROWNJOHN, J. M. W.; MIDDLETON, C. J. Procedures for vibration serviceability assessment of high-frequency floors. *Engineering Structures*, 1548–1559, 2008.

CAMPISTA, F, F. *Análise de vibrações e estudo de conforto humano sobre pisos mistos (aço-concreto) submetidos a ações humanas rítmicas*. 2016. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Civil. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

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. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Civil. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

CAMPISTA, F.F.; GASPAR, C.M.R.; SANTOS DA SILVA, J.G. Modelagem das ações humanas rítmicas e estudo do conforto humano sobre edifícios mistos (aço-concreto). *In: XXXVI IBERIAN LATIN-AMERICAN CONGRESS ON COMPUTATIONAL METHODS IN ENGINEERING (CILAMCE)*. Rio de Janeiro: 2015. p. 1-16.

CAMPOSINHOS, R. S.; NEVES, A. S. Lajes Aligeradas com Vigotas Pré-Tensionadas. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – FEUP, Porto. 2015.

CARVALHO, F. W. L. *Procedimento experimental para avaliação do fator de amortecimento em estruturas*. 2002. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

CHEN, S.; ZHANG, R.; ZHANG, J. Human-induced vibration of steel-concrete composite floors. *Structures and Buildings*, v. 171, p. 50-63, 2018.

CLOUGH, R. W.; PENZIEN, J. Dynamics of Structures. McGraw-Hill, 634p. 1993.

CRAIG, R. R.; KURDILA, A. J. Fundamentals of Structural Dynamics. Wiley, New York, 2nd ed., 2006.

DA SILVA, J. G. S.; VELLASCO, P. C. G. da S.; DE ANDRADE, S. A. L.; SOEIRO, F. J. da CP.; WERNECK, R. N. An evaluation of the dynamical performance of composite slabs. *Computer Structures*, 81(18-19):1905–13, 2003.

DALLARD, P.; FITZPATRICK, A. J.; FLINT, A., LE BOURVA, S.; LOW, A.; SMITH, R. M. R.; WILLFORD, M. The London Millennium Footbridge. *The Structural Engineer*, vol. 79, 17-33, 2001.

DE PAULA, F. A.; QUEIROZ, G. Uso do MEF na Adaptação de uma Estrutura para Resistir a Solicitações Oriundas de Atividades Rítmicas. *In: ANAIS DO II SIMPÓSIO DE MECÂNICA COMPUTACIONAL*, Ouro Preto, 1998.

DÍAZ, I. M.; PEREIRA, E.; HUDSON, M. J.; REYNOLDS, P. Enhancing Active Vibration Control of Pedestrian Structures Using Inertial Actuators with Local Feed Back Control. *Engineering Structures*, p. 157-166, 2012.

EL-DARDIRY, E.; JI, T. Modelling of the dynamic behavior of profiled composite floors. *Engineering Structures*, 28(4):567–79, 2005.

ELLIS, B. R.; JI, T. Floor vibration induced by dance-type loads: theory and verification. *In: The Structural Engineer*, v. 72, 1994.

FELDMANN, M.; HEINEMEYER, C.; BUTZ, C. Design of floor structures for human induced vibrations. *JRC Scientific and Technical Reports*. 2009.

FERNANDES, H. *Comportamento dinâmico de passarelas modelas como viga sujeitas a vibrações na direção vertical induzidas por pedestres*. 2007. Tese (doutorado). Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa.

FUJINO, Y.; PACHEO, B. M.; NAKAMURA, S. I.; WARNITCHAI, P. Synchronization of Human Walking Observed During Lateral Vibration of a Congested Pedestrian Bridge. *Engineering and Structural Dynamics*, p. 741-758, 1993.

GASPAR, C. M. R.; Da SILVA, J. G. S. Influence of the human rhythmic activities modelling on the composite floor dynamic response. *Journal of Civil Engineering and Architecture Research*, vol. 2, p. 429-437, 2015.

GASPAR, Cássio Marques Rodrigues. *Avaliação do efeito da interação humana sobre pisos de edificações submetidos a atividades humanas rítmicas*. 2018. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Civil. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

GOMES, P. F. Curso de Estatística Experimental. 15. Ed. Fealq, Piracicaba. 2009.

HANAGAN, L. Walking-Induced Floor Vibration Case Studies." *Journal of Architectural Engineering-ASCE*, 11(1), 14-18, 2005.

HARITOS, N.; GAD, E. F.; WILSON, J. L. Evaluating the Dynamic Characteristics of Floor Systems using Dynamic Testing. *In: PROCEEDINGS OF ACAM2005*, Melbourne, 2005, p. 225-230.

HEWITT, C.; MURRAY, T. Office Fit-Out and Floor Vibrations. *Modern Steel Construction*, p. 35-38, 2004.

HICKS, S. J.; SMITH, A. L. (2011). Design of floor structures against human induced vibrations. *Steel Construction*, 4(2), p. 114-120, 2011.

HOMEM, S. M. Control of Human Induced Floor Vibrations. Massachusetts Institute of Technology. 2014.

INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION. ISO 2631-1 - Evaluation of human exposure to whole-body vibration: General requirements. 1997.

INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION. ISO 2631-2 - Evaluation of human exposure to whole-body vibration, Part 2: Human exposure to continuous and shock-induced vibrations in buildings (1 to 80 Hz). 1989.

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.

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.

JI, T.; ELLIS, B. R. Floor Vibration Induced by danced – Type Loads: Theory and Verification. *The Structural Engineer*, v. 72, 1994.

JOHANSSON, P. *Vibration of Hollow Core Concrete Elements Induced by Walking*. 2009. Dissertação (Mestrado) - Department of Construction Sciences. Lund University, Lund

JUNGES, P. *Análise de vibrações de uma laje mista de concreto e perfis PRFV induzidas por atividades humanas*. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

KÜSTER, L; SARTORI, A. L. Análise dinâmica de estruturas de concreto: Avaliação de três sistemas construtivos de lajes. *Teoria e Prática na Engenharia Civil*, v.18, p. 13-22, 2011.

LENZEN, K. M. Vibration of steel joist-concrete Slabs Floors. *Engineering Journal of American Institute of Steel Construction*, vol. 3, pp. 133 – 136, 1966.

LIMA, M. D. H. *Controle de Vibrações Induzidas em uma Laje de Academia de Ginástica com a Utilização de Amortecedores de Massa Sintonizados*. 2007. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Tecnologia. Universidade de Brasília, Brasília.

LJUNGGREN, F. *Dynamic Properties and Subjective Perception*. 2019. Tese (doutorado) – Department of Human Work Sciences, Division of Sound and Vibration. Luleå University of Technology, Suécia.

MA, R.; KE, L.; WANG, D.; CHEN, A.; PAN, Z. Experimental Study on Pedestrians' Perception of Human-Induced Vibrations of Footbridges. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, v. 18, 2018.

MATSUMOTO, Y.; GRIFFIN, M. J. Comparison of biodynamic responses in standing and seated human bodies. *Journal of Sound and Vibration*. vol. 238, p. 691-704. 2000.

MCCORMICK, M. M. *Office Floor Vibration: Design Criteria and Tests*. Melbourne Research Laboratories, The Broken Hill Proprietary Company, Lmt., Melbourne, Australia, 1974.

MELLO, A. V. A.; da SILVA, J. G. S.; VELLASCO, P. C. G. da S.; de ANDRADE, S. A. L.; de LIMA, L. R. O. Dynamic analysis of composite systems made of concrete slabs and steel beams. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 64, p. 1142–1151, 2008.

MELLO, A. V. DE A. *Vibrações em Pisos de Edificações Induzidas por Atividades Humanas*. 2005. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

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.

MENDES, P.; OLIVEIRA, S. *Análise dinâmica de estruturas - utilização integrada de modelos de identificação modal e modelos de elementos finitos*. Laboratório nacional de engenharia civil, Lisboa, 2008.

MURRAY, T. M.; ALLEN, D. E.; UNGAR, E. E. *Design Guide 11, Floor Vibrations Due to Human Activities*, American Institute of Steel Construction AISC, Canadian Institute of Steel Construction CISC, 2003.

MURRAY, T. M.; ALLEN, D. E.; UNGAR, E. E.; DAVIS, D. B. Steel design guide series 11: Vibrations of steel-framed structural systems due to human activity, 2nd Edition. 1st Printing. Chicago, USA: American Institute of Steel Construction (AISC), 2016.

MURRAY, T.M. Acceptability Criterion for Occupant: Induced Floor Vibrations. *Engineering Journal of American Institute of Steel Construction*, v. 18, p. 62-70, 1981.

NAKAMURA, S.; KAWASAKI, T.; KATSUURA, H.; YOKOYAMA, K. Experimental studies on lateral forces induced by pedestrians. *Journal of Construction Steel Research*, p. 247-252, 2008.

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.

PAVIC, A.; REYNOLDS, P. Vibration Serviceability of Long-Span Concrete Building Floors: Review of Mathematical Modelling Approaches. *The Shock and Vibration Digest*. 2002.

PAVIC, A.; REYNOLDS, P. Experimental assessment of vibration serviceability of existing office floors under human-induced excitation. *Experimental Techniques*, v. 23, p. 41–45, 1999.

PCB Piezotronics. Installation and Operating Manual: Seismic, miniature (50 gm), ceramic flexural ICP accelerometer, Model 393B04. 2017.

PEDERSEN, L.; FRIER, C. Sensitivity of Footbridge Vibrations to Stochastic Walking Parameters. *Journal of Sound and Vibration*, p. 2683-2701, 2010.

SETAREH, M. Vibration serviceability of a building floor structure: dynamic testing and computer modeling. *Journal of performance of constructed facilities*, p. 497–507, 2010.

SHAHABPOOR, E.; PAVIC, A.; RACIC, V. Interaction between Walking Humans and Structures in Vertical Direction: A Literature Review. *Shock and Vibration*, p. 1–22, 2016.

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.

SMITH, A.; HICK, S.; DEVINE, P. *Design of Floors for Vibration: A New Approach*. SCI Publication, The Steel Construction Institute, Ascot, UK, 2009.

STEIGER, R.; FELTRIN, G.; WEBER, F.; NERBANO, S.; MOTAVALLI, M. Experimental modal analysis of a multi-stored light-frame timber building. *Bulletin of Earthquake Engineering*, v. 15, p.3265–3291, 2015.

TILDEN, C. J. Kinect Effects of Crowds. In: *Proceedings of American Society of Civil Engineers*, v. 34, p. 325-340, 1913.

TILLY, G.; CULLINGTON, D.; EYRE, R. Dynamic Behaviour of Footbridges. IABSE, Surveys, p. 13-24, 1984.

TREDGOLD, T. *Elementary Principles of Carpentry*. E. & F. N. Spon, 2nd ed., 1875.

UNGAR, E. E. Damping of Panels: Noise and Vibration Control. L. L. Beranek, ed., McGraw-Hill, New York, p. 434-475, 1988.

VARELA, W, D. (2004). *Modelo teórico-experimental para análise de vibrações induzidas por pessoas caminhando sobre lajes de edifícios*. 2004. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

VARELA, W. D.; BATTISTA, R. C. Control of vibrations induced by people walking on large span composite floor decks. *Engineering Structures*, v. 33, p. 2485–2494, 2011.

WILLFORD, M., YOUNG, P.; FIELD, C. Predicting footfall-induced vibration: Part 1. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*, p. 65-72, 2007.

WILLFORD, M.; YOUNG, P. A Design Guide for Footfall Induced Vibration of Structures. *The Concrete Society Publication CCIP-016*, Trowbridge, UK, 2006

WILLIAMS, M. S.; WALDRON, P. Evaluation of methods for predicting occupant induced vibrations in concrete floors. *Structure Engineering*, 72(20), p. 334–40, 1994.

ZHANG, S.; XU, L. Human-induced vibration of cold-formed steel floor systems: Parametric studies. *Advances in Structural Engineering*, p. 1-14, 2020.

ŽIVANOVIC, S.; PAVIC, A. Probabilistic Modeling of Walking Excitation for Building Floors. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, p. 132-143, 2009.

ZÚÑIGA, J. E. V. *Análise da resposta dinâmica experimental de uma passarela tubular mista, aço-concreto, submetida ao caminhar humano*. 2011. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Civil. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

**APÊNDICE A –****PLANTA DO PAVIMENTO INVESTIGADO**



**APÊNDICE B –****RESPOSTAS DE ACELERAÇÃO NO DOMÍNIO DO TEMPO E DA FREQUÊNCIA**

# 1

## **RESPOSTAS DINÂMICAS OBTIDAS NOS ENSAIOS DE VIBRAÇÃO FORÇADA**

Neste capítulo são apresentadas as respostas dinâmicas obtidas para os cinco pisos investigados, no domínio do tempo e da frequência, quando submetidos ao caminhar de uma pessoa. Os sinais foram coletados através de cinco acelerômetros para três tipos de caminhada (lenta, normal e rápida) em quatro direções (aleatória, diagonal, paralela e perpendicular).

## 1.1 Piso 1

### 1.1.1 Caminhada lenta

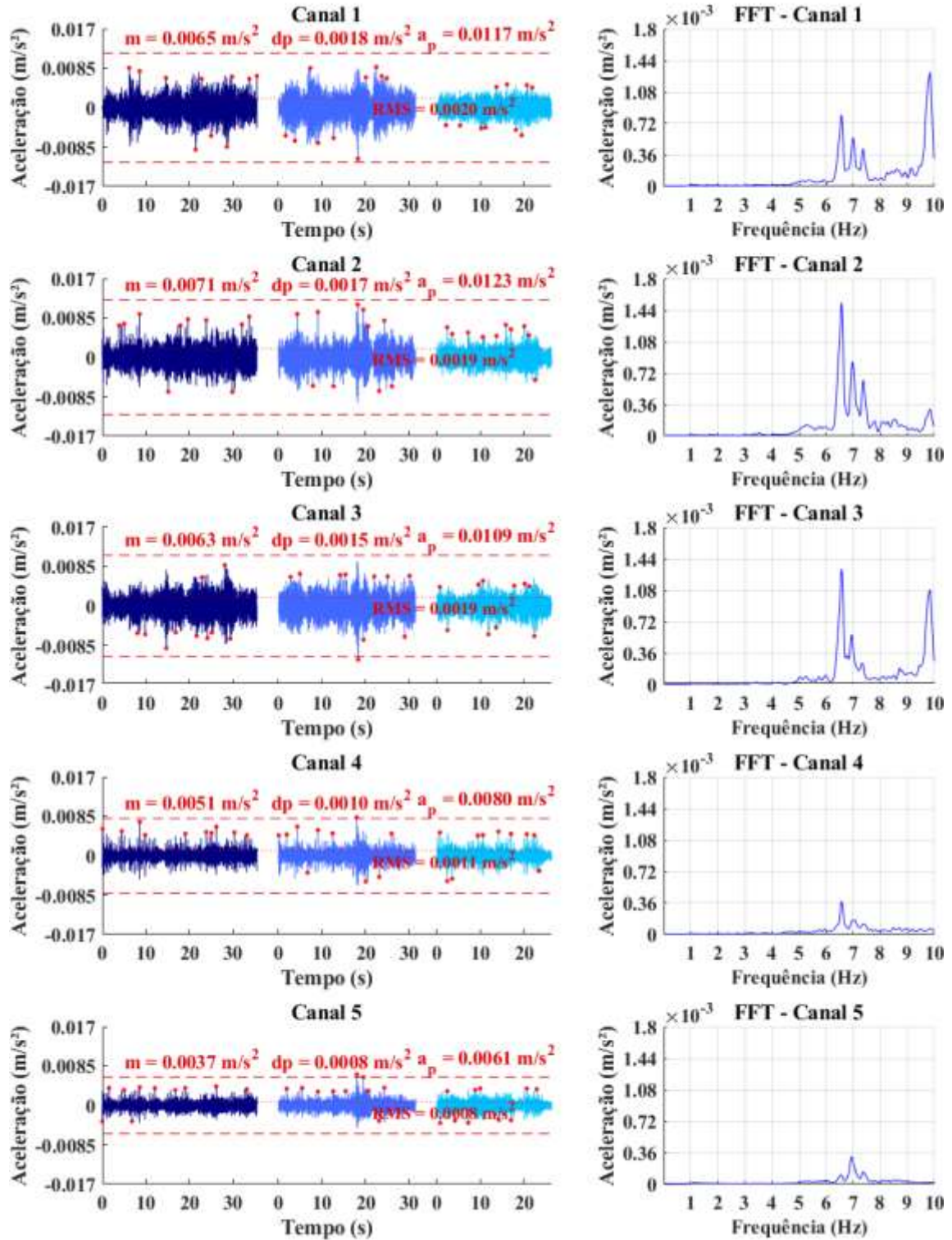


Figura B – 1 – Resposta dinâmica do piso 1 para caminhada lenta em trajetória aleatória.

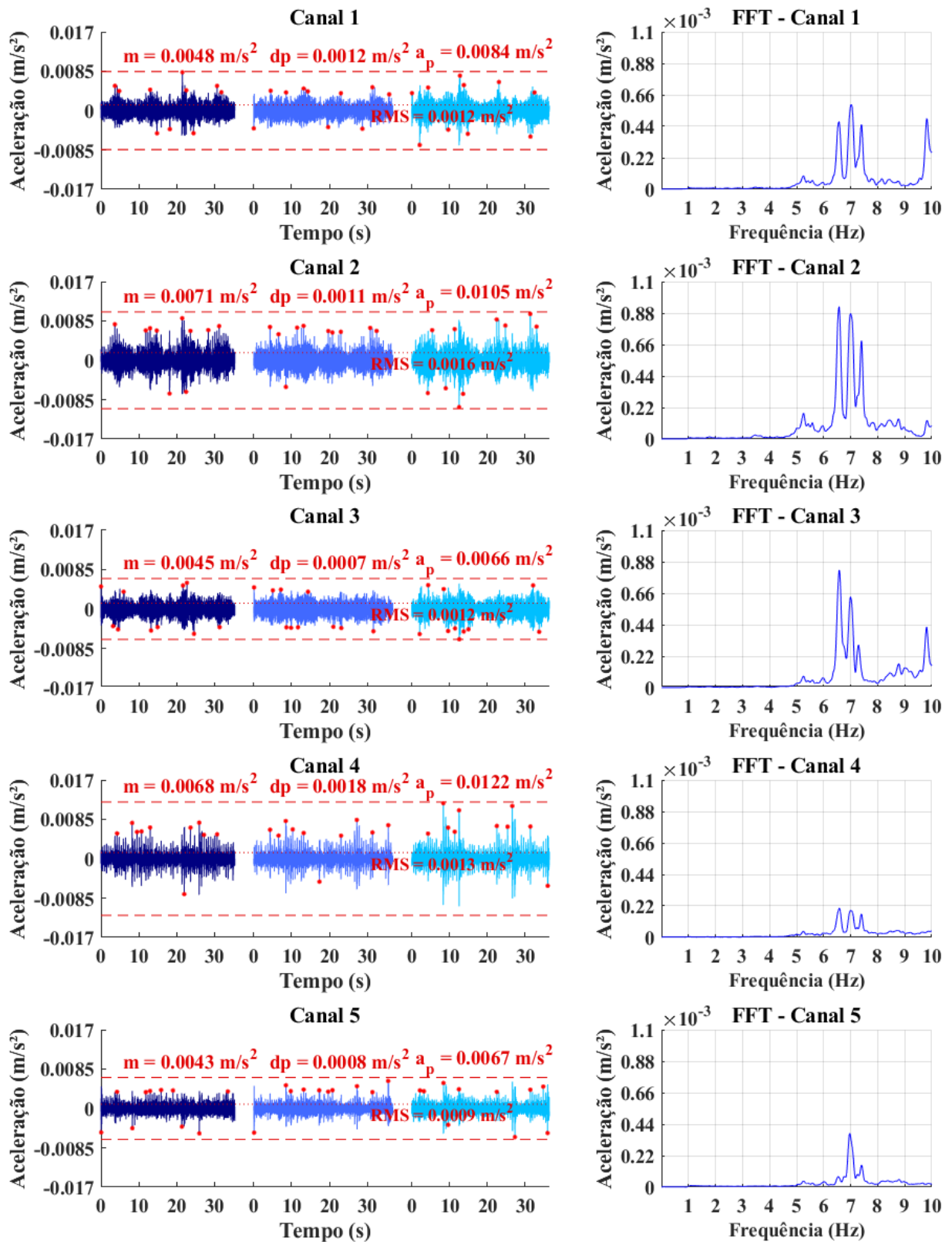


Figura B – 2 – Resposta dinâmica do piso 1 para caminhada lenta em trajetória diagonal.

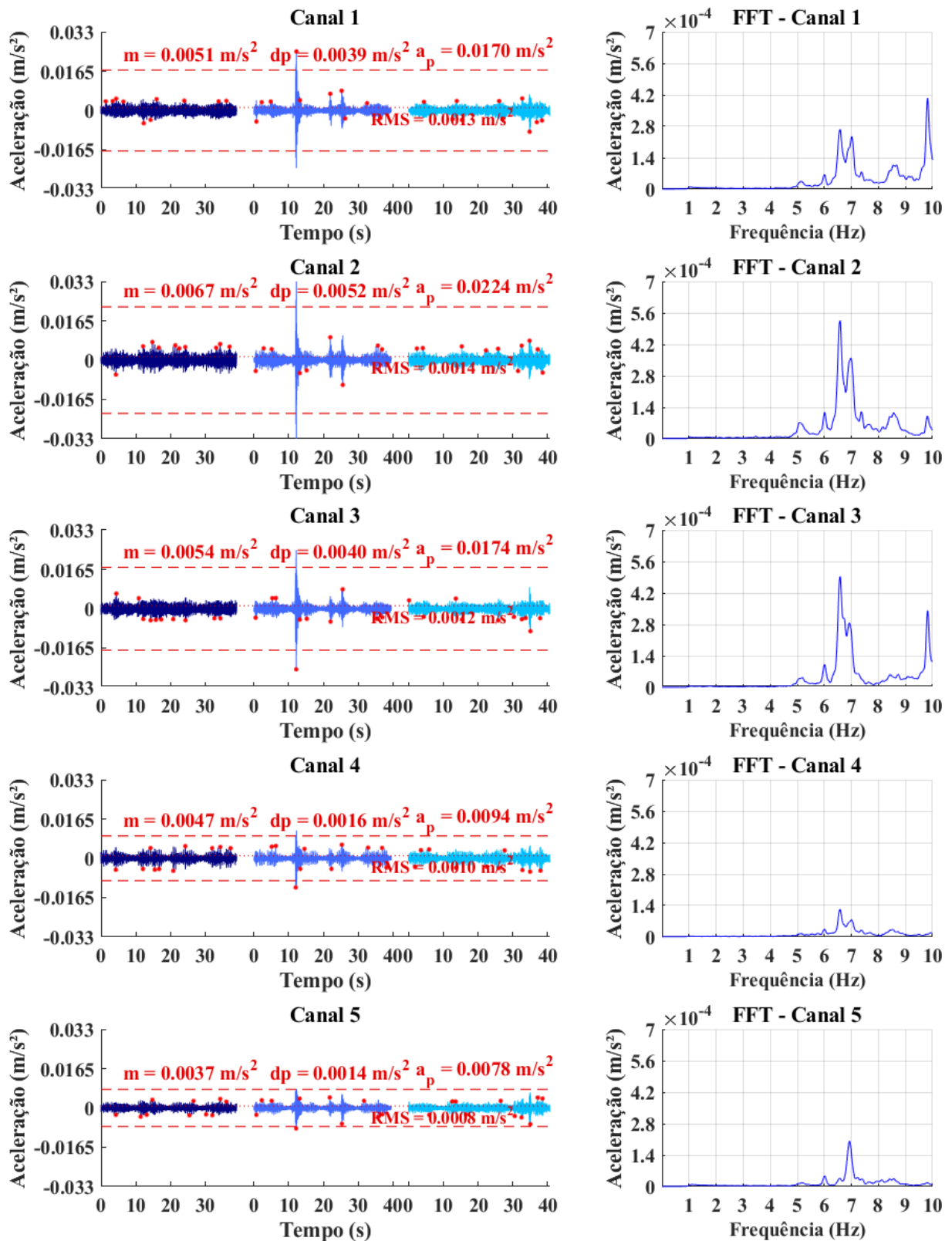


Figura B – 3 – Resposta dinâmica do piso 1 para caminhada lenta em trajetória paralela.

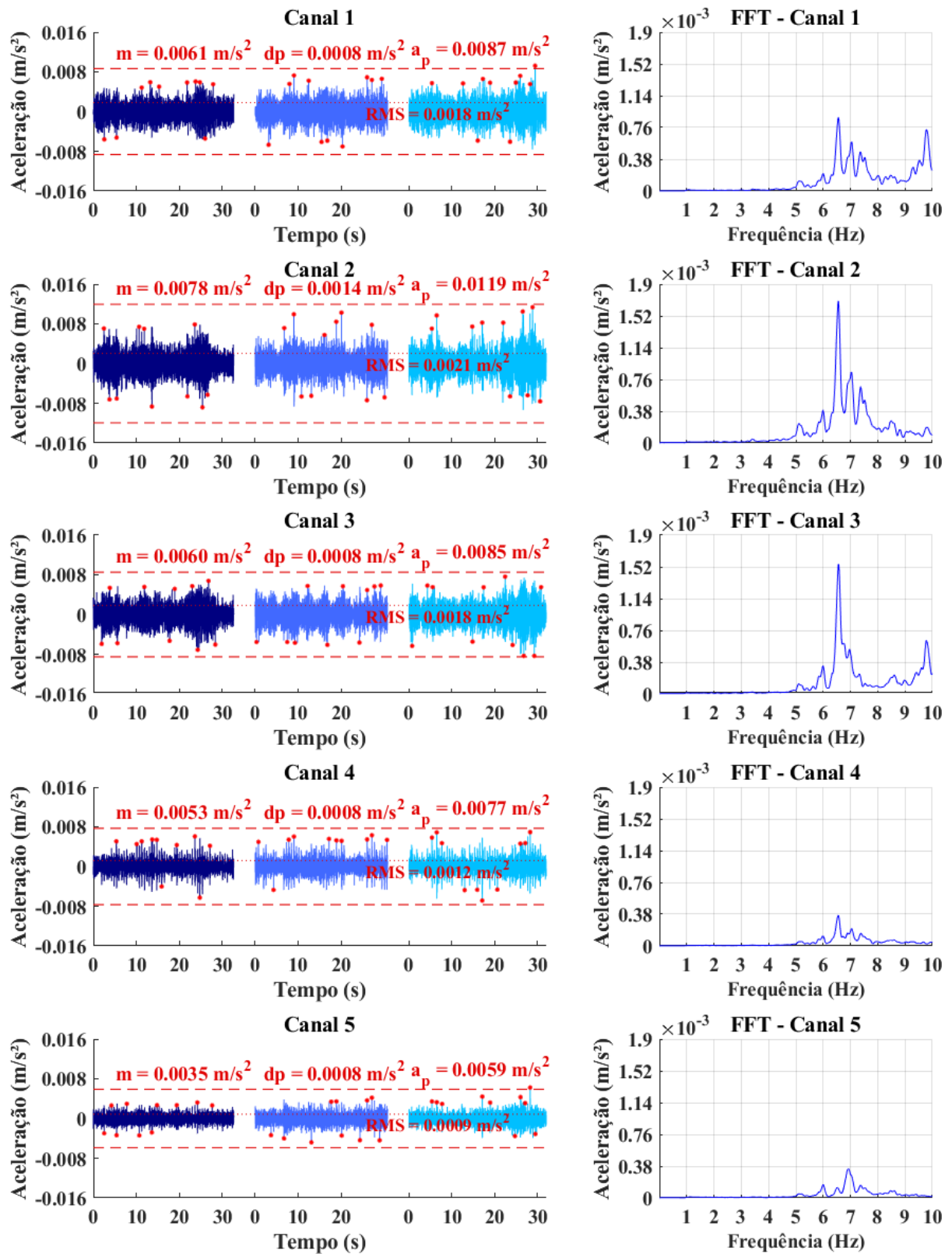


Figura B – 4 – Resposta dinâmica do piso 1 para caminhada lenta em trajetória perpendicular.

### 1.1.2 Caminhada normal

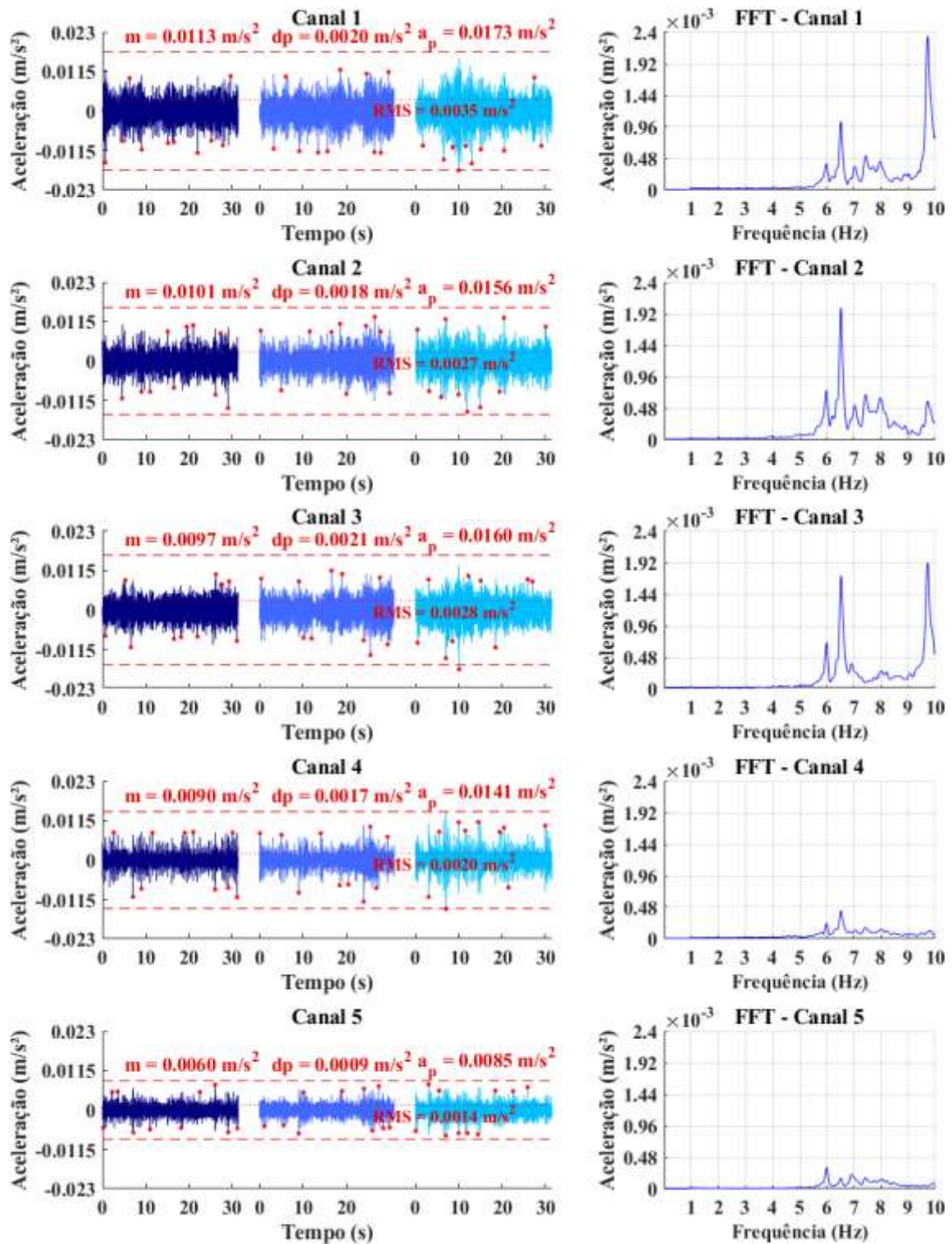


Figura B – 5 – Resposta dinâmica do piso 1 para caminhada normal em trajetória aleatória.

