



Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Centro de Tecnologia e Ciências
Faculdade de Engenharia

Amanda Borges Oliveira

**Análise de vibrações de passarelas de pedestres submetidas a
cargas dinâmicas de vandalismo**

Rio de Janeiro
2024

Amanda Borges Oliveira

**Análise de vibrações de passarelas de pedestres submetidas a cargas
dinâmicas de vandalismo**



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

Orientadores: Prof. Dr. José Guilherme Santos da Silva

Prof. Dr. Gilvan Lunz Debona

Rio de Janeiro

2024

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

O48 Oliveira, Amanda Borges.
Análise de vibrações de passarelas de pedestres submetidas a cargas dinâmicas de vandalismo / Amanda Borges Oliveira. – 2024.
144 f.

Orientadores: José Guilherme Santos da Silva, Gilvan Lunz Debona.

Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia civil - Teses. 2. Análise estrutural (Engenharia) - Teses. 3. Vandalismo - Teses. 4. Áreas para pedestres - Teses. 5. Pontes - Projetos e construção - Teses. I. Silva, José Guilherme Santos da. II. Debona, Gilvan Lunz. III. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia. IV. Título.

CDU 624.21

Bibliotecária: Júlia Vieira – CRB7/6022

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

Assinatura

Data

Amanda Borges Oliveira

**Análise de vibrações de passarelas de pedestres submetidas a cargas
dinâmicas de vandalismo**

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

Aprovada em:

Banca Examinadora:

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

Prof. Dr. Gilvan Lunz Debona, DSc. (Orientador)
Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro - UFRRJ

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

Prof. Dr. Guilherme Santana Alencar, PhD.
Universidade de Brasília - UnB

Rio de Janeiro

2024

DEDICATÓRIA

Deus, cuja graça foi minha rocha durante esta jornada. A minha família, que compartilhou deste caminho comigo. Aos meus orientadores, cuja sabedoria moldou este trabalho.

AGRADECIMENTOS

A Deus, cujo amor e amparo foram minha luz e força durante todo o percurso deste trabalho.

A minha família, pelo apoio constante, compreensão e encorajamento nos momentos de dedicação à pesquisa.

Ao meu orientador Prof. José Guilherme Santos da Silva, pela paciência, sabedoria e direcionamento ao longo deste caminho, sendo fundamental para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu orientador Prof. Gilvan Lunz Debona, por toda ajuda e paciência durante os ensaios experimentais, sendo muito importante ao longo desta caminhada acadêmica.

Aos amigos e colegas, pela participação nos ensaios experimentais.

A Capes, pelo apoio financeiro concedido, que viabilizou a realização desta pesquisa.

A todos, minha eterna gratidão.

Não temas, crê somente.

Marcos 5:36

RESUMO

OLIVEIRA, Amanda Borges. *Análise de vibrações de passarelas de pedestres submetidas a cargas dinâmicas de vandalismo*. 2024. 144 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

O objetivo deste trabalho de pesquisa é o de investigar o comportamento estrutural dinâmico de passarelas de pedestres, quando submetidas às ações dinâmicas oriundas de vandalismo, tendo em mente o desenvolvimento de testes experimentais e modelagem numérica. Assim sendo, ao longo do estudo são investigados três modelos matemáticos tradicionais utilizados para a caracterização da ação humana mediante o emprego das funções Hanning, semi-senoidal e triangular. Os testes experimentais são realizados sobre uma passarela de concreto existente, localizada na Faculdade de Engenharia (FEN) da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ). O sistema estrutural é do tipo simplesmente apoiado com vão de 24,4 m, utilizado correntemente para a travessia de pedestres. Inicialmente, a análise modal da estrutura foi conduzida com base na realização de testes experimentais, visando caracterizar as frequências naturais e modos de vibração. Em seguida, foram consideradas situações de carregamento distintas para a realização dos testes experimentais de vibração forçada sobre a passarela, com a participação de até 20 pessoas, objetivando a simulação de excitações dinâmicas de vandalismo. A modelagem numérica da passarela foi desenvolvida com base no emprego do programa de elementos finitos ANSYS, e o referido modelo numérico foi utilizado para a calibração dos resultados obtidos via monitoração experimental da estrutura. Em seguida, a resposta estrutural dinâmica da passarela em estudo foi avaliada numericamente e os níveis de conforto humano foram comparados com critérios estabelecidos em normas e recomendações de projeto. Analisando-se os resultados da pesquisa, ressalta-se que quando 20 pessoas produzem ações dinâmicas rítmicas sobre a estrutura, o valor da aceleração de pico é da ordem de $1,50 \text{ m/s}^2$ ($a_p = 1,50 \text{ m/s}^2$), correspondendo a um nível de conforto mínimo.

Palavras-chave: Passarela; Vandalismo; Conforto humano; Análise experimental; Modelagem em elementos finitos.

ABSTRACT

OLIVEIRA, Amanda Borges. *Vibration analysis of pedestrian footbridges subjected to vandalism dynamic loads*. 2024. 144 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

This research work aims to investigate the dynamic structural behaviour of pedestrian footbridges, when subjected to dynamic actions associated to vandalism, based on the development of experimental tests and numerical modelling. Therefore, three traditional mathematical models used to characterize the human actions are investigated using the Hanning, semi-sinusoidal and triangular functions. The experimental tests are carried out on an existing concrete footbridge, located at the Faculty of Engineering (FEN) of the State University of Rio de Janeiro (UERJ). The structural system is simply supported spanning 24.4 m, currently used for pedestrian crossing. Initially, the modal analysis of the structure was conducted based on experimental tests, aiming to characterize the natural frequencies and vibration modes. Then, different loading situations were considered to carry out experimental forced vibration tests on the footbridge, with the participation of up to 20 people, aiming to simulate dynamic excitations of vandalism. The footbridge numerical modelling was developed based on the use of the ANSYS finite element program, and the numerical model was used to calibrate the results obtained based on the structure experimental monitoring. After that, the studied footbridge dynamic structural response was numerically assessed and the human comfort levels were compared with criteria established in standards and design recommendations. Analysing the research results, it is highlighted that when 20 people produce rhythmic dynamic actions on the structure, the peak acceleration value is about of 1.50 m/s^2 ($a_p = 1.50 \text{ m/s}^2$), corresponding to a minimum comfort level.

Keyword: Footbridge; Vandalism; Human Comfort; Experimental Analysis; Finite element modeling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Passarela da Fé em Aparecida do Norte, Brasil [1]	19
Figura 2: Passarela TRUMPF em Ditzingen, Alemanha [2]	20
Figura 3: Passarela da Paz em Calagry, Alberta, Canadá [3]	20
Figura 4: Colapso de uma passarela na Carolina do norte - Estados Unidos [4]	21
Figura 5: Cargas de vandalismo sobre uma passarela: teste experimental [8]	25
Figura 6: Caminhada e corrida de um grupo de pessoas com passada livre [31]	32
Figura 7: Movimento do corpo durante um salto [40]	38
Figura 8: Aceleração no domínio do tempo do corpo durante o salto [41]	39
Figura 9: Força no domínio do tempo do corpo durante o salto [41]	39
Figura 10: Função semi-seno utilizada em atividades humanas rítmicas [41]	40
Figura 11: Comparação entre o sinal experimental e o sinal da função semi-seno [41]	41
Figura 12: Coeficiente de defasagem para atividades humanas rítmicas [41]	42
Figura 13: Modelo de carregamento [42]	44
Figura 14: vista lateral da passarela	47
Figura 15: Vista frontal da passarela	48
Figura 16: Vista interna da passarela	48
Figura 17: Vista inferior da passarela	49
Figura 18: Vista do apoio da passarela	49
Figura 19: Detalhe da junta de dilatação	50
Figura 20: Vista superior da passarela	50
Figura 21: Vista lateral da passarela	51
Figura 22: Corte transversal da passarela	51
Figura 23: Vista tridimensional do modelo em elementos finitos	53
Figura 24: Vista lateral do modelo em elementos finitos	53
Figura 25: Vista frontal do modelo em elementos finitos	54
Figura 26: Caixa do acelerômetro PCB Piezotronics (Dytran)	58
Figura 27: Acelerômetro e sua característica de funcionamento	58
Figura 28: Vistas do ADS 2500	60
Figura 31: Amplificador de potência BAA 1000	63

Figura 32: Localização dos acelerômetros	64
Figura 33: Estrutura excitada no meio do vão da passarela	65
Figura 34: Gerador de sinal e amplificador de potência	66
Figura 35: Posicionamento dos acelerômetros Dytran	66
Figura 36: Acelerômetros conectados ao ADS 2500 e controlado por computador	67
Figura 37: Resposta dinâmica da passarela. Seção estrutural investigada: 1/6 do vão. Frequência de excitação: 1 a 50 Hz. Posição da excitação dinâmica: 1/2 do vão (Vertical)	68
Figura 38: Resposta dinâmica da passarela. Seção estrutural investigada: 1/4 do vão. Frequência de excitação: 1 a 50 Hz. Posição da excitação dinâmica: 1/2 do vão (Vertical)	68
Figura 39: Resposta dinâmica da passarela. Seção estrutural investigada: 1/2 do vão. Frequência de excitação: 1 a 50 Hz. Posição da excitação dinâmica: 1/2 do vão	68
Figura 40: Resposta dinâmica da passarela. Seção estrutural investigada: 3/4 do vão. Frequência de excitação: 1 a 50 Hz. Posição da excitação dinâmica: 1/2 do vão (Vertical)	69
Figura 41: Resposta dinâmica da passarela. Seção estrutural investigada: 5/6 do vão. Frequência de excitação: 1 a 50 Hz. Posição da excitação dinâmica: 1/2 do vão (vertical)	69
Figura 42: Modos de vibração experimentais	71
Figura 43: Modos de vibração do modelo relativo à 1ª frequência natural $f_{01} = 4,85$ Hz	74
Figura 44: Modos de vibração do modelo relativo à 2ª frequência natural $f_{02} = 8,35$ Hz	75
Figura 45: Modos de vibração do modelo relativo à 3ª frequência natural $f_{03} = 13,79$ Hz	76
Figura 46: Modos de vibração do modelo relativo à 4ª frequência natural $f_{04} = 15,77$ Hz	77
Figura 47: Modos de vibração do modelo relativo à 5ª frequência natural $f_{05} = 18,73$ Hz	78
Figura 48: Modos de vibração do modelo relativo à 6ª frequência natural $f_{06} = 30,77$ Hz	79

Figura 49: Modos de vibração do modelo relativo à 7ª frequência natural $f_{07} = 31,84$ Hz	80
Figura 50: Modos de vibração do modelo relativo à 8ª frequência natural $f_{08} = 32,10$ Hz	81
Figura 51: Modos de vibração do modelo relativo à 9ª frequência natural $f_{09} = 41,91$ Hz	82
Figura 52: Modos de vibração do modelo relativo à 10ª frequência natural $f_{10} = 48,76$ Hz	83
Figura 53: Grupo 1 - Um indivíduo saltando	87
Figura 54: Grupo 2 - Quinze indivíduos saltando	87
Figura 55: Grupo 3 - Vinte indivíduos saltando	87
Figura 56: Metrônomo	88
Figura 57: Caixa acústica	88
Figura 58: Sistema de aquisição de dados	89
Figura 59: Acelerômetros posicionados no centro do vão da passarela	90
Figura 60: Ponto de análise da estrutura	90
Figura 61: Salto com frequência de excitação: 2,40 Hz ($f_p = 2,40$ Hz) (1 pessoa)	92
Figura 62: Resposta dinâmica experimental da passarela (1 pessoa; $f = 2,40$ Hz)	93
Figura 63: Salto com frequências de excitação: 2,20 Hz ($f_p = 2,20$ Hz) e 2,40 Hz ($f_p = 2,40$ Hz) (15 pessoas)	94
Figura 64: Resposta dinâmica experimental (15 pessoas; $f = 2,20$ Hz)	95
Figura 65: Resposta dinâmica experimental (15 pessoas; $f = 2,40$ Hz)	95
Figura 66: Salto com frequências de excitação livre (15 pessoas)	96
Figura 67: Resposta dinâmica experimental (15 pessoas; $f =$ Livre)	97
Figura 68: Salto com frequências de excitação: 2,20 Hz ($f_p = 2,20$ Hz) e 2,40 Hz ($f_p = 2,40$ Hz) (15 pessoas) (20 pessoas)	98
Figura 69: Resposta dinâmica experimental (20 pessoas; $f = 2,20$ Hz)	99
Figura 70: Resposta dinâmica experimental (20 pessoas; $f = 2,40$ Hz)	99
Figura 71: Salto com frequências de excitação livre	100
Figura 72: Resposta dinâmica experimental (20 pessoas; $f =$ Livre)	101
Figura 73: Carga dinâmica modelada através de Faisca [41] ($f_p = 2,40$ Hz)	106
Figura 74: Carga dinâmica modelada através da função semi-senoidal [42] ($f_p = 2,40$ Hz)	106

Figura 75: Carga dinâmica modelada através da função triangular [42] ($f_p = 2,40$ Hz)	107
Figura 76: Resposta dinâmica da passarela. Ressonância ($f = 2,40$ Hz; $T = 0,41$ s; $T_c = 0,25$ s; $CD = 1$; $k_p = 3,28$) (Faisca [41])	108
Figura 77: Resposta dinâmica da passarela. Ressonância ($f = 2,40$ Hz; $T = 0,41$ s; $t_p = 0,25$ s; $k_p = 3,28$) (Função semi-senoidal [42])	109
Figura 78: Resposta dinâmica da passarela. Ressonância ($f = 2,40$ Hz; $T = 0,41$ s; $t_p = 0,25$ s; $k_p = 3,28$) (Função triangular [42])	110
Figura 79: Resposta dinâmica da passarela. Quase ressonância ($f = 2,20$ Hz; $T = 0,45$ s; $T_c = 0,27$ s; $CD = 0,95$; $k_p = 3,33$) (Faisca [41])	112
Figura 80: Resposta dinâmica da passarela. Ressonância ($f = 2,40$ Hz; $T = 0,41$ s; $T_c = 0,25$ s; $CD = 0,95$; $k_p = 3,28$) (Faisca [41])	112
Figura 81: Resposta dinâmica da passarela. Quase ressonância ($f = 2,20$ Hz; $T = 0,45$ s; $t_p = 0,27$ s; $k_p = 3,33$) (Função semi-senoidal [42])	113
Figura 82: Resposta dinâmica da passarela. Ressonância ($f = 2,40$ Hz; $T = 0,41$ s; $t_p = 0,25$ s; $k_p = 3,28$) (Função semi-senoidal [42])	113
Figura 83: Resposta dinâmica da passarela. Quase ressonância ($f = 2,20$ Hz; $T = 0,45$ s; $t_p = 0,27$ s; $k_p = 3,33$) (Função triangular [42])	113
Figura 84: Resposta dinâmica da passarela. Ressonância ($f = 2,40$ Hz; $T = 0,41$ s; $t_p = 0,25$ s; $k_p = 3,28$) (Função triangular [42])	114
Figura 85: Resposta dinâmica da passarela. Quase ressonância ($f = 2,20$ Hz; $T = 0,45$ s; $T_c = 0,27$ s; $k_p = 3,33$) (Faisca [41])	115
Figura 86: Resposta dinâmica da passarela. Ressonância ($f = 2,40$ Hz; $T = 0,41$ s; $T_c = 0,25$ s; $CD = 0,95$; $k_p = 3,28$) (Faisca [41])	116
Figura 87: Resposta dinâmica da passarela. Quase ressonância ($f = 2,20$ Hz; $T = 0,45$ s; $t_p = 0,27$ s; $k_p = 3,33$) (Função semi-senoidal [42])	116
Figura 88: Resposta dinâmica da passarela. Ressonância ($f = 2,40$ Hz; $T = 0,41$ s; $t_p = 0,25$ s; $k_p = 3,28$) (Função semi-senoidal [42])	117
Figura 89: Resposta dinâmica da passarela. Quase ressonância ($f = 2,20$ Hz; $T = 0,45$ s; $t_p = 0,27$ s; $k_p = 3,33$) (Função triangular [42])	117
Figura 90: Resposta dinâmica da passarela. Ressonância ($f = 2,40$ Hz; $T = 0,41$ s; $t_p = 0,25$ s; $k_p = 3,28$) (Função triangular [42])	117

Figura 91: Comparação da aceleração vertical numérica e experimental devido a uma pessoa saltando em ressonância ($f_p = 2,40$ Hz)	121
Figura 92: Comparação da aceleração vertical numérica e experimental devido a quinze pessoas saltando em quase ressonância ($f_p = 2,20$ Hz)	121
Figura 93: Comparação da aceleração vertical numérica e experimental devido a vinte pessoas saltando em ressonância ($f_p = 2,40$ Hz)	122
Figura 94: Comparação da aceleração vertical numérica e experimental a vinte pessoas saltando em quase ressonância ($f_p = 2,20$ Hz)	122
Figura 95: Deslocamento. Quase ressonância ($f = 2,20$ Hz; $T = 0,45$ s; $T_p = 0,27$ s; $k_p = 3,33$) (Função semi-senoidal [42])	141
Figura 96: Deslocamento. Ressonância ($f = 2,40$ Hz; $T = 0,41$ s; $T_p = 0,25$ s; $k_p = 3,28$) (Função semi-senoidal [42])	141
Figura 97: Deslocamento. Quase ressonância ($f = 2,20$ Hz; $T = 0,45$ s; $T_p = 0,27$ s; $k_p = 3,33$) (Função triangular [42])	142
Figura 98: Deslocamento. Ressonância ($f = 2,40$ Hz; $T = 0,41$ s; $T_p = 0,25$ s; $k_p = 3,28$) (Função triangular [42])	142
Figura 99: Deslocamento. Quase ressonância ($f = 2,20$ Hz; $T = 0,45$ s; $T_p = 0,27$ s; $k_p = 3,33$) (Função semi-senoidal [42])	143
Figura 100: Deslocamento. Ressonância ($f = 2,40$ Hz; $T = 0,41$ s; $T_p = 0,25$ s; $k_p = 3,28$) (Função semi-senoidal [42])	143
Figura 101: Deslocamento. Quase ressonância ($f = 2,20$ Hz; $T = 0,45$ s; $T_p = 0,27$ s; $k_p = 3,33$) (Função triangular [42])	144
Figura 102: Deslocamento. Ressonância ($f = 2,40$ Hz; $T = 0,41$ s; $T_p = 0,25$ s; $k_p = 3,28$) (Função triangular [42])	144

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classificação das passarelas (Guia de projeto SÉTRA)	36
Tabela 2: Níveis de conforto humano: vibrações verticais	36
Tabela 3: Níveis de conforto humano: vibrações horizontais	36
Tabela 4: Parâmetros analíticos desenvolvido por Faisca [41]	42
Tabela 5: Parâmetros α e β utilizados na análise de vibração forçada	56
Tabela 6: Frequências naturais numéricas do modelo	72
Tabela 7: Comparação dos valores das frequências naturais	84
Tabela 8: Comparação dos valores das massas obtidas	85
Tabela 9: Ensaio de vibração forçada	91
Tabela 10: Acelerações de pico experimentais	102
Tabela 11: Parâmetros de representação para a carga dinâmica ($f_p = 2,20$ Hz)	104
Tabela 12: Parâmetros de representação para a carga dinâmica ($f_p = 2,40$ Hz)	105
Tabela 13: Comparação das acelerações de pico experimentais x numérico	119
Tabela 14: Análise comparativa com o critério de conforto humano (SÉTRA [40])	125
Tabela 15: Análise comparativa com o critério de conforto humano (Eurocode [38] e BS 5400 [39])	127

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANSYS	Swanson Analysis Systems
bpm	Batidas por minuto
BS	British standards institution
Eurocode	European Standard
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
MEF	Método dos elementos finitos
NBR	Norma Brasileira
UERJ	Universidade do Estado do Rio de Janeiro

LISTA DE SÍMBOLOS

E_c	Módulo de elasticidade longitudinal
ν	Coefficiente de Poisson
ρ	Densidade
$f_{1,vert}$	Primeira frequência vertical
$a_{lim,vert}$	Aceleração limite vertical
ξ_i	Taxa de amortecimento do i-ésimo modo
ω_{0i}	Frequência natural circular referente ao i-ésimo modo
f	Frequência
f_{ck}	Resistência característica à compressão do concreto
Hz	Hertz
Kg	Quilograma
kg/m ³	Quilograma por metro cúbico
MPa	Megapascal
GPa	Gigapascal
rad/s	Radiano por segundo
m	Massa
M	Metro
m ²	Metro quadrado
mm	Milímetro
N	Newton
s	Segundo
t	Tempo
CD	Coefficiente de defasagem
k_p	Coefficiente de contato
G	Peso total da pessoa multiplicada pela aceleração da gravidade
T_c	Tempo de contato entre o pé e o solo
T	Período de atividade
t_p	Tempo de contato entre o pé e o solo
f_p	Frequência de passo
T_p	Período da atividade

F(t) Carga dinâmica oriunda da excitação humana (vandalismo)

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	19
1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
2 AVALIAÇÕES DE VIBRAÇÃO E CONFORTO HUMANO	35
2.1 Considerações iniciais	35
2.2 Norma Europeia (Eurocode)	35
2.3 Norma Britânica BS 5400	35
2.4 Guia de projeto SÉTRA	35
3 CARACTERIZAÇÃO DAS ATIVIDADES HUMANAS RÍTMICAS	37
3.1 Considerações iniciais	37
3.2 Caracterização das atividades humanas rítmicas	38
3.3 Modelo de carregamento proposto por Faisca (Função Hanning)	39
3.4 Modelo de carregamento proposto por Bachmann et al. (Função semi-senoidal)	43
3.5 Modelo de carregamento proposto por Bachmann et al. (Função triangular)	44
4 MODELO ESTRUTURAL INVESTIGADO	46
4.1 Considerações iniciais	46
4.2 Modelo estrutural da passarela	46
5 MODELAGEM EM ELEMENTOS FINITOS DA PASSARELA	52
5.1 Considerações iniciais	52
5.2 Modelo em elementos finitos da estrutura	52
6 MONITORAÇÃO EXPERIMENTAL: EQUIPAMENTOS UTILIZADOS	57
6.1 Considerações iniciais	57
6.2 Acelerômetro PCB <i>Piezotronics</i> (Dytran)	57
6.3 ADS 2500 (Sistema de aquisição de dados)	59
6.4 Shaker S 51140-M e Amplificador de potência BAA 1000	60
6.4.1 NCH <i>ToneGenerator</i>	63
7 ANÁLISE MODAL EXPERIMENTAL	64
7.1 Considerações iniciais	64
7.2 Descrição dos testes experimentais	64
7.3 Teste experimental: Shaker S 51140-M e ADS 2500	65

8	ANÁLISE MODAL NUMÉRICA	72
8.1	Considerações iniciais	72
8.2	Frequências naturais (autovalores)	72
8.3	Modos de vibração (autovetores)	73
8.4	Comparação: testes experimentais x modelo numérico	84
9	ANÁLISE DINÂMICA EXPERIMENTAL (VIBRAÇÃO FORÇADA)	86
9.1	Considerações iniciais	86
9.2	Descrição dos testes experimentais	86
9.3	Testes experimentais I: 1 pessoa	91
9.4	Testes experimentais II: 15 pessoas	93
9.5	Testes experimentais III: 20 pessoas	97
9.6	Resumo das acelerações de pico experimentais	101
10	ANÁLISE DINÂMICA NUMÉRICA (VIBRAÇÃO FORÇADA)	103
10.1	Considerações iniciais	103
10.2	Modelo de carregamento dinâmico investigado	103
10.2.1	Modelo de carregamento dinâmico: 1 pessoa	108
10.2.2	Modelo de carregamento dinâmico: 15 pessoas	111
10.2.3	Modelo de carregamento dinâmico: 20 pessoas	114
10.2.4	Comparação: testes experimentais x modelo numérico	118
11	AVALIAÇÃO DO CONFORTO HUMANO	124
11.1	Considerações iniciais	124
11.2	Análise das acelerações máximas numéricas	124
12	CONSIDERAÇÕES FINAIS	128
12.1	Introdução	128
12.2	Conclusões	128
12.2.1	Análise modal: modelo numérico versus testes experimentais	128
12.2.2	Análise de vibração forçada e modelos de carregamento dinâmico	129
12.2.2	Sugestões para trabalhos futuros	133
	REFERÊNCIAS	135
	APÊNDICE	141

INTRODUÇÃO

As passarelas são comumente construídas em concreto contínuo ou aço, sendo algumas delas compostas. Embora possam abranger diversos vãos, é usual que se limitem a três ou menos. A eficiência no uso de materiais é ditada pela economia do design e da construção modernos, orientando a concepção estrutural para uma utilização otimizada de volume de material.

Dessa forma, os arquitetos ganharam uma maior liberdade na arte de projetar, resultando em passarelas com concepções arquitetônicas cada vez mais ousadas. Existe uma variedade de concepções estruturais para superestrutura de passarelas, incluindo vigas de alma cheia, vigas em caixão, vigas mistas, treliças, pórticos e estruturas suspensas (estaiadas e pênséis). A disposição do tabuleiro pode ser retangular, esconsa ou curva.

Nesse contexto, e reconhecendo a relevância do tema de pesquisa abordado nesta dissertação de mestrado, apresentam-se alguns projetos de passarelas modernas, inovadoras e arrojadas, verdadeiras obras de arte que aliam funcionalidade à estética excepcional.



Figura 1: Passarela da Fé em Aparecida do Norte, Brasil [1]

A Passarela da Fé, ilustrada na Figura 1, está localizada na Aparecida do Norte, Brasil. Esta estrutura de concreto armado, com 392,2 metros de comprimento e altura máxima de 35,52 metros em relação ao chão, conecta a Basílica Velha ao Santuário Nacional. O formato em S é uma homenagem a Nossa Senhora de

Aparecida, adotando o S de Senhora como referência. A passarela foi inaugurada em 19 de dezembro de 1971 com o objetivo de criar um caminho seguro e otimizado para o deslocamento dos fiéis que visitam a Basílica Matriz e o Santuário Nacional.



Figura 2: Passarela TRUMPF em Ditzingen, Alemanha [2]

A Figura 2 apresenta uma passarela de design moderno situada em Ditzingen, Alemanha, conectando duas áreas de produção na sede da empresa TRUMPF sobre uma movimentada estrada regional. Essa notável construção foi viabilizada pela eficiência extraordinária da estrutura de suporte, resultando em uma leve casca composta por chapas de aço inoxidável de dupla curvatura, com apenas 2 cm de espessura.



Figura 3: Passarela da Paz em Calgary, Alberta, Canadá [3]

A Passarela da Paz, projetada pelo renomado arquiteto Santiago Calatrava, atravessa o Rio Bow em Calgary, Canadá (Figura 3). Concluída em 2012, a estrutura helicoidal parcialmente fechada é composta por uma treliça única biapojada, possuindo 126 m de comprimento e pesando 700 toneladas. Além disso, a passarela apresenta uma ciclovia central com passeios em ambos os lados.

Entretanto, a modernidade dos projetos da construção civil vem ocasionando em passarelas cada vez mais leves e esbeltas, muitas vezes caracterizadas por amortecimento extremamente baixo, contribuindo para a suscetibilidade a vibrações, facilitando a excitação de ressonância em certas estruturas, gerando problemas de desconforto humano e até seu colapso, como ocorreu em 20 de maio de 2000 em uma passarela no Estado da Carolina do Norte, Estados Unidos, durante a saída de uma multidão em um evento esportivo deixando mais de 100 pessoas feridas, conforme ilustra a Figura 4.



Figura 4: Colapso de uma passarela na Carolina do norte - Estados Unidos [4]

Portanto, ressalta-se a crucial importância da análise do comportamento dinâmico estrutural, especialmente no que diz respeito ao conforto humano, a fim de evitar vibrações excessivas, uma vez que isso pode resultar em um colapso estrutural, e garantir o conforto ao usuário.

Motivação

A principal motivação para o desenvolvimento deste trabalho de pesquisa reside no fato de que, nas últimas décadas, os projetos dos sistemas estruturais de passarelas de pedestres têm se tornado cada vez mais leves, arrojados e esbeltos, e os problemas de vibrações excessivas e desconforto humano têm sido recorrentes. Deste modo, pretende-se contribuir com referência ao aprimoramento e desenvolvimento de investigações sobre a análise estrutural dinâmica de passarelas de pedestres no que tange ao carregamento dinâmico de vandalismo, tendo em mente o atendimento das normas de projeto, em especial, considerando-se os Estados Limites de Serviço (ELS), referentes a vibrações excessivas e conforto humano dos usuários.

Objetivos

Este estudo tem por objetivo a análise do comportamento estrutural dinâmico de passarelas de pedestres quando submetidas às excitações dinâmicas associadas a vandalismo. Para tal, inicialmente, objetiva-se o desenvolvimento de testes experimentais (vibração livre e vibração forçada), de maneira a caracterizar o comportamento dinâmico de uma passarela de concreto existente, simplesmente apoiada, com vão de 24,4 m, utilizada para a travessia de pedestres, localizada na Faculdade de Engenharia (FEN) da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ). No que diz respeito à representação das cargas dinâmicas de vandalismo, serão investigados modelos matemáticos tradicionais referentes às funções Hanning, semi-senoidal e triangular. A resposta dinâmica da passarela em estudo (deslocamentos e acelerações) será analisada com base no desenvolvimento de um modelo em elementos finitos, calibrado via resultados dos testes experimentais. Finalmente, objetiva-se verificar o atendimento aos estados limites de serviço (ELS) da passarela de pedestres investigada, submetida às ações dinâmicas de vandalismo, com base na análise dos valores das acelerações de pico, tendo em mente a posterior avaliação dos níveis de conforto humano da estrutura.

Estrutura da Dissertação

No primeiro capítulo, são apresentadas as normas e critérios de projeto utilizados para avaliação do conforto humano, seguindo uma ordem decrescente em relação ao tempo de publicação.

No segundo capítulo, são detalhadas as características das atividades humanas rítmicas, juntamente com as formulações matemáticas empregadas na representação da ação de vandalismo.

O terceiro capítulo descreve o modelo estrutural da passarela, bem como suas propriedades geométricas e físicas.

O quarto capítulo apresenta a estrutura modelada mediante uso do software de elementos finitos ANSYS [5], assim como a modelagem do amortecimento estrutural.

No quinto capítulo, são apresentados os equipamentos utilizados durante os ensaios de vibrações livre e forçada.

O sexto capítulo descreve as frequências e modos de vibração experimentais mediante uso dos equipamentos Shaker S 51140-M e ADS2500.

O sétimo capítulo descreve as frequências e modos de vibração numéricos mediante uso do software de elementos finitos ANSYS [5].

No oitavo capítulo são apresentados os testes experimentais de vibração forçada com grupos de 1, 15 e 20 indivíduos saltando sobre a passarela.

No nono capítulo são apresentadas as respostas dinâmicas numéricas de vibração forçada mediante uso do software de elementos finitos ANSYS [5] com o mesmo grupamento de indivíduos do oitavo capítulo, porém, representado pelo modelo tradicional de força-dura.

O décimo capítulo avalia o comportamento dinâmico da passarela, no que tange ao desconforto humano oriundo de ações dinâmicas oriundas de vandalismo.

Por fim, décimo primeiro capítulo descreve as conclusões alcançadas com este estudo, contendo as considerações e sugestões para continuação desta pesquisa.

1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Considerando-se a relevância e a atualidade do tema de pesquisa em estudo, e à luz dos aspectos previamente mencionados a respeito da investigação de vibrações oriundas de atividades humanas rítmicas, ao longo das últimas décadas, inúmeras pesquisas científicas têm sido realizadas.

Brownjohn, Dumanoglu e Taylor [6] conduziram uma investigação, tanto analítica quanto experimental, de uma passarela suspensa por cabos com um vão de 50 metros, situada no Reino Unido, em Gales. O estudo abordou a necessidade de uma modelagem precisa, levando em consideração os detalhes estruturais existentes, mesmo em pontes de pequeno porte, como a que foi avaliada. Além disso, salientaram que este caso representa um exemplo pertinente de uma estrutura leve, extensa, flexível e com baixo nível de amortecimento. Com isso em mente, somado à coincidência das principais frequências naturais e das frequências de excitação causadas pelo passo dos pedestres, isso demonstra a suscetibilidade das vibrações induzidas por pedestres.

Baltar [7] estudou o comportamento de seis passarelas submetidas a carregamentos dinâmicos produzidos pela locomoção de um ou mais pedestres caminhando ou correndo da cidade de Brasília com o intuito de se avaliar os seus níveis de segurança e conforto. As passarelas foram modeladas pelo método de elementos finitos e foram submetidas a análises de vibrações livre e forçada. Foi utilizado o programa computacional ANSYS para a obtenção das respostas estática e dinâmica.

Caetano et al. [8] realizaram um estudo em uma passarela da faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, com o objetivo de medir a resposta ressonante induzida por pequenos grupos de estudantes pulando de forma sincronizada, a fim de induzir a ressonância. A Figura 1 demonstra um exemplo desse tipo de teste para a frequência de excitação associada ao segundo modo de vibração da passarela estudada pelos autores. Observa-se que em menos de 5 segundos um grupo de 18 pessoas induziu uma aceleração máxima de $6,6 \text{ m/s}^2$ no terço do maior vão, apresentando um deslocamento de 3,4 centímetros. Esses resultados demonstram uma grande facilidade de excitar a passarela em sua

ressonância e suscitam a questão de quanto dano pode ser intencionalmente causado por um grupo de pedestres.

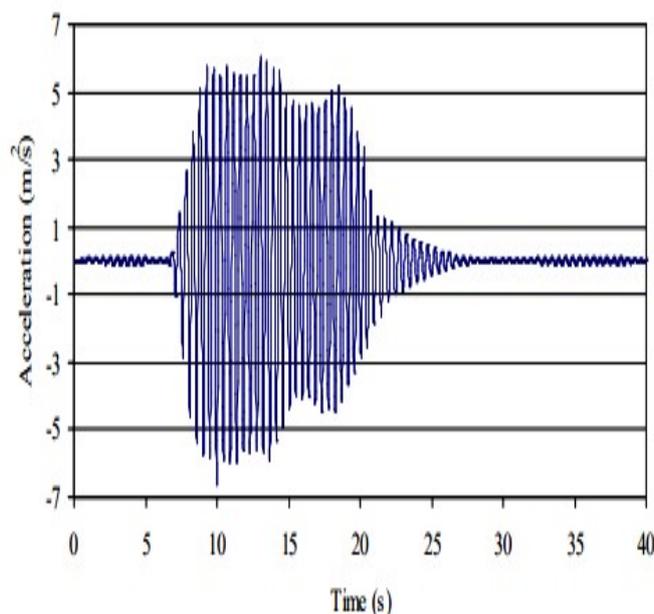


Figura 5: Cargas de vandalismo sobre uma passarela: teste experimental [8]

Figueiredo [9] desenvolveu diversos modelos de carregamento de forma a representar a travessia de pedestres sobre uma passarela. O estudo em questão considera, inclusive, um modelo mais realista de carregamento desenvolvido para incorporar o impacto transiente do calcanhar devido ao caminhar humano. Neste modelo de carregamento, o movimento de pernas que causa a subida e descida da massa efetiva do corpo em cada passo foi considerado e a posição do carregamento dinâmico foi alterada de acordo com a posição do indivíduo, assim a função de tempo, correspondente a excitação induzida pela caminhada, teve uma variação espacial e temporal. A análise de diversos projetos distintos de passarelas foi realizada em um extenso estudo de casos, onde foram investigadas as respostas dinâmicas dessas estruturas. Em uma fase subsequente, características estruturais e dinâmicas foram avaliadas através de um estudo paramétrico. Os resultados obtidos, em termos das acelerações verticais de pico e rms (root mean square), foram comparados com critérios de projeto.

Živanović et al. [10] publicaram a revisão mais abrangente até à sua data, com cerca de 200 referências que lidam com a vibração de pedestres e seu conforto

humano. A pesquisa identificou literaturas que indicam que os humanos são as mais importantes fontes de vibrações em passarelas. Entretanto, a excitação induzida por multidões ainda não está claramente definida.

Huang, Thambiratnama e Perera [11] observaram que, no contexto de passarelas esbeltas suspensas por cabos, estas tendem, predominantemente, a exibir modos de vibração, como o modo de vibração lateral com torção.

Brownjohn e Pavic [12] desenvolveram um método para estimar as massas modais dos modos de vibração em passarelas. Uma das vantagens do método é que, em sua forma mais simples, apenas uma medição de um único canal de resposta de aceleração da passarela (salto, caminhar ou livre), necessita ser registrado. O método se baseia em dados laboratoriais obtidos a partir de séries temporais de um único indivíduo. Foi realizada uma avaliação do método em quatro tipos diferentes de passarelas, e os resultados revelaram uma precisão aceitável, com uma margem de erro de aproximadamente 15% na estimativa das massas modais dos modos de vibração vertical.

Nhleko et al. [13] destacam os efeitos dos saltos humanos no comportamento vibratório de estruturas. Os autores se concentraram no modelo de força de pulso semi-senoidal, integrado ao código de prática BS 6399-96 para a descrição de cargas humanas saltantes. No entanto, observou-se que este modelo não é capaz de prever adequadamente a forma do impulso de carga ou seu harmônico dominante para frequências de salto significativamente inferiores a 2 Hz. A pesquisa desenvolvida pelos autores introduz um novo modelo geral, que incorpora fatores de forma de impulso e se baseia no tratamento do sistema estrutura-jumper como um sistema de massa pseudovariável.

Naprstek e Fischer [14] avaliaram o comportamento do pêndulo com estudos analíticos e numéricos de amortecimento com a excitação cinemática harmônica horizontal. Concluíram que o modelo linear utilizado de amortecimento do pêndulo é aceitável apenas numa extensão muito limitada. Resume-se que os limites de estabilidade dinâmica e o comportamento pós-crítico devem ser cuidadosamente investigados.

Nakamura e Kawasaki [15] desenvolveram um método numérico para prever a resposta lateral de uma viga, induzida por pedestres em passarelas. O método baseia-se em equações de movimento, incluindo, os coeficientes da taxa de força

lateral de um pedestre, densidade de pedestres, taxa de sincronização das pessoas e comportamento dos pedestres.

Bruno e Venuti [16] fizeram um modelo matemático e computacional para simular uma multidão sobre uma passarela, baseando-se na decomposição matemática e numérica de um sistema não linear em dois subsistemas que se interagem. Ele foi concebido para simular o fenômeno de excitação lateral, causado por pedestres andando sobre a passarela, em efeito de multidão. O modelo foi aplicado para simular um evento real que ocorreu no Japão. Os resultados obtidos a partir da simulação de um evento real mostram uma excelente concordância com os dados registrados. Assim, na fase de projeto conceitual, é importante planejar o tipo de tráfego de pedestres que a passarela irá receber durante a sua vida útil.

Caetano et al. [17] expôs que a passarela Pedro e Inês, localizada sobre o rio Mondego, em Coimbra, é um exemplo importante de uma estrutura propensa a vibrações verticais e laterais, que está sendo extensivamente estudada, a fim de se caracterizar o seu comportamento dinâmico, e desse implementar medidas corretivas que garantam a segurança e o conforto dos pedestres.

Debona [18] objetivou monitorar experimentalmente e modelar numericamente a resposta estrutural dinâmica de passarelas de pedestres, com base na consideração do efeito da interação dinâmica pedestre-estrutura. Inicialmente, a análise modal da passarela foi conduzida a partir do desenvolvimento de monitoração experimental dinâmica, mediante o emprego de acelerômetros instalados sobre a estrutura e pedestres, com base no uso de um dispositivo para aquisição de dados, via vibrometria a laser (PDV-100: Portable Digital Vibrometer), além da utilização de outro sistema para a medição de vibrações (Shaker). Em relação aos ensaios de vibração livre foram utilizadas duas técnicas: SIMO (Single Input Multiple Output) e SISO (Single Input Single Output). Com relação à técnica SIMO, uma força de excitação é aplicada sobre um ponto da estrutura (entrada) e a resposta estrutural dinâmica (saída) é obtida simultaneamente em vários pontos do modelo. No que diz respeito à técnica SISO, a força é aplicada sobre a estrutura e a resposta dinâmica é obtida, individualmente, em cada ponto do sistema, considerando-se a variação da posição de aplicação da força de excitação (entrada) quanto do sensor de medição (saída).

Piccardo e Tubino [19] modelaram probabilisticamente, considerando várias fontes de aleatoriedade: chegada dos pedestres, velocidade dos passos, amplitude da força e peso dos pedestres. A modelagem consistiu em uma representação probabilística dos pedestres: as chegadas eram modeladas como variáveis aleatórias de Poisson e as frequências dos passos, velocidade dos passos e amplitude de força e peso modeladas como distribuição normal. O objetivo era analisar a resposta dinâmica resultante e para isso foi usado apenas o primeiro harmônico.

Zuñiga [20] objetivou desenvolver uma investigação experimental dinâmica sobre uma passarela tubular mista (aço-concreto). A passarela estudada correspondeu a um modelo estrutural real, existente na cidade do Rio de Janeiro, sendo constituída por três vãos (32,5 m, 17,5 m e 20,0 m) e dois balanços (7,50 m e 5,0 m), apresentando um comprimento total de 82,5 m. A estrutura é composta por uma estrutura tubular de aço (treliças metálicas) e lajes de concreto, formando um sistema misto com interação completa. O modelo estrutural é submetido correntemente à travessia de pedestres e ciclistas. O autor realizou testes experimentais sobre o modelo estrutural e confrontados com resultados numéricos. Para a modelagem numérica do sistema foram empregadas técnicas usuais de discretização, via método dos elementos finitos (MEF), por meio do programa ANSYS. Com base na metodologia de análise desenvolvida, a partir da obtenção dos resultados experimentais, a resposta dinâmica da passarela, em termos das acelerações de pico, foi comparada com os valores limites propostos por normas e recomendações de projeto, objetivando uma avaliação do desempenho da estrutura, no que diz respeito ao problema de vibrações oriundas do caminhar dos pedestres.

Bocian et al. [21] objetivaram estudar a interação pedestre-estrutura, tendo como fonte geradora de vibração, amortecimento e massa, a contribuição de um pedestre. Foi notado que o amortecimento sofre influência positiva ou negativa conforme valores de frequência de passo, afetando de diferentes formas a estrutura.

Duarte [22] objetivou estudar a resposta dinâmica e analisar o conforto humano de passarelas mistas (aço-concreto), quando submetidas ao caminhar humano, mediante emprego de modelos biodinâmicos representativos de pedestres, desenvolvendo uma metodologia para a análise do comportamento estrutural dinâmico de passarelas de pedestres, com base na modelagem numérica, análise

estrutural e consideração do efeito da interação dinâmica pedestre-estrutura. O modelo estrutural investigado se refere a uma passarela de pedestres real, construída sobre a Avenida Ayrton Senna, na cidade do Rio de Janeiro/RJ, Brasil, com um vão central de 68,6 m de comprimento.

Pereira [23] avaliou duas passarelas com diferentes materiais e concepções estruturais, submetidas às ações dinâmicas produzidas por pedestres, mediante uso do software ANSYS 15 e à luz de trabalhos de outros pesquisadores. Os resultados foram confrontados com prescrições normativas que têm especificado métodos para qualificar o desempenho estrutural dinâmico e a partir das simulações em diferentes cenários verificou-se que as passarelas estudadas podem apresentar problemas de vibrações excessivas na direção vertical.

Ma et al. [24] realizaram um experimento com o propósito de investigar a percepção de pedestres em relação às vibrações provocadas por pedestres em passarelas. O experimento teve como objetivo determinar a influência de diferentes amplitudes de aceleração e frequências na percepção dos indivíduos que se deslocavam sobre uma superfície vibratória, tanto na direção vertical quanto na direção lateral. Os resultados revelaram que os participantes demonstraram uma notável sensibilidade a um aumento tanto na amplitude de aceleração quanto na frequência de vibração, sendo mais sensíveis e intolerantes às vibrações na direção lateral do que na direção vertical.

Bassoli, Gambarelli e Vincenzi [25] conduziram uma avaliação experimental e numérica da resposta estrutural dinâmica da passarela Pasternak quando sujeita às cargas geradas pela caminhada de pedestres. Os testes experimentais, realizados com diferentes grupos de pedestres, registraram as vibrações do ambiente, identificaram os parâmetros modais e investigaram a resposta dinâmica causada pela ação de pedestres. Subsequentemente, um modelo de elementos finitos foi desenvolvido e calibrado. Em seguida, a resposta estrutural foi investigada através de dois métodos avançados de simulação. O primeiro baseou-se em uma força periódica de caminhada e foi empregado para análises dinâmicas como modelo de elementos finitos. No segundo método, adotou-se um modelo de força multi-harmônica, levando em consideração a variabilidade da carga móvel (os pedestres), e sua resposta dinâmica foi avaliada mediante decomposição modal. Os autores concluíram que à medida que a frequência dos passos se aproximava da primeira

frequência natural da estrutura e à medida que aumentava o número de pedestres, a aceleração máxima de pico também aumentava.