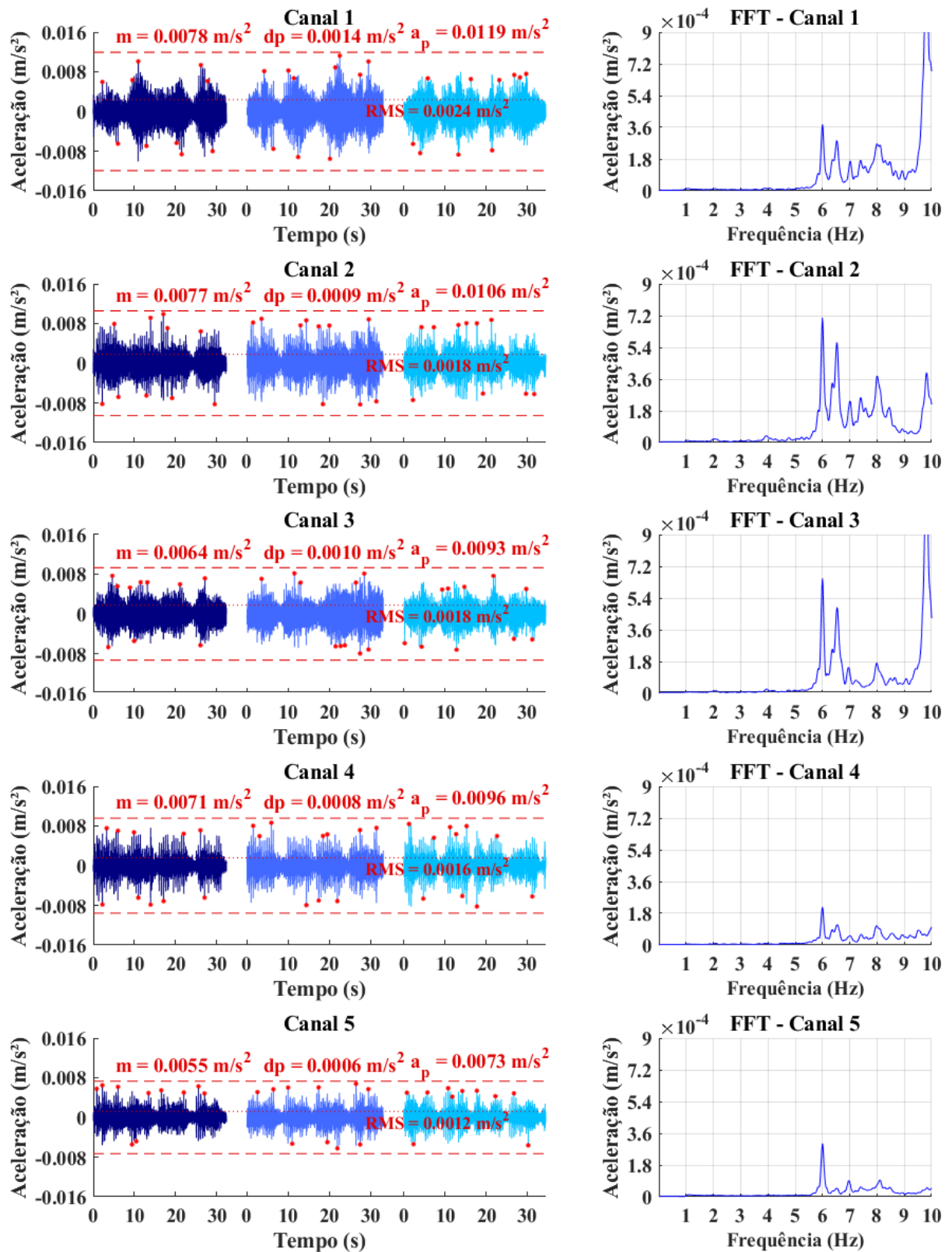


Figura B – 6 – Resposta dinâmica do piso 1 para caminhada normal em trajetória diagonal.

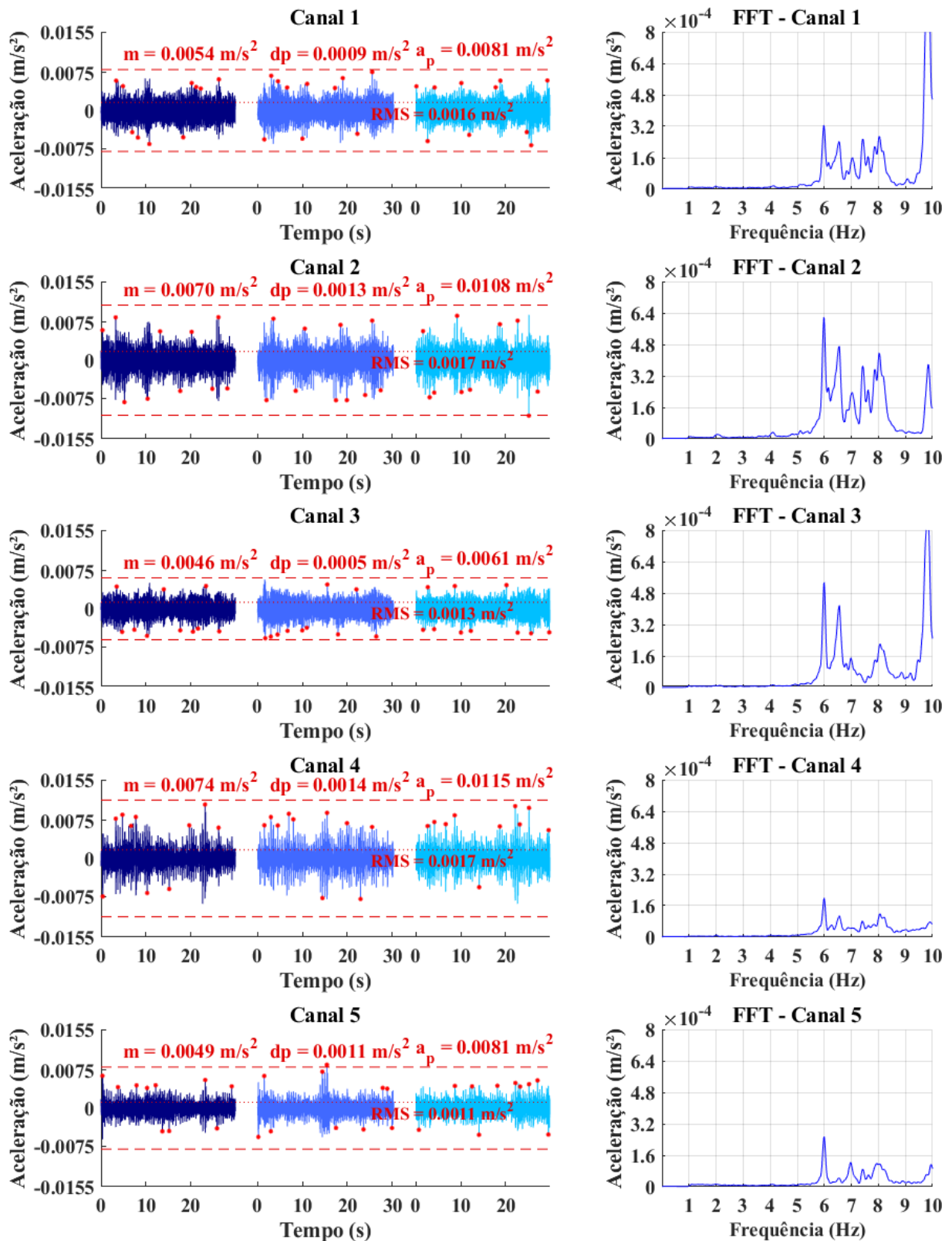


Figura B – 7 – Resposta dinâmica do piso 1 para caminhada normal em trajetória paralela.

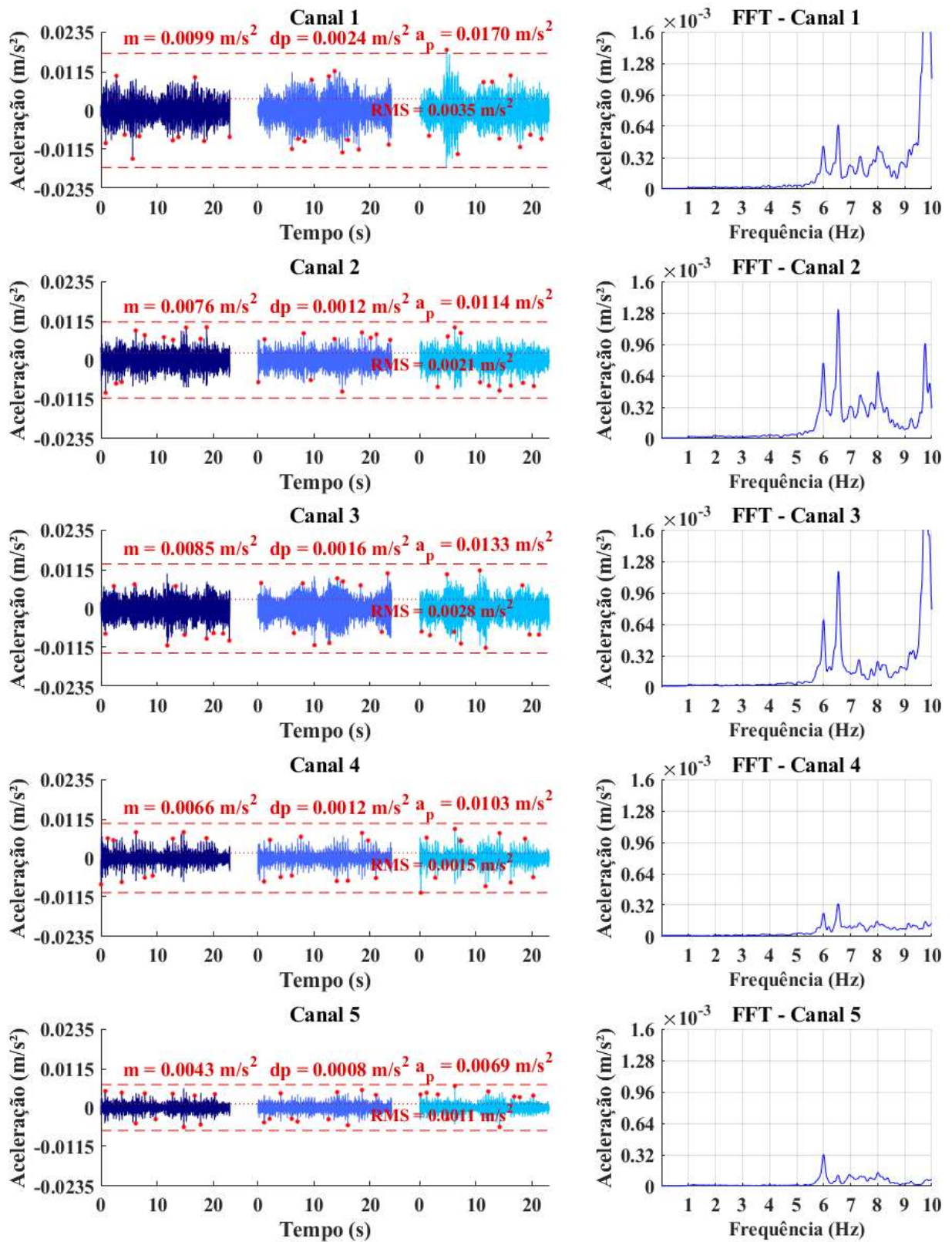


Figura B – 8 – Resposta dinâmica do piso 1 para caminhada normal em trajetória perpendicular.

### 1.1.3 Caminhada rápida

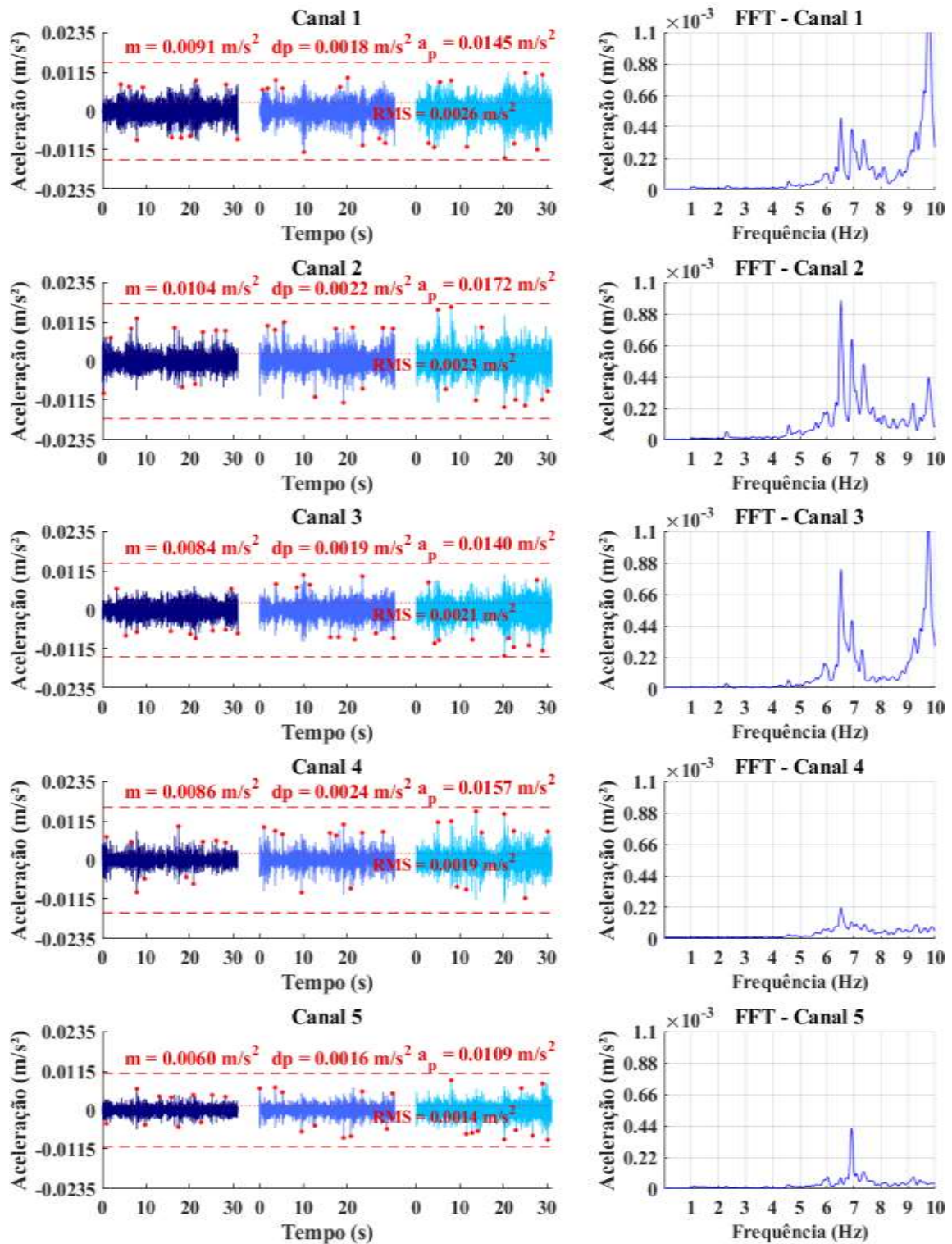


Figura B – 9 – Resposta dinâmica do piso 1 para caminhada rápida em trajetória aleatória.

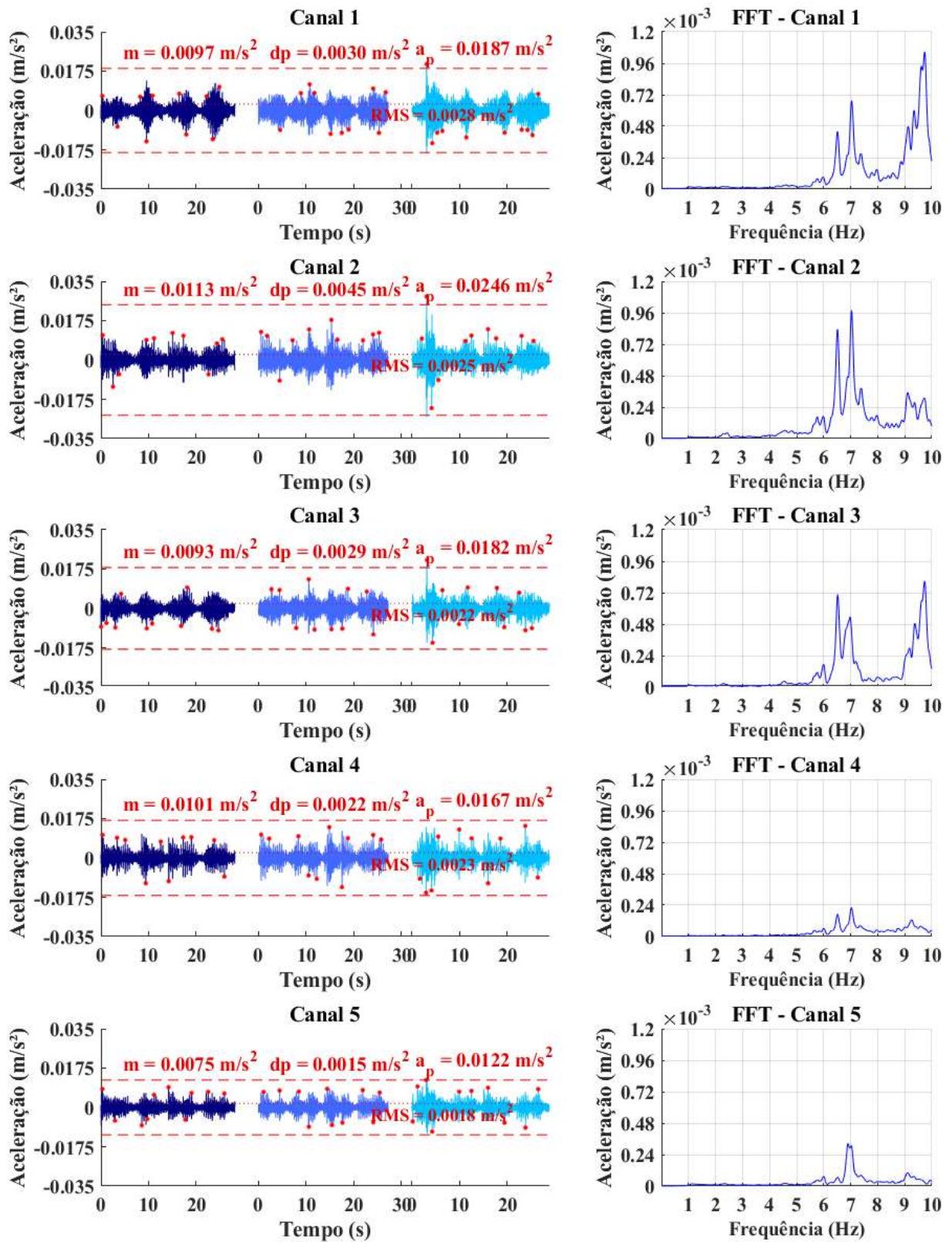


Figura B – 10 – Resposta dinâmica do piso 1 para caminhada rápida em trajetória diagonal.

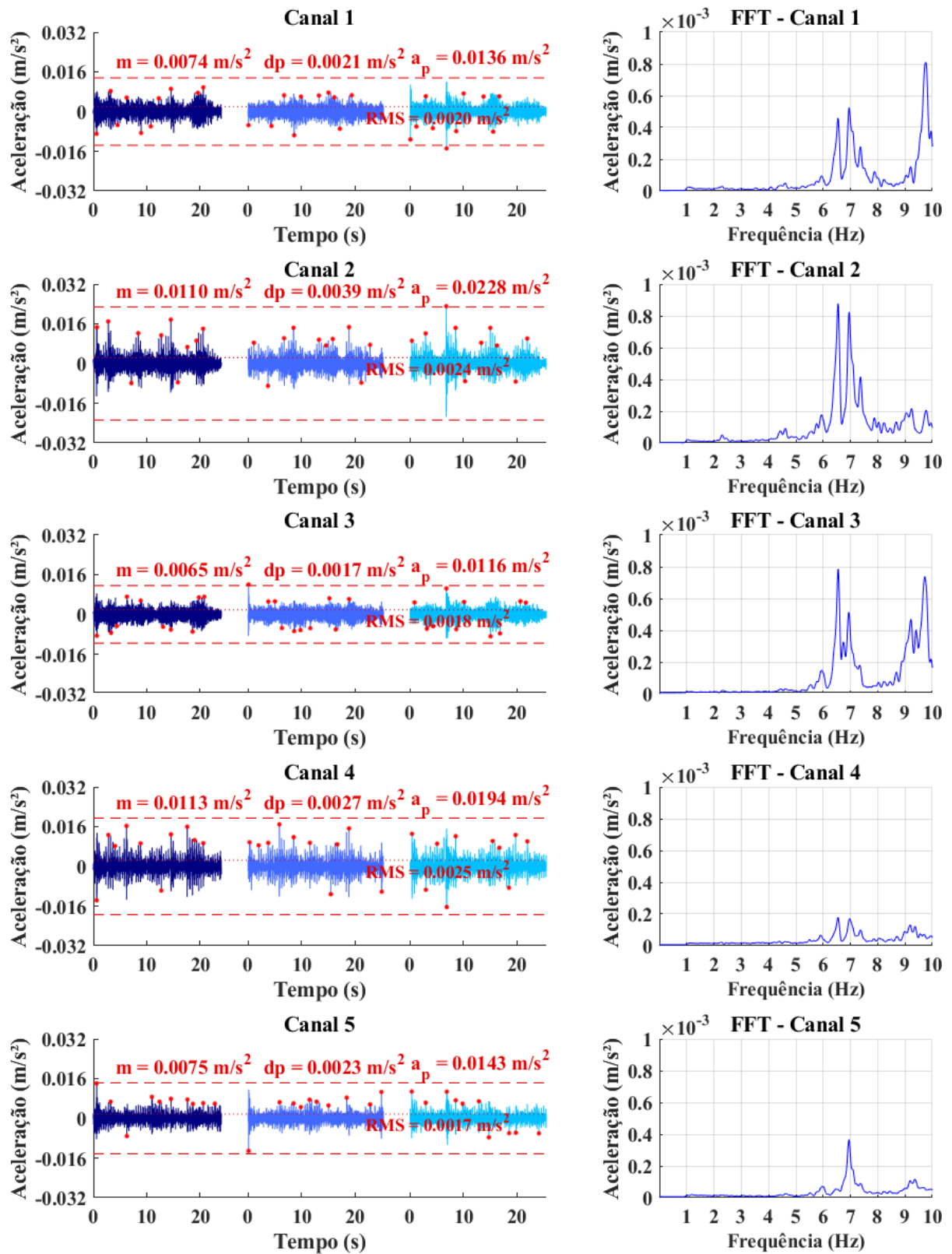


Figura B – 11 – Resposta dinâmica do piso 1 para caminhada rápida em trajetória paralela.

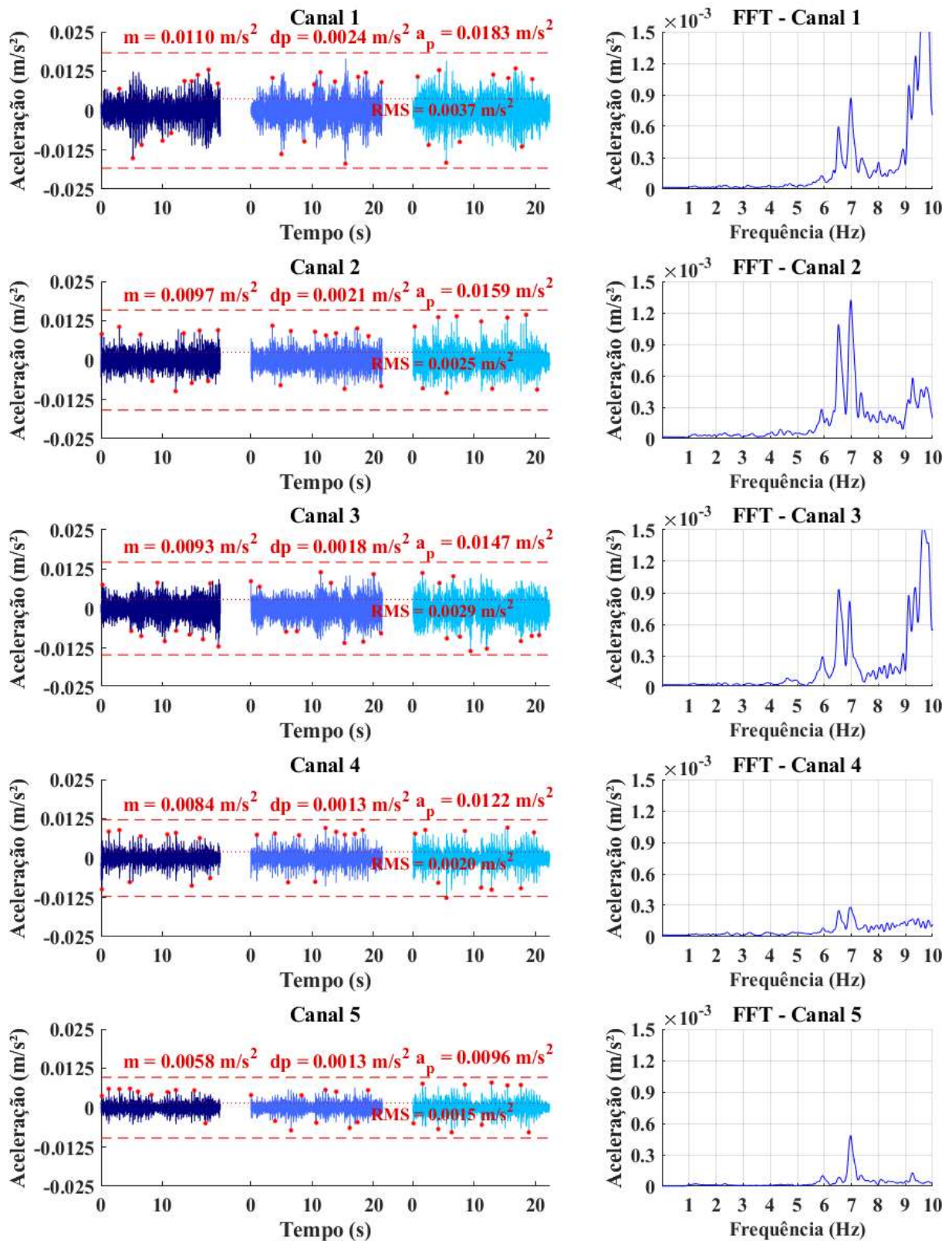


Figura B – 12 – Resposta dinâmica do piso 1 para caminhada rápida em trajetória perpendicular.