Batista [26] ressalta que em muitos casos é difícil evitar que as frequências mais baixas das passarelas se encontrem no intervalo de valores próximos a 5 Hz, como é proposto, porque isso exigiria aumento de rigidez e de massa da estrutura, tendo como alternativa a utilização de amortecedores. O autor realizou simulações no domínio do tempo e com variados números de pedestres correndo de forma sincronizada e demonstrou vibrações em excesso e ultrapassou os limites de serviço indicados em literatura, havendo a necessidade de se projetar sistema de controle por amortecedor.

Kumar et al. [27] apresentaram um modelo de excitação dinâmica vertical de estruturas induzida por um único pedestre caminhando ao longo de superfícies planas e relativamente rígidas. O modelo incorpora um oscilador autônomo de um grau de liberdade autônomo que se assemelha ao movimento vertical do corpo humano durante a caminhada, como um processo periódico impulsionado por uma fonte interna de energia. Através da combinação de osciladores fundamentais de Van der Pol, Duffing e Rayleigh, com diversos termos não-lineares que descrevem o amortecimento da força restauradora, juntamente com harmônicos superiores pares e ímpares, foi possível identificar os parâmetros de modelagem. Como resultado, uma correlação altamente satisfatória entre os dados numéricos e experimentais foi estabelecida para todos os indivíduos avaliados.

Silva [28] objetivou avaliar o efeito da interação pedestre-estrutura sobre a resposta estrutural dinâmica de passarelas de pedestres. Para tal, uma série de testes experimentais foi desenvolvida em conjunto com a geração de um modelo em elementos finitos, visando à calibração dos resultados das análises experimentais e posterior estudo do conforto humano de passarelas submetidas à caminhada de pedestres. Desta forma, a estrutura investigada se refere a um modelo estrutural de passarela de pedestres existente, localizada na Rua Osvaldo Aranha, conhecida comumente como Radial Oeste, localizada nas proximidades do Estádio do Maracanã, na cidade do Rio de Janeiro/RJ, Brasil. Inicialmente, para identificar e avaliar o comportamento estrutural dinâmico global do modelo estrutural foi realizada uma análise modal operacional (OMA) sobre a passarela. Depois disso, uma série

de testes experimentais de vibração forçada foram conduzidos sobre a estrutura, considerando-se os pedestres caminhando sobre a passarela com diferentes frequências de passo. Na sequência do estudo, um modelo de elementos finitos foi desenvolvido, com base na utilização do programa computacional ANSYS, tendo em mente a calibração dos resultados obtidos a partir do monitoramento experimental da passarela.

Gonzaga [29] apresentou em seu trabalho uma ferramenta computacional denominada Programa de Interação Pessoa-Estrutura (PIPE) desenvolvida com a implementação de modelos analíticos para representar o movimento do sistema acoplado passarela-pedestre e de algoritmo de simulação do tráfego de pedestres. Para ação de multidão, o autor obteve os resultados por meio de simulações de Monte Carlo a partir de um modelo de carga probabilístico. A validação do programa foi demonstrada através da comparação com resultados da literatura. Além disso, o autor apresentou um estudo paramétrico das características dinâmicas de MBs e estrutura de passarelas com o qual destaca-se a importância da relação entre as frequências do passo, da estrutura e do MB.

Górski et al [30] estudaram o efeito da excitação dinâmica em passarelas sob atividades induzidas por humanos, pequenas motocicletas e trens que passavam sob a estrutura. Com os testes feitos por humanos, foi possível identificar modos de torção da estrutura associados às frequências naturais e razões de amortecimento de 4 a 21 Hz e 0,52 a 2,77%, respectivamente. A frequência fundamental $f_1 = 4,35$ Hz ficou dentro da faixa estabelecida pelo Eurocode e pelo SÉTRA, conforme referências citadas pelos autores. Atividades normais de pedestres foram induzidas e testadas em pontos no meio do vão. Nesse ponto foi constatado que existe a possibilidade de ressonância com efeitos nocivos das vibrações relacionadas ao segundo harmônico de frequência obtido pelos passos, porém os valores de aceleração de pico se mantiveram dentro do limite crítico para o nível mínimo de conforto de acordo com SÉTRA. Para atividades sincronizadas com mais de um pedestre, foram obtidos resultados de vibrações que excedem o conforto mínimo, entretanto, por ser uma estrutura estaiada, o alto nível de amortecimento de vibrações (em torno de 2,77%) causa rápida dissipação nesses efeitos, diminuindo o tempo em que os pedestres ficam expostos ao fenômeno.

Hawryszków [31] objetivou apresentar resultados de testes dinâmicos, com um grupo de 40 pessoas sobre a estrutura de um vão em arco de uma passarela da Polônia (Figura 6). A passarela possui um arco assimétrico e vão principal de 90 m de comprimento, considerada um exemplo de soluções estruturais interessantes. A pesquisa incluiu cargas normais e ações de vandalismo na passarela. As cargas normais englobam caminhada, corrida ou corrida rápida. A excitação de vandalismo consistiu em caminhada ou corrida sincronizadas e meio agachamento rítmico. O objetivo principal das cargas de vandalismo é verificar a segurança e o comportamento da estrutura em condições dinâmicas extremas. O autor concluiu, em termos de deformação, que a segurança da estrutura em condições de influências dinâmicas está garantida, incluindo ações de vandalismo.



Figura 6: Caminhada e corrida de um grupo de pessoas com passada livre [31]

Ruiz [32] ajustou um modelo de caminhada bípede para reproduzir às forças de reação do piso (FRP) registradas por placas de força durante testes experimentais envolvendo pessoas caminhando. A autora propôs equações de regressão para estimar os parâmetros e as condições iniciais do modelo em função da massa, altura e velocidade da marcha do pedestre. A avaliação das equações propostas foi realizada através da comparação dos históricos de força simulados e medidos em superfície rígida. O modelo também foi utilizado para reproduzir testes experimentais realizados em uma estrutura flexível e as respostas dinâmicas previstas foram comparadas com as vibrações medidas na passarela de teste.

He et al. [33] destacam que o teste experimental se configura como a abordagem mais confiável para a obtenção de parâmetros dinâmicos do corpo humano. Os pesquisadores indicam que o método tradicional frequentemente utiliza teste em mesa vibratória ou uma bancada de teste bem projetada, acionada por um agitador mecânico. Na análise das propriedades dinâmicas do corpo humano, os autores empregam um procedimento simples baseado em transmissibilidade. Neste processo, a excitação é provocada por um agitador humano com movimento rítmico, atuando sobre uma estrutura flexível, que pode assumir a forma de uma passarela ou um piso de grande vão.

Rodríguez-Suesca et al. [34] avaliaram as características dinâmicas e o desempenho vibratório de oito passarelas, localizadas na cidade de Tunja, Colômbia, em deterioração, apresentando vibração excessiva sob carregamentos de serviço. Os autores implementaram uma metodologia de avaliação baseada em testes de vibração e análises numéricas. Foram realizados uma caracterização modal experimental, com o objetivo de atualizar modelos estruturais numéricos, e testes de vibração uniformes para diferentes tipos de carregamento de pedestres. Por fim, foram realizadas simulações de travessia de pedestres para uma faixa típica de frequências de caminhada e corrida utilizando um modelo de carga de passo a passo com uma nova proposta de funções de força normalizada de um único passo. Os resultados mostraram vibrações elevadas na maioria das passarelas para condições de carregamento temporários e excepcionais, que são inseguras para algumas das estruturas.

Santos [35] analisou as vibrações e avaliou o conforto humano de pisos mistos (aço-concreto) submetidos a carregamentos dinâmicos humanos rítmicos, objetivando representar as ações dinâmicas produzidas por pessoas praticando atividades humanas rítmicas. Foram utilizadas formulações matemáticas tradicionais para a representação das cargas dinâmicas (modelos de “*força dura*”); e, também, considerando-se o emprego de sistemas biodinâmicos, representados por meio de sistemas do tipo “massa-mola-amortecedor” com um grau de liberdade (S1GL), tendo em mente a incorporação das características dinâmicas dos indivíduos.

Yahia et al [36] analisou uma passarela da *Jordan University of Science and Technology*, na Jordânia, devido ao fato de vários pedestres sentirem desconforto ao trafegar. Foram conduzidas investigações experimentais para caminhada, corrida e corrida com várias pessoas na sequência de um, dois, cinco, oito e nove. Como se sabe, os pedestres exercem forças dinâmicas verticais e laterais. Após comparação dos testes com referências importantes, conclui-se que para caminhada diária normal, as acelerações verticais são consideradas aceitáveis, tanto para um quanto para vários pedestres. Alguns códigos especificam excitações que excedem limites de conforto, mas são extremas e não ocorrem normalmente.

Moreira [37] investigou o comportamento estrutural dinâmico de passarelas mistas (aço-concreto), quando submetidas às ações dinâmicas produzidas por pedestres, considerando as metodologias de análise existentes na literatura técnica. Ao longo do trabalho do autor foram apresentados os modelos matemáticos tradicionais utilizados para a caracterização da ação humana, os métodos expeditos para análise dinâmica de passarelas, além dos critérios de conforto humano estabelecidos pelas normas de projeto vigentes. Além disso, foi apresentado no trabalho de pesquisa a resposta estrutural dinâmica das passarelas com base no emprego de modelos biodinâmicos, representativos dos pedestres, de maneira a levar em consideração as propriedades dinâmicas dos indivíduos e o efeito da interação dinâmica pedestre-estrutura. As metodologias de análise foram aplicadas sobre três projetos estruturais de passarelas mistas (aço-concreto) com vãos de 27,2 m, 32 m e 36 m, respectivamente, todas situadas na cidade do Rio de Janeiro/RJ, Brasil. A modelagem numérica das estruturas foi desenvolvida com base no emprego do programa de elementos finitos ANSYS.

2 AVALIAÇÕES DE VIBRAÇÃO E CONFORTO HUMANO

2.1 Considerações iniciais

Este capítulo tem por objetivo apresentar diversos critérios de projeto sob a perspectiva do conforto humano, no que diz respeito às vibrações provocadas por atividades humanas rítmicas.

2.2 Norma Europeia (Eurocode)

A norma europeia Eurocode [38] recomenda que sejam dispensadas das verificações de acelerações limites, na direção transversal vertical e transversal horizontal, as passarelas que apresentam as primeiras frequências naturais na direção transversal vertical e transversal horizontal acima de 5 Hz e 2,5 Hz, respectivamente. O documento estabelece ainda um valor de aceleração limite na direção transversal vertical $a_{lim,vert}$ menor ou igual a $0,7 \text{ m/s}^2$ (7% g).

2.3 Norma Britânica BS 5400

2.4 Guia de projeto SÉTRA

A metodologia SÉTRA [40] é baseada no conceito de classificação de passarelas (em função do nível de tráfego) e no nível de conforto humano necessário, contando com a interpretação de resultados obtidos a partir de testes realizados na passarela de Solferino, Itália, e em uma plataforma experimental.

O Guia classifica a passarela em quatro classes diferentes, conforme apresenta a Tabela 1:

Tabela 1: Classificação das passarelas (Guia de projeto SÉTRA)

Classe IV	Raramente utilizadas, construídas em áreas pouco habitadas ou para assegurar a continuidade da caminhada de pedestres sobre rodovias. Assim, não precisam ser avaliadas dinamicamente.
Classe III	Empregadas para uso padrão e ocasionalmente são submetidas ao carregamento associado ao fluxo de pedestres, que neste caso é de 0,5 pedestre/m ² .
Classe II	Urbanas construídas para ligar áreas populosas submetidas a tráfego pesado e ocasionalmente toda sua área é submetida ao carregamento de pedestres, que neste caso é de 0,8 pedestre/m ² .
Classe I	Urbanas construídas em áreas com alta concentração de pedestres (estações de trem, estádios de futebol, etc.), submetidas frequentemente a tráfego pesado, que neste caso é de 1,0 pedestre/m ² .

O guia estabelece critérios de aceleração máxima para avaliar o conforto humano em relação a vibrações verticais, conforme indicado na Tabela 2, e para vibrações horizontais, conforme especificado na Tabela 3. Em ambas as situações, a falta de conforto pode atingir um nível inaceitável, prejudicando a utilização da passarela pelos pedestres.

Tabela 2: Níveis de conforto humano: vibrações verticais

Faixa de aceleração (m/s ²)	0,0 – 0,5	0,5 – 1,0	1,0 – 2,5	> 2,5
Faixa 1	Máximo			
Faixa 2		Médio		
Faixa 3			Mínimo	
Faixa 4				Inaceitável

Tabela 3: Níveis de conforto humano: vibrações horizontais

Faixa de aceleração (m/s ²)	0,0 – 0,15	0,15 – 0,30	0,30 – 0,80	> 0,80

Faixa 1	Máximo			
Faixa 2		Médio		
Faixa 3			Mínimo	
Faixa 4				Inaceitável

Portanto, conforme a Tabela 2, o nível máximo de conforto humano encontra-se entre 0 e 0,5 m/s². Em relação à faixa de conforto humano médio, a aceleração situa-se entre 0,15 e 0,30 m/s². Para o conforto humano mínimo, essa faixa está entre 0,30 e 0,80 m/s². Por fim, a faixa inaceitável corresponde a uma aceleração superior a 0,80 m/s².

Além disso, em relação à Tabela 3, que se trata de faixa de vibrações horizontais, o nível máximo de conforto humano situa-se entre 0 e 0,15 m/s². Para o conforto humano médio, essa faixa está entre 0,15 e 0,30 m/s². No que tange ao conforto humano mínimo, encontra-se entre 0,30 e 0,80 m/s². Por fim, a faixa inaceitável corresponde a uma aceleração superior a 0,80 m/s².

3 CARACTERIZAÇÃO DAS ATIVIDADES HUMANAS RÍTMICAS

3.1 Considerações iniciais

O presente capítulo explora as características humanas rítmicas, que podem ser representadas por saltos, caminhadas, dança e atividade aeróbica, apresentando graficamente o movimento corporal durante um salto, além de destacar os modelos de carregamento empregados neste estudo, tais como a função Hanning, elaborada por [41], e as funções Semi-senoidal e Triangular, desenvolvidas por [42]. A modelagem da carga gerada pela atividade de salto, originada pela ação de vandalismo, segue a metodologia tradicional de força-dura e será comparada com os resultados dinâmicos experimentais apresentados no Capítulo 8.

3.2 Caracterização das atividades humanas rítmicas

As atividades humanas rítmicas são representadas pela variação entre o momento de contato e a perda de contato dos pés de um indivíduo sobre a estrutura. Desta forma, durante a realização de um salto a pessoa encontra-se no ar em um determinado intervalo de tempo; e em outro, encontra-se em contato com o solo, conforme Figura 7.

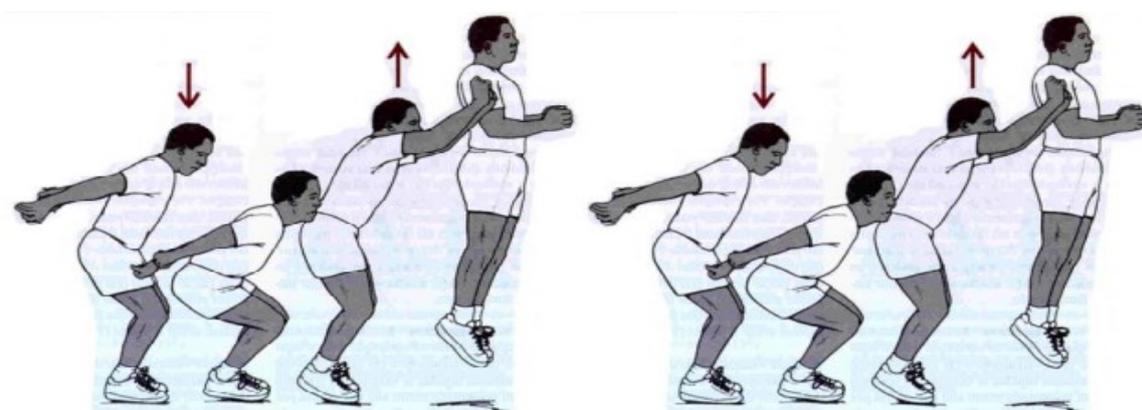


Figura 7: Movimento do corpo durante um salto [40]

A Figura 7 ilustra os movimentos que ocorrem com o corpo humano, além da variação do centro de massa, de um indivíduo durante a realização de um salto. A primeira etapa mostra a pessoa na posição inicial, seguida da flexão de joelhos, preparando-se para dar o impulso do salto. Posteriormente, ocorre o período em que o indivíduo encontra-se no ar, seguida da aterrissagem, ocorrendo nova flexão nos joelhos. Portanto, as etapas se repetem durante a continuidade do salto.

A partir do entendimento das etapas de um salto, é possível ilustrar graficamente as respostas da aceleração e força do corpo obtidas durante a monitoração experimental de um salto (Figuras 8 e 9).

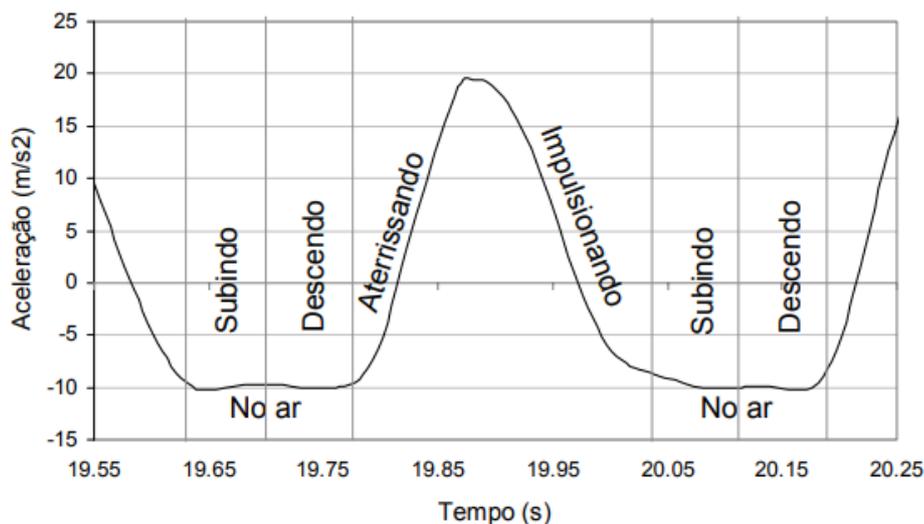


Figura 8: Aceleração no domínio do tempo do corpo durante o salto [41]

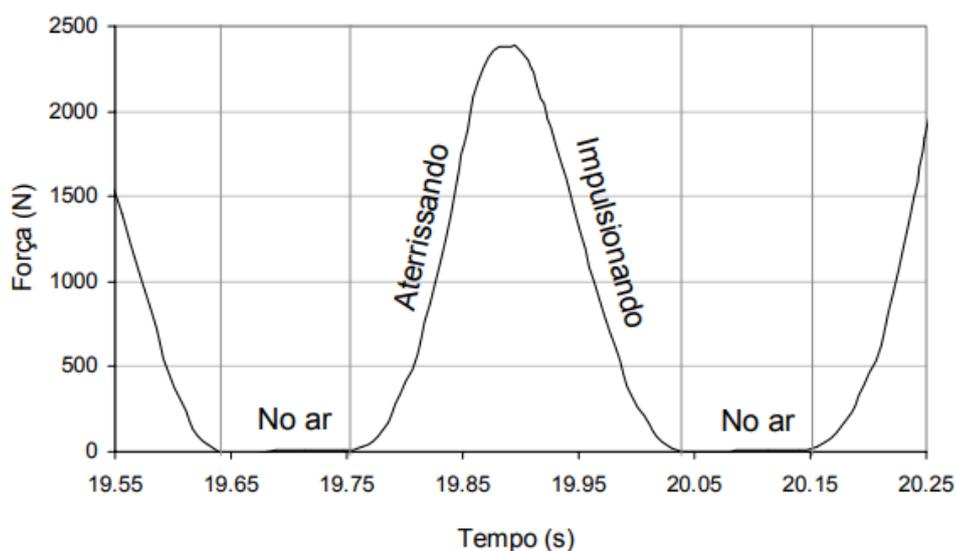


Figura 9: Força no domínio do tempo do corpo durante o salto [41]

Conforme Figura 8, quando o indivíduo se encontra no ar, o mesmo está submetido a uma aceleração de aproximadamente $9,81 m/s^2$. Quando se encontra totalmente apoiado sobre o solo, alcança uma aceleração de aproximadamente $19 m/s^2$. Em relação à Figura 9, percebe-se uma força máxima de aproximadamente 2500 N quando o indivíduo se acha totalmente apoiado sobre o solo.

3.3 Modelo de carregamento proposto por Faisca (Função Hanning)

O modelo de carregamento desenvolvido por Faisca [41] a partir de ensaios experimentais, foi proposto uma função de carregamento fundamentada na função Hanning. Foi observado pela autora que os sinais temporais das atividades com perda de contato com a estrutura (atividade humana rítmica), podem ser aproximados a uma função semi-seno, com dois intervalos de tempo significativos. A Figura 10 ilustra o gráfico representativo da função semi-seno, onde FDN significa Força Dinâmica Normalizada, que é a razão entre a amplitude da carga dinâmica e o peso do indivíduo.