## 1.2 Piso 2

### 1.2.1 Caminhada lenta

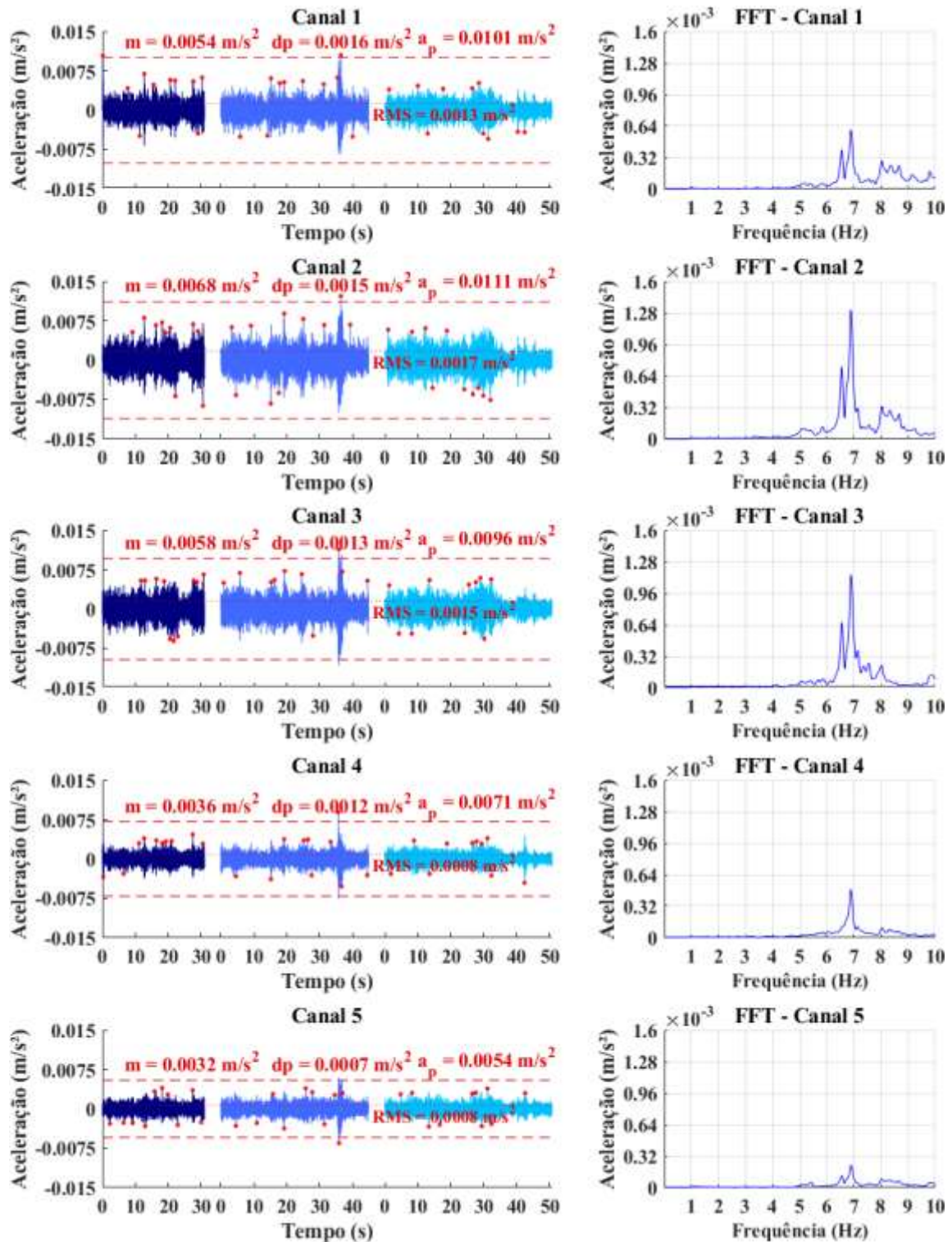


Figura B – 13 – Resposta dinâmica do piso 2 para caminhada lenta em trajetória aleatória.

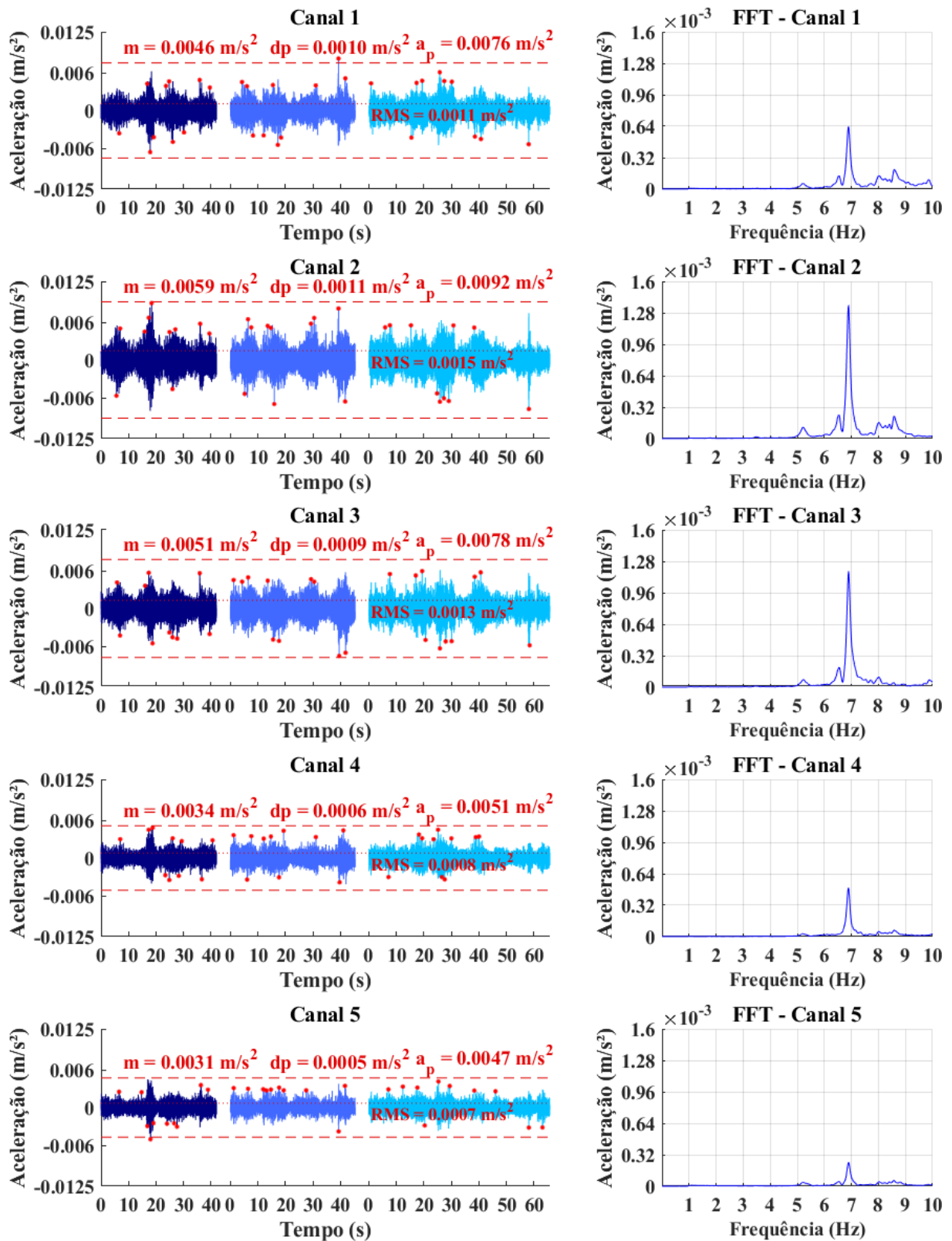


Figura B – 14 – Resposta dinâmica do piso 2 para caminhada lenta em trajetória diagonal.

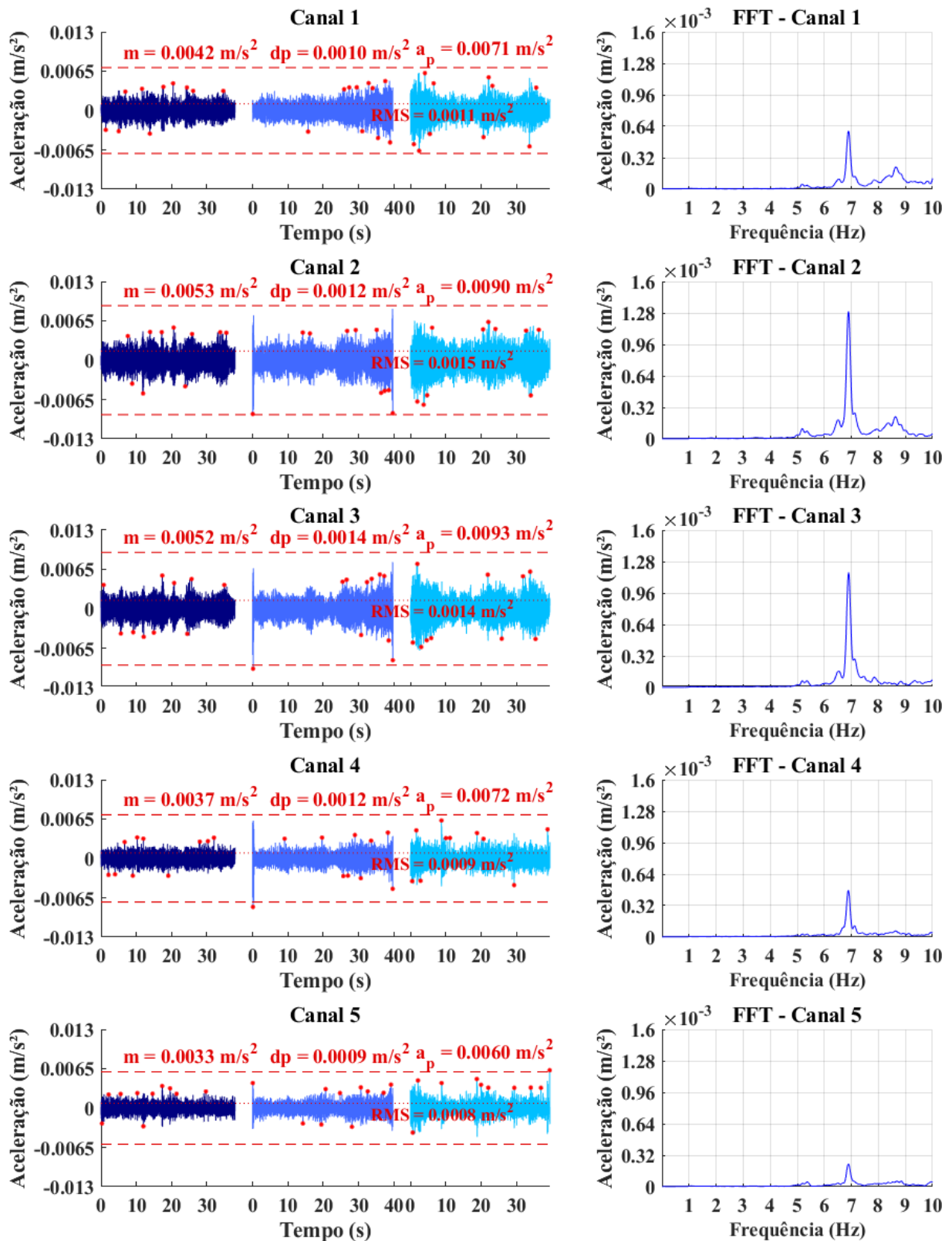


Figura B – 15 – Resposta dinâmica do piso 2 para caminhada lenta em trajetória paralela.

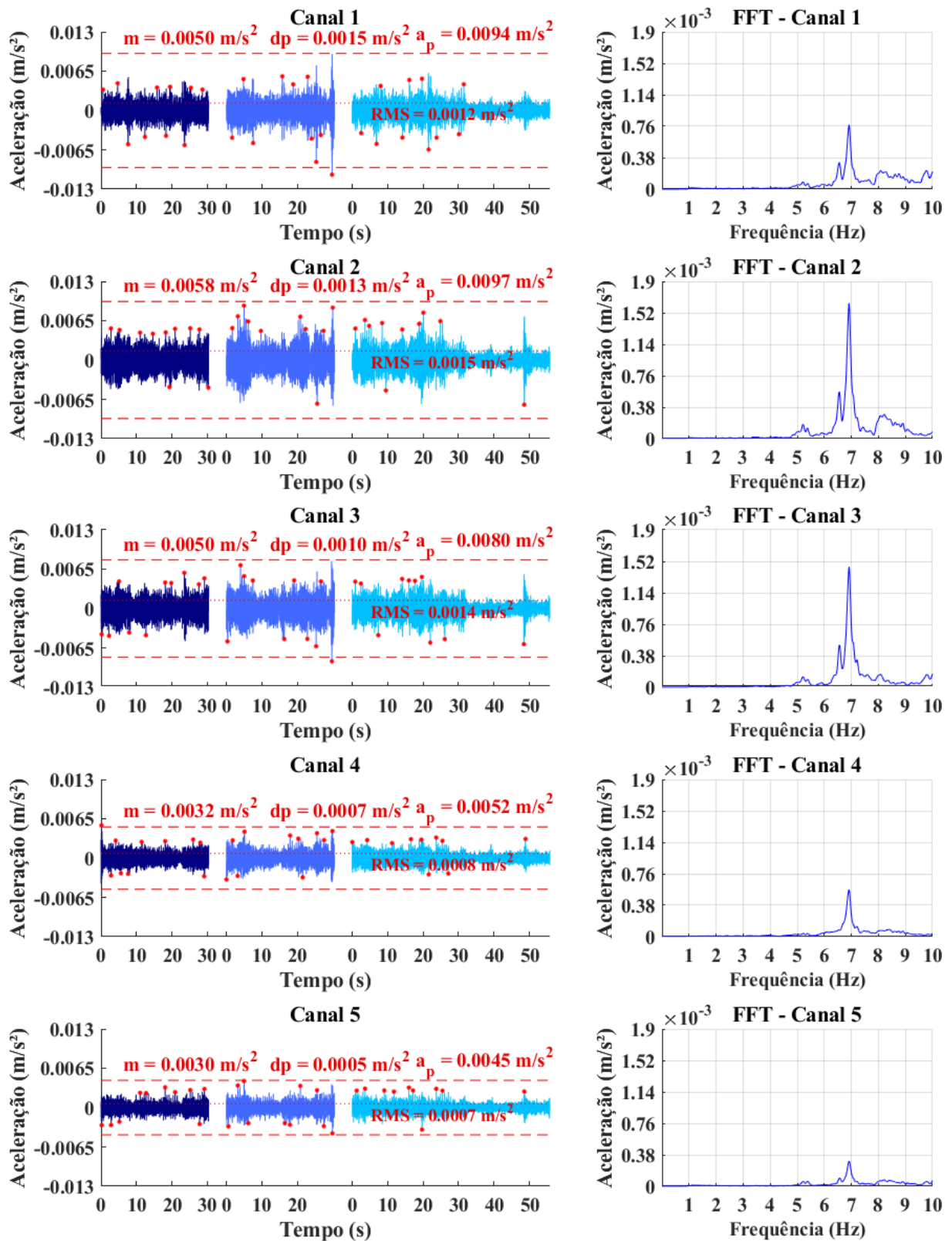


Figura B – 16 – Resposta dinâmica do piso 2 para caminhada lenta em trajetória perpendicular.

## 1.2.2 Caminhada normal

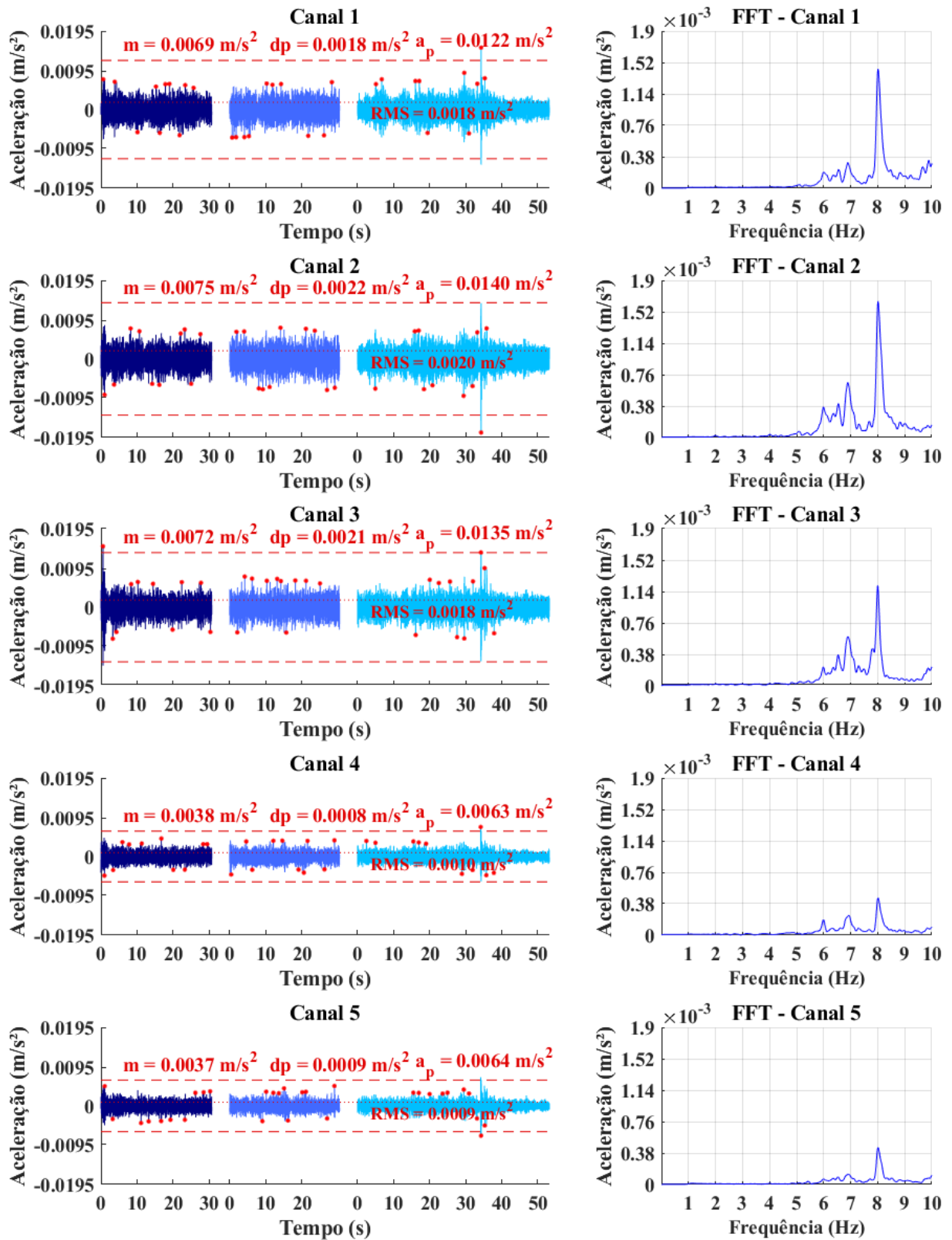


Figura B – 17 – Resposta dinâmica do piso 2 para caminhada normal em trajetória aleatória.

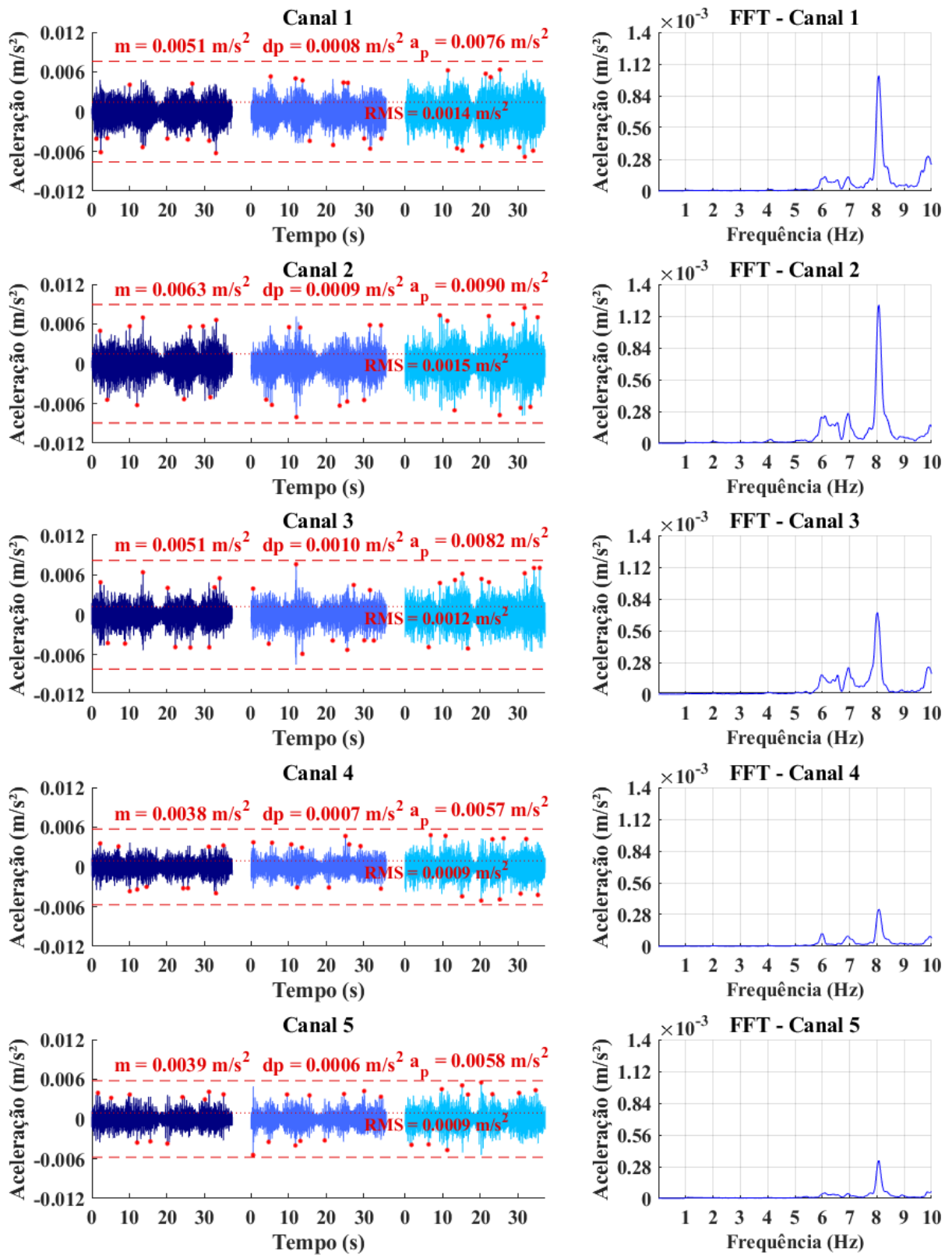


Figura B – 18 – Resposta dinâmica do piso 2 para caminhada normal em trajetória diagonal.

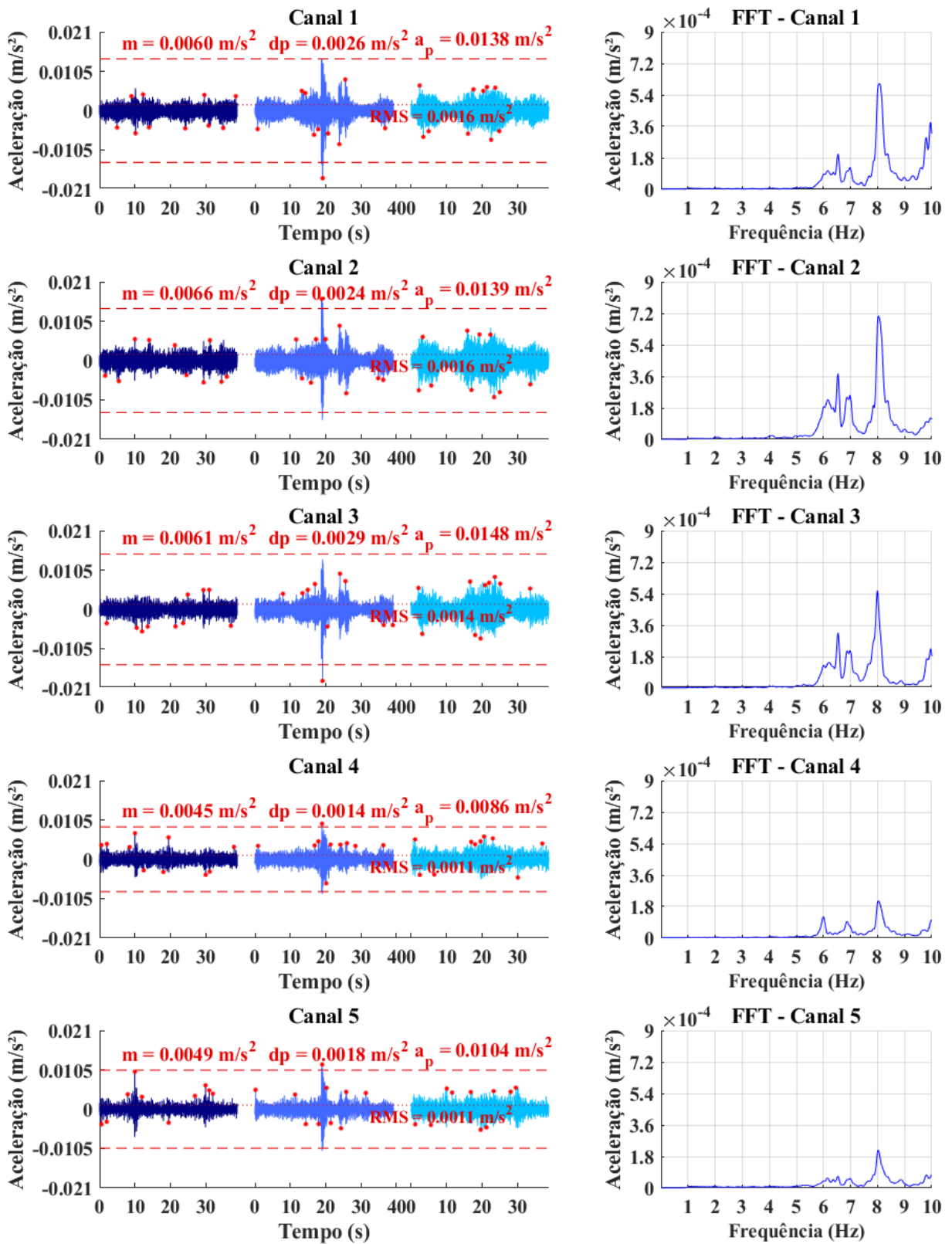


Figura B – 19 – Resposta dinâmica do piso 2 para caminhada normal em trajetória paralela.

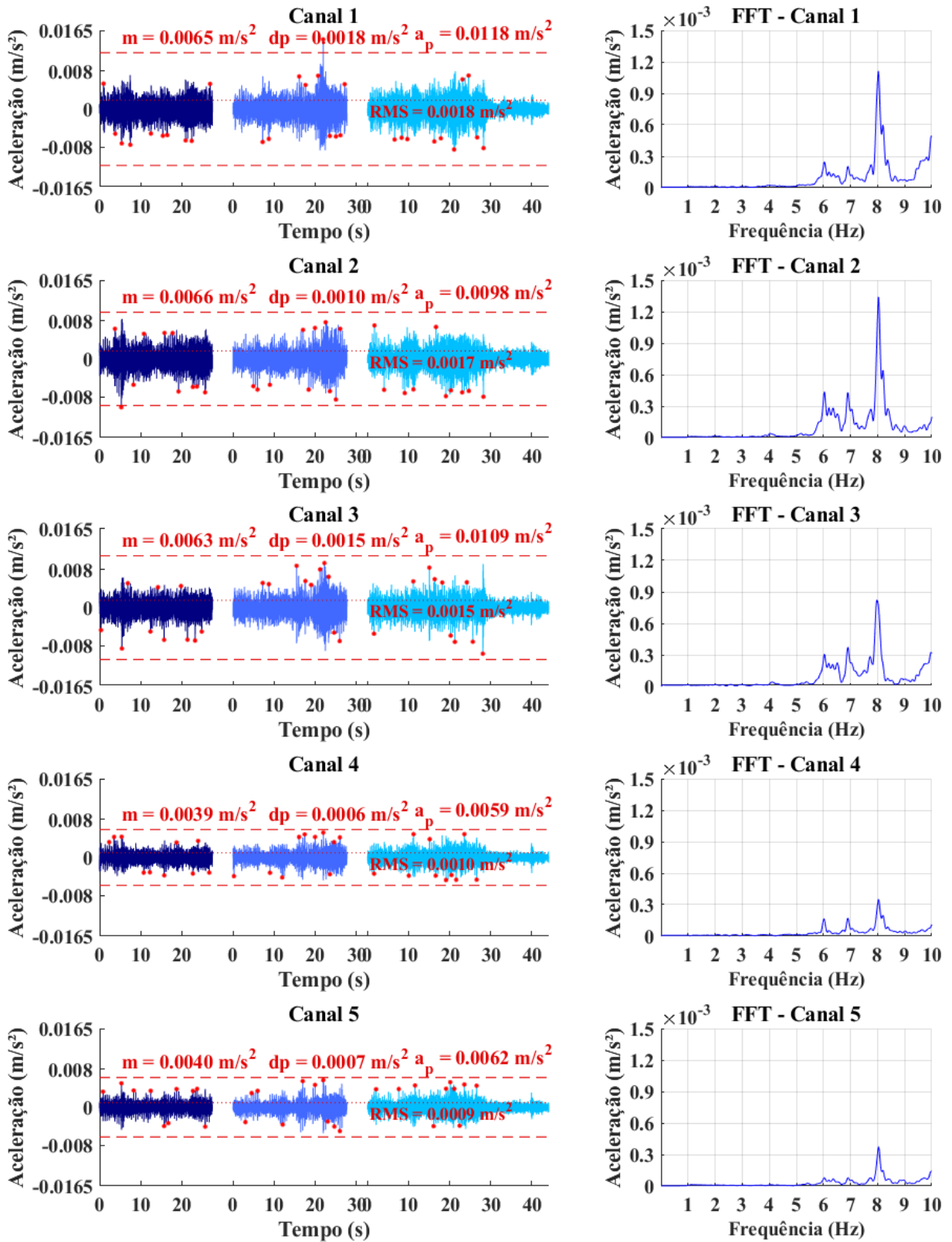


Figura B – 20 – Resposta dinâmica do piso 2 para caminhada normal em trajetória perpendicular.