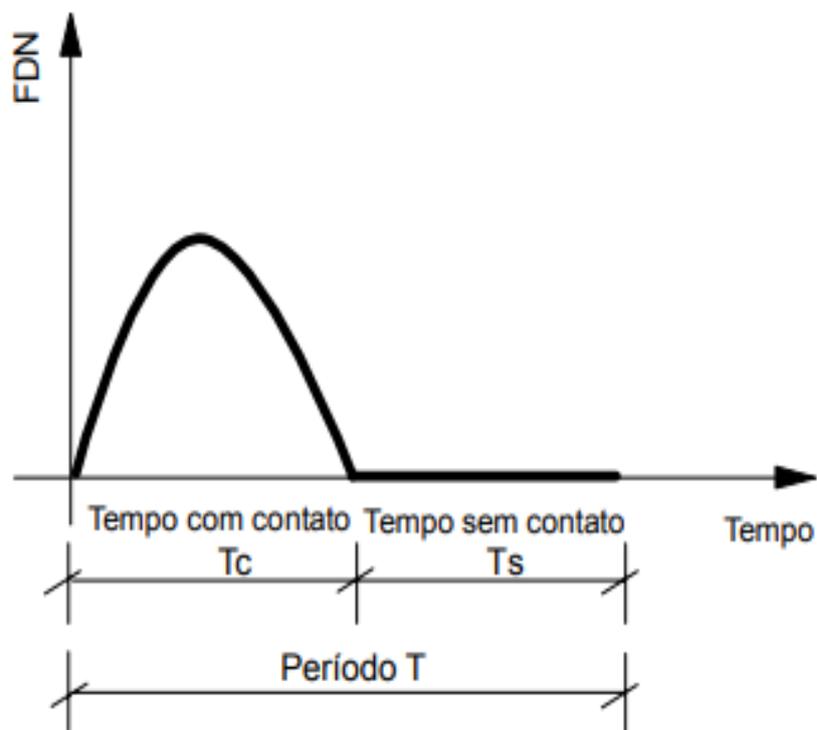


Figura 10: Função semi-seno utilizada em atividades humanas rítmicas [41]

Entretanto, no decorrer de sua pesquisa com base em estudos experimentais, foi observada pela Faisca [41] que a função semi-seno apresenta uma forma mais arredondada do que o sinal experimental, indicando que esta função não é a mais adequada para representar o sinal experimental, conforme ilustra a Figura 11.

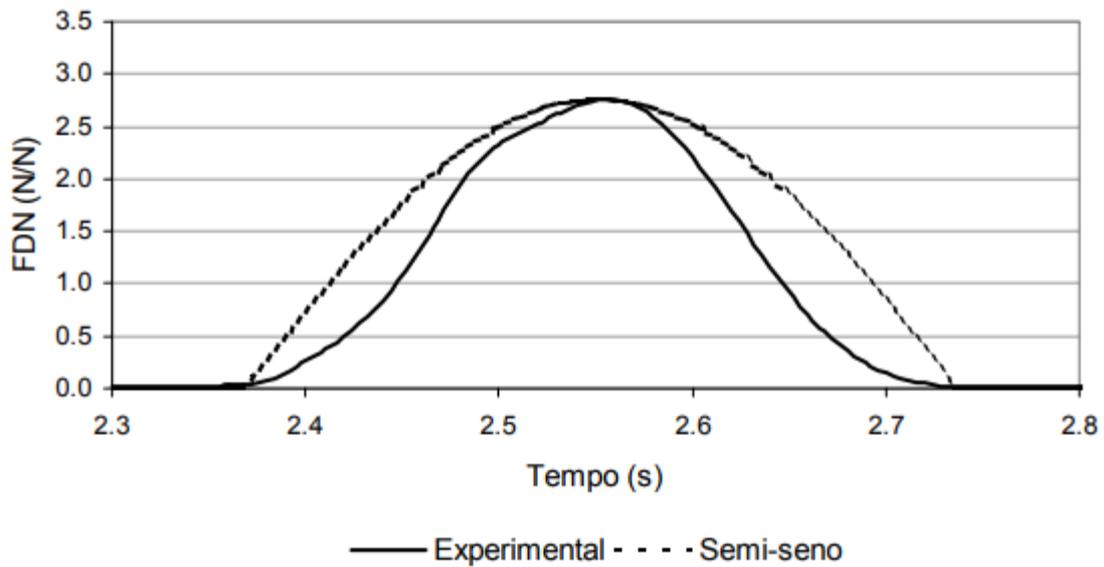


Figura 11: Comparação entre o sinal experimental e o sinal da função semi-seno [41]

Faisca [41] realizou um estudo com várias funções e foi verificado que a função normalmente empregada em processamento de sinais é a janela Hanning, que representa melhor o sinal experimental. A Equação (1) representa a função matemática elaborada pela autora.

$$F(t) = CD \left\{ k_p P \left[0,5 - 0,5 \cos\left(\frac{2\pi}{T_c} t\right) \right] \right\} \rightarrow t \leq T_c \quad (1)$$

$$F(t) = 0 \rightarrow T_c < t \leq T \quad (2)$$

$$k_p = \frac{2T}{T_c} \quad (3)$$

Onde:

$F(t)$: Carga dinâmica oriunda da excitação humana (vandalismo) (N);

CD: Coeficiente de defasagem;

k_p : Coeficiente de contato;

P: Peso total da pessoa multiplicada pela aceleração da gravidade (N);

T_c : Tempo de contato entre o pé e o solo (s);

T: Período da atividade (s).

No contexto dos parâmetros que representam a função Hanning, o coeficiente de defasagem (CD) leva em consideração a falta de sincronismo entre os praticantes de atividade humana rítmica, de acordo com a Figura 12.

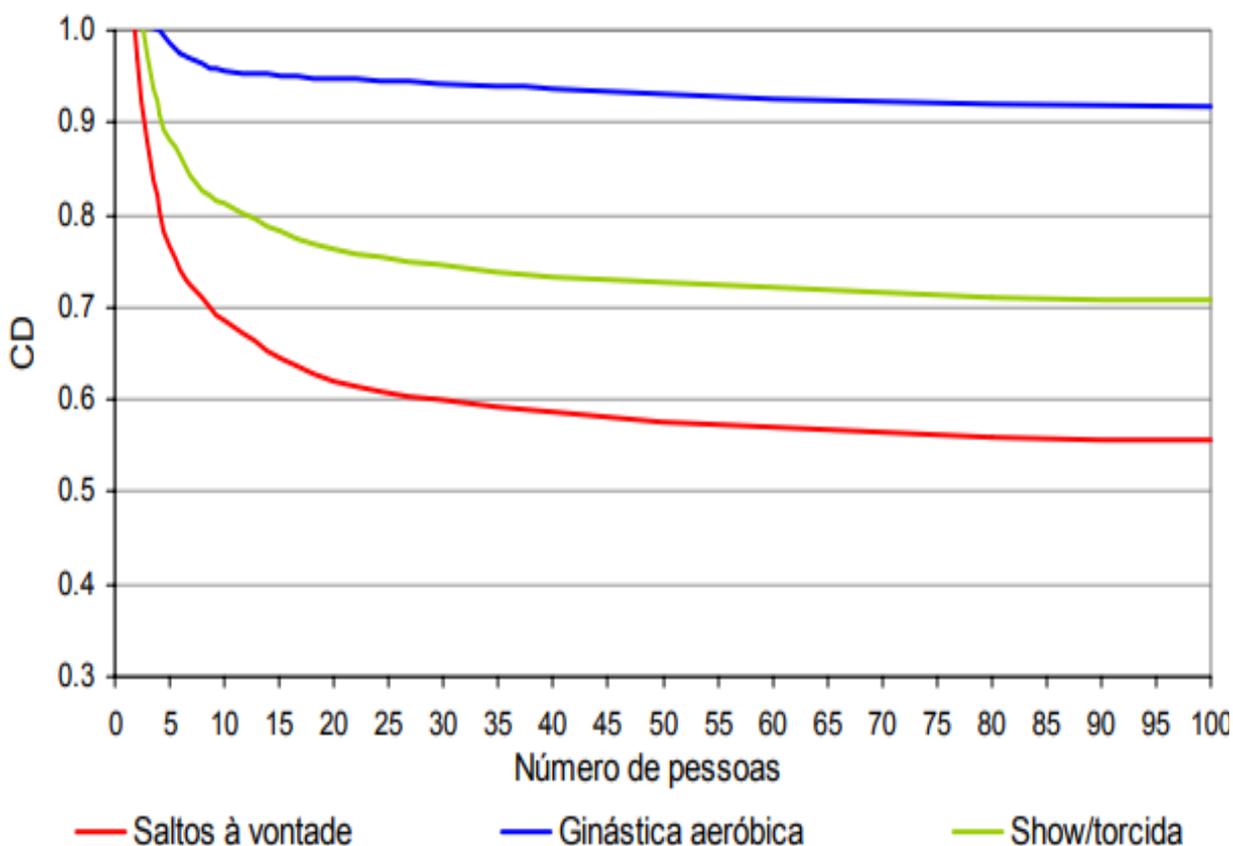


Figura 12: Coeficiente de defasagem para atividades humanas rítmicas [41]

A Tabela 4 apresenta os valores dos parâmetros analíticos desenvolvidos por Faisca [41] para projetos estruturais quando submetidos à atividade humana rítmica.

Tabela 4: Parâmetros analíticos desenvolvido por Faisca [41]

Atividade	T (s)	T _c (s)	k _p
Saltos à vontade	0,44 ± 0,15	0,32 ± 0,09	3,17 ± 0,58
Ginástica aeróbica	0,44 ± 0,09	0,34 ± 0,09	2,78 ± 0,60
Show/torcida	0,37 ± 0,03	0,33 ± 0,09	2,41 ± 0,51

3.4 Modelo de carregamento proposto por Bachmann et al. (Função semi-senoidal)

O estudo de Bachmann et al. [42] representa um dos primeiros trabalhos a propor um modelo matemático para descrever o carregamento proveniente da atividade humana rítmica. Segundo os autores, a função semi-seno adequadamente caracteriza o carregamento com perda de contato, conforme expresso pela Equação (4).

$$F(t) = k_p G \operatorname{sen}\left(\frac{\pi}{t_p} t\right) \rightarrow t \leq t_p \quad (4)$$

$$F(t) = 0 \rightarrow t_p < t \leq T_p \quad (5)$$

De acordo com a Equação (6), o peso estático de um indivíduo deve ser igual a integral de um pulso em relação ao tempo, com largura igual ao período de contato (t_p).

$$\frac{1}{T} \int_0^{t_p} k_p G \operatorname{sen}\left(\frac{\pi}{t_p} t\right) dt \quad (6)$$

A solução da Equação (6) é apresentada na Equação (7), onde percebe-se uma relação entre o coeficiente de impacto (k_p) e a razão de contato (α) entre t_p/T_p .

$$k_p = \frac{\pi}{2\alpha}; \alpha = \frac{t_p}{T_p} \quad (7)$$

Onde:

$F(t)$: Carga dinâmica oriunda da excitação humana (vandalismo) (N);

k_p : Coeficiente de contato;

G : Peso total da pessoa multiplicada pela aceleração da gravidade (N);

t_p : Tempo de contato entre o pé e o solo (s);

T_p : Período da atividade (s).

A Figura 13 apresenta o modelo de carregamento proposto por Bachmann et al. [42]. Neste modelo, quanto menor for o valor da razão de contato (α) entre t_p/T_p , maior será o coeficiente de impacto (k_p), conforme observado na Figura 13b. De acordo com os autores, um período de contato (t_p) inferior a 0,15 s é dificilmente alcançado devido à fisiologia humana. Ainda conforme os autores, os valores mais frequentes para a razão de contato situam-se na faixa de 0,25 a 0,60.

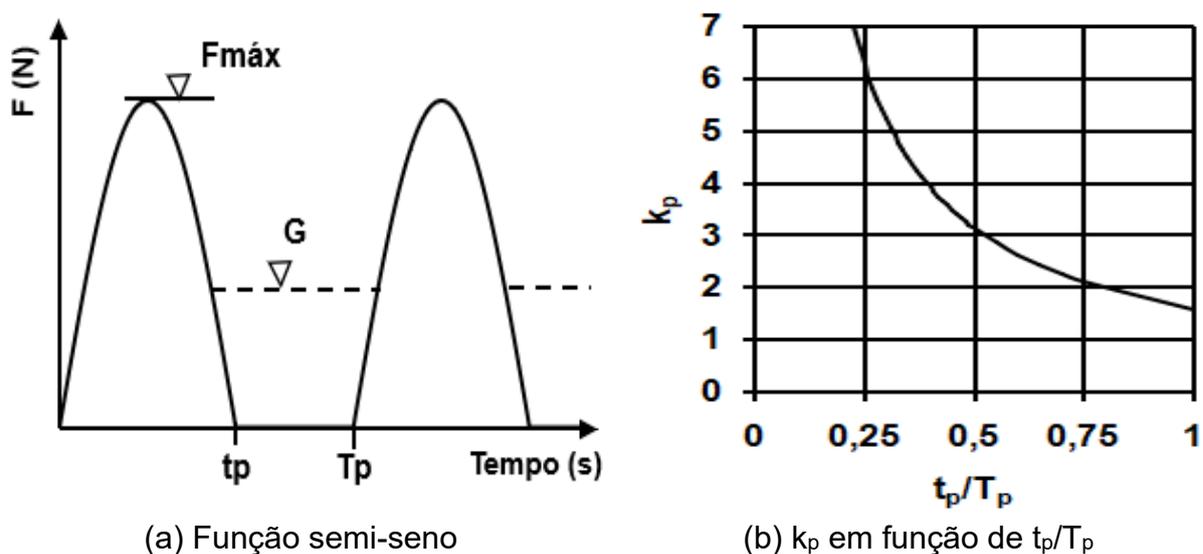


Figura 13: Modelo de carregamento [42]

3.5 Modelo de carregamento proposto por Bachmann et al. (Função triangular)

O estudo de Bachmann et al. [42] representa um dos primeiros trabalhos a propor um modelo matemático para descrever o carregamento proveniente da atividade humana rítmica. Segundo os autores, assim como a função Semi-senoidal, a função Triangular adequadamente caracteriza o carregamento com perda de contato, conforme expresso pela Equação (8).

$$F(t) = k_p G \left(\frac{2t}{t_p} \right) \rightarrow t \leq \frac{t_p}{2} \quad (8)$$

$$F(t) = k_p G \left[1 - \frac{2 \left(t - \frac{t_p}{2} \right)}{t_p} \right] \rightarrow \frac{t_p}{2} < t < t_p \quad (9)$$

$$F(t) = 0 \rightarrow t_p < t \leq T_p \quad (10)$$

$$k_p = 2 f_p t_p \quad (11)$$

Onde:

$F(t)$: Carga dinâmica oriunda da excitação humana (vandalismo) (N);

k_p : Coeficiente de contato;

G : Peso total da pessoa multiplicada pela aceleração da gravidade (N);

t_p : Tempo de contato entre o pé e o solo (s);

f_p : Frequência de passo (Hz);

T_p : Período da atividade (s).

4 MODELO ESTRUTURAL INVESTIGADO

4.1 Considerações iniciais

O presente capítulo expõe as informações pertinentes ao projeto estrutural da passarela investigada, cujo comportamento dinâmico foi analisado neste estudo. Serão fornecidos os dados relativos à geometria da estrutura, características geométricas das seções e propriedades físicas dos materiais empregados. A estrutura em foco é uma passarela de concreto já existente, composta por vigas e lajes em concreto armado, sujeita a vibrações oriundas de atividades humanas rítmicas (vandalismo).

4.2 Modelo estrutural da passarela

O modelo estrutural investigado corresponde a uma estrutura real, existente, associada a uma passarela com 3,4 m de largura e 24,4 m de extensão. O sistema estrutural é baseado em uma passarela de concreto armado simplesmente apoiada, constituída por duas vigas invertidas e duas lajes de concreto, formando um sistema em U, com lajes em “sanduíche”, de acordo com as Figuras 14 a 22.

O sistema estrutural está localizado entre os blocos A e B do campus da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Rio de Janeiro/RJ, Brasil e está sendo utilizada atualmente para a travessia de pedestres. A superestrutura é composta por duas vigas invertidas longitudinais com seção de 20 x 167 cm e uma viga longitudinal intermediária de 10 x 62 cm ligadas entre si por vigas transversais de 10 x 62 cm distantes de 244 cm entre si. As vigas transversais de extremidade da estrutura são vigas de 25 x 62 cm ligadas a dentes “gerber” de 60 cm que fazem o apoio da passarela junto à estrutura dos blocos A e B da universidade.

O piso da passarela é composto por duas lajes que fazem um sistema de “sanduíche” ligando as extremidades das vigas, com espessuras de 7 e 8 cm para as lajes superior e inferior. No projeto foram utilizados os aparelhos de apoio de neoprene com o objetivo de permitir os deslocamentos relativos à translação no sentido longitudinal da passarela entre a estrutura e os prédios. Como não foi especificado em projeto as medidas e o tipo dos aparelhos de neoprene utilizados na

passarela, os seus coeficientes de rigidez foram adaptados conforme calibração dos modelos numéricos.

Em relação às características físicas do concreto, este possui uma resistência característica à compressão igual a 14,0 MPa ($f_{ck} = 14,0$ MPa), módulo de elasticidade longitudinal igual a 17,8 GPa ($E_c = 17,8$ GPa), coeficiente de Poisson igual a 0,2 ($\nu = 0,2$) e densidade de 2500 kg/m³ ($\rho = 2500$ kg/m³). A massa total da estrutura é de 66200 kg.



Figura 14: vista lateral da passarela



Figura 15: Vista frontal da passarela



Figura 16: Vista interna da passarela

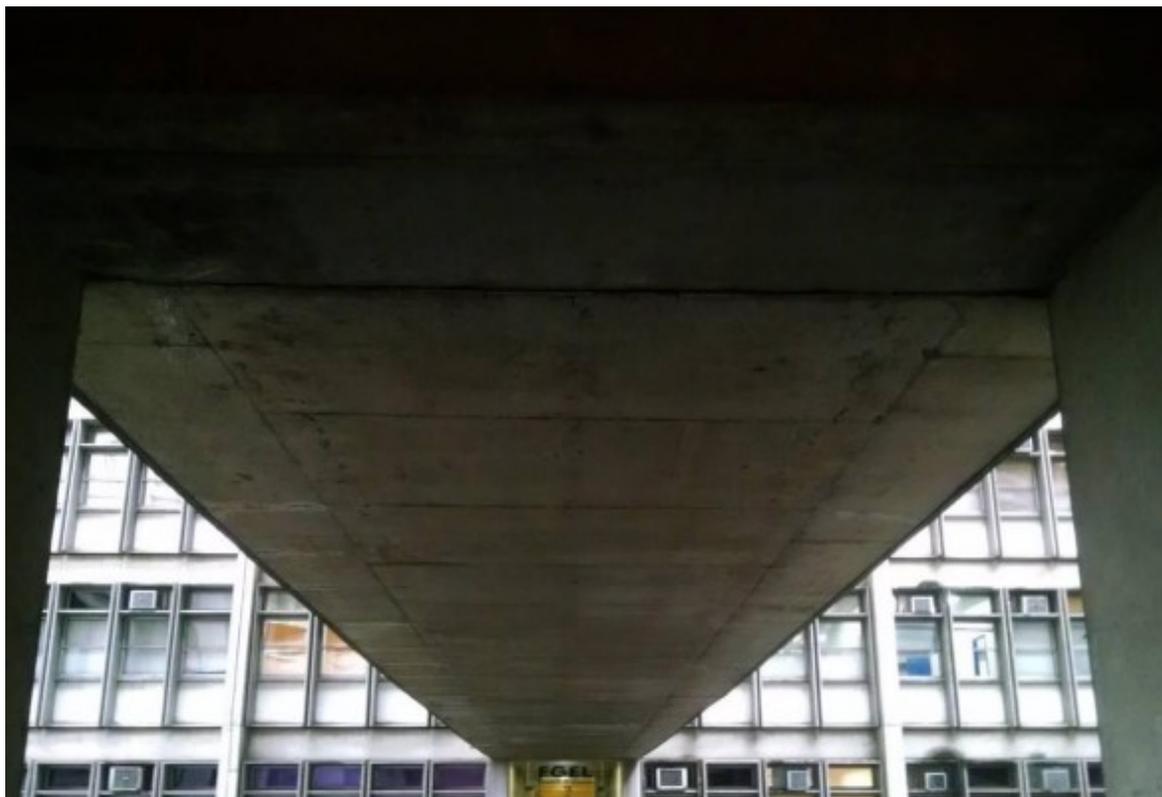


Figura 17: Vista inferior da passarela

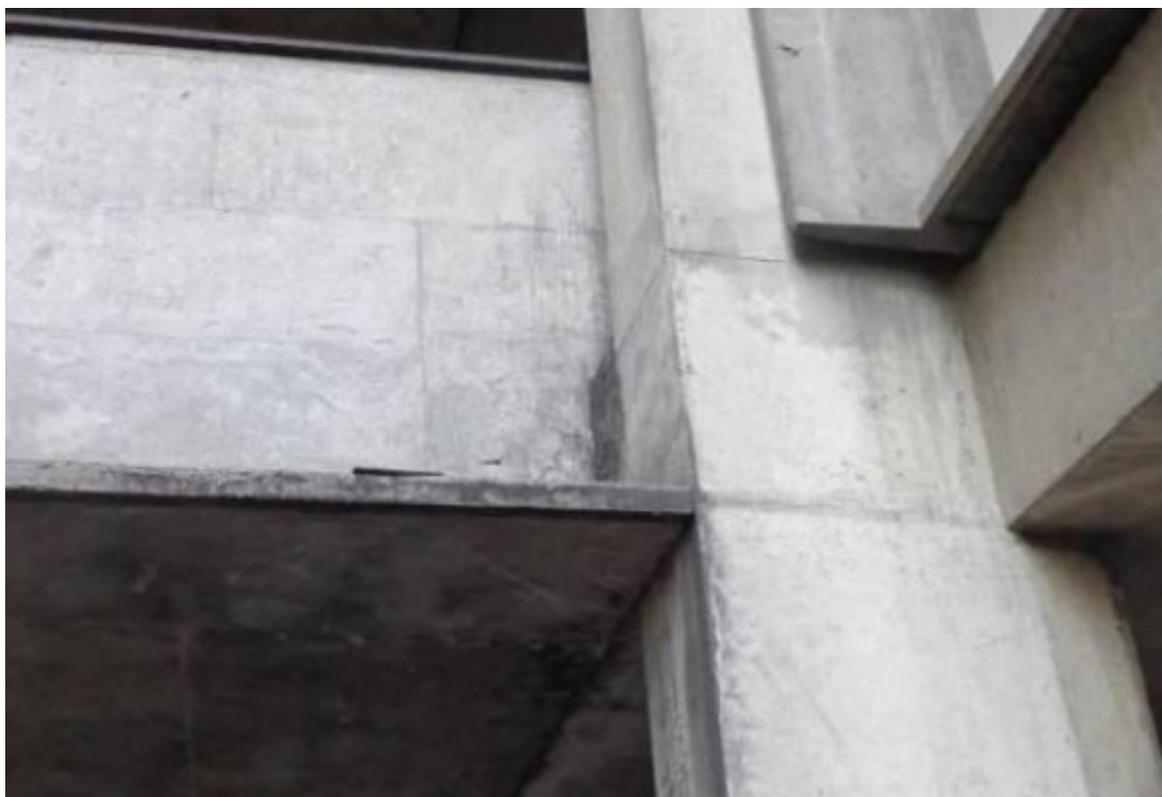


Figura 18: Vista do apoio da passarela

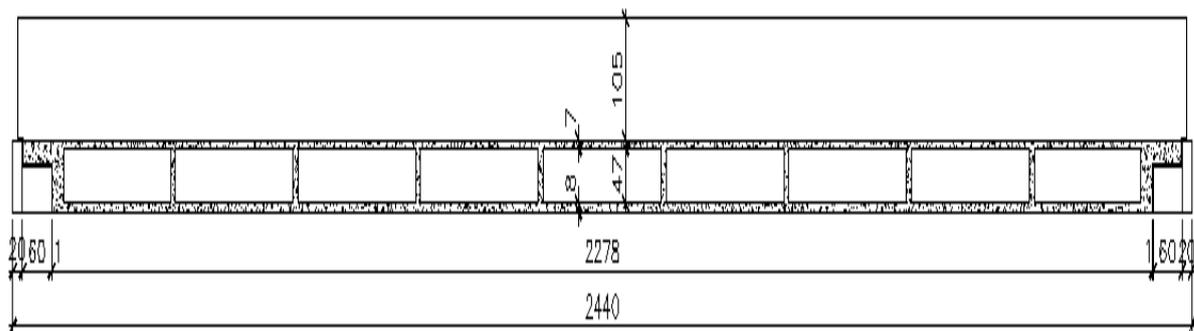


Figura 21: Vista lateral da passarela

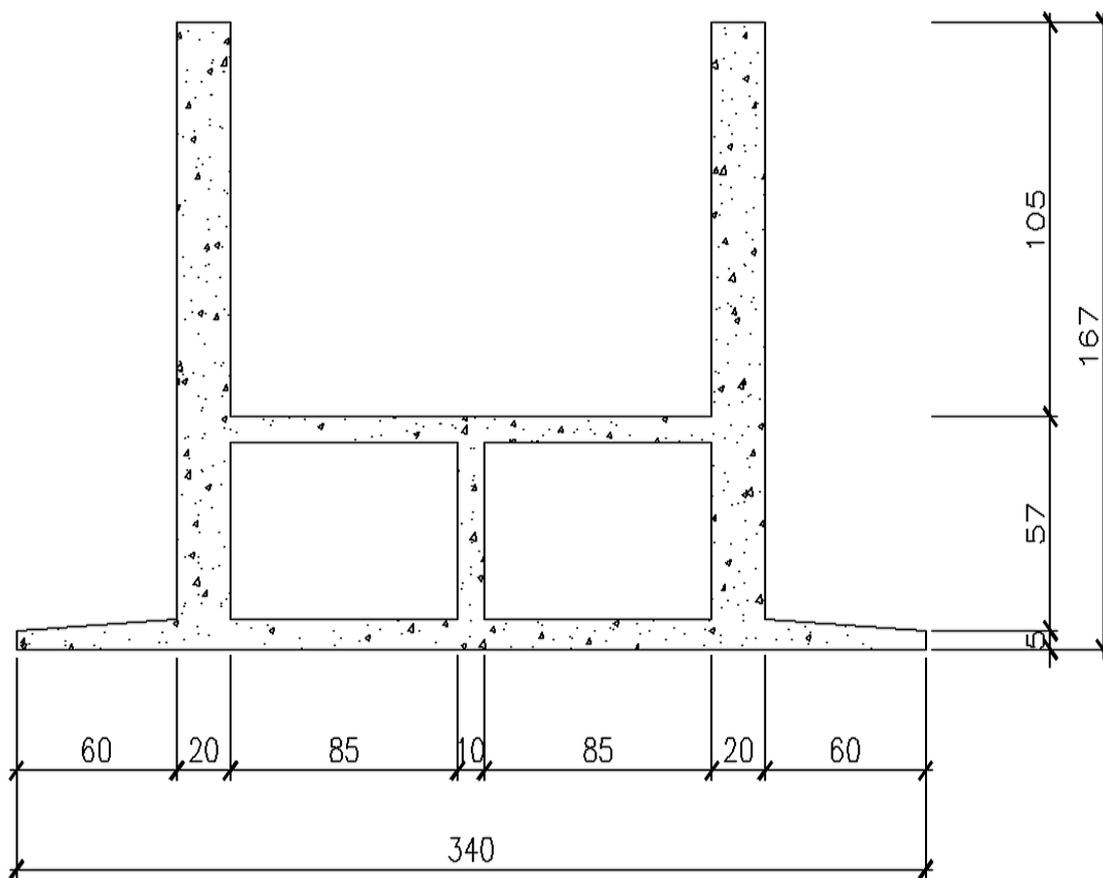


Figura 22: Corte transversal da passarela

5 MODELAGEM EM ELEMENTOS FINITOS DA PASSARELA

5.1 Considerações iniciais

No presente capítulo, as propriedades presentes na passarela são utilizadas no desenvolvimento do modelo numérico-computacional tridimensional que representa da forma mais real possível o comportamento do sistema estrutural estudado. No modelo numérico desenvolvido são empregadas técnicas usuais de discretização, via método dos elementos finitos, por meio do emprego do programa ANSYS [5]. Neste modelo, toda a estrutura da passarela é representada por elementos finitos de casca SHELL63.

5.2 Modelo em elementos finitos da estrutura

Neste trabalho de pesquisa, um modelo numérico-computacional foi desenvolvido para representar, da maneira mais fidedigna possível, o comportamento estrutural da passarela de pedestres investigada. Este modelo foi empregado na análise modal e forçada, visando a avaliação do comportamento dinâmico da estrutura. O modelo computacional tridimensional, concebido para a análise dinâmica do piso da passarela, foi gerado utilizando técnicas convencionais de refinamento de malha presentes nas simulações do método dos elementos finitos implementadas pelo software de análise estrutural ANSYS [5].

O refinamento da malha foi realizado de modo a gerar elementos finitos uniformemente distribuídos na ordem de 25 por 25 centímetros, evidenciando um refinamento adequado para a passarela de pedestres em estudo. As Figuras 23 a 25 apresentam o modelo estrutural da passarela em análise, destacando uma discretização eficiente da malha de elementos finitos e suas características.

Nós: 4104
Elementos (Shell63): 4074
Graus de liberdade: 23364

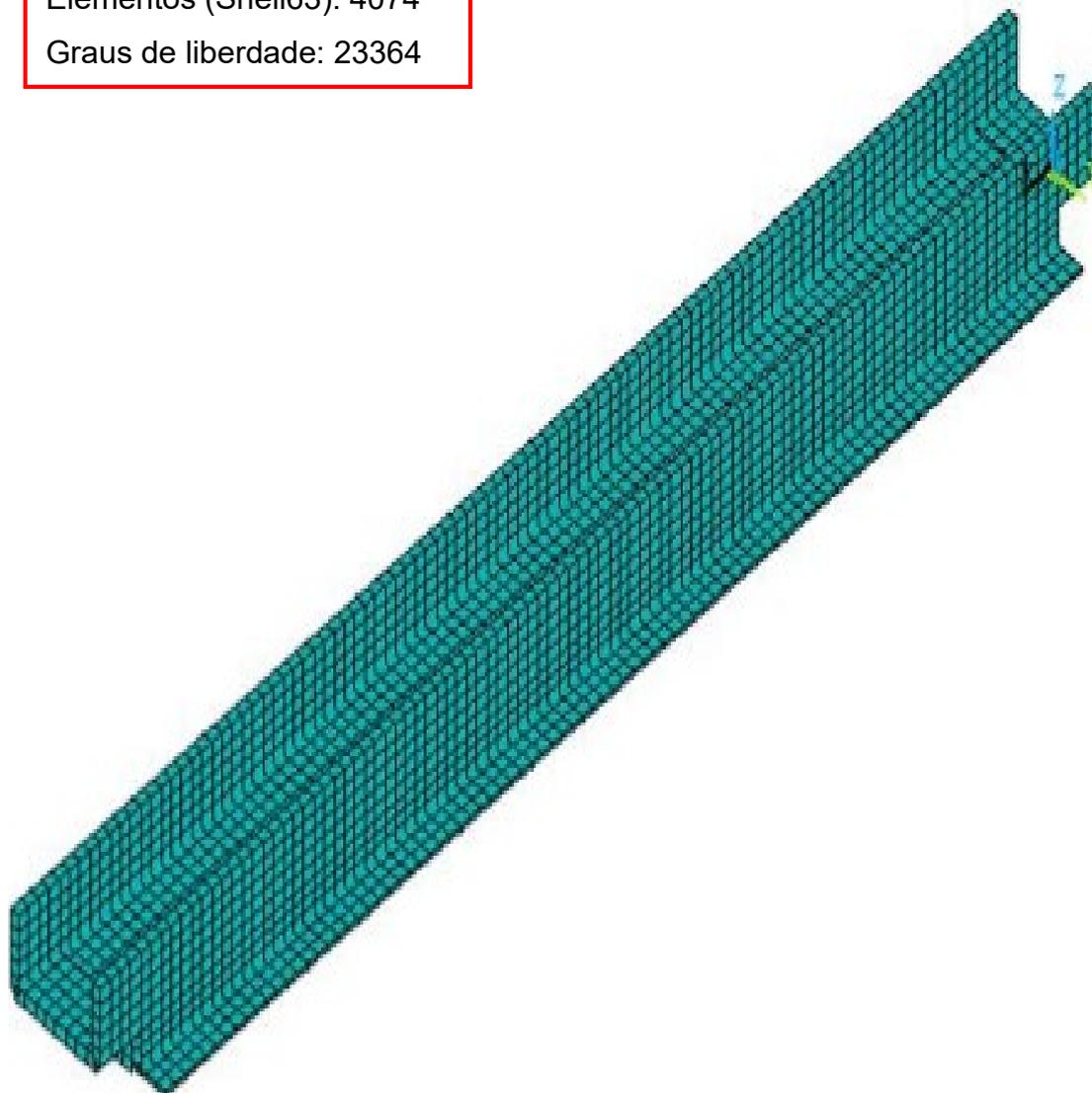


Figura 23: Vista tridimensional do modelo em elementos finitos

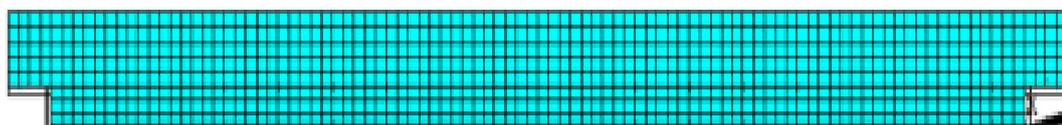


Figura 24: Vista lateral do modelo em elementos finitos

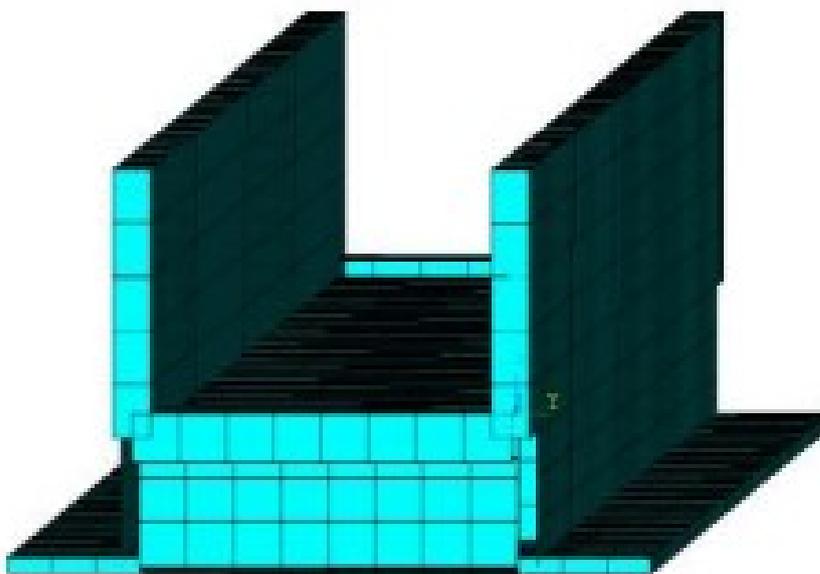


Figura 25: Vista frontal do modelo em elementos finitos

5.3 Modelagem do amortecimento estrutural

O amortecimento estrutural refere-se à capacidade de um sistema estrutural dissipar ou absorver a energia vibracional geradas por cargas dinâmicas. De maneira mais precisa, o amortecimento estrutural está relacionado à redução da amplitude das oscilações naturais de uma estrutura ao longo do tempo.

Conforme Chopra [43], é impossível determinar a matriz de amortecimento de um sistema estrutural através das propriedades de amortecimento de cada elemento que compõe a estrutura da maneira como é determinada a matriz de rigidez, por exemplo. Isto ocorre porque ao contrário do módulo de elasticidade, que é utilizado na computação da rigidez, as propriedades de amortecimento dos materiais não são bem estabelecidas.

Ainda que estas propriedades fossem conhecidas, de acordo com Chopra [43], a matriz de amortecimento resultante não levaria em conta uma parte significativa da energia dissipada através do atrito nas ligações em estruturas metálicas, abertura e fechamento de microfissuras no concreto, atrito entre a estrutura e outros elementos que estejam acoplados à mesma, tais como alvenaria, divisórias, equipamentos mecânicos, proteção contra incêndio, etc. Algumas destas fontes de dissipação de energia são extremamente difíceis de serem identificadas.

O amortecimento de uma estrutura só é considerado correto, se sua resposta for obtida através de ensaios experimentais. Todavia, a realização destes ensaios muitas das vezes demanda tempo e custo que na maioria dos casos é muito elevado. Por esta razão, o amortecimento é geralmente obtido em termos de taxas de contribuição, ou taxas de amortecimento modal, de acordo com Clough e Penzien [44].

Portanto, geralmente é utilizada a matriz de amortecimento de Rayleigh, que considera duas principais parcelas, uma relativa à taxa de contribuição da matriz de massa (α); e outra, à taxa de contribuição da matriz de rigidez (K), conforme pode ser observado através da Equação 12. Define-se M a matriz de massa e K a matriz de rigidez do sistema, conforme Craig Jr. [45], Clough e Penzien [44] e Chopra [43].

$$C = \alpha M + K \quad (12)$$

A Equação 12 pode ser reescrita, em termos de taxa de amortecimento modal e frequência natural circular (rad/s), como:

$$\xi_i = \frac{\alpha}{2 \omega_{0i}} + \frac{\beta \omega_{0i}}{2} \quad (13)$$

Onde:

ξ_i = Taxa de amortecimento do i-ésimo modo;

ω_{0i} = Frequência natural circular referente ao i-ésimo modo.

Isolando α e β da Equação 13, para duas frequências naturais mais importantes, obtém-se as Equações 14 e 15:

$$\alpha = 2 \xi_1 \omega_{01} - \beta \omega_{01} \omega_{01} \quad (14)$$

$$\beta = \frac{2 (\xi_2 \omega_{02} - \xi_1 \omega_{01})}{\omega_{02} \omega_{02} - \omega_{01} \omega_{01}} \quad (15)$$

A partir de duas frequências naturais mais importantes para a análise dinâmica do problema em questão torna-se possível descobrir os valores dos parâmetros α e β . O parâmetro ω_{01} é representado pela frequência natural circular fundamental; e ω_{02} , a segunda frequência natural circular mais importante da estrutura.

Com o objetivo de se obter realisticamente a taxa de amortecimento da estrutura, foram realizados ensaios experimentais sobre a passarela de pedestre em estudo. Conforme o resultado obtiveram-se coeficientes de amortecimento para o primeiro modo de 1,70% ($\xi = 1,70\%$ ou 0,017); já em relação ao segundo modo, uma taxa de amortecimento de 1,15% ($\xi = 1,15\%$ ou 0,015); por fim, no que tange ao terceiro modo, a taxa de amortecimento apresentou um valor de 1,02% ($\xi = 1,02\%$ ou 0,0102). Portanto, para o desenvolvimento da modelagem numérica, foi utilizada a taxa de amortecimento referente ao primeiro modo. Esta taxa de amortecimento demonstra a existência de poucos elementos que contribuem para o amortecimento da estrutura. A Tabela 5 apresenta os parâmetros α e β utilizados nas análises numéricas de vibração forçada via método dos elementos finitos.

Tabela 5: Parâmetros α e β utilizados na análise de vibração forçada

f_{01} (Hz)	f_{02} (Hz)	ω_{01} (rad/s)	ω_{02} (rad/s)	α	β
4,85	15,77	30,47	99,09	0,7924	0,0002624

Conforme a Tabela 5, o parâmetro α , que é o multiplicador da matriz de massa, apresenta um valor de 0,7924. Quanto ao parâmetro β , multiplicador da matriz de rigidez, ele possui um valor de 0,0002624.

6 MONITORAÇÃO EXPERIMENTAL: EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

6.1 Considerações iniciais

O presente Capítulo aborda as funcionalidades específicas de cada equipamento utilizado na monitoração experimental desta pesquisa, desde o acelerômetro, que é utilizado para medir a vibração de estruturas, até o *Shaker S 51140-M*, que é um excitador de vibração.

6.2 Acelerômetro PCB *Piezotronics* (Dytran)

Em engenharia civil, um acelerômetro pode ser utilizado para monitorar e medir a aceleração de estruturas, fornecendo dados importantes sobre a resposta dinâmica de edifícios, pontes e outras infraestruturas a eventos como atividades humanas, ventos fortes, ou até mesmo terremotos. Isso ajuda os engenheiros a avaliarem a segurança e a integridade estrutural das construções, permitindo a implementação de medidas preventivas ou corretivas quando necessário. Em resumo, o acelerômetro é uma ferramenta valiosa para entender e otimizar o desempenho de estruturas em condições dinâmicas.

Existem diversos tipos de tecnologias (piezoelétricos, piezorresistivos, extensômetros de resistência elétrica, laser, térmico, etc.), e embora todos tenham a mesma finalidade, podem ser bastante diferentes uns dos outros, dependendo da aplicação a que se destinam e condições em que têm que trabalhar. Nesta pesquisa, foi utilizado um acelerômetro capacitivo da marca Dytran. Este dispositivo está associado à capacitância variável do circuito em função da oscilação, podendo-se medir, conseqüentemente, a variação de voltagem (Figuras 26 e 27).

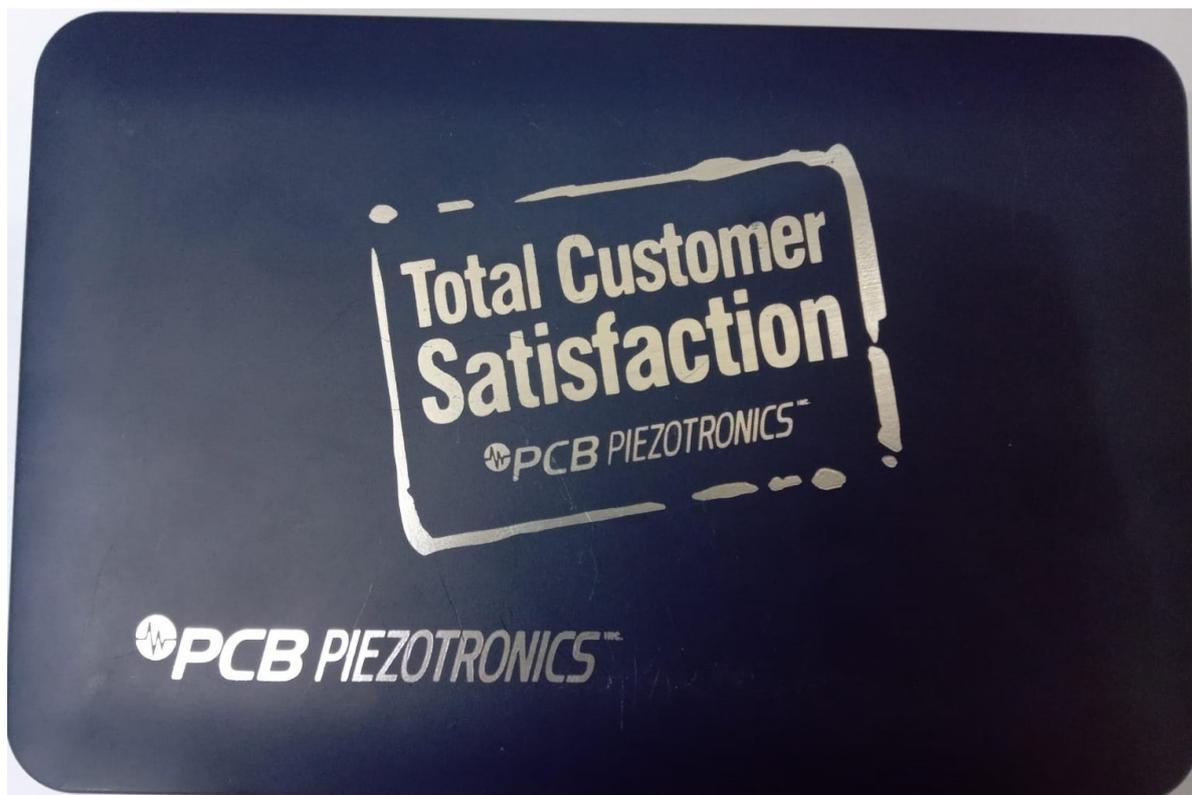


Figura 26: Caixa do acelerômetro PCB Piezotronics (Dytran)



Figura 27: Acelerômetro e sua característica de funcionamento

6.3 ADS 2500 (Sistema de aquisição de dados)

O sistema de aquisição de dados ADS2500 foi utilizado para medir e gravar as respostas das acelerações obtidas experimentalmente. O sistema ADS 2500 é fabricado pela LYNX Tecnologia Eletrônica LTDA e é composto por uma unidade de aquisição de dados com alta taxa de amostragem, entradas para conexão de diversos tipos de sensores, bem como software de configuração e visualização de dados, como o AqDados 7.5.8, e de pós processamento dos sinais armazenados em séries temporais, como o AqDAnalysis 7.5.



(a) Vista frontal



(b) Vista posterior

Figura 28: Vistas do ADS 2500

6.4 Shaker S 51140-M e Amplificador de potência BAA 1000

O Shaker, um excitador de vibração do tipo TIRAvib – S 51140-M, conforme ilustrado nas Figuras 29 e 30, é um dispositivo que utiliza um transdutor eletromagnético para gerar vibrações em uma ampla faixa de frequências, com capacidade para produzir uma força de até 400 N. Este equipamento opera em um intervalo de frequência que varia de 5 a 5000 Hz, sendo capaz de gerar sinais de onda sinusoidal ou aleatória. Sua ativação é realizada por meio de um amplificador de potência da marca TIRAvib de 1200VA, conforme representado na Figura 31, e por um gerador de sinal, o qual será detalhado no próximo item.