## 1.2.3 Caminhada rápida

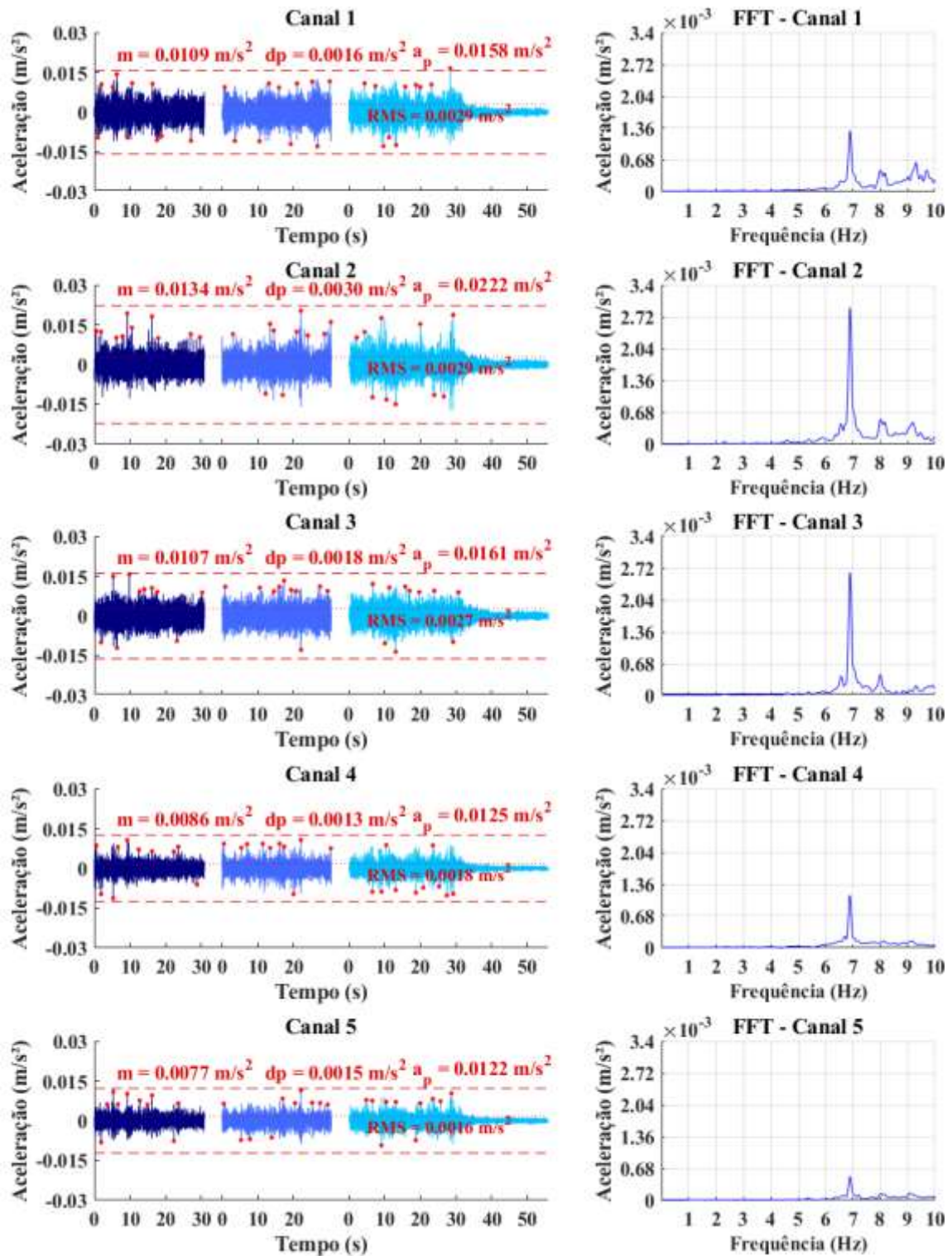


Figura B – 21 – Resposta dinâmica do piso 2 para caminhada rápida em trajetória aleatória.

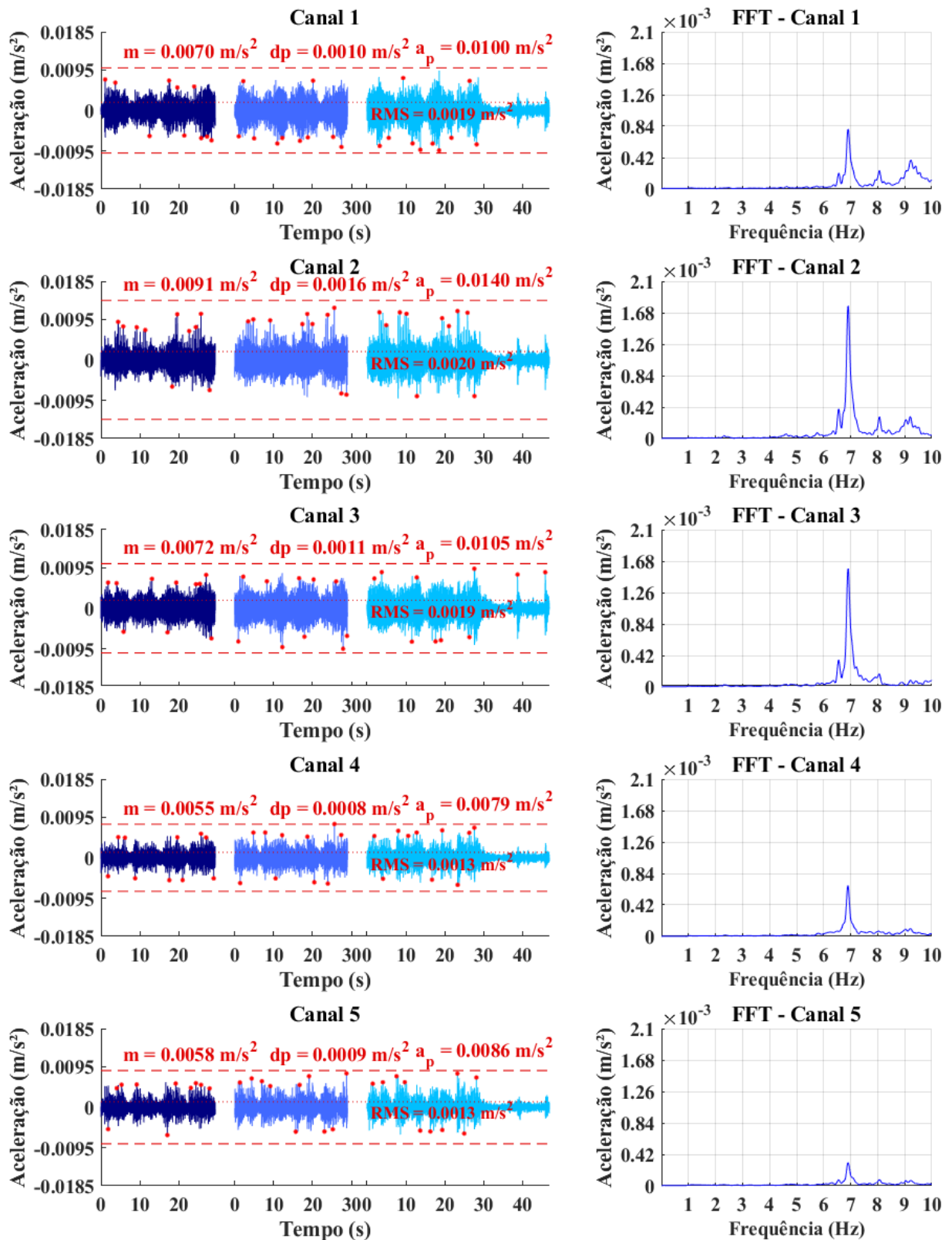


Figura B – 22 – Resposta dinâmica do piso 2 para caminhada rápida em trajetória diagonal.

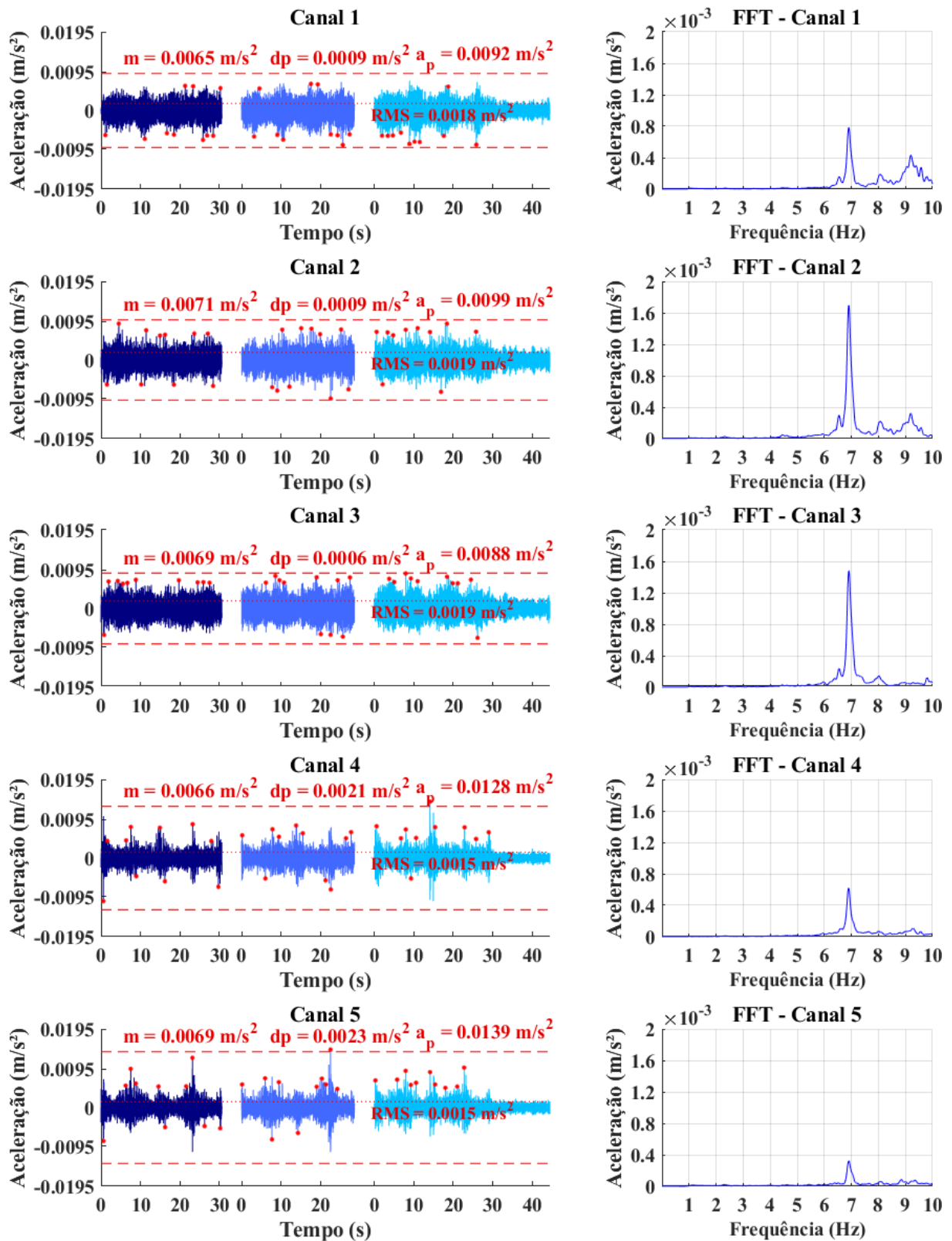


Figura B – 23 – Resposta dinâmica do piso 2 para caminhada rápida em trajetória paralela.

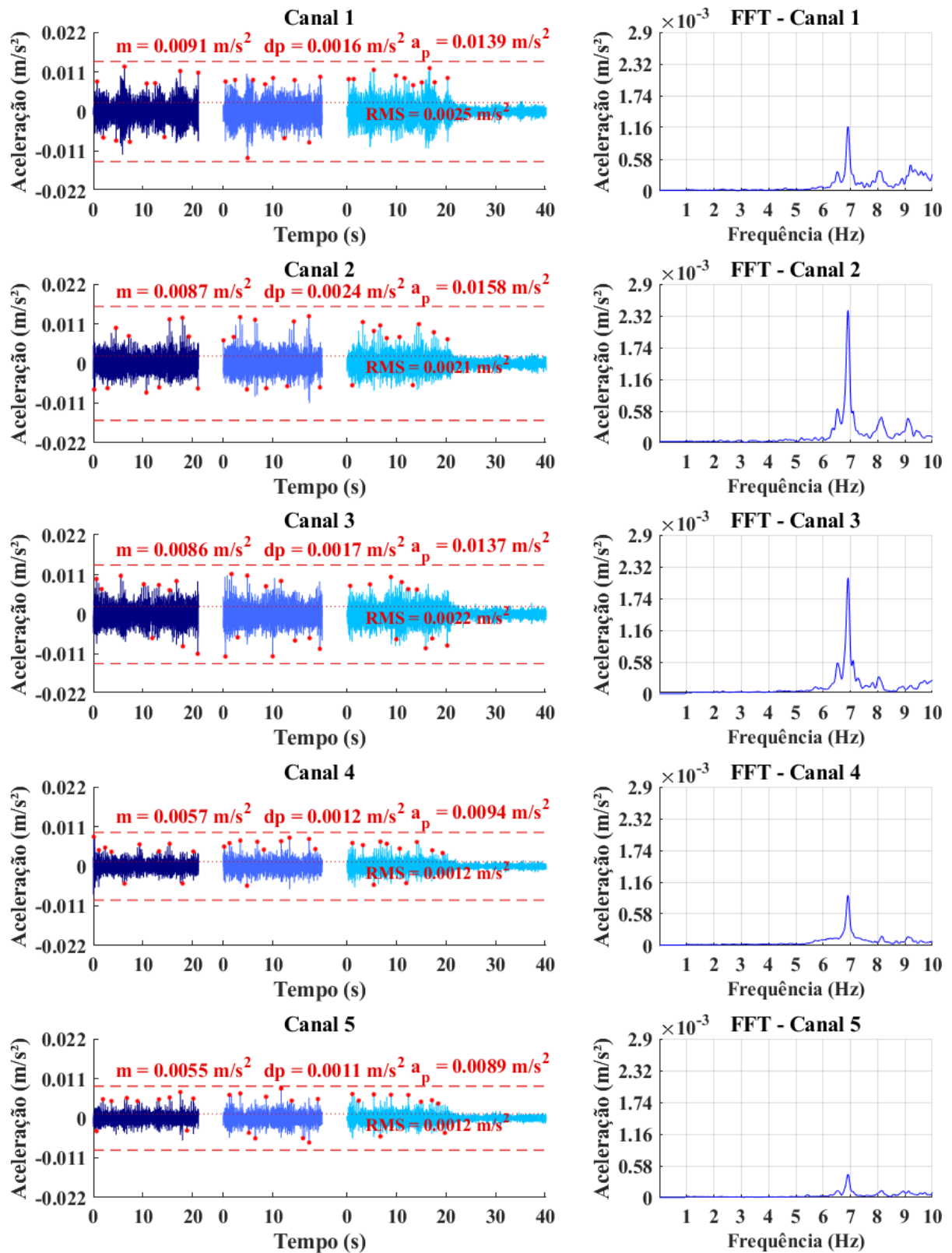


Figura B – 24 – Resposta dinâmica do piso 2 para caminhada rápida em trajetória perpendicular.

### 1.3 Piso 3

#### 1.3.1 Caminhada lenta

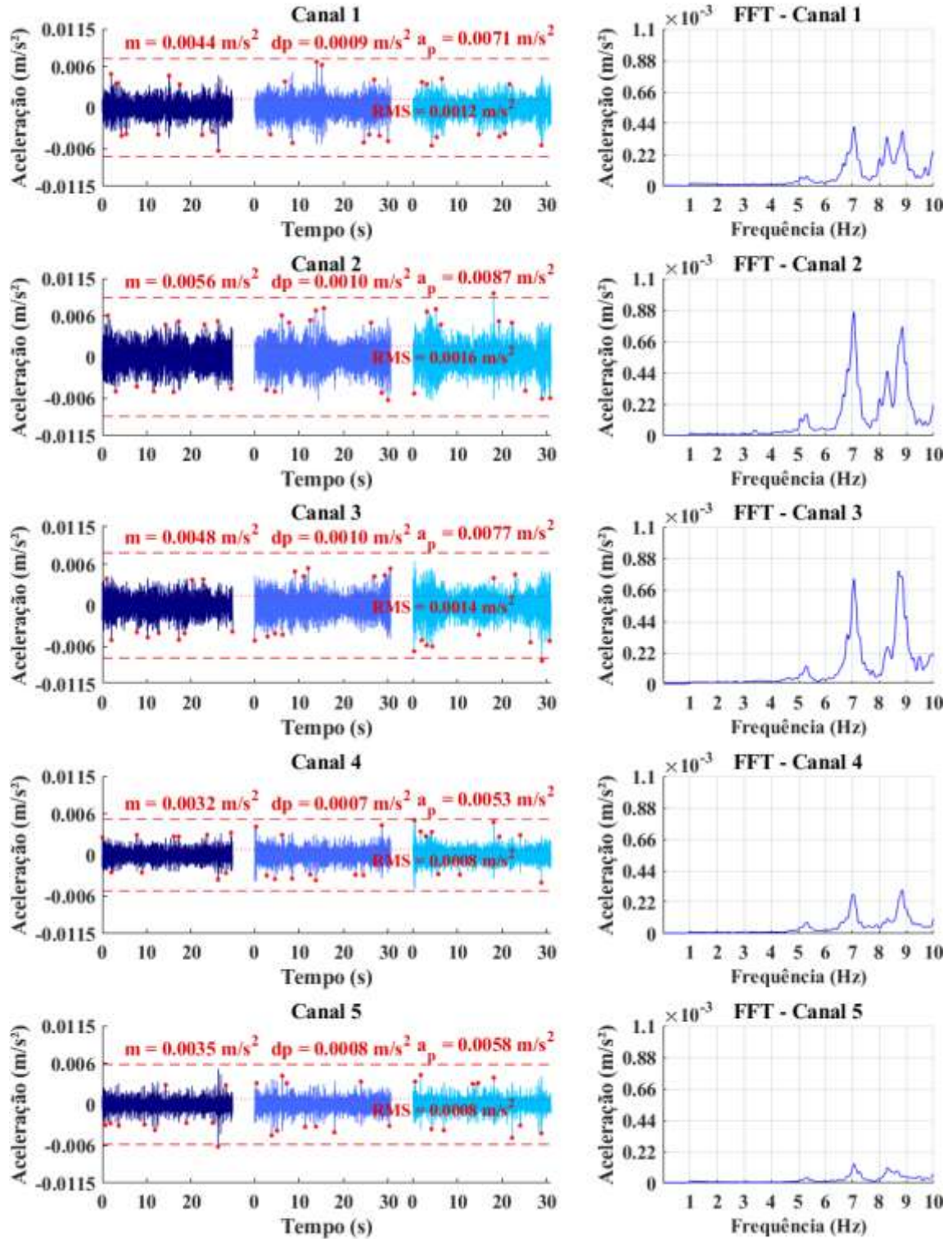


Figura B – 25 – Resposta dinâmica do piso 3 para caminhada lenta em trajetória aleatória.

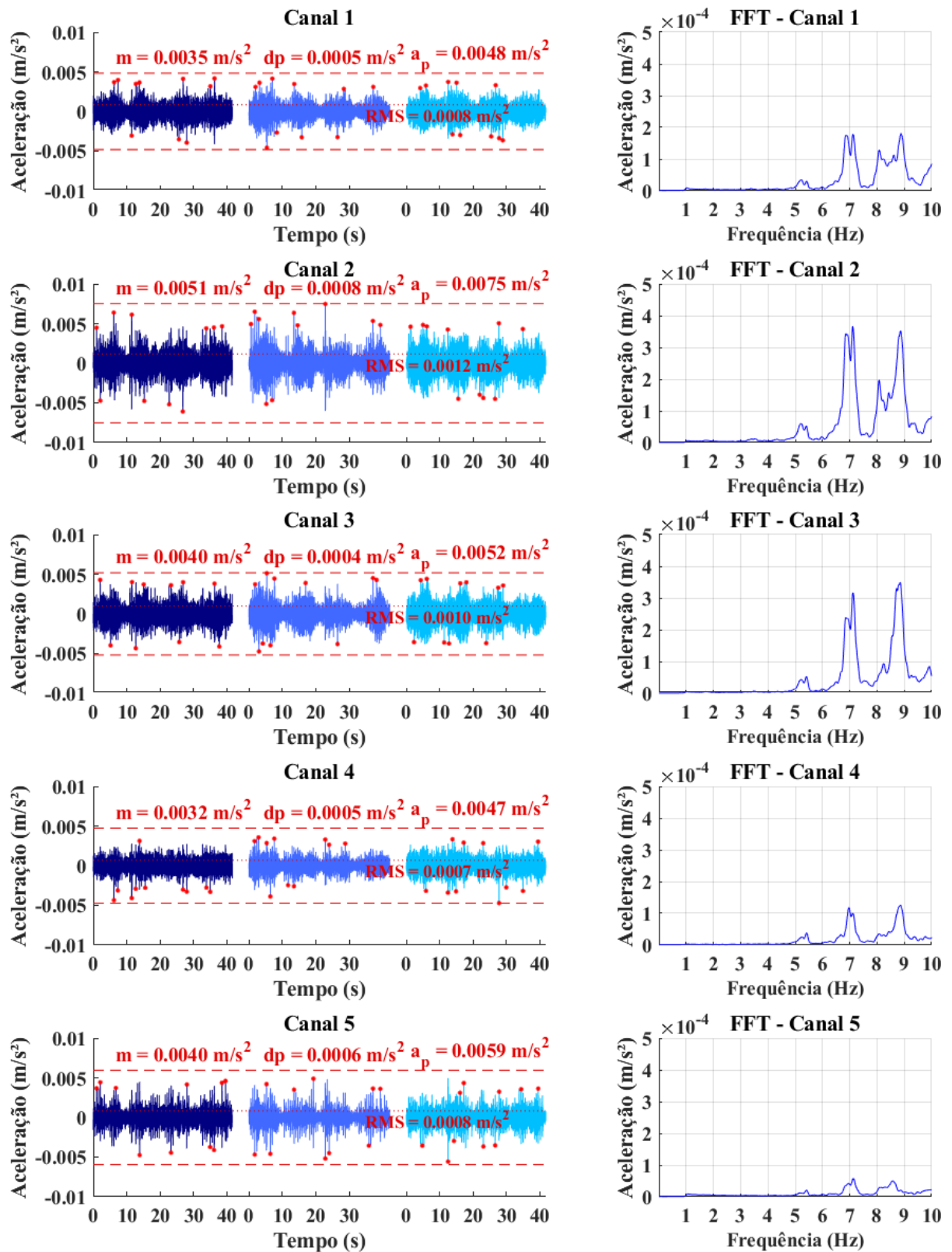


Figura B – 26 – Resposta dinâmica do piso 3 para caminhada lenta em trajetória diagonal.

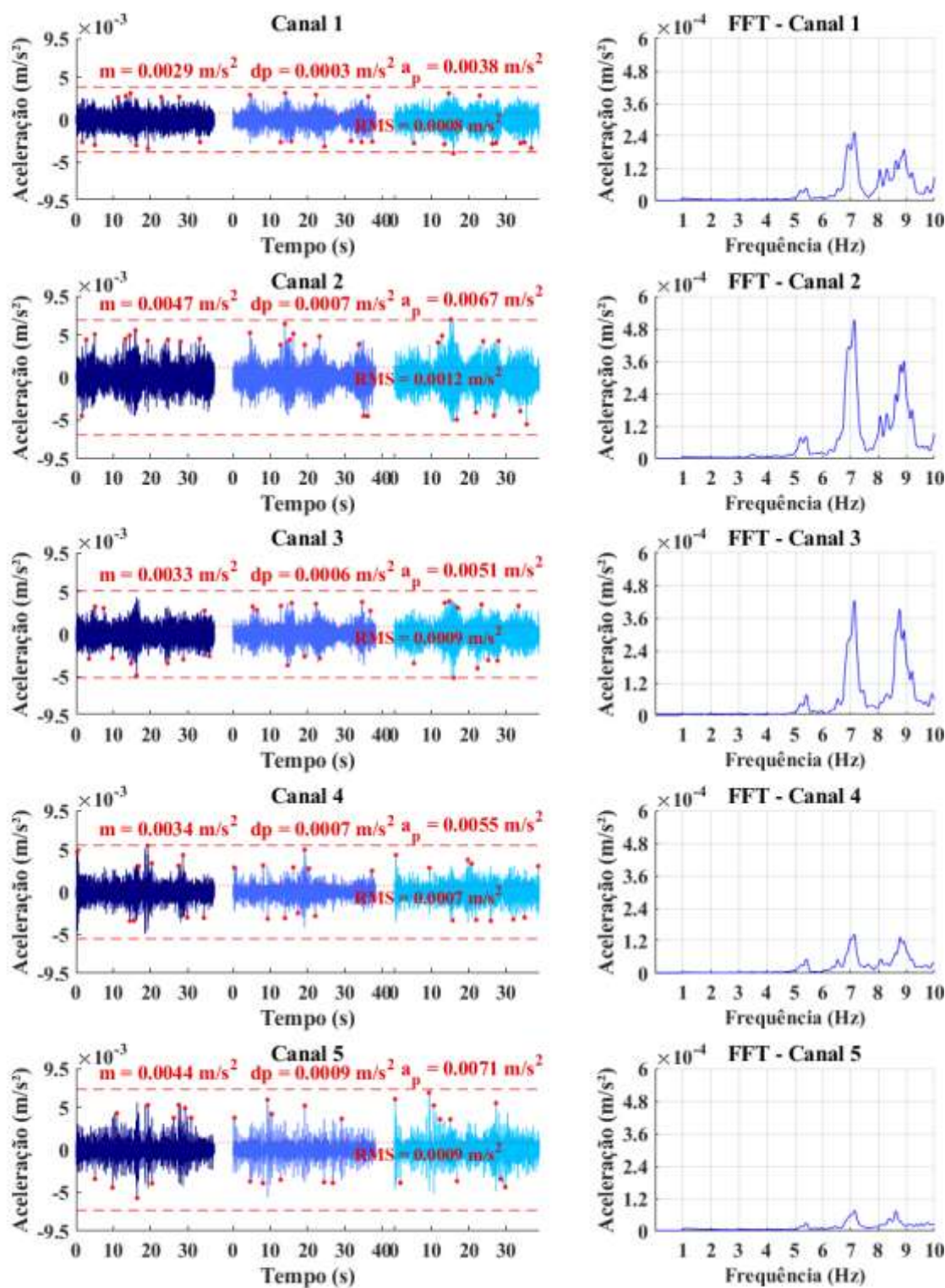


Figura B – 27 – Resposta dinâmica do piso 3 para caminhada lenta em trajetória paralela.

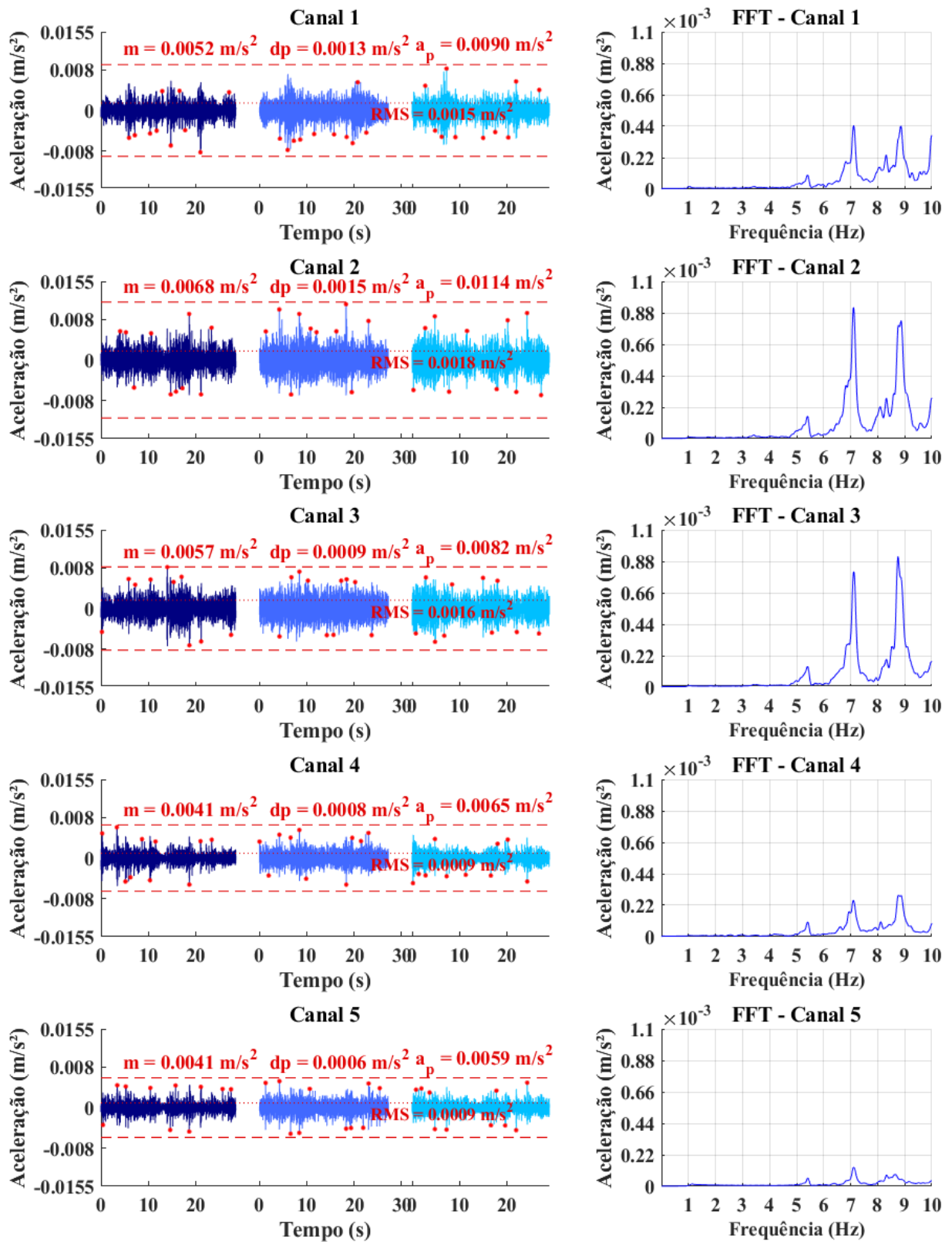


Figura B – 28 – Resposta dinâmica do piso 3 para caminhada lenta em trajetória perpendicular.