(a) Topo



(b) Inferior



(c) Frontal



(c) Lateral



Figura 30: Identificação Shaker S 51140-M



Figura 29: Amplificador de potência BAA 1000

6.4.1 NCH *ToneGenerator*

O NCH *ToneGenerator* é um aplicativo desenvolvido para a geração de sinais, apresentando uma interface intuitiva e de fácil utilização. Este aplicativo é compatível tanto com computadores quanto com dispositivos *palm*. O mesmo é capaz de criar ondas senoidais, quadradas, triangulares e aleatórias. O aplicativo foi integrado ao amplificador de potência e ao *Shaker* para conduzir ensaios de vibração livre na passarela objeto de estudo.

7 ANÁLISE MODAL EXPERIMENTAL

7.1 Considerações iniciais

Este capítulo explora a análise modal mediante testes experimentais realizados “in loco”, utilizando um acelerômetro instalado na estrutura e conectado a um sistema de aquisição de dados ADS 2500. Para excitar a estrutura, por meio de testes de vibração livre, foi utilizado um *Shaker* do tipo S 51140-M, com o objetivo de se obter as frequências naturais (autovalores) e os modos de vibração (autovetores) do modelo em estudo.

7.2 Descrição dos testes experimentais

Nos ensaios, cinco acelerômetros foram estrategicamente posicionados em pontos distintos do tabuleiro, a saber: 1/6, 1/4, 1/2, 3/4 e 5/6 do vão da passarela, conforme indicado na Figura 32, representados por AC01, AC02, AC03, AC04 e AC05, respectivamente. Diversos testes de vibração livre foram conduzidos utilizando o Shaker S 51140-M conectado ao ADS 2500 (Figuras 33 a 36), visando obter as frequências naturais e as formas modais referentes ao primeiro, segundo e terceiro modos de vibração da estrutura. As Figuras 37 a 41 apresentam os resultados mais representativos obtidos experimentalmente.

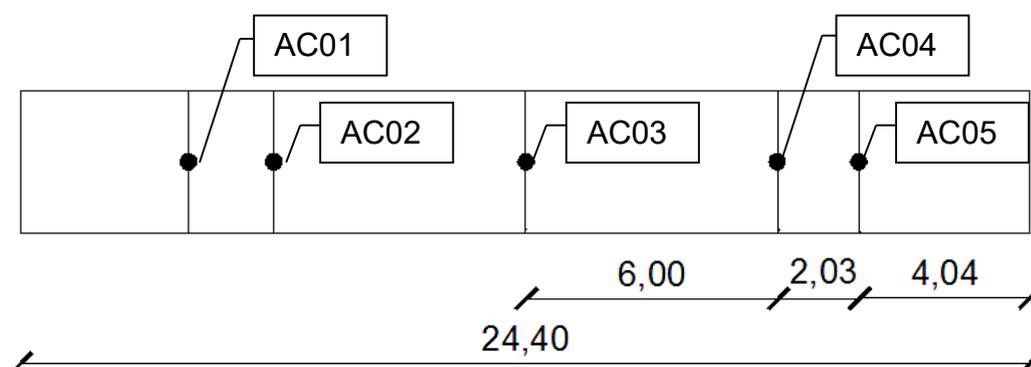


Figura 30: Localização dos acelerômetros

7.3 Teste experimental: Shaker S 51140-M e ADS 2500

O teste foi conduzido de maneira a excitar a estrutura por meio de um *Shaker*, auxiliado por um amplificador de potência, posicionado no centro do vão da passarela (Figuras 33 e 34). Para tal, foi realizada uma varredura de 1 a 50 Hz durante 60 segundos ($t = 60$ s) com o objetivo de identificar as três frequências mais significativas da passarela. Todas as respostas foram obtidas mediante o uso de cinco acelerômetros do tipo Dytran posicionados simetricamente em $1/6$, $1/4$, $1/2$, $3/4$ e $5/6$ do vão da passarela, conforme Figura 35.

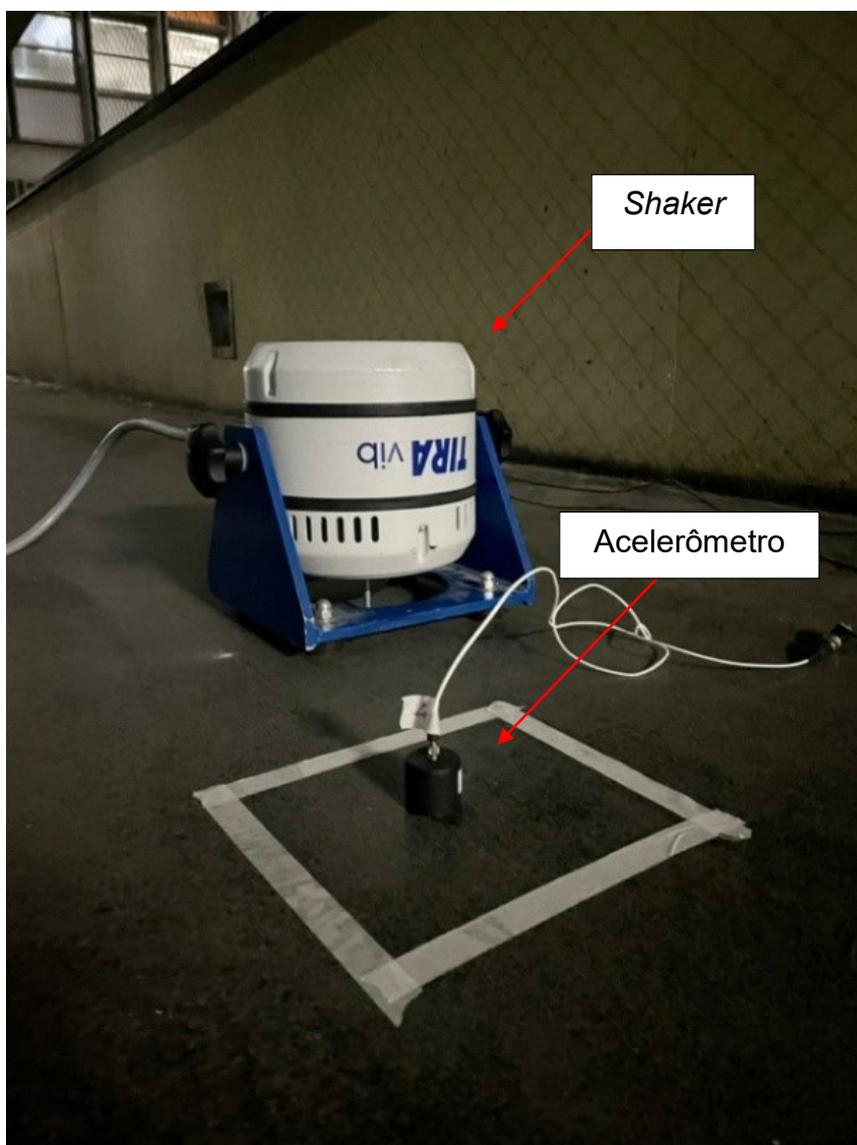


Figura 31: Estrutura excitada no meio do vão da passarela

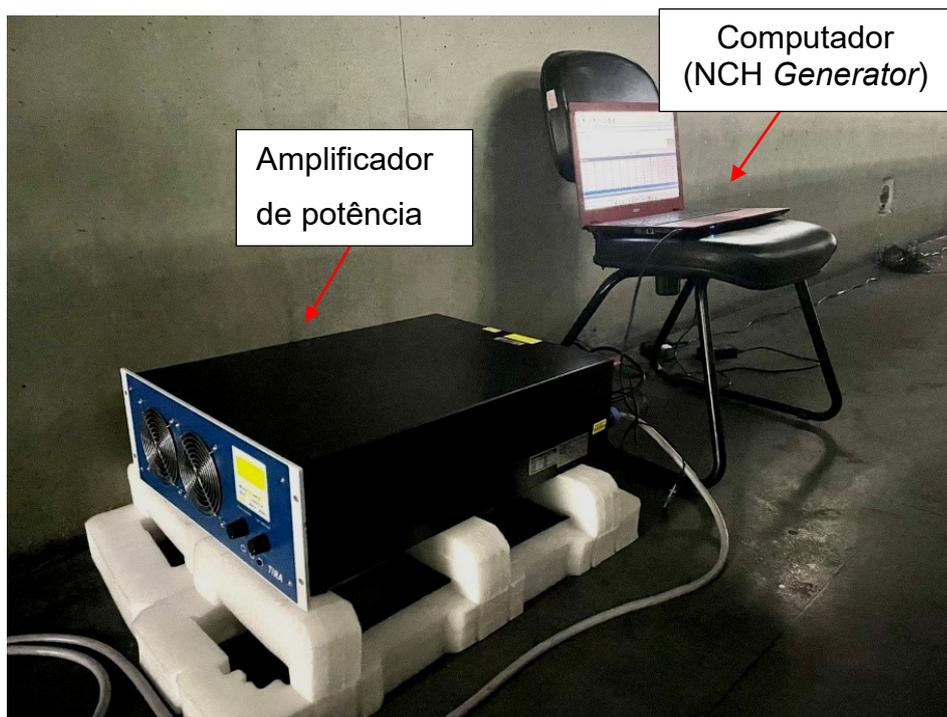


Figura 32: Gerador de sinal e amplificador de potência

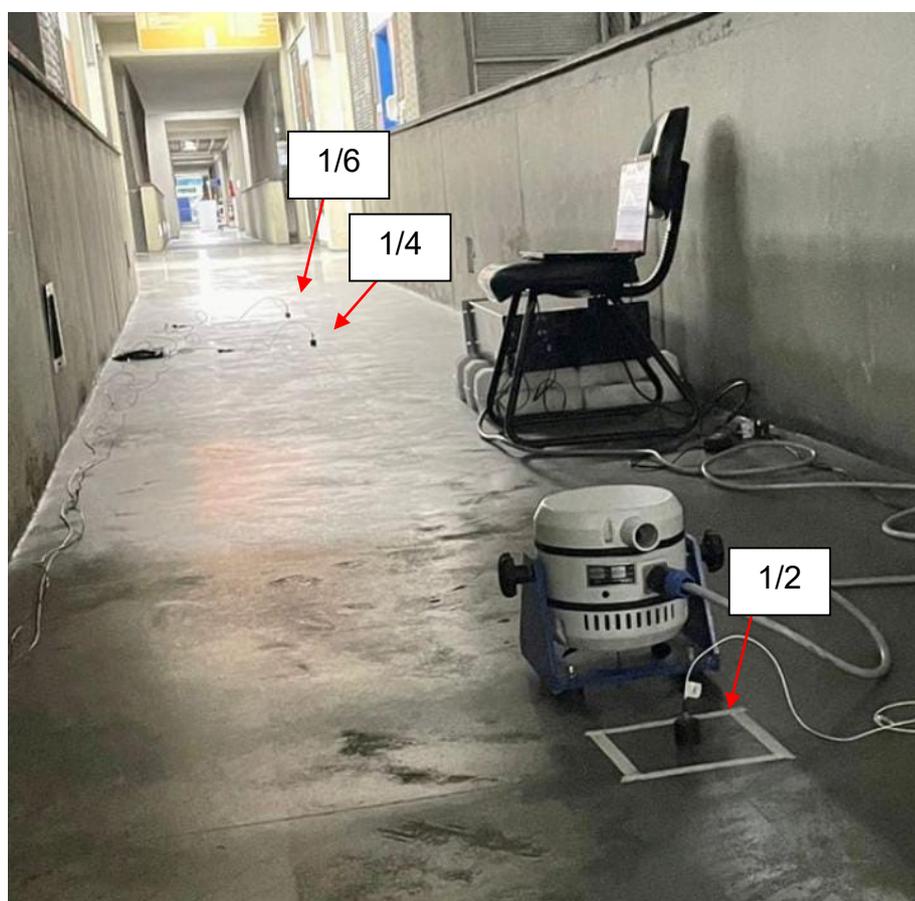


Figura 33: Posicionamento dos acelerômetros Dytran

Os acelerômetros estão integrados a um sistema de aquisição de dados ADS 2500, produzido pela empresa LYNX Tecnologia Eletrônica (Figura 36). Esse sistema, por meio de sua placa condicionadora e controladora, converte o sinal de variação elétrica em valores de engenharia, tais como deformação específica, aceleração e força, sendo controlado por um computador.

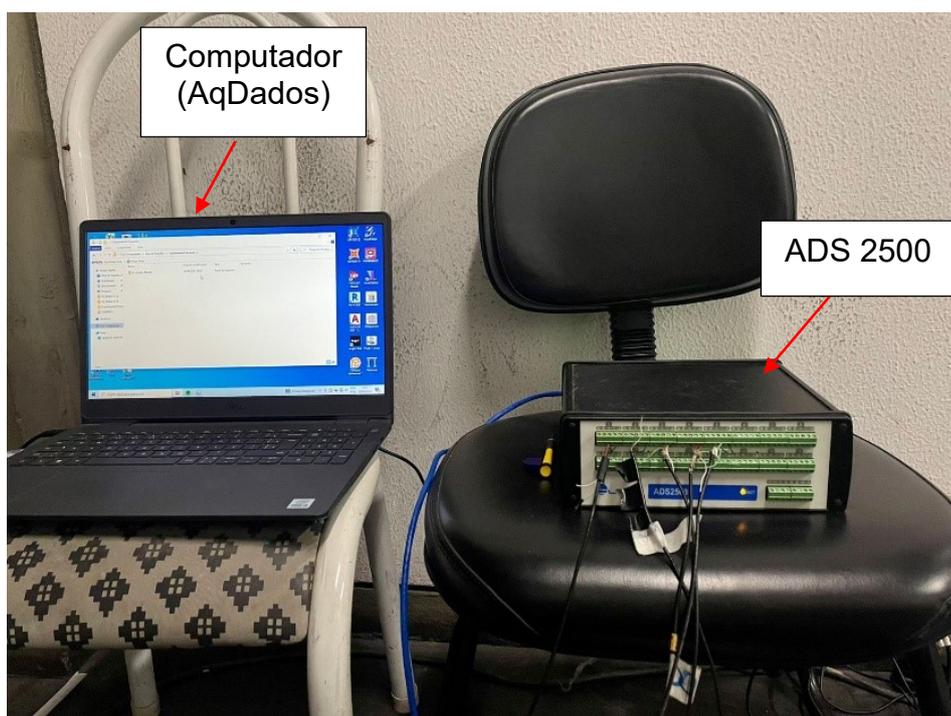
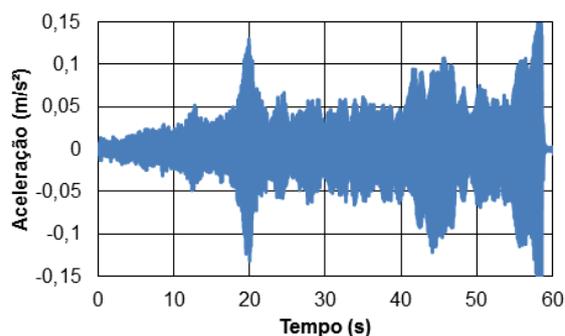


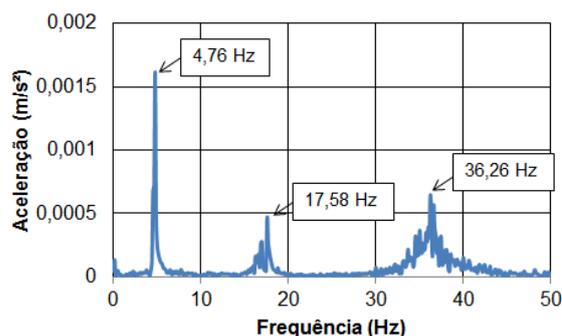
Figura 34: Acelerômetros conectados ao ADS 2500 e controlado por computador

A partir dos ensaios experimentais, realizados para analisar as vibrações provocadas pelo *Shaker* na passarela, foram obtidos resultados tanto no domínio do tempo quanto no da frequência. Esses resultados estão descritos nas Figuras 37 a 41.

Os espectros de resposta das vibrações da estrutura em cinco pontos específicos são apresentados por meio das Transformadas Rápidas de Fourier (FFT), correspondendo às saídas associadas aos cinco acelerômetros Dytran utilizados na análise modal experimental da passarela. Essas respostas podem ser visualizadas nas Figuras 37b a 41b, extraídas do software AqDAnalysis do Sistema de Aquisição de Dados ADS 2500.

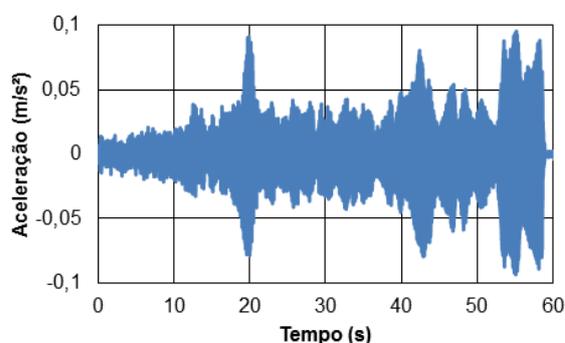


(a) Aceleração no domínio do tempo

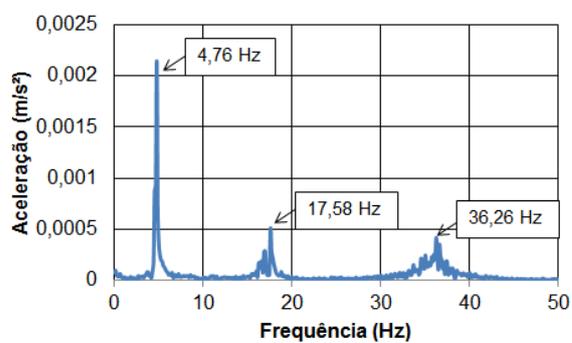


(b) Aceleração no domínio da frequência

Figura 35: Resposta dinâmica da passarela. Seção estrutural investigada: 1/6 do vão. Frequência de excitação: 1 a 50 Hz. Posição da excitação dinâmica: 1/2 do vão (Vertical)

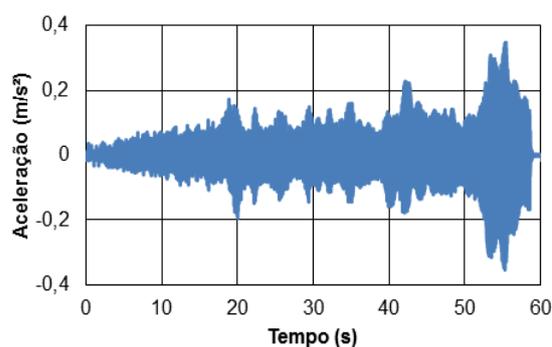


(a) Aceleração no domínio do tempo

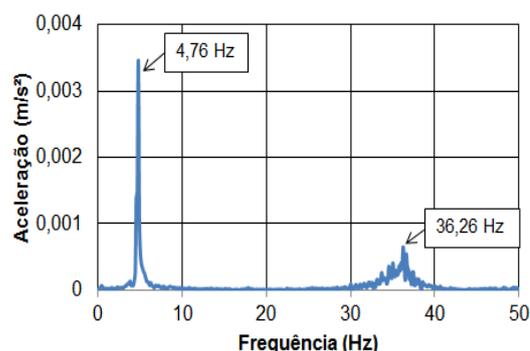


(b) Aceleração no domínio da frequência

Figura 36: Resposta dinâmica da passarela. Seção estrutural investigada: 1/4 do vão. Frequência de excitação: 1 a 50 Hz. Posição da excitação dinâmica: 1/2 do vão (Vertical)



(a) Aceleração no domínio do tempo



(b) Aceleração no domínio da frequência

Figura 37: Resposta dinâmica da passarela. Seção estrutural investigada: 1/2 do vão. Frequência de excitação: 1 a 50 Hz. Posição da excitação dinâmica: 1/2 do vão

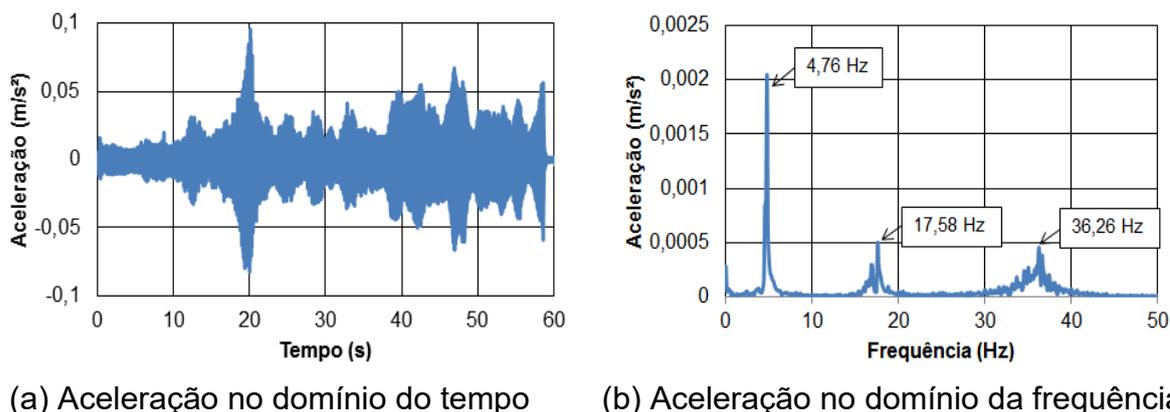


Figura 38: Resposta dinâmica da passarela. Seção estrutural investigada: 3/4 do vão. Frequência de excitação: 1 a 50 Hz. Posição da excitação dinâmica: 1/2 do vão (Vertical)