### 1.3.2 Caminhada normal

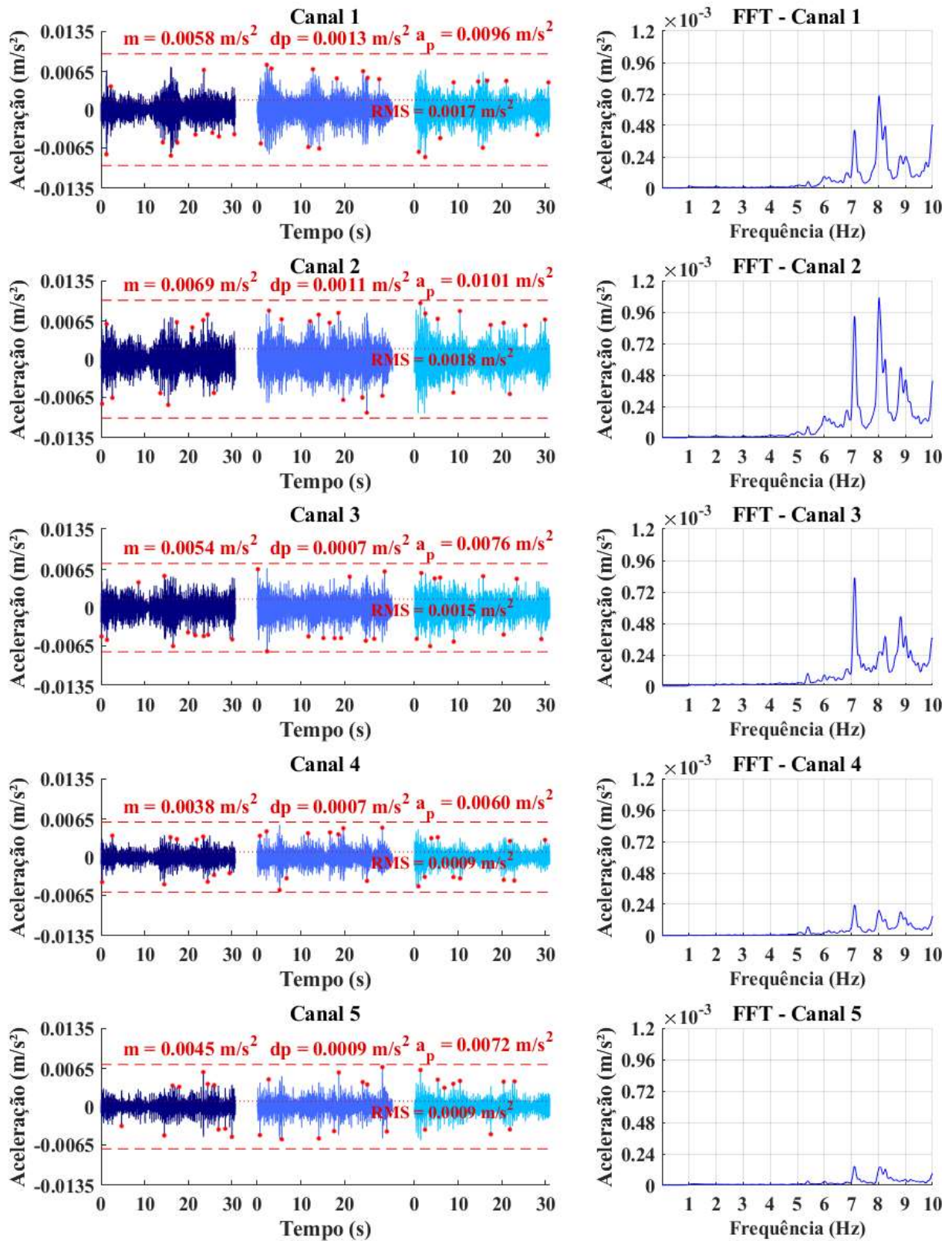


Figura B – 29 – Resposta dinâmica do piso 3 para caminhada normal em trajetória aleatória.

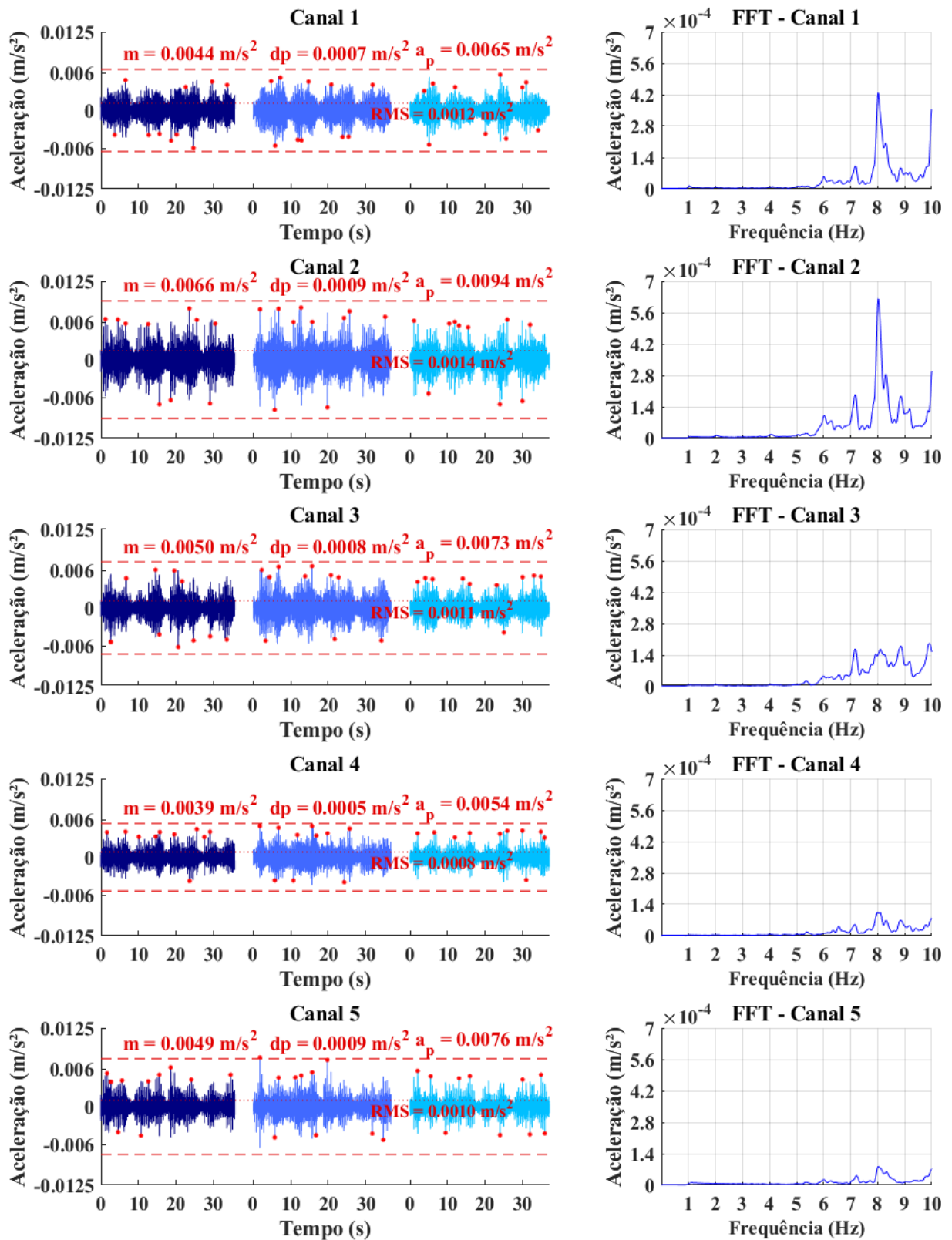


Figura B – 30 – Resposta dinâmica do piso 3 para caminhada normal em trajetória diagonal.

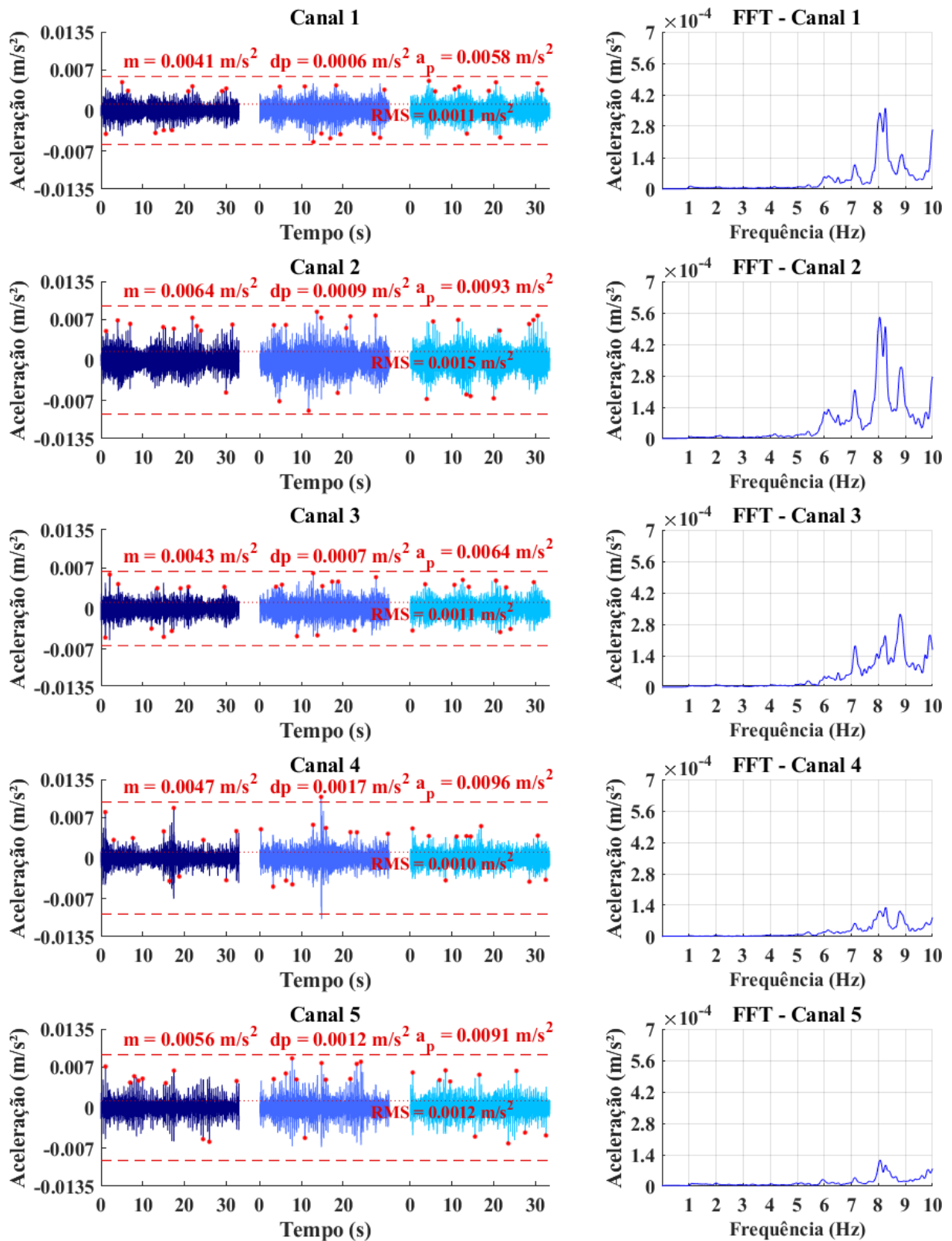


Figura B – 31 – Resposta dinâmica do piso 3 para caminhada normal em trajetória paralela.

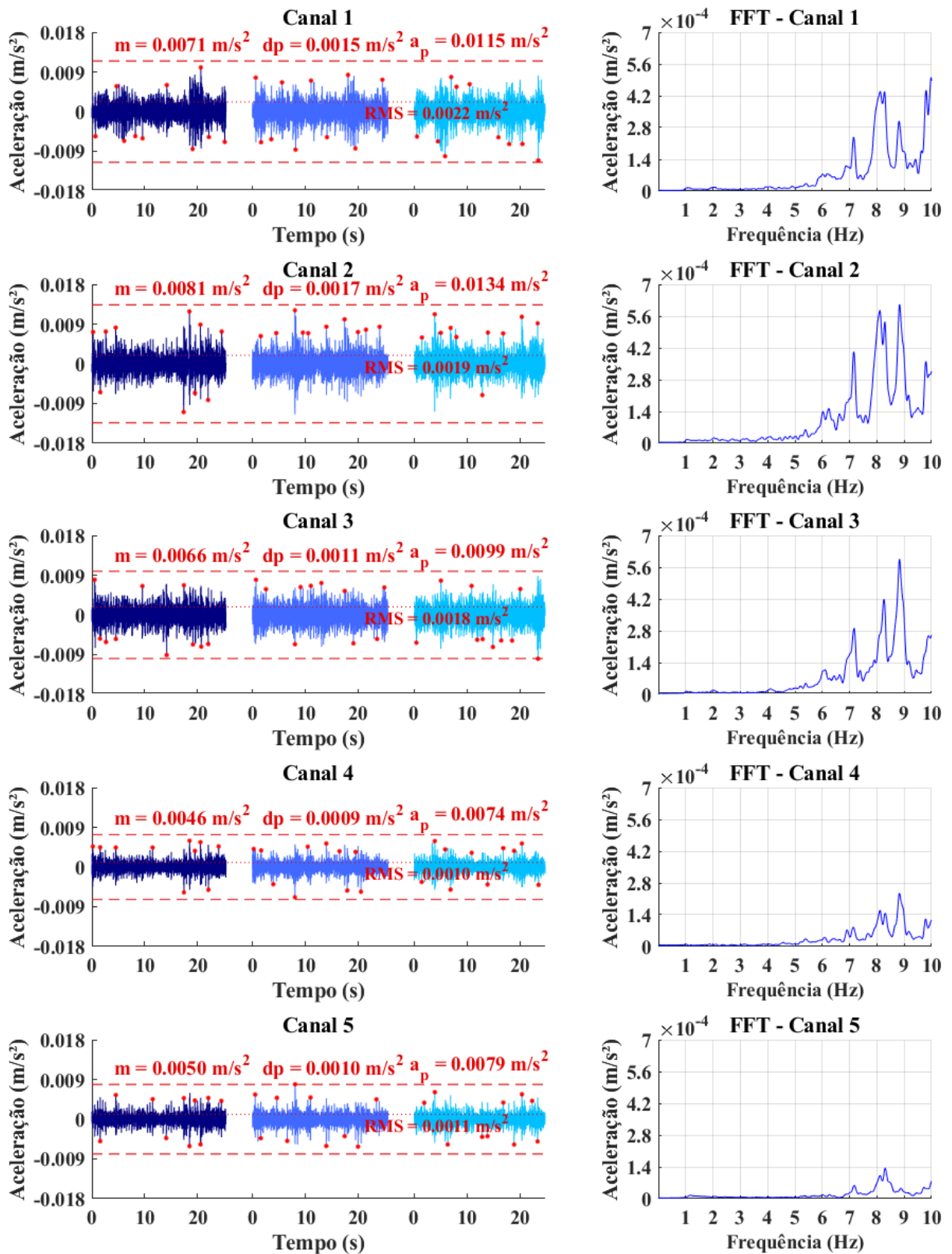


Figura B – 32 – Resposta dinâmica do piso 3 para caminhada normal em trajetória perpendicular.

### 1.3.3 Caminhada rápida

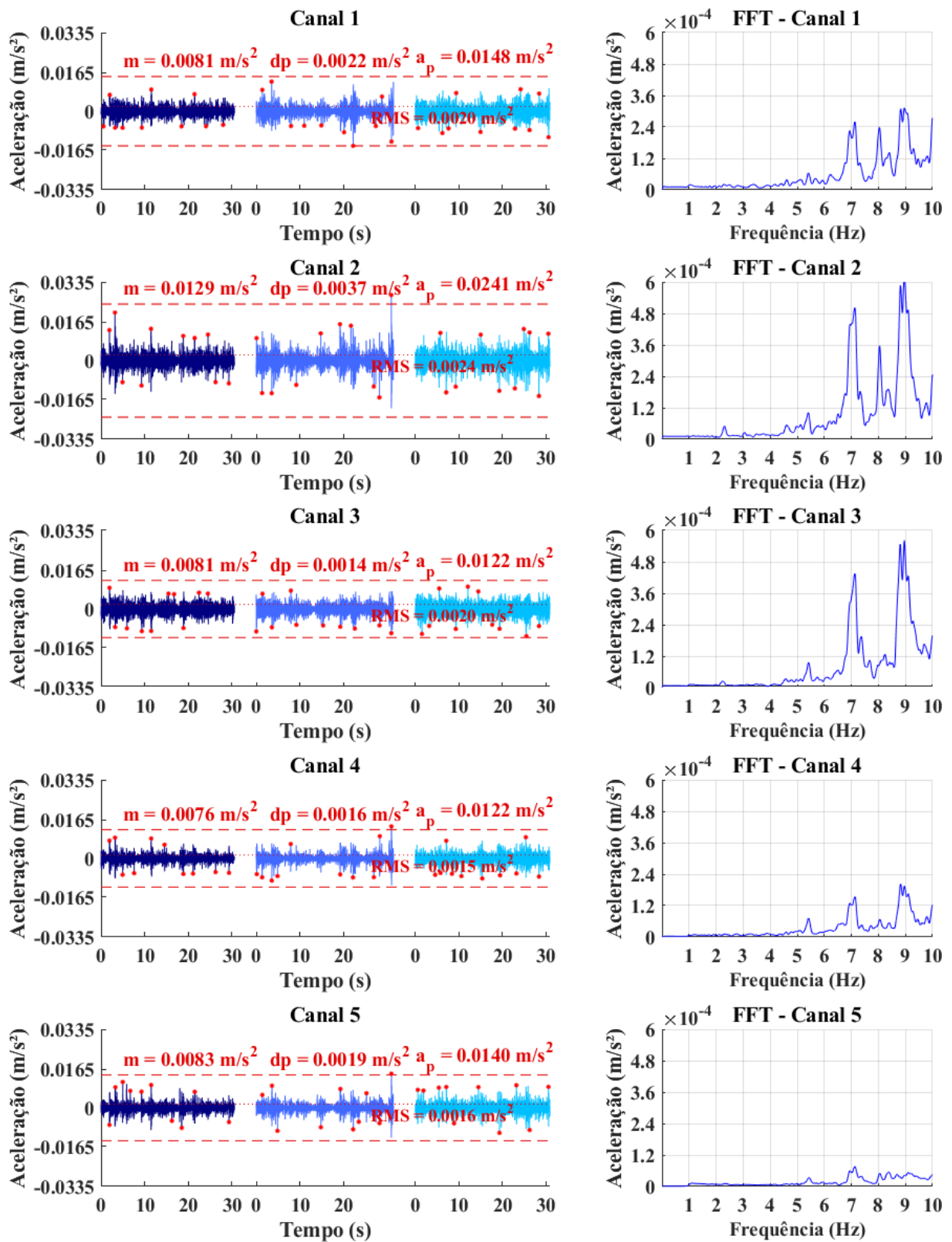


Figura B – 33 – Resposta dinâmica do piso 3 para caminhada rápida em trajetória aleatória.

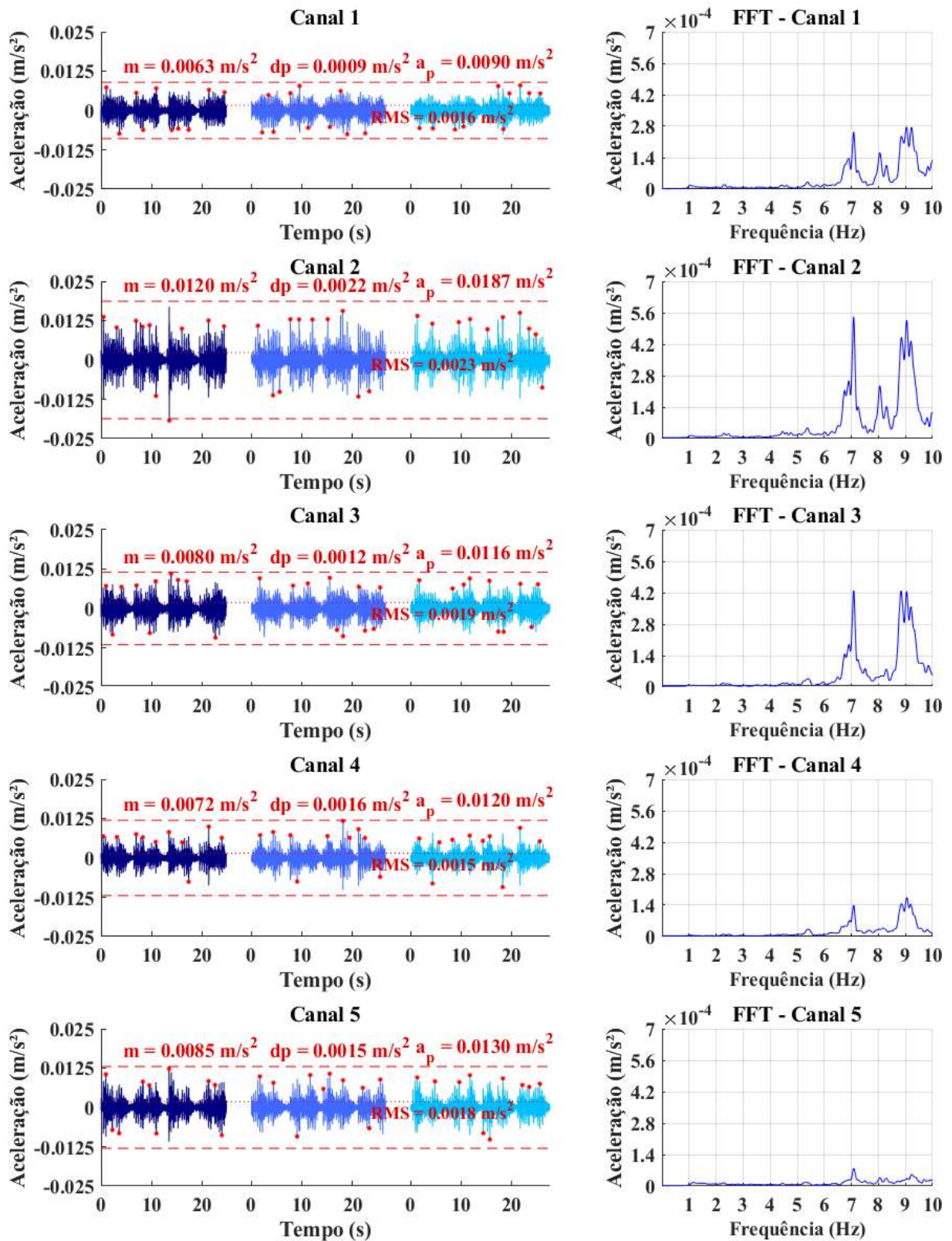


Figura B – 34 – Resposta dinâmica do piso 3 para caminhada rápida em trajetória diagonal.

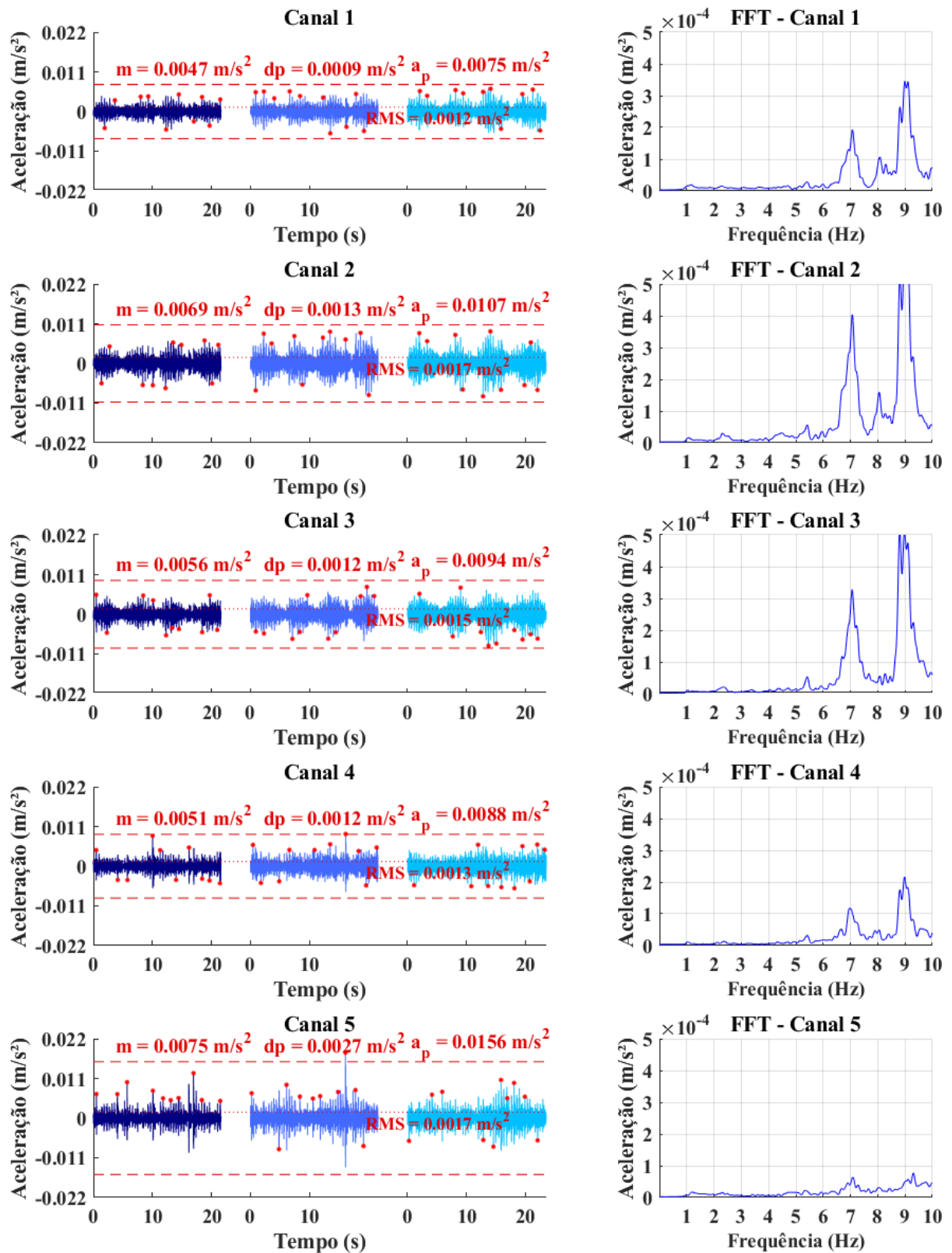


Figura B – 35 – Resposta dinâmica do piso 3 para caminhada rápida em trajetória paralela.

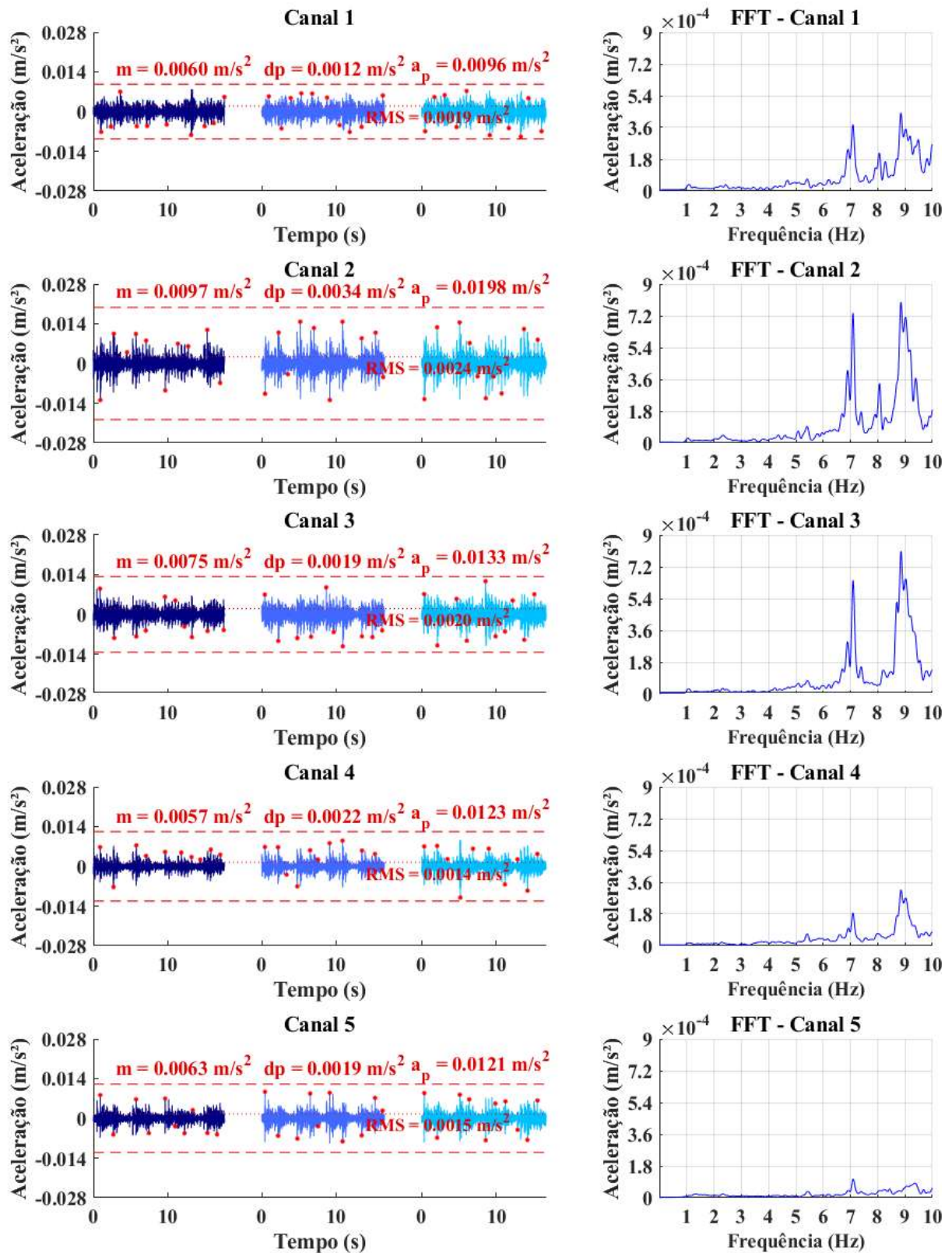


Figura B – 36 – Resposta dinâmica do piso 3 para caminhada rápida em trajetória perpendicular.

## 1.4 Piso 4

### 1.4.1 Caminhada lenta

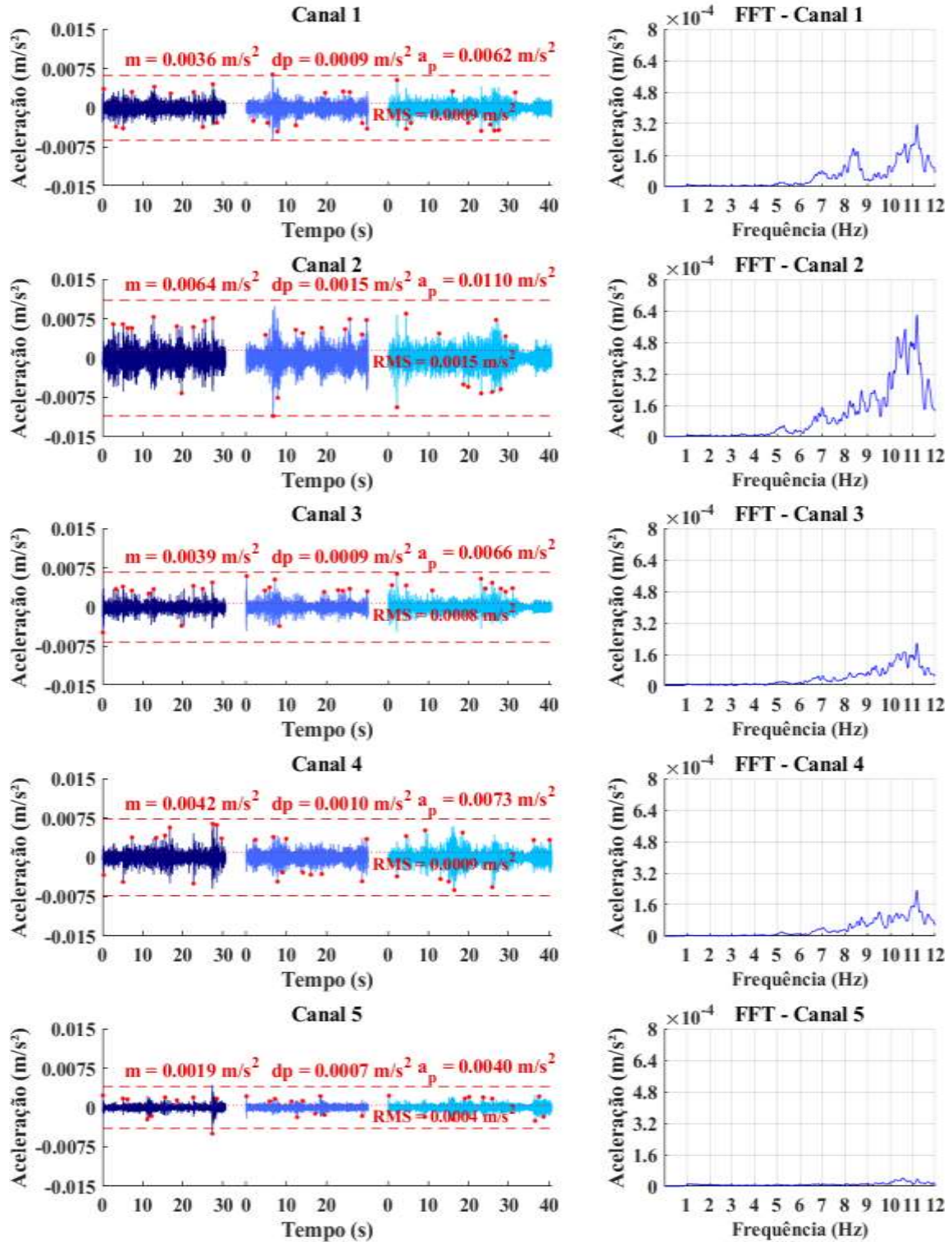


Figura B – 37 – Resposta dinâmica do piso 4 para caminhada lenta em trajetória aleatória.

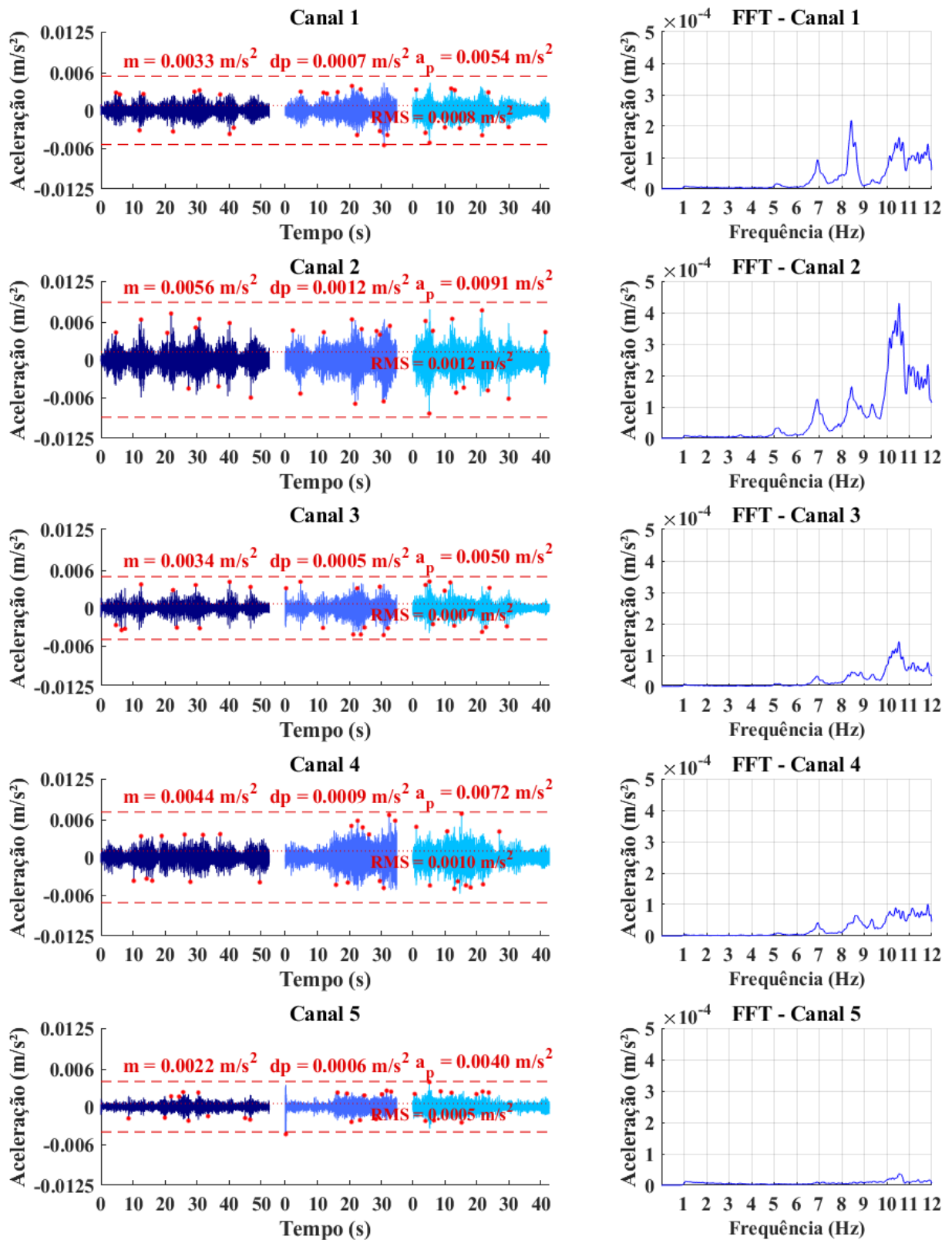


Figura B – 38 – Resposta dinâmica do piso 4 para caminhada lenta em trajetória diagonal.

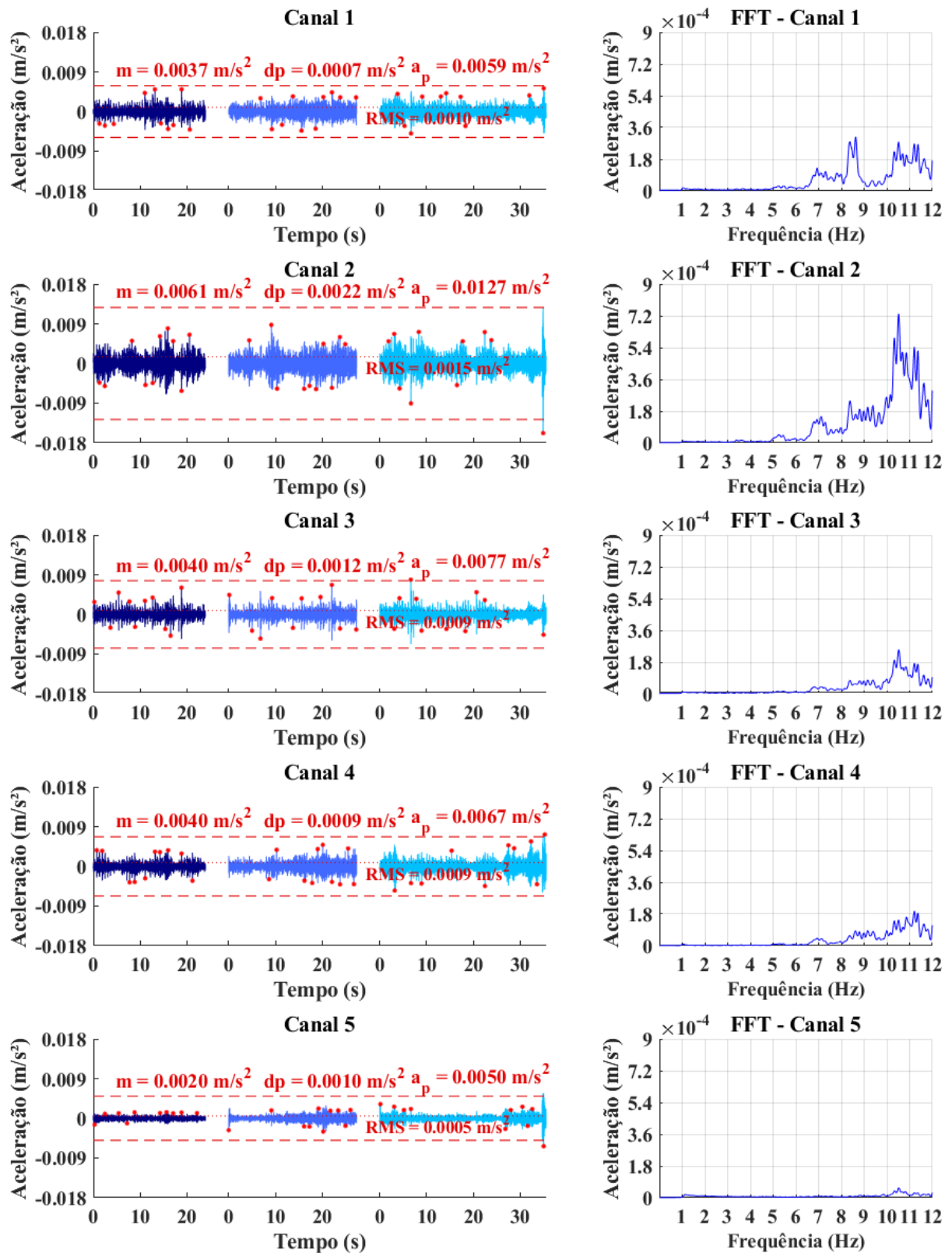


Figura B – 39 – Resposta dinâmica do piso 4 para caminhada lenta em trajetória paralela.

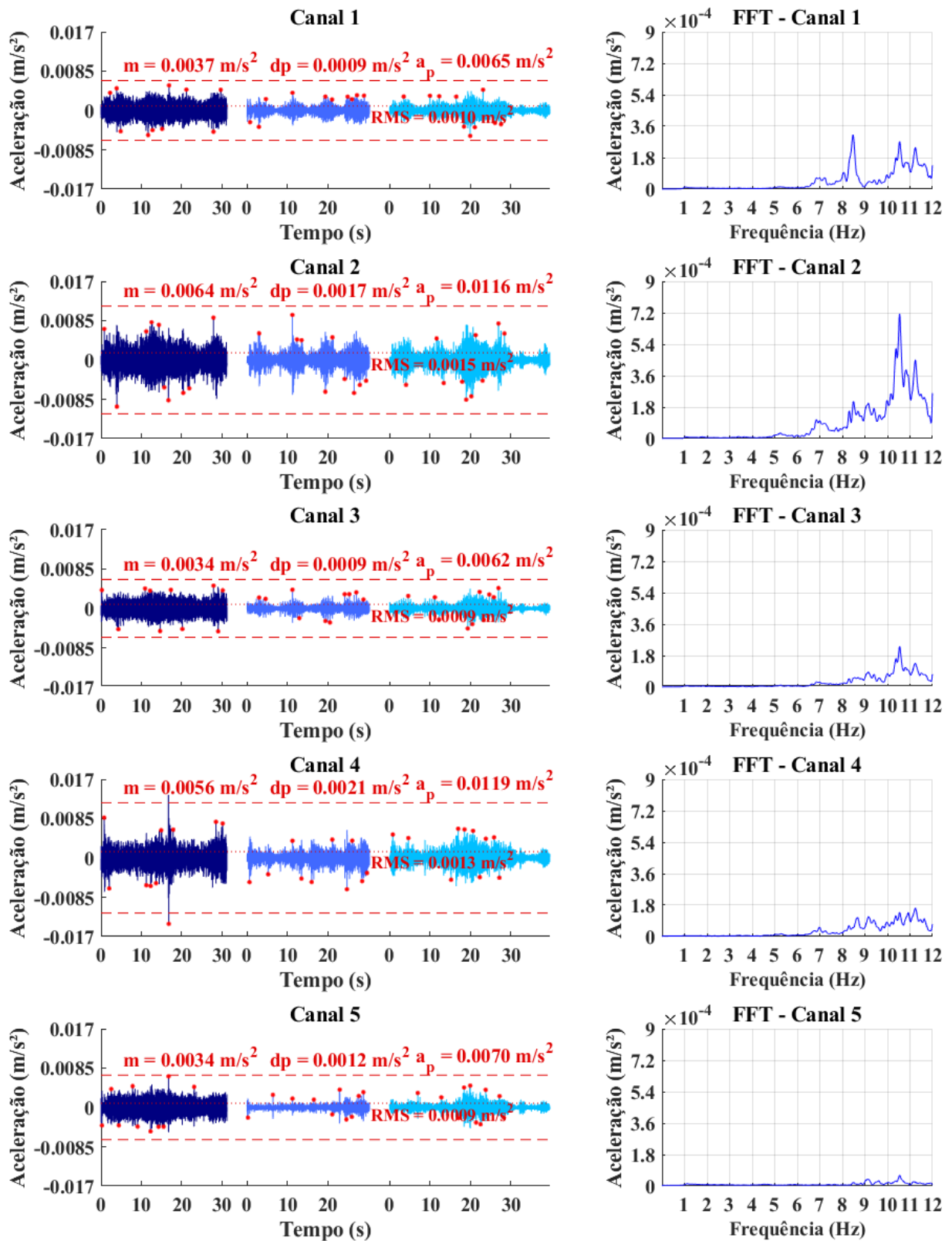


Figura B – 40 – Resposta dinâmica do piso 4 para caminhada lenta em trajetória perpendicular.

## 1.4.2 Caminhada normal

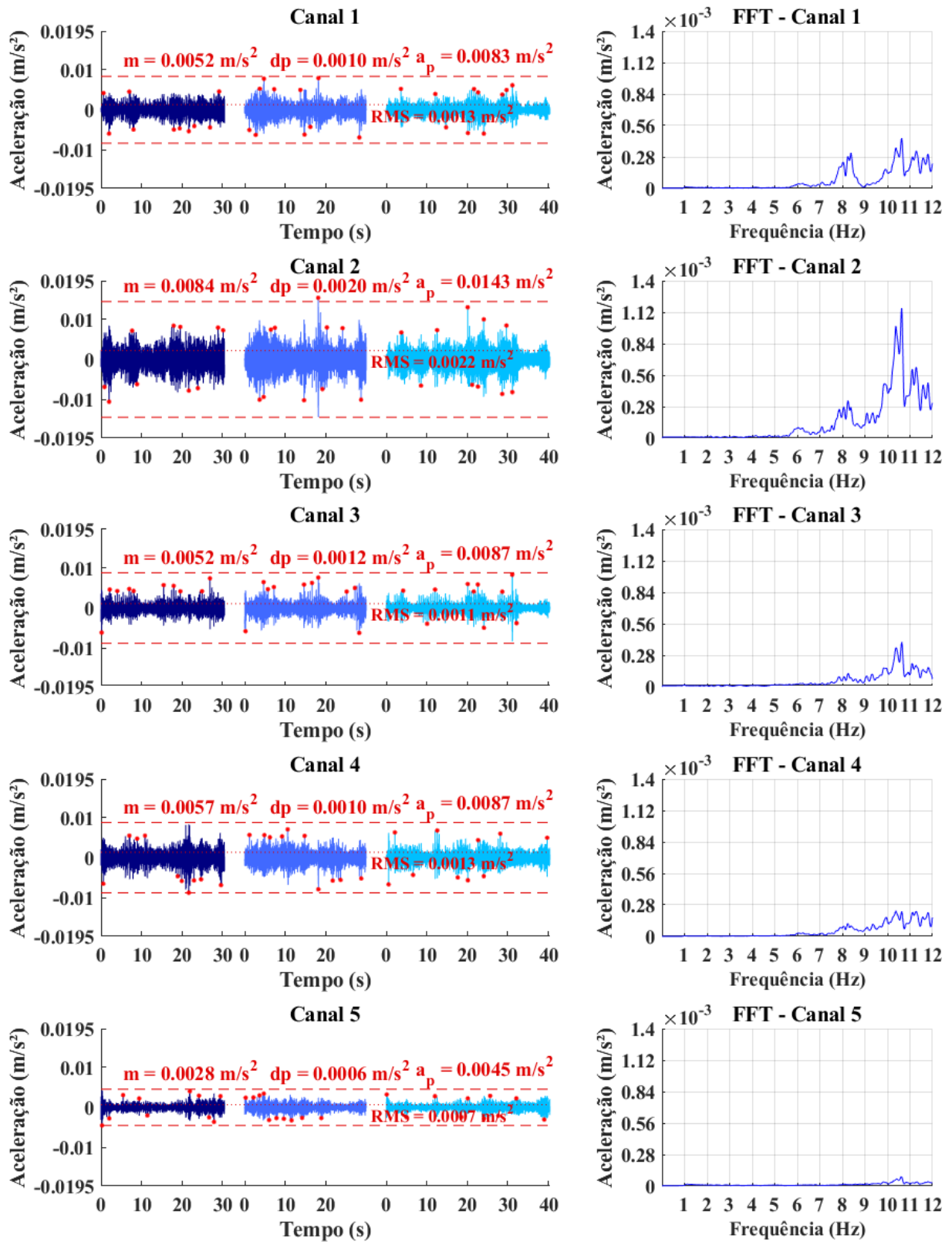


Figura B – 41 – Resposta dinâmica do piso 4 para caminhada normal em trajetória aleatória.

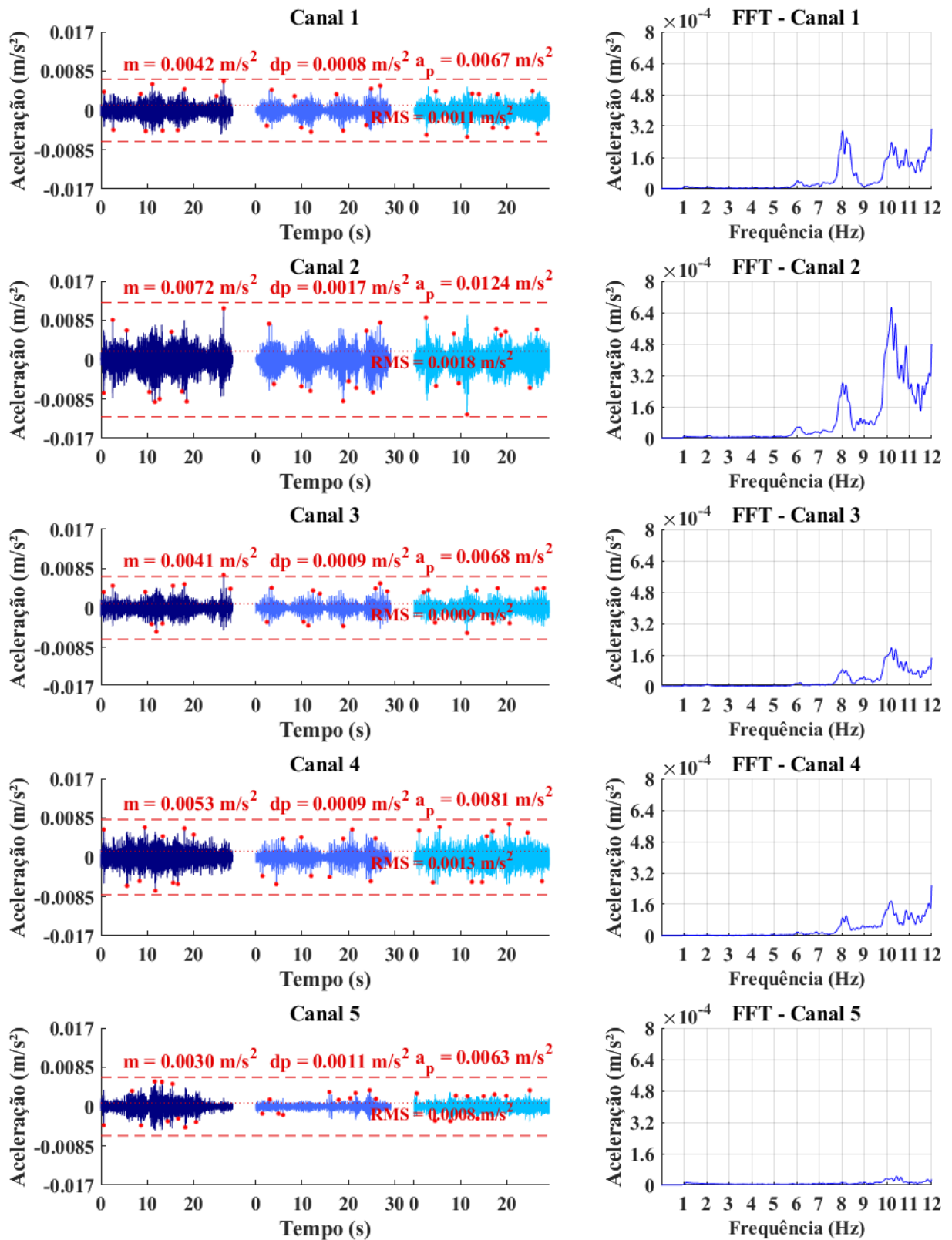


Figura B – 42 – Resposta dinâmica do piso 4 para caminhada normal em trajetória diagonal.

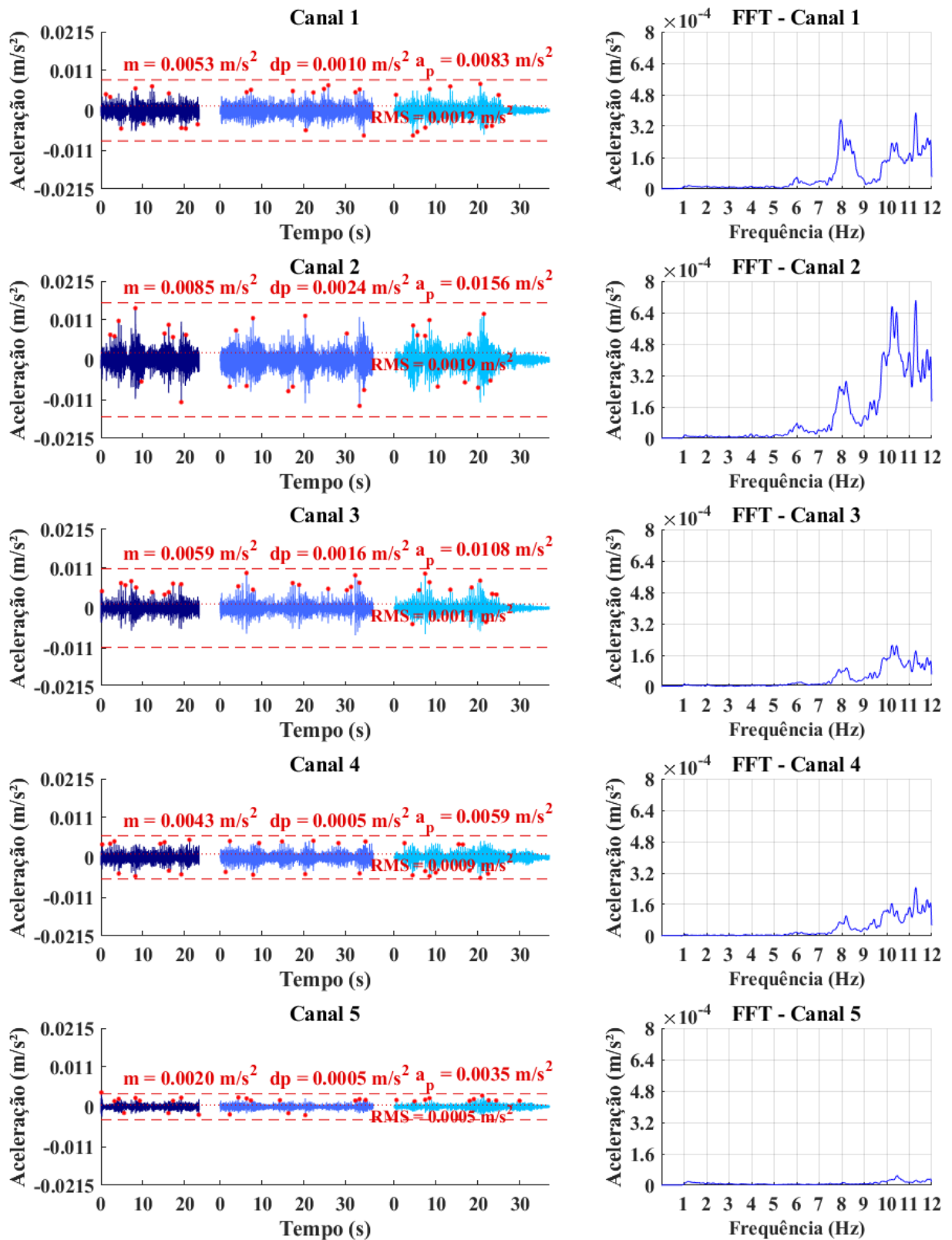


Figura B – 43 – Resposta dinâmica do piso 4 para caminhada normal em trajetória paralela.

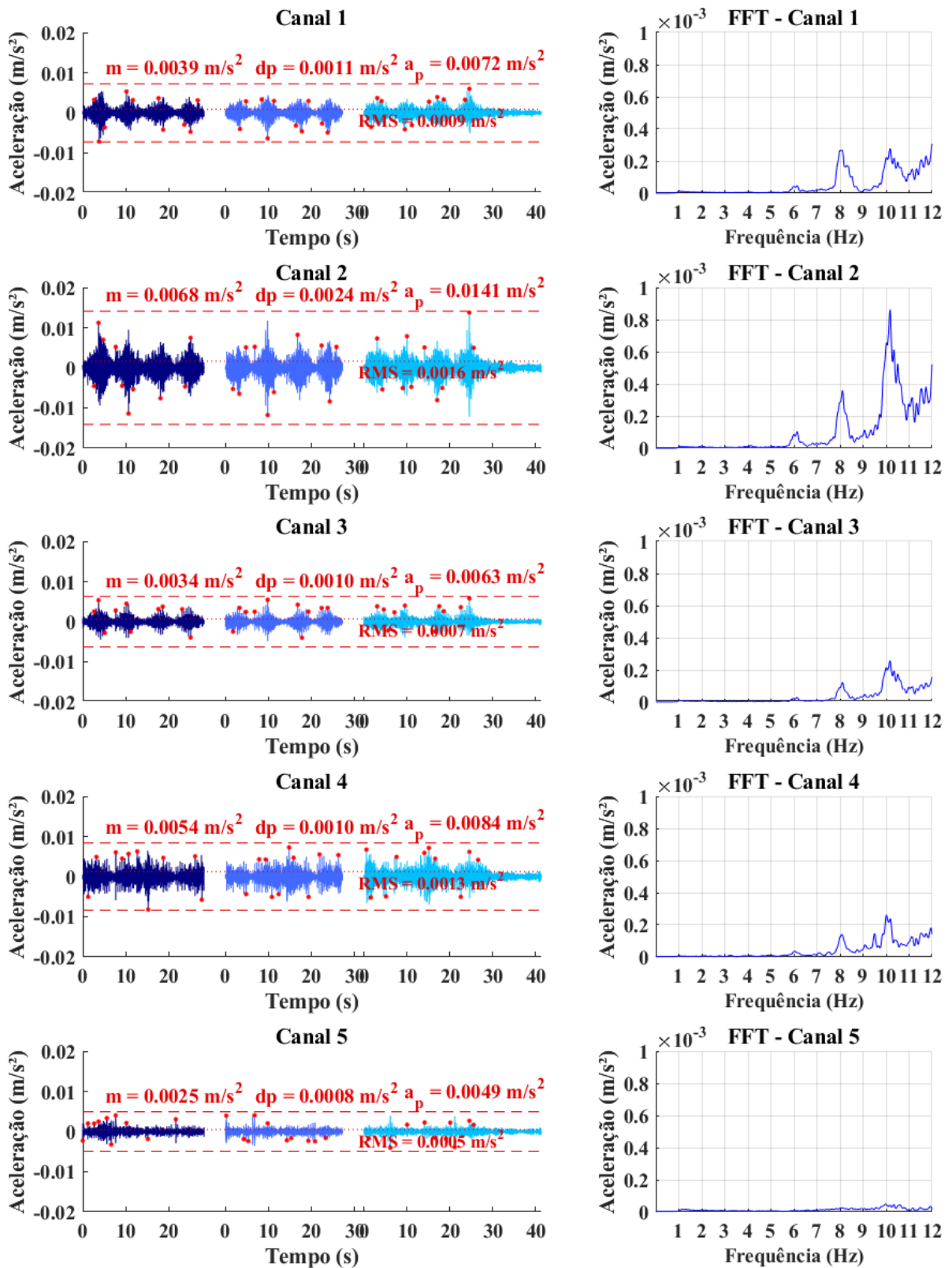


Figura B – 44 – Resposta dinâmica do piso 4 para caminhada normal em trajetória perpendicular.