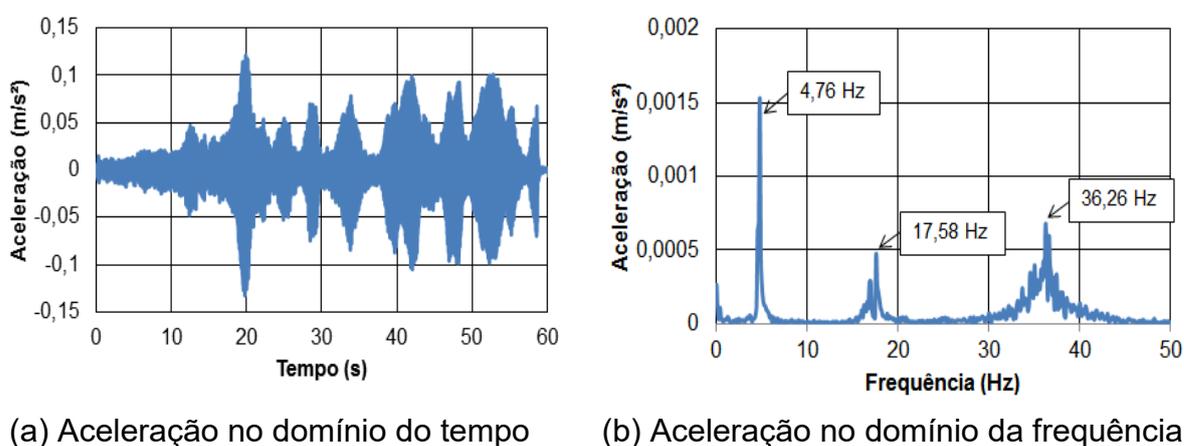


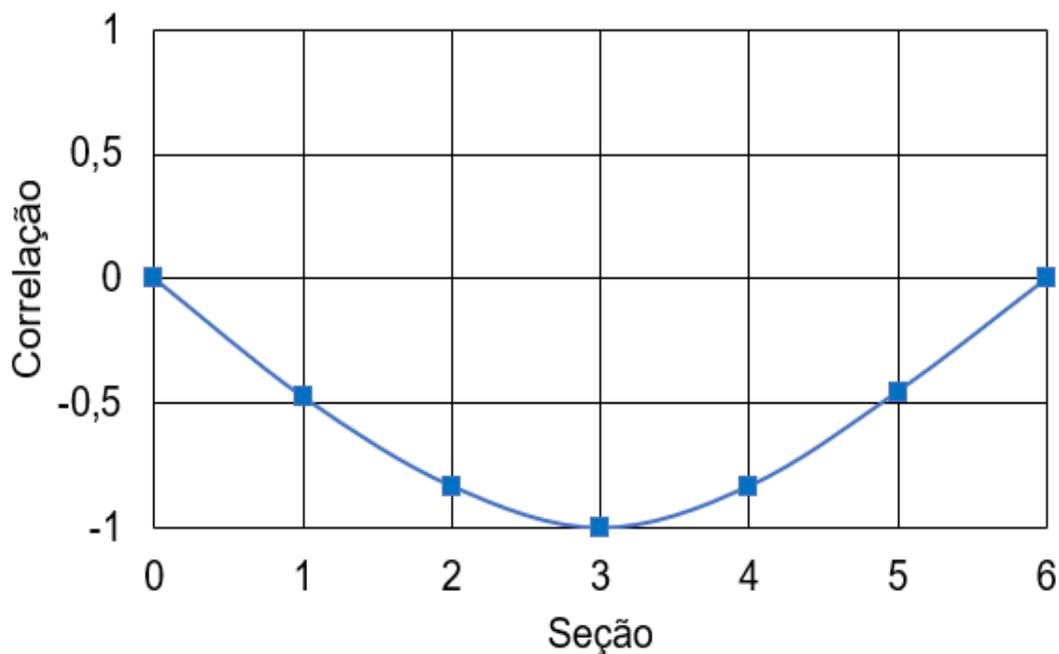
Figura 39: Resposta dinâmica da passarela. Seção estrutural investigada: 5/6 do vão. Frequência de excitação: 1 a 50 Hz. Posição da excitação dinâmica: 1/2 do vão (vertical)

Analisando-se os resultados apresentados nas Figuras 37 a 41, torna-se evidente a identificação de três picos de frequência, correspondentes a três modos verticais de vibração associados à flexão ($f_{01}= 4,76$ Hz; $f_{02}= 17,58$ Hz; $f_{03}= 36,26$ Hz). É notável que o segundo modo de vibração não é evidenciado na Figura 39 (correspondente à metade do vão da estrutura), onde o valor da amplitude de oscilação desse modo é nulo. No entanto, observa-se que o primeiro modo de vibração atinge sua amplitude máxima nesse ponto, quando comparado aos demais gráficos.

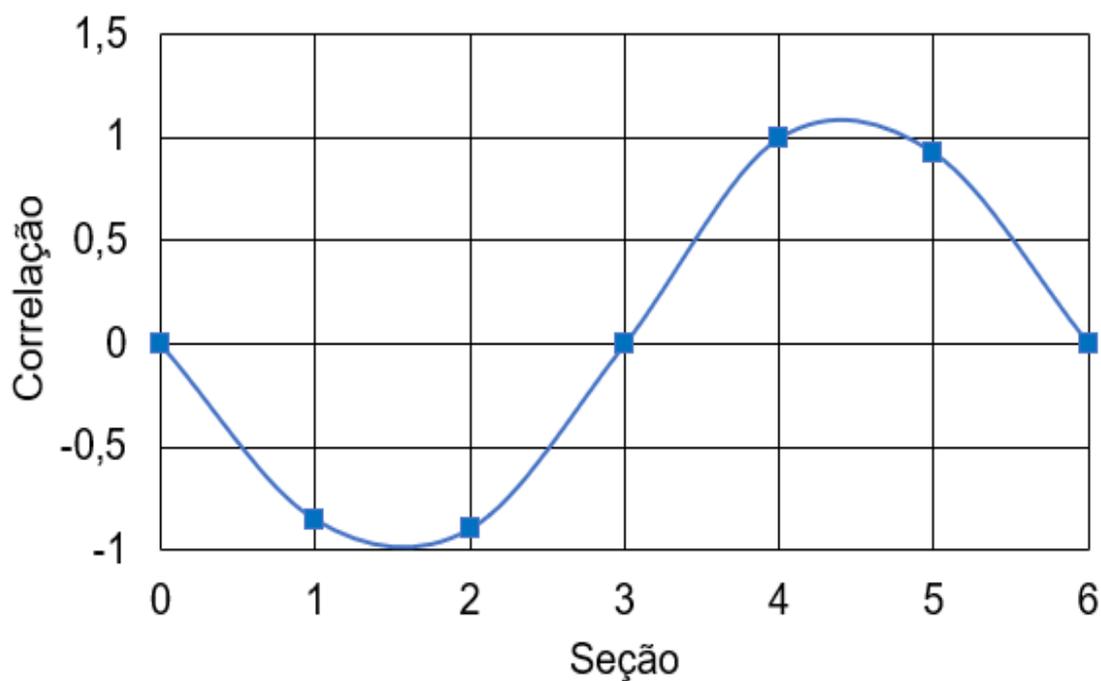
A seguir, são apresentados os três primeiros modos experimentais de vibração, gerados pela correlação entre as amplitudes obtidas nos gráficos de

domínio da frequência apresentados anteriormente, representativos de cada acelerômetro utilizado na passarela (AC01, AC02, AC03, AC04 e AC05).

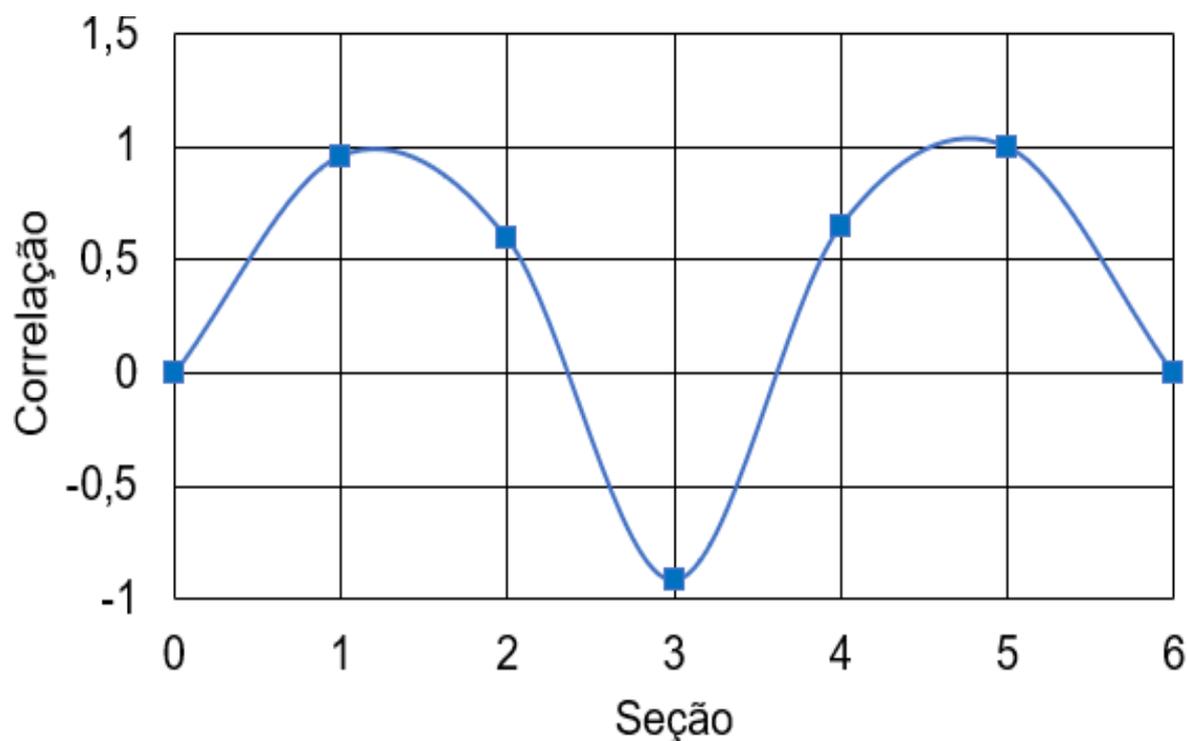
Conforme indicado na Figura 42, as seções 0 e 6 correspondem aos apoios da passarela, enquanto as seções 1, 2, 3, 4 e 5 estão associadas, respectivamente, aos acelerômetros AC01, AC02, AC03, AC04 e AC05.



(a) 1º modo de vibração experimental ($\xi=1,70\%$)



(b) 2º modo de vibração experimental ($\xi=1,15\%$)



(c) 3º modo de vibração experimental ($\xi=1,02\%$)
Figura 40: Modos de vibração experimentais

De acordo com Debona [18], o tipo de excitação (pessoa, martelo ou *shaker*) pode alterar o amortecimento modal da estrutura, devido ao indivíduo, após executar o impacto, possuir propriedades de um sistema massa-mola-amortecedor, aumentando falsamente o amortecimento modal da estrutura.

Os coeficientes de amortecimento modais da estrutura, referentes aos três primeiros modos de vibração com ênfase nos efeitos de flexão, foram determinados utilizando o método de decremento logarítmico. Os valores obtidos foram, respectivamente, 1,70% para o primeiro modo, 1,15% para o segundo modo e 1,02% para o terceiro modo.

8 ANÁLISE MODAL NUMÉRICA

8.1 Considerações iniciais

Neste Capítulo são apresentadas as frequências naturais (autovalores) e modos de vibração (autovetores) numéricas da passarela investigada neste trabalho, com o objetivo de calibrar com os resultados obtidos via monitoração experimental (Capítulo 6). Após a análise dos autovalores e autovetores do modelo numérico em elementos finitos (MEF) [45], será apresentada a diferença entre os resultados obtidos numericamente e experimentalmente.

8.2 Frequências naturais (autovalores)

Através da análise de vibração livre do modelo em estudo por meio do programa computacional de Elementos Finitos (ANSYS [5]), foram obtidas as frequências naturais (autovalores). A Tabela 6 exibe as dez primeiras frequências naturais da estrutura, que serão posteriormente comparadas aos resultados de ensaios experimentais. A análise das frequências naturais desempenha um papel crucial neste trabalho, haja vista que se objetiva analisar o conforto humano e a resposta da estrutura quando submetida a carregamento humano rítmico (vandalismo).

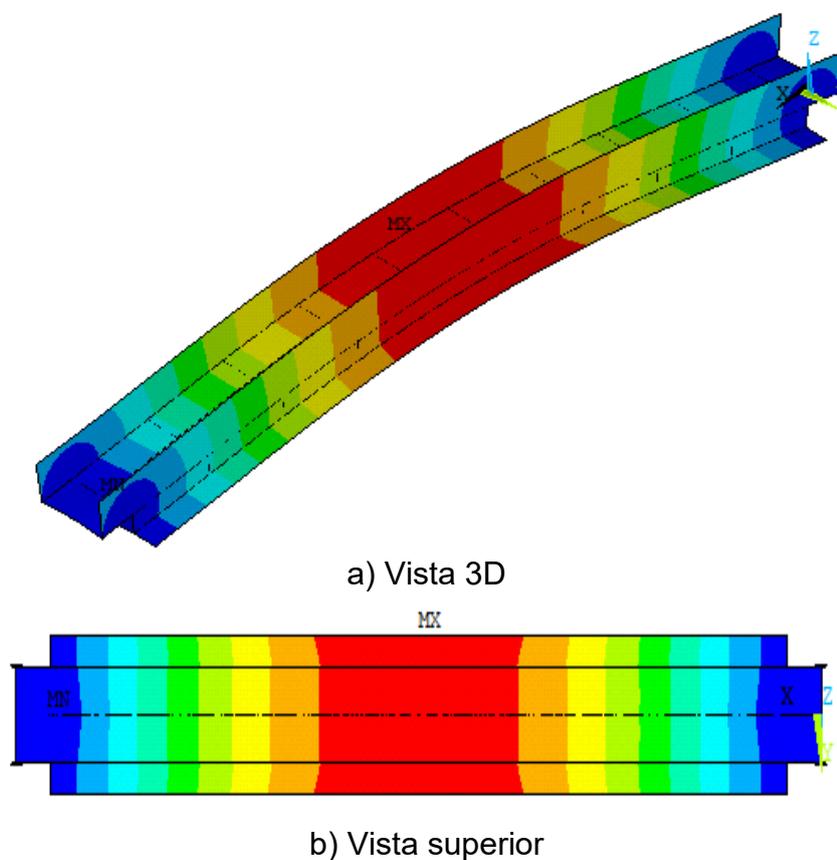
Tabela 6: Frequências naturais numéricas do modelo

Frequências naturais (Hz)		Modos de vibração	
f_{01}	4,85	Modo 1	1º Modo de flexão vertical do tabuleiro
f_{02}	8,35	Modo 2	1º Modo de torção das vigas
f_{03}	13,79	Modo 3	1º Modo de torção do tabuleiro
f_{04}	15,77	Modo 4	2º Modo de flexão vertical do tabuleiro
f_{05}	18,73	Modo 5	2º Modo de torção das vigas
f_{06}	30,77	Modo 6	3º Modo de torção das vigas
f_{07}	31,84	Modo 7	3º Modo de flexão vertical do tabuleiro
f_{08}	32,10	Modo 8	2º Modo de torção do tabuleiro
f_{09}	41,91	Modo 9	4º Modo de torção das vigas
f_{10}	48,76	Modo 10	4º Modo de flexão vertical do tabuleiro

Com base nos resultados apresentados na Tabela 6, observa-se que as frequências naturais proeminentes da estrutura, de acordo com os objetivos deste estudo, são as seguintes: a primeira frequência, com um valor de 4,85 Hz, está relacionada ao primeiro modo de flexão vertical do tabuleiro; a quarta frequência, com um valor de 15,77 Hz, corresponde ao segundo modo de flexão vertical; e a sétima frequência, com um valor de 31,84 Hz, está associada ao terceiro modo de flexão vertical do tabuleiro.

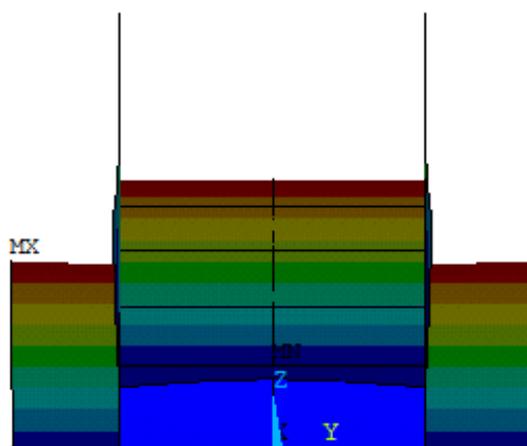
8.3 Modos de vibração (autovetores)

As Figuras 43 a 52 ilustram as dez primeiras formas modais associadas ao modelo, as quais correspondem às dez primeiras frequências naturais da estrutura, apresentadas de forma quantitativa e qualitativa na Tabela 6.



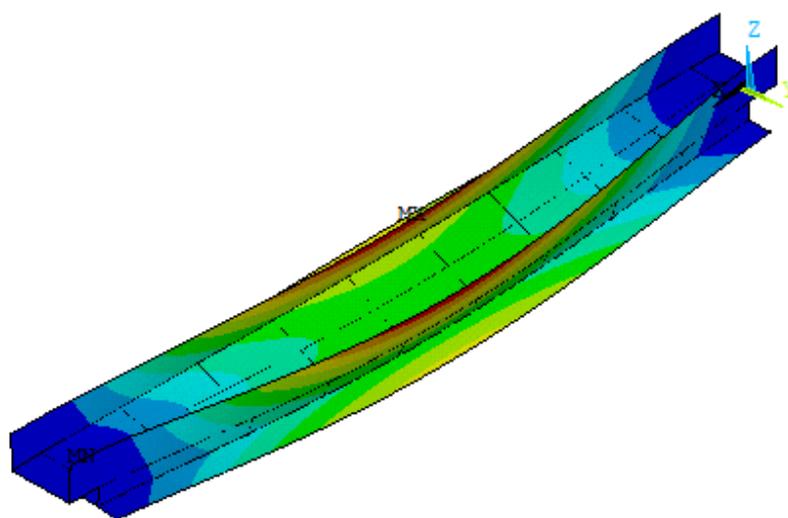


c) Vista lateral

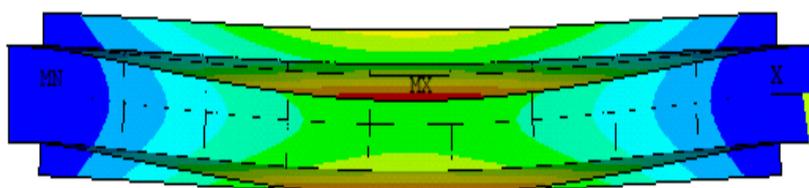


d) Vista frontal

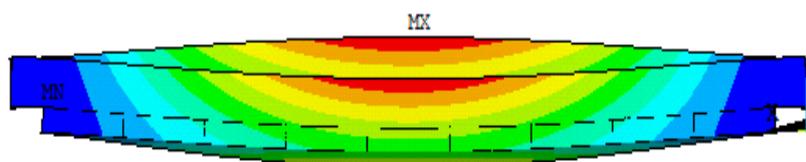
Figura 41: Modos de vibração do modelo relativo à 1ª frequência natural
 $f_{01} = 4,85$ Hz



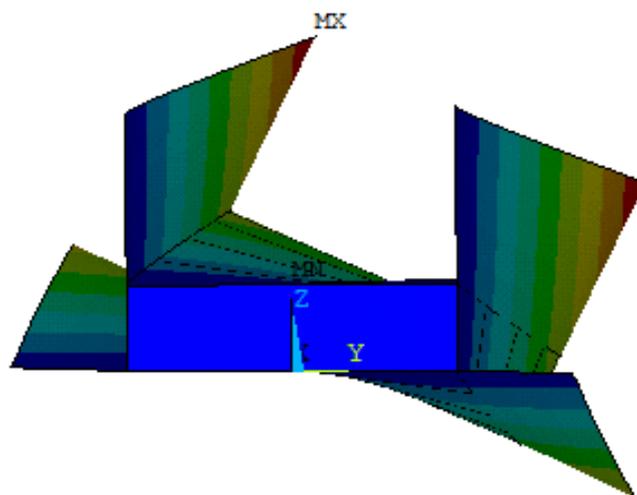
a) Vista 3D



b) Vista superior

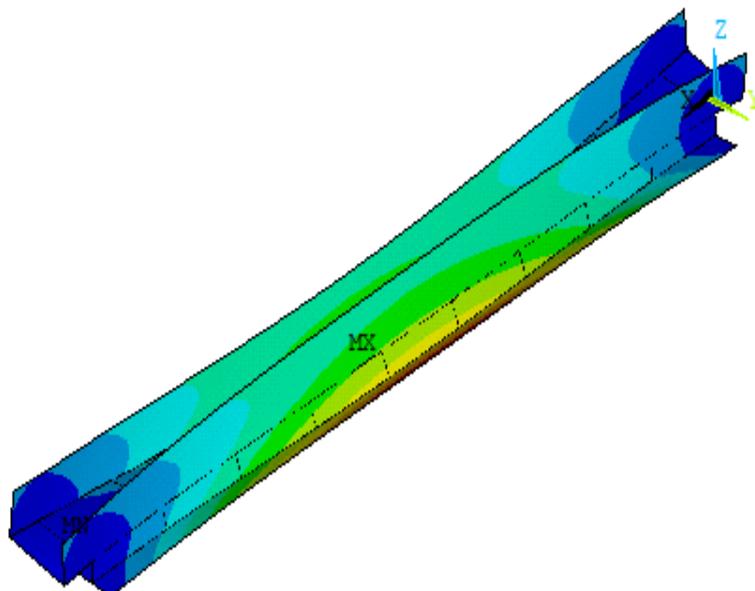


c) Vista lateral

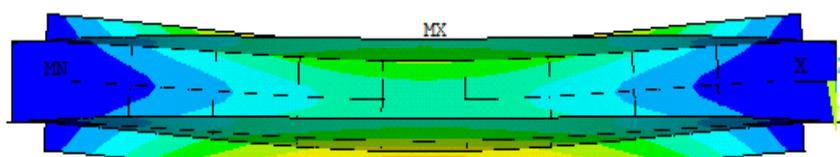


d) Vista frontal

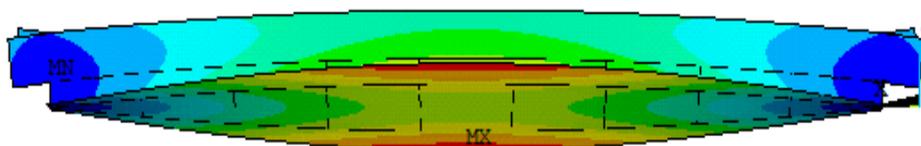
Figura 42: Modos de vibração do modelo relativo à 2ª frequência natural
 $f_{02} = 8,35$ Hz