### 1.4.3 Caminhada rápida

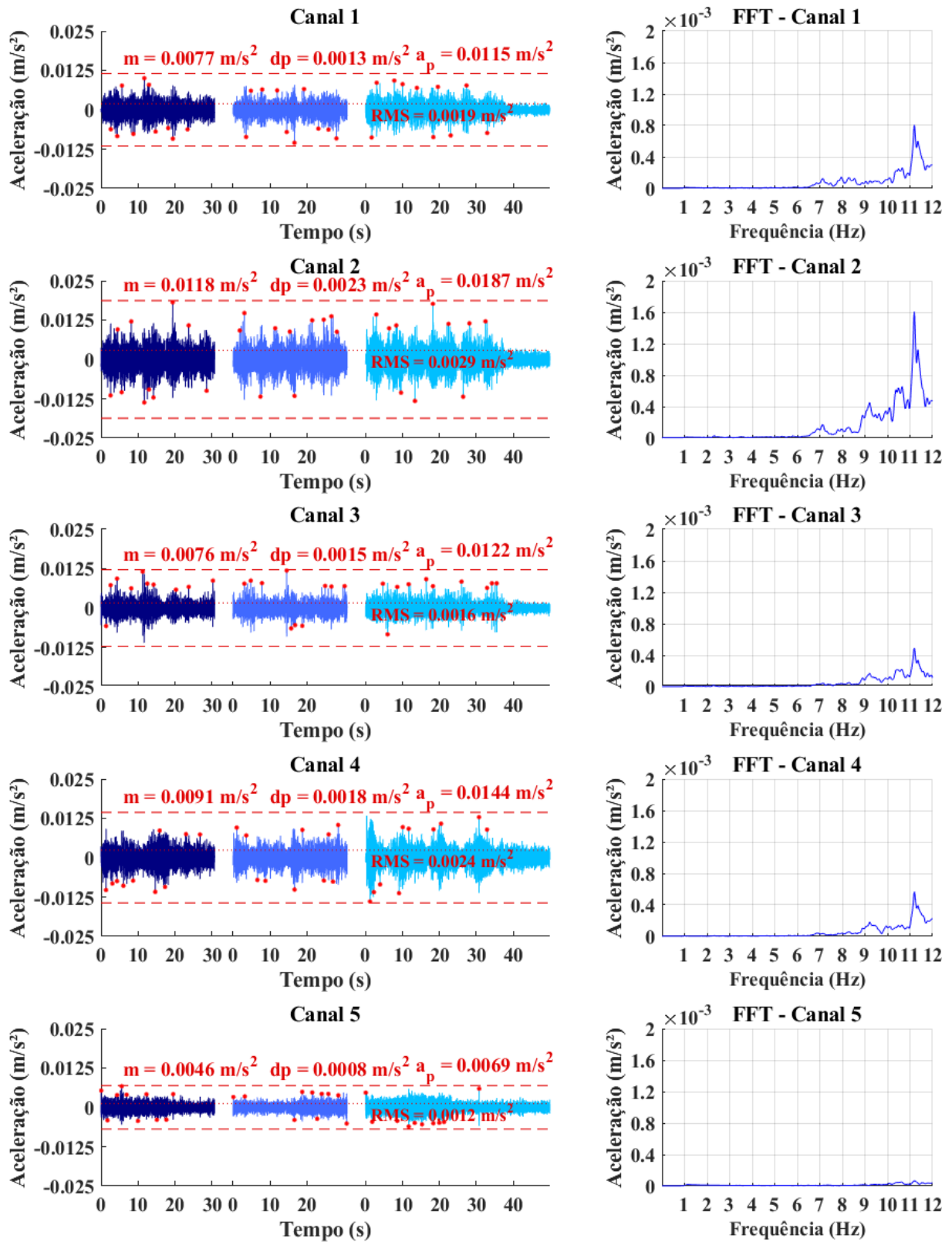


Figura B – 45 – Resposta dinâmica do piso 4 para caminhada rápida em trajetória aleatória.

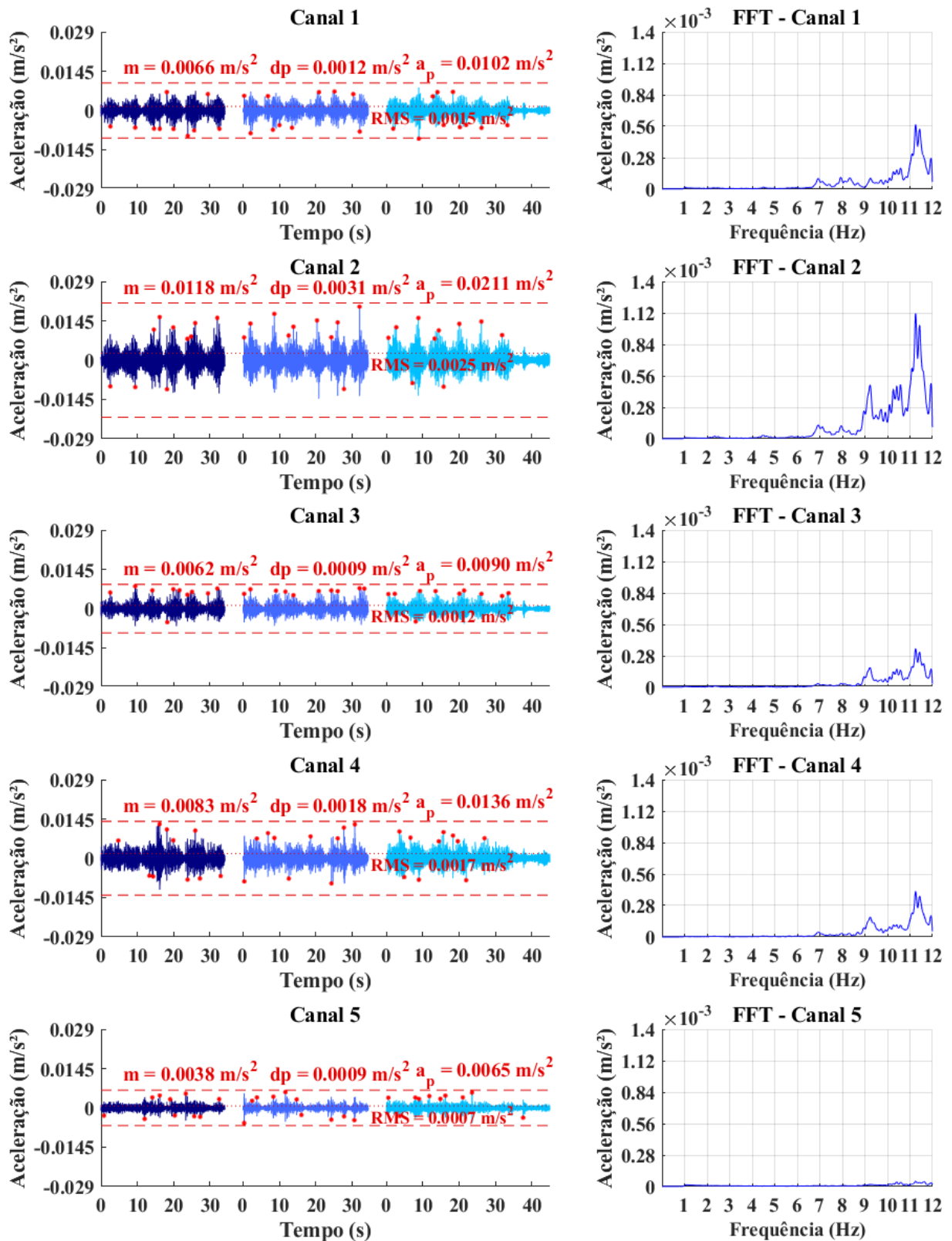


Figura B – 46 – Resposta dinâmica do piso 4 para caminhada rápida em trajetória diagonal.

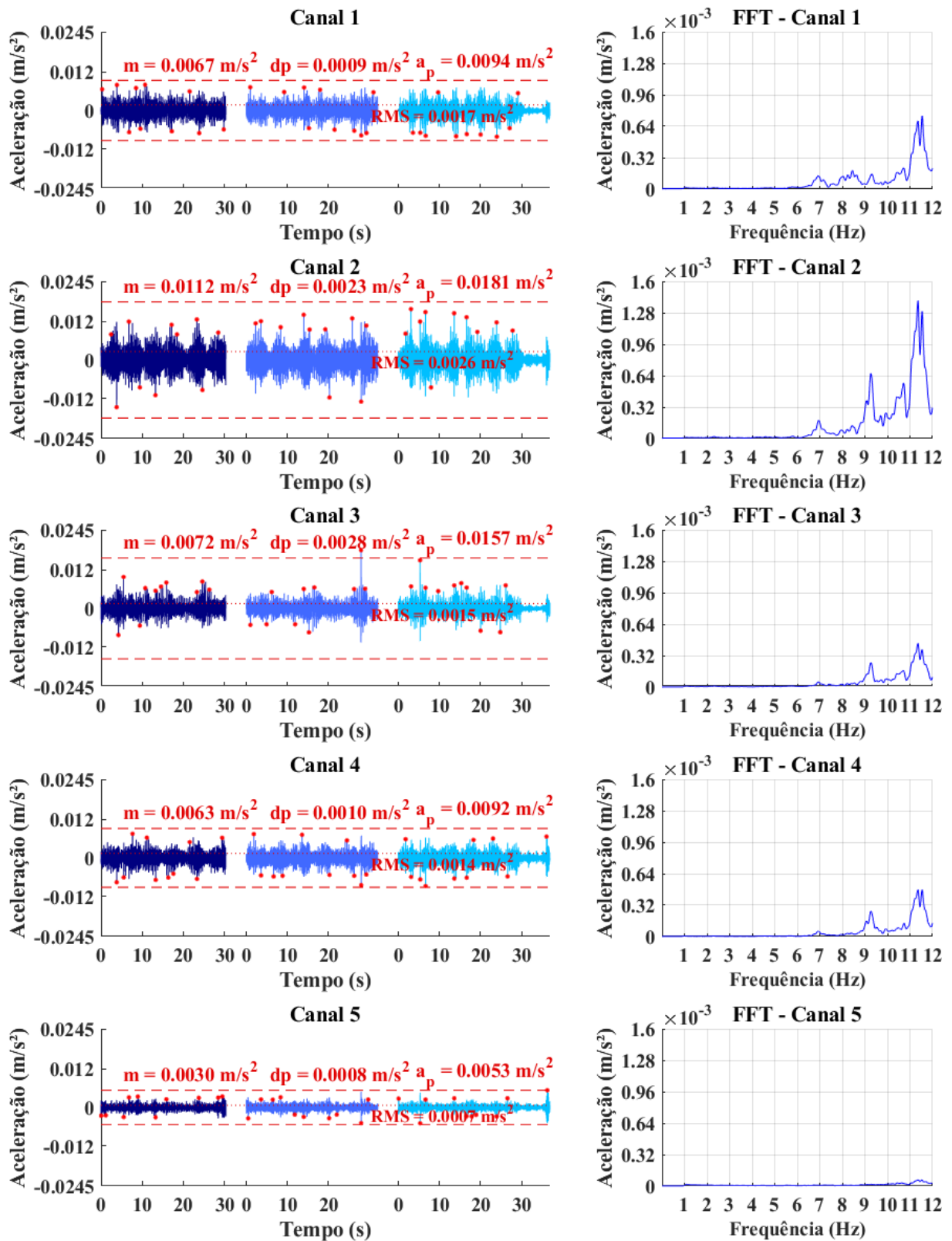


Figura B – 47 – Resposta dinâmica do piso 4 para caminhada rápida em trajetória paralela.

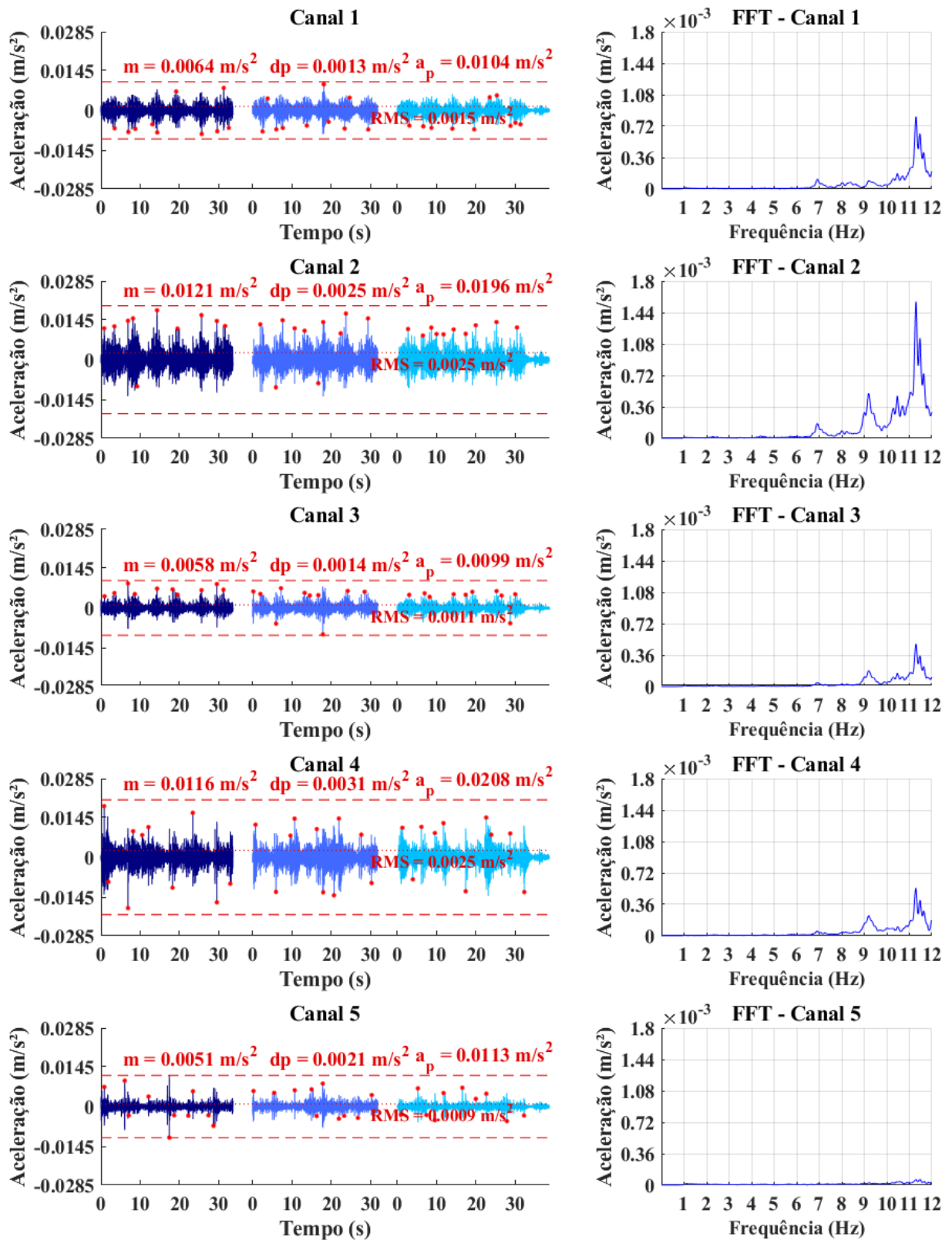


Figura B – 48 – Resposta dinâmica do piso 4 para caminhada rápida em trajetória perpendicular.

## 1.5 Piso 5

### 1.5.1 Caminhada lenta

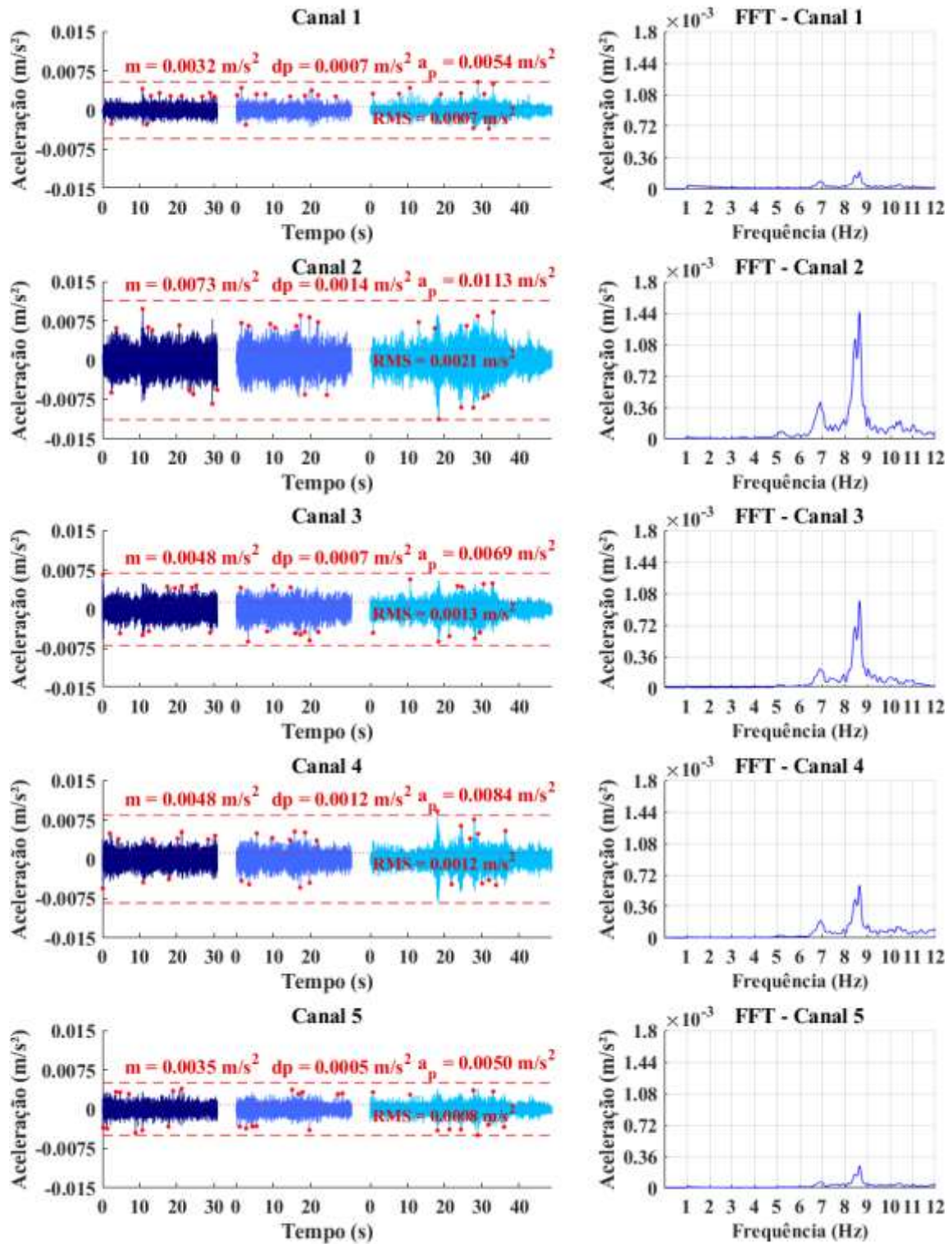


Figura B – 49 – Resposta dinâmica do piso 5 para caminhada lenta em trajetória aleatória.

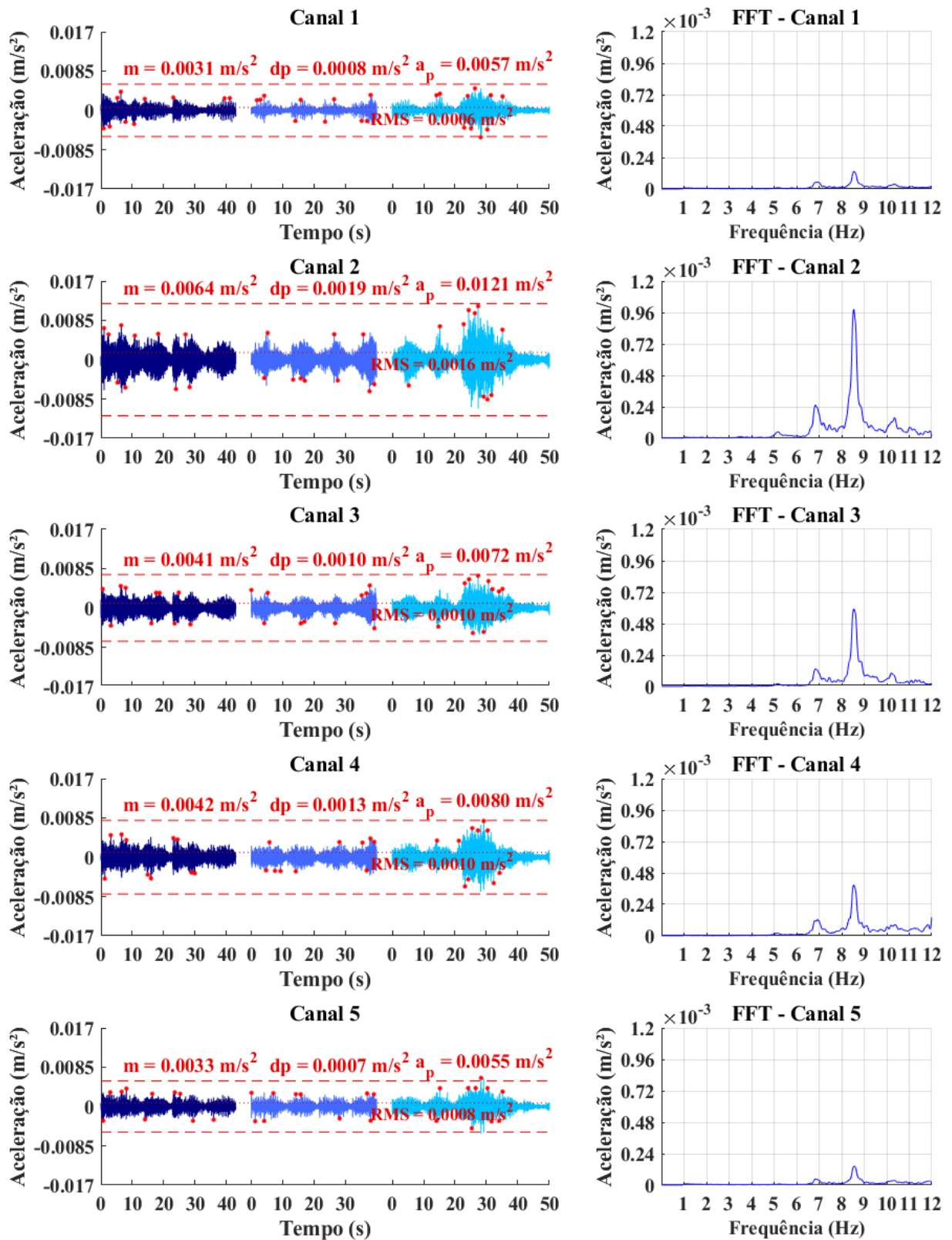


Figura B – 50 – Resposta dinâmica do piso 5 para caminhada lenta em trajetória diagonal.

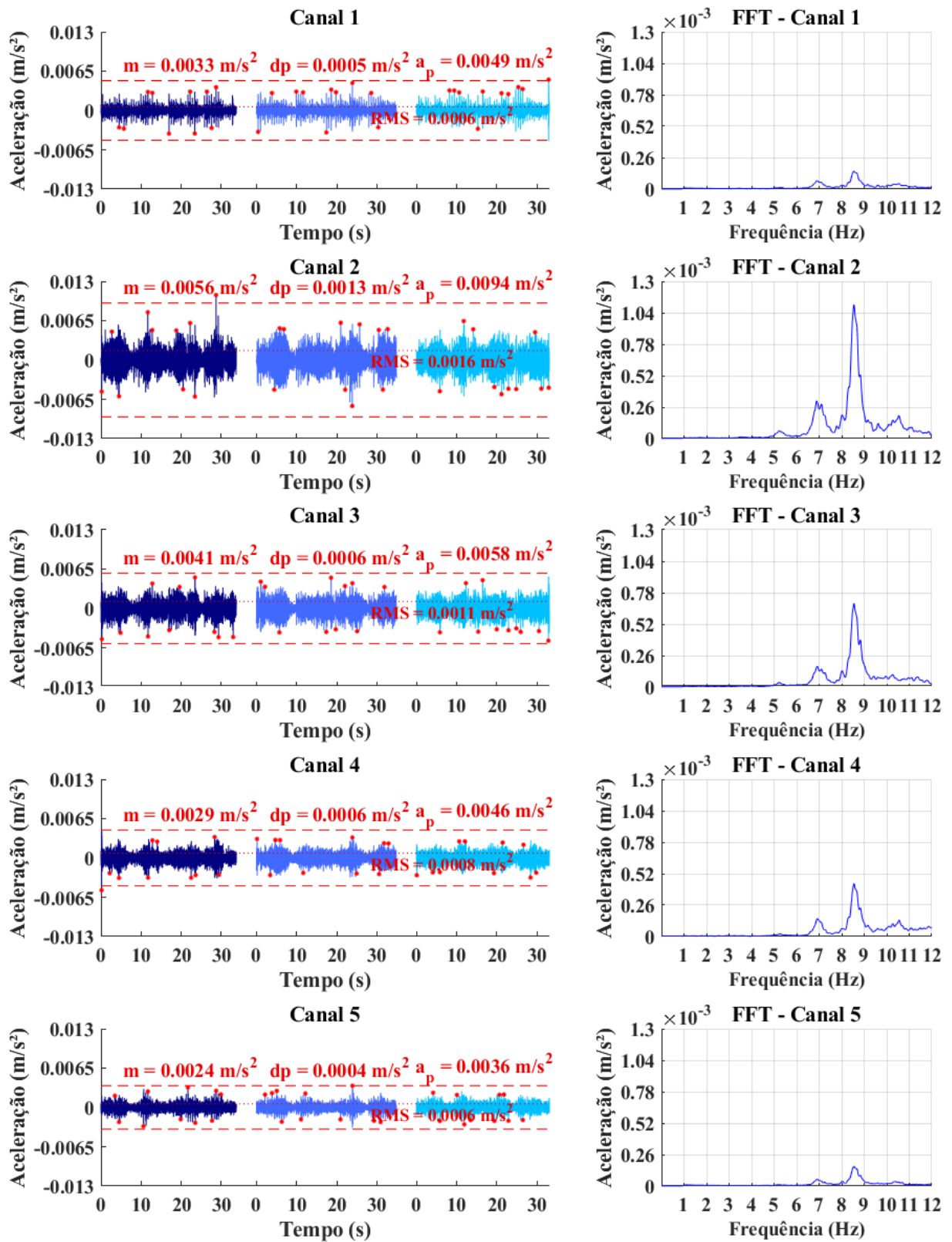


Figura B – 51 – Resposta dinâmica do piso 5 para caminhada lenta em trajetória paralela.

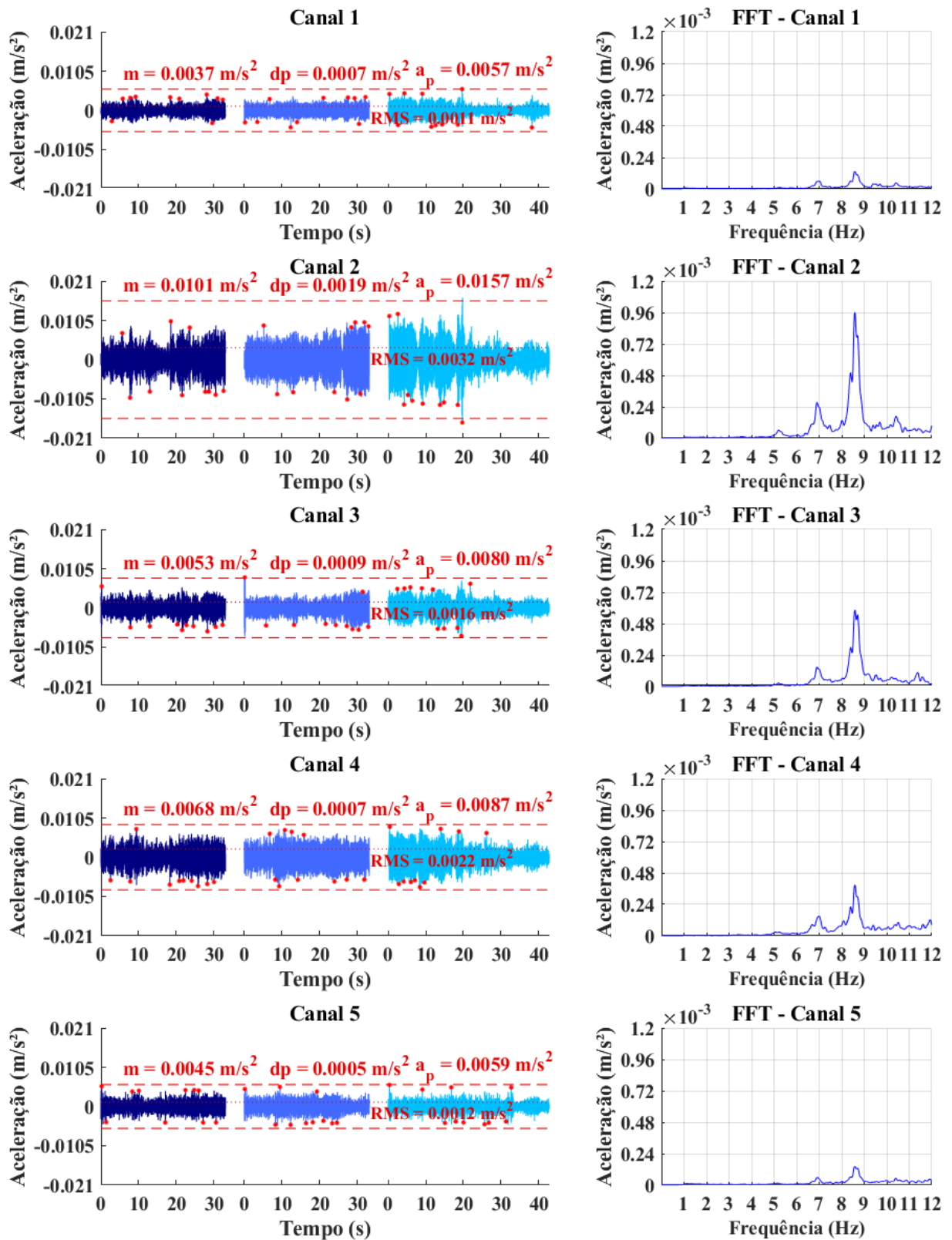


Figura B – 52 – Resposta dinâmica do piso 5 para caminhada lenta em trajetória perpendicular.

## 1.5.2 Caminhada normal

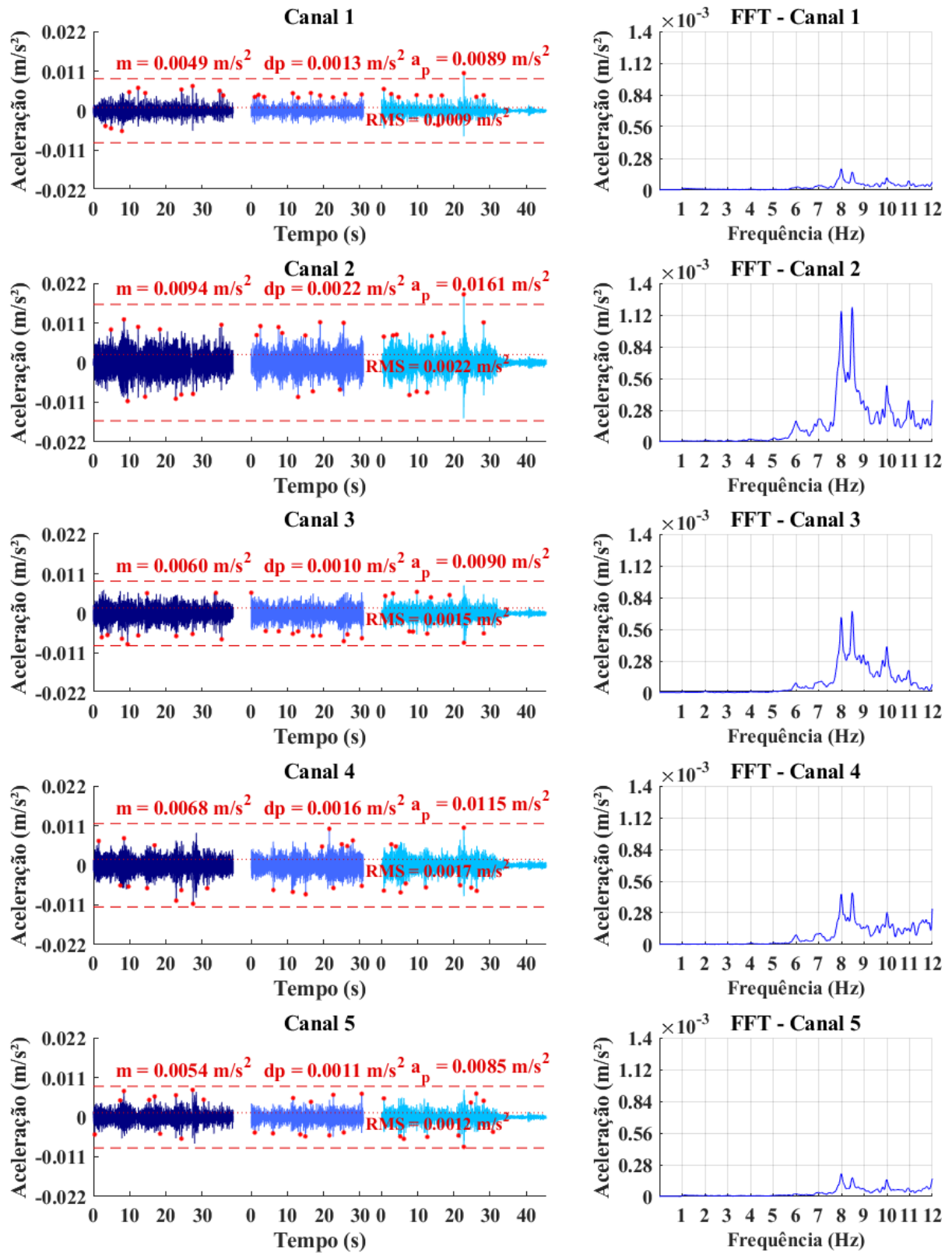


Figura B – 53 – Resposta dinâmica do piso 5 para caminhada normal em trajetória aleatória.

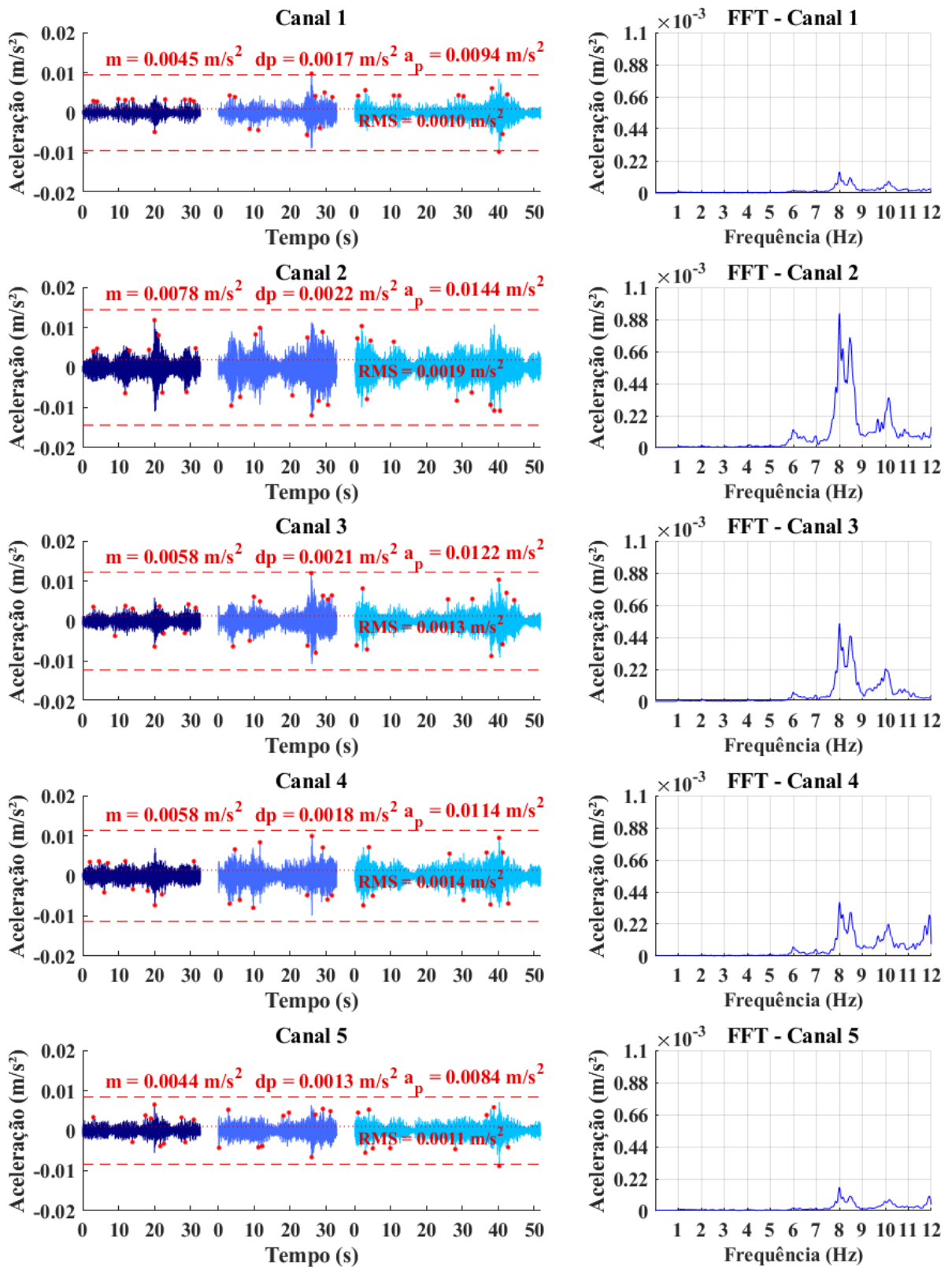


Figura B – 54 – Resposta dinâmica do piso 5 para caminhada normal em trajetória diagonal.

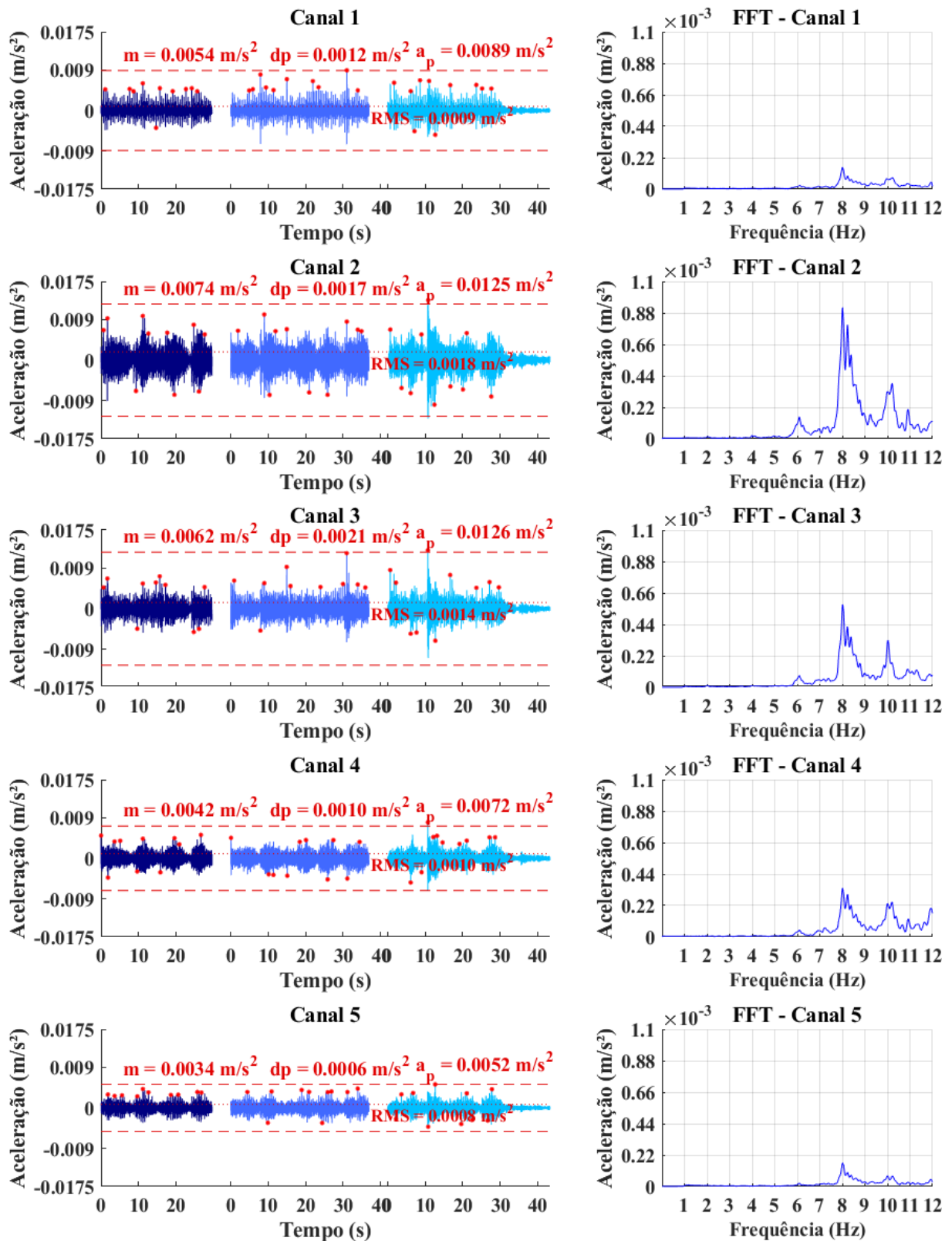


Figura B – 55 – Resposta dinâmica do piso 5 para caminhada normal em trajetória paralela.

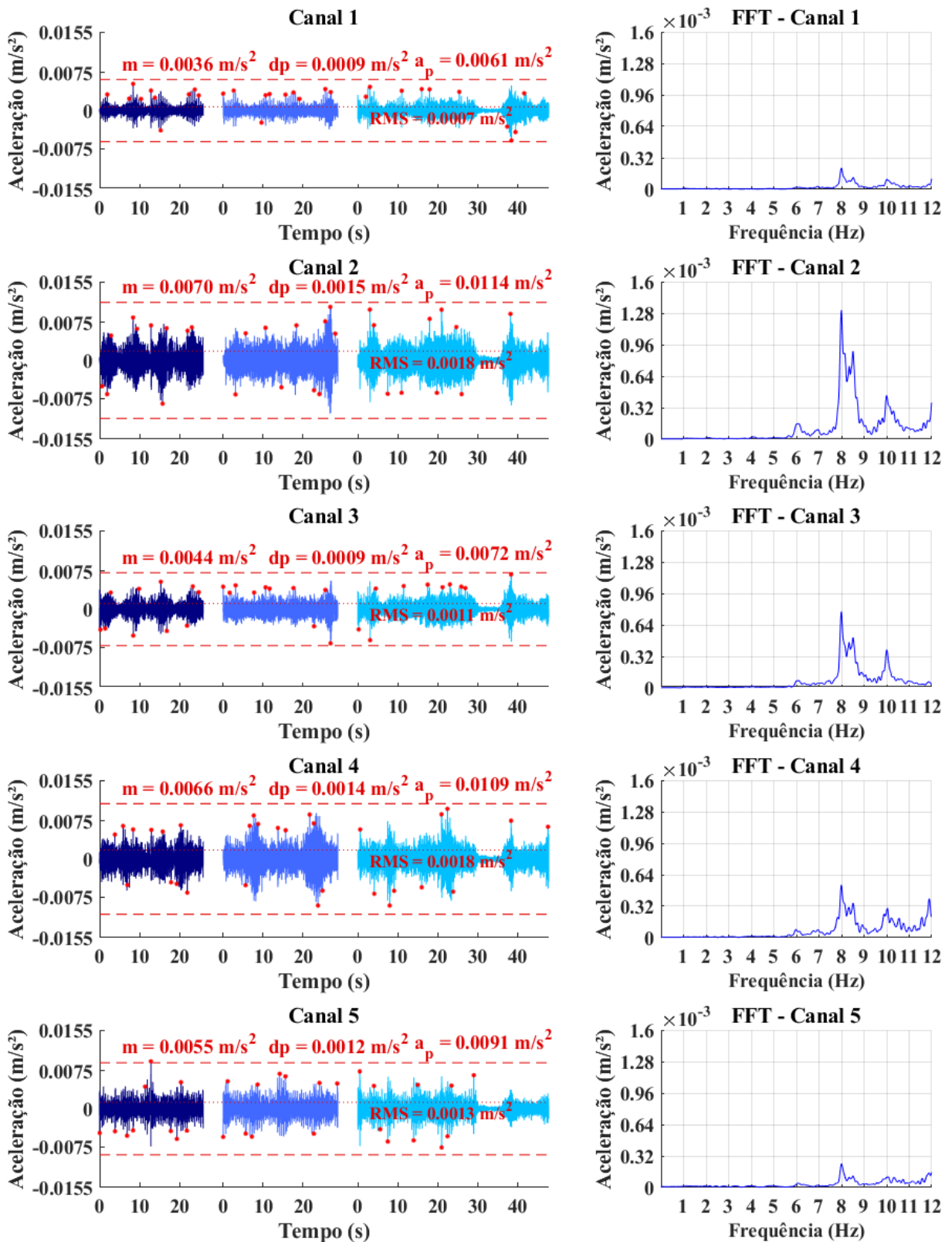


Figura B – 56 – Resposta dinâmica do piso 5 para caminhada normal em trajetória perpendicular.

## 1.5.3 Caminhada rápida

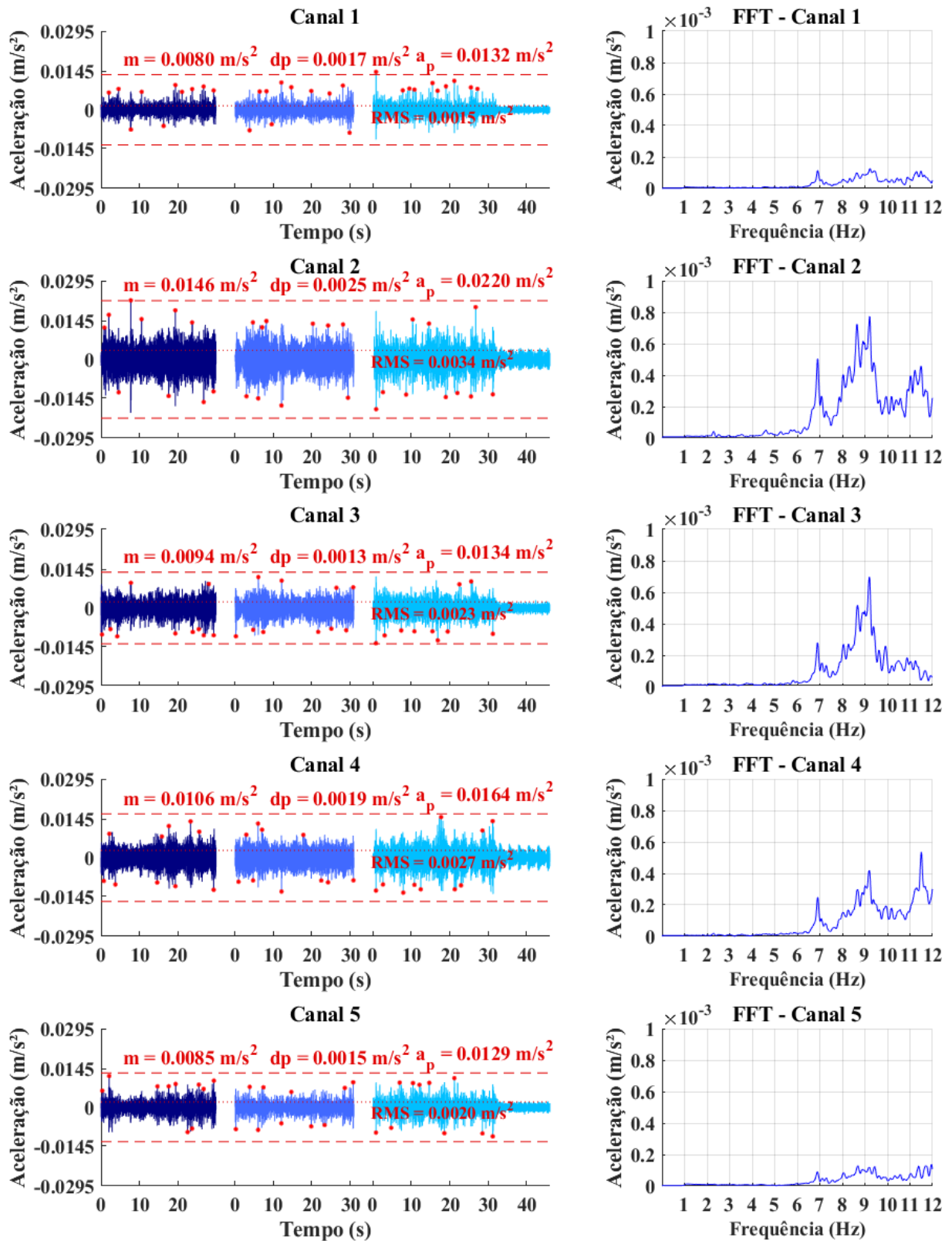


Figura B – 57 – Resposta dinâmica do piso 5 para caminhada rápida em trajetória aleatória.

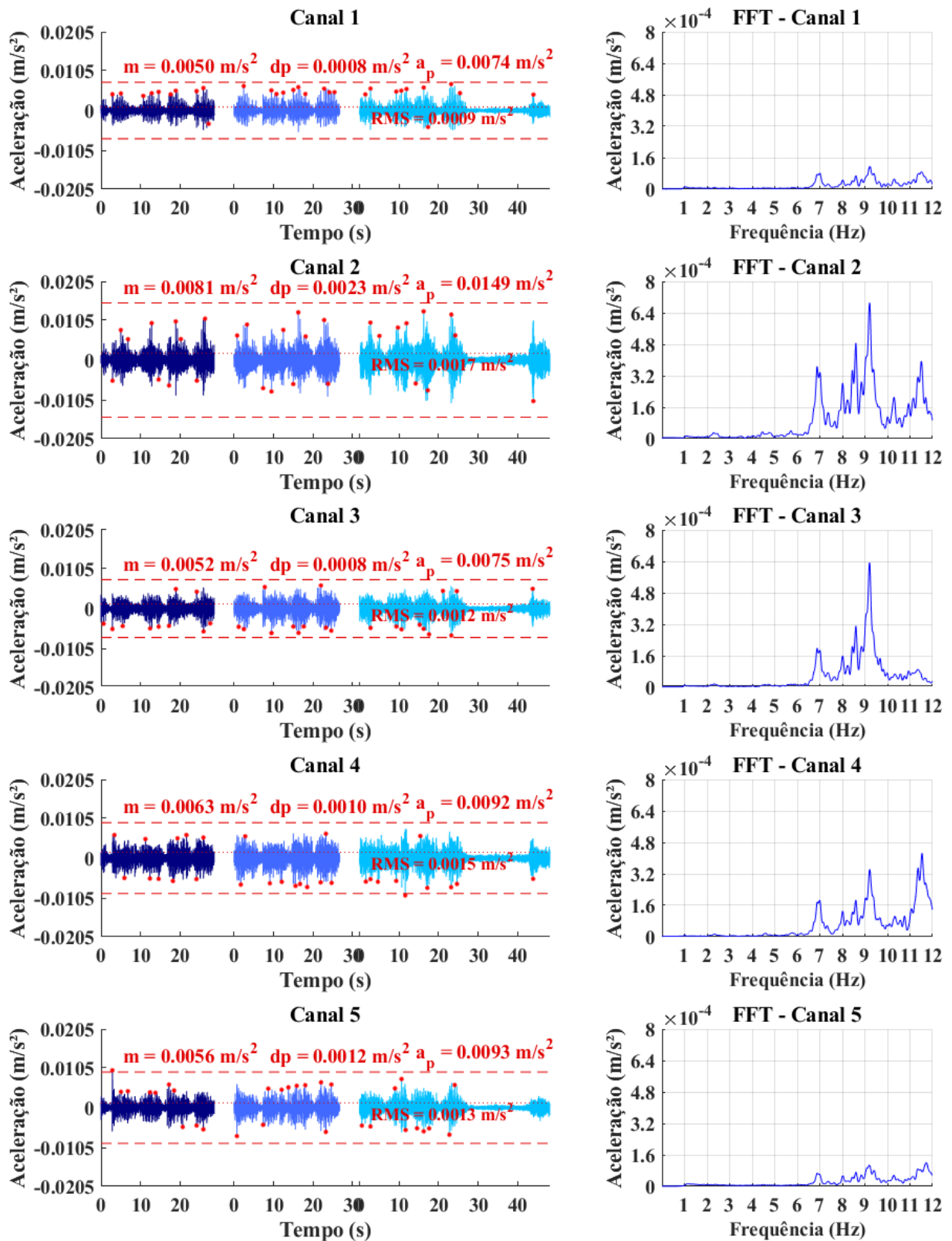


Figura B – 58 – Resposta dinâmica do piso 5 para caminhada rápida em trajetória diagonal.

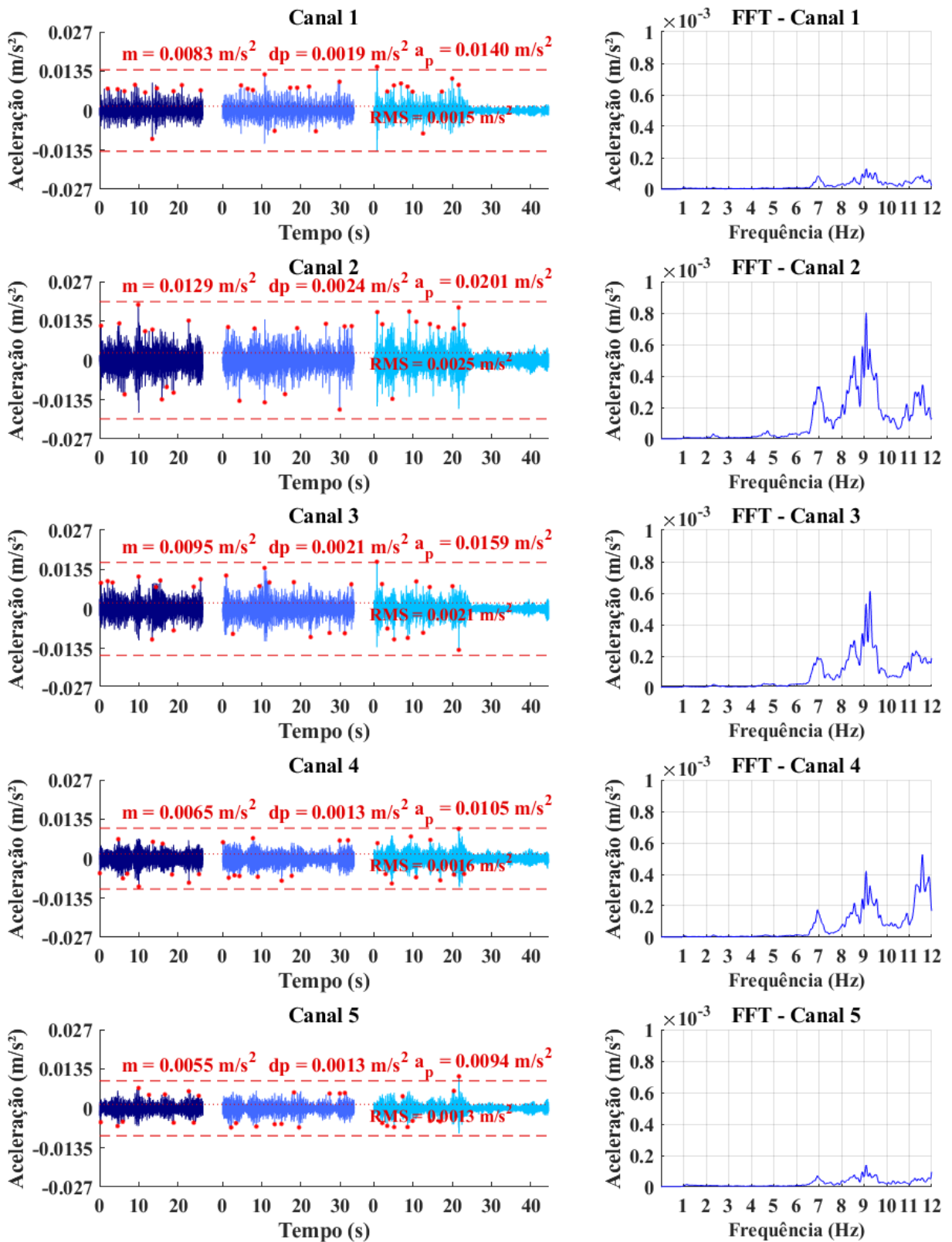


Figura B – 59 – Resposta dinâmica do piso 5 para caminhada rápida em trajetória paralela.

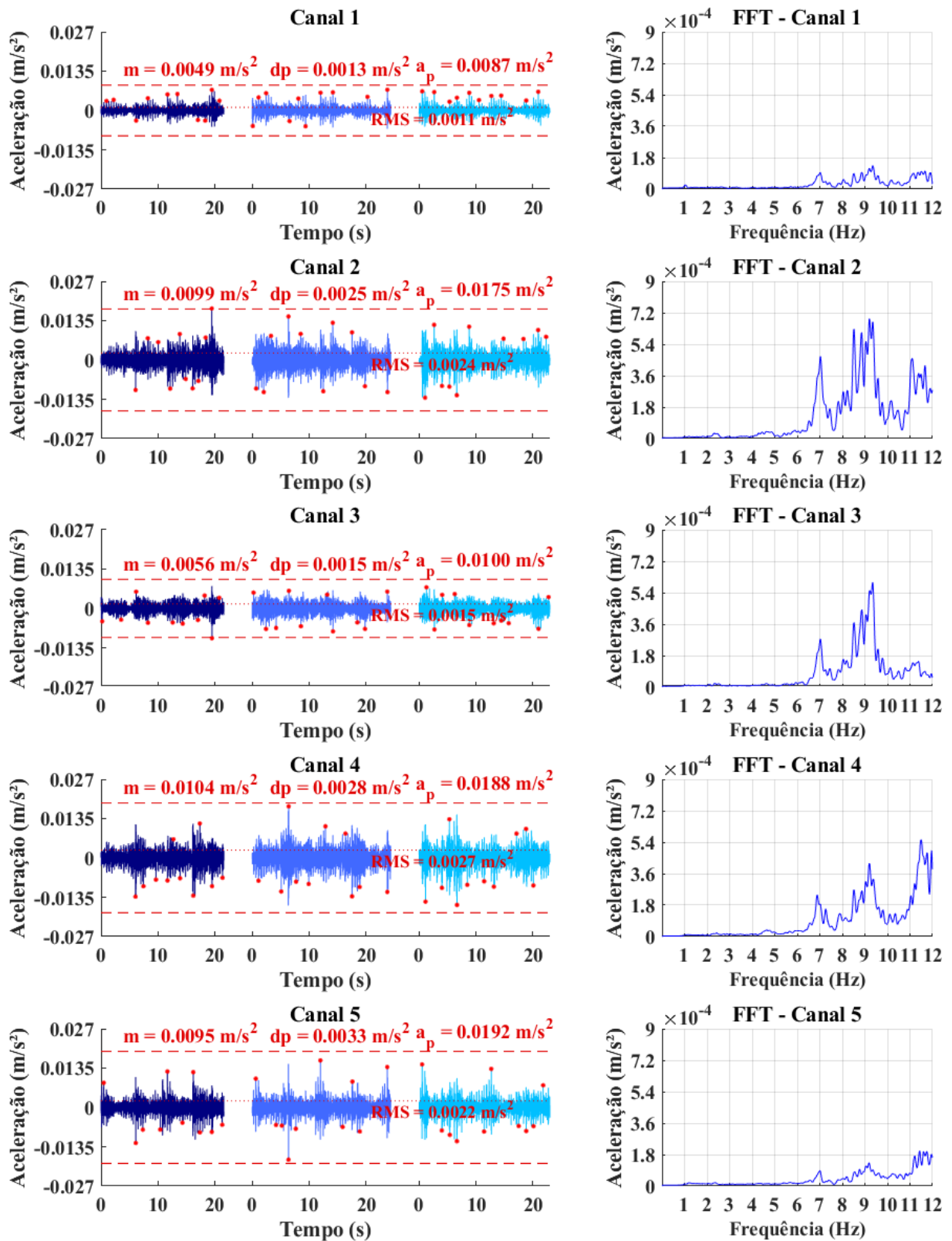


Figura B – 60 – Resposta dinâmica do piso 5 para caminhada rápida em trajetória perpendicular.