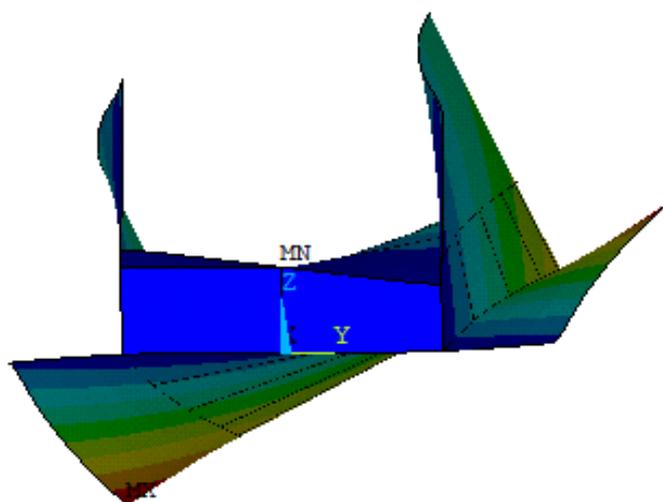
a) Vista 3D



b) Vista superior

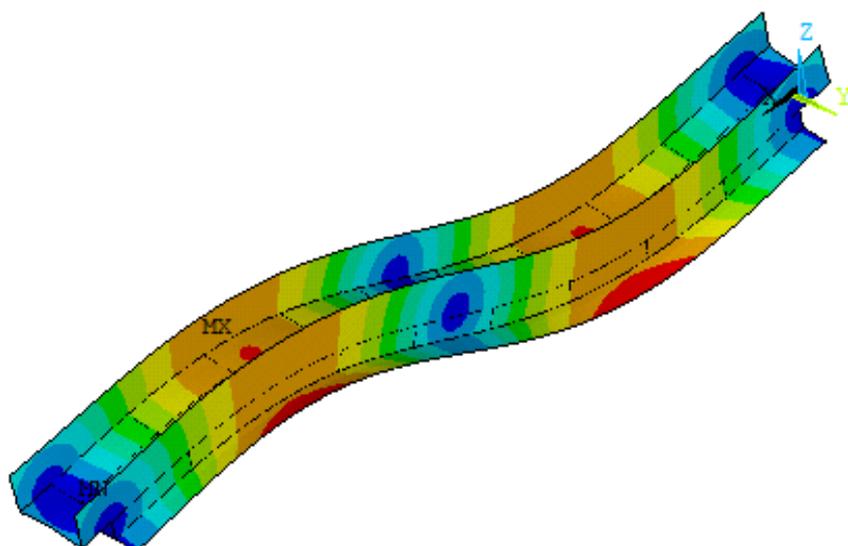


c) Vista lateral

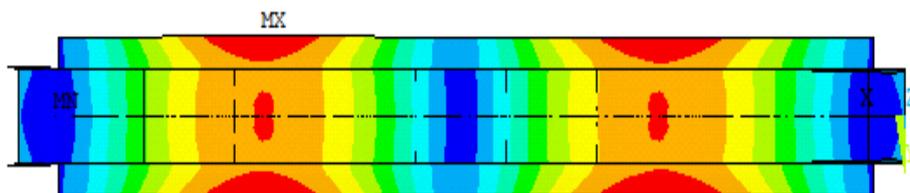


d) Vista frontal

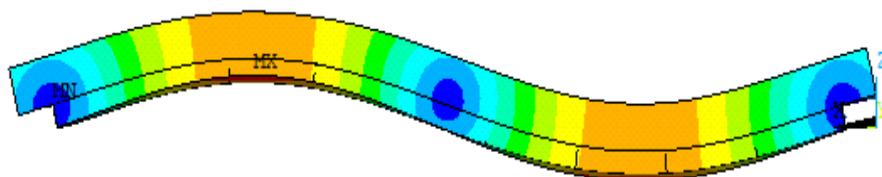
Figura 43: Modos de vibração do modelo relativo à 3ª frequência natural $f_{03} = 13,79$ Hz



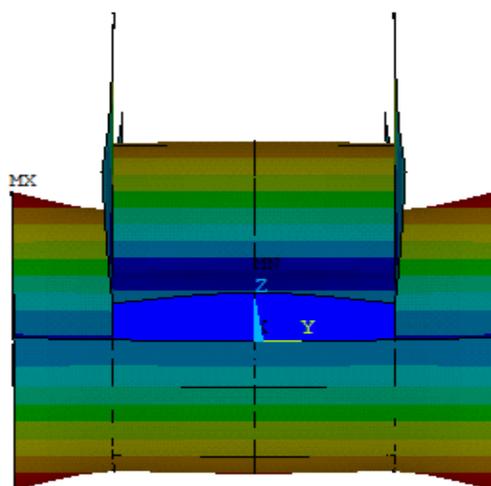
a) Vista 3D



b) Vista superior

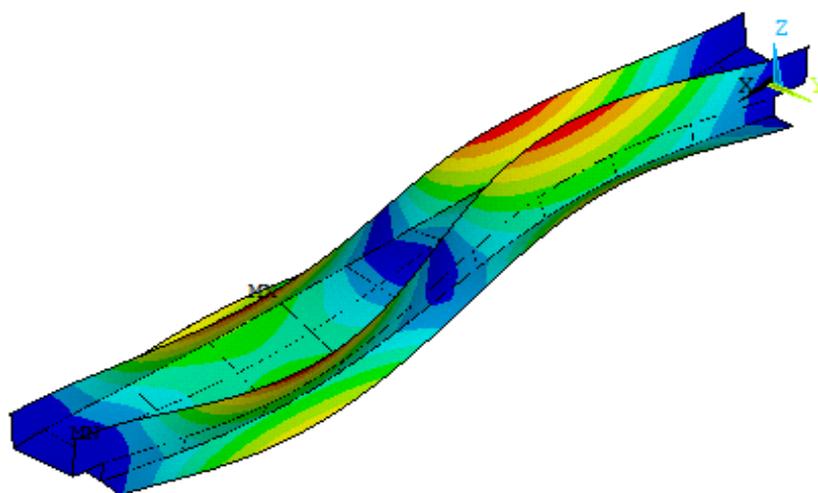


c) Vista lateral

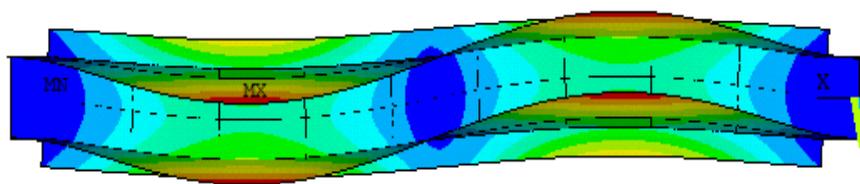


d) Vista frontal

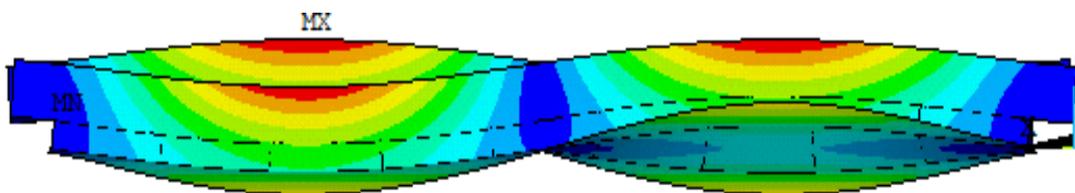
Figura 44: Modos de vibração do modelo relativo à 4ª frequência natural
 $f_{04} = 15,77$ Hz



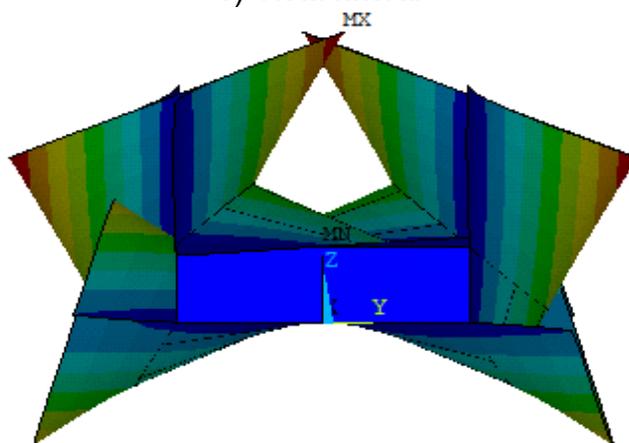
a) Vista 3D



b) Vista superior

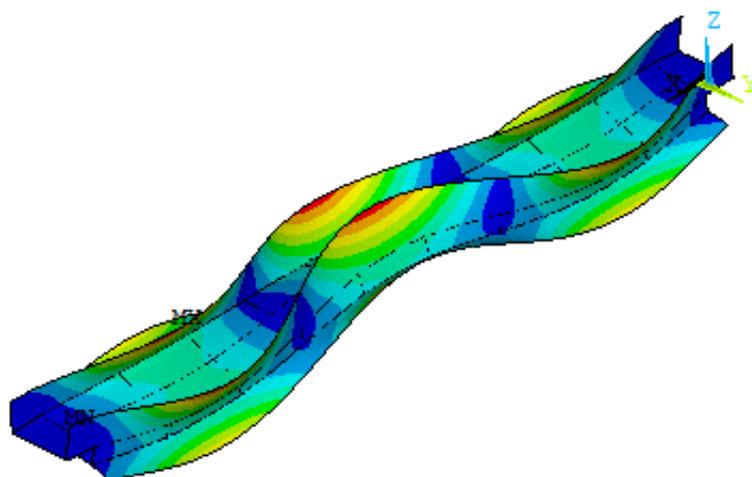


c) Vista lateral

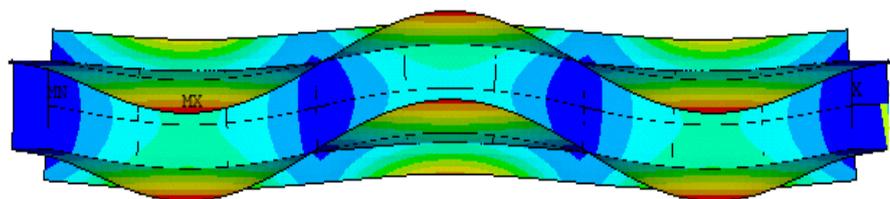


d) Vista frontal

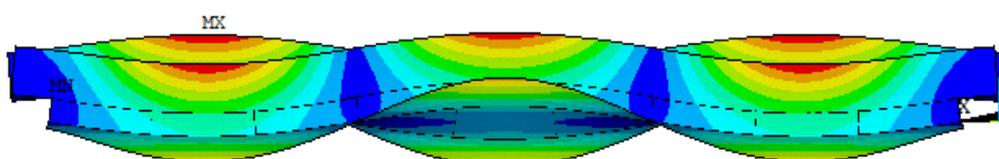
Figura 45: Modos de vibração do modelo relativo à 5ª frequência natural
 $f_{05} = 18,73 \text{ Hz}$



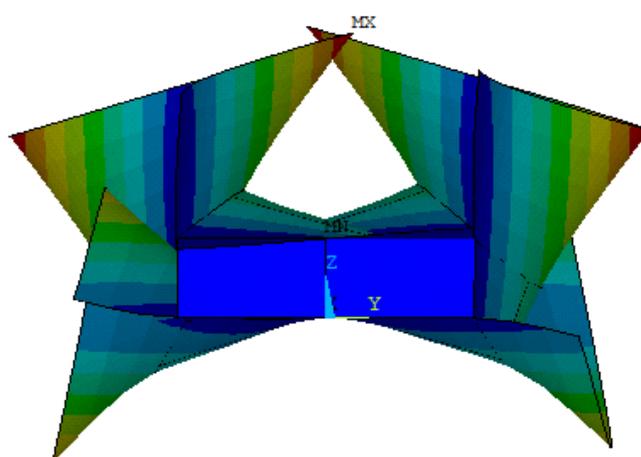
a) Vista 3D



b) Vista superior

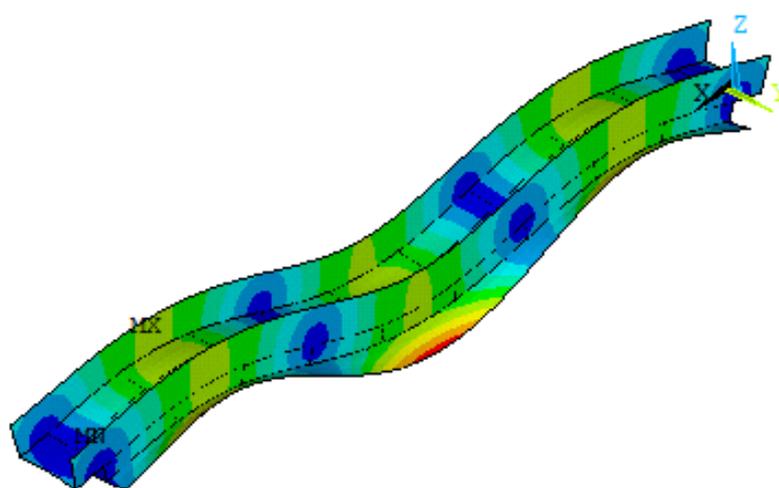


c) Vista lateral

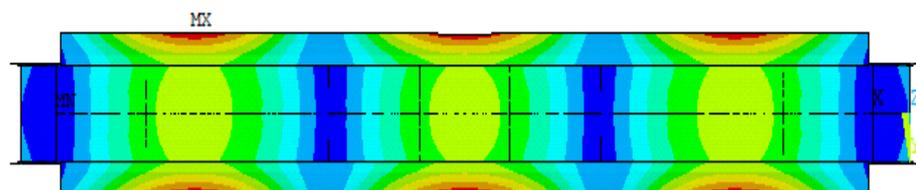


d) Vista frontal

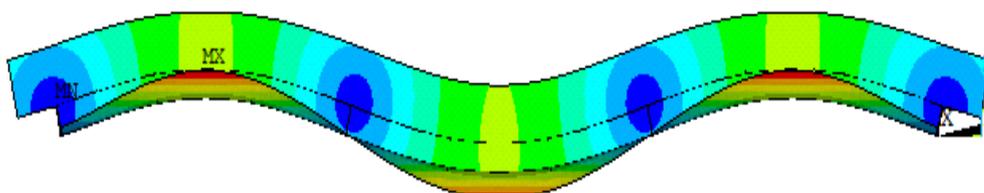
Figura 46: Modos de vibração do modelo relativo à 6ª frequência natural
 $f_{06} = 30,77$ Hz



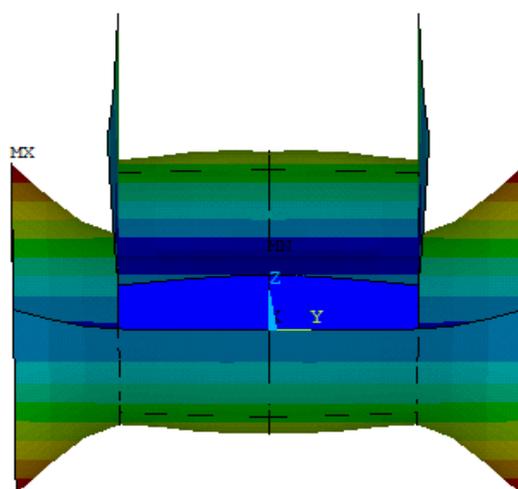
a) Vista 3D



b) Vista superior

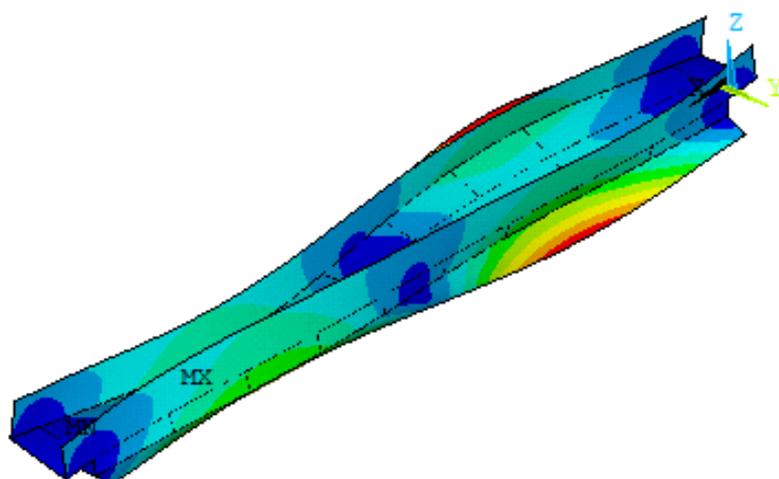


c) Vista lateral

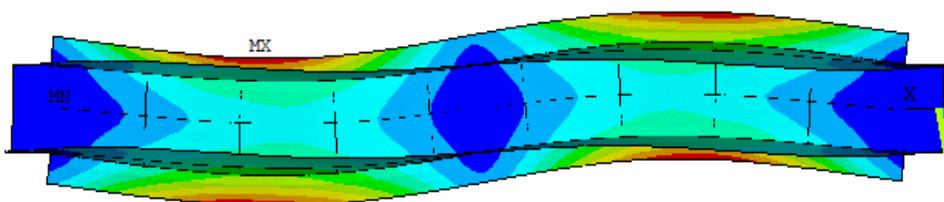


d) Vista frontal

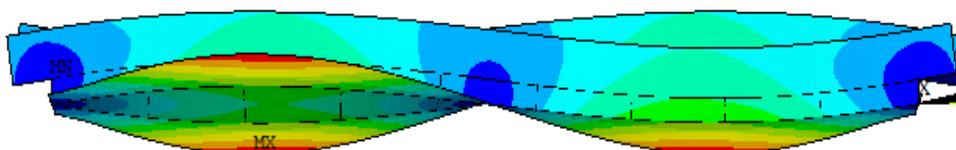
Figura 47: Modos de vibração do modelo relativo à 7ª frequência natural $f_{07} = 31,84$ Hz



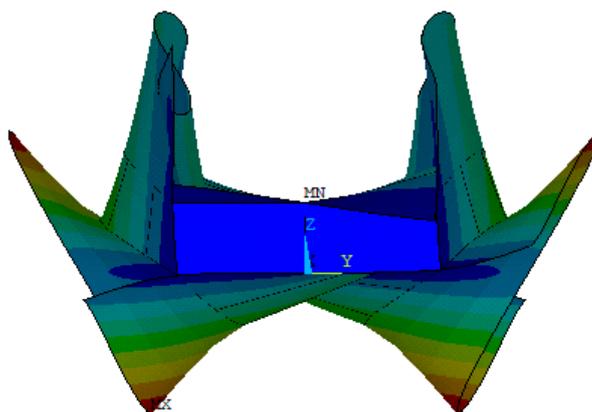
a) Vista 3D



b) Vista superior

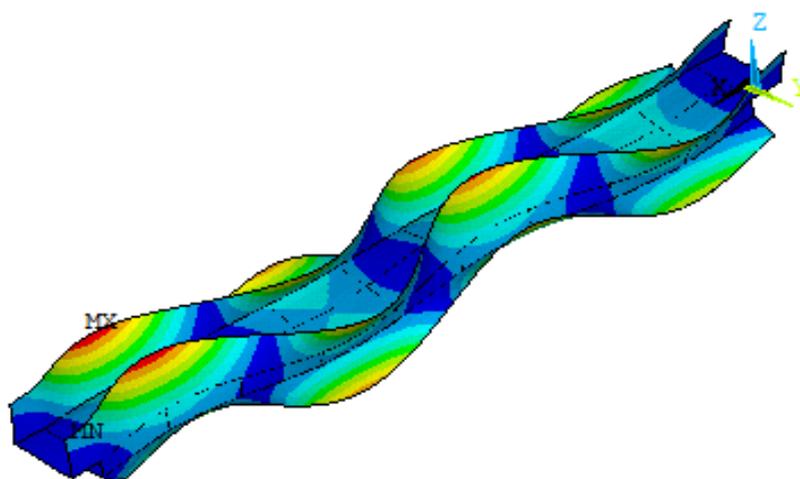


c) Vista lateral

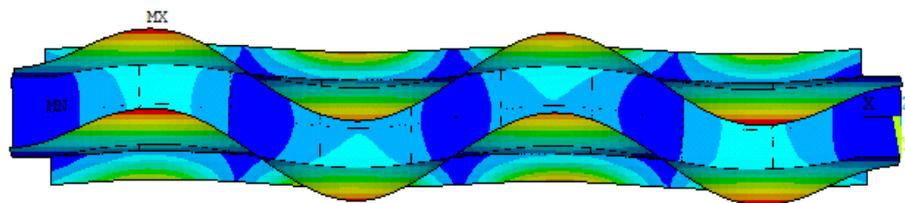


d) Vista frontal

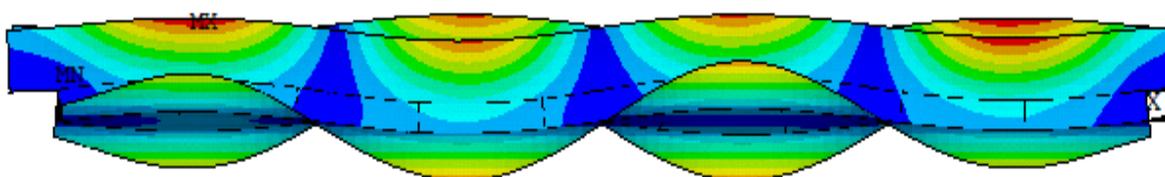
Figura 48: Modos de vibração do modelo relativo à 8ª frequência natural $f_{08} = 32,10$ Hz



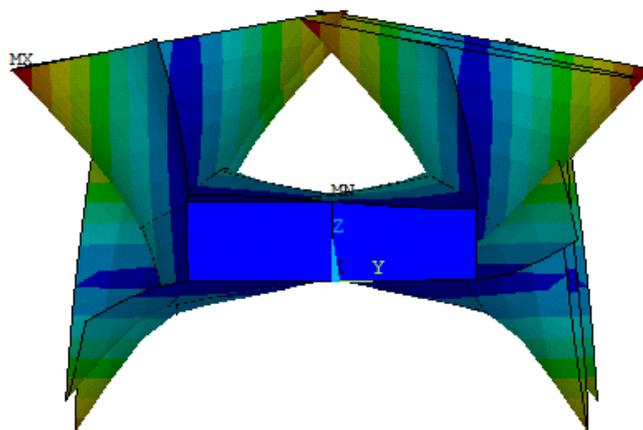
a) Vista 3D



b) Vista superior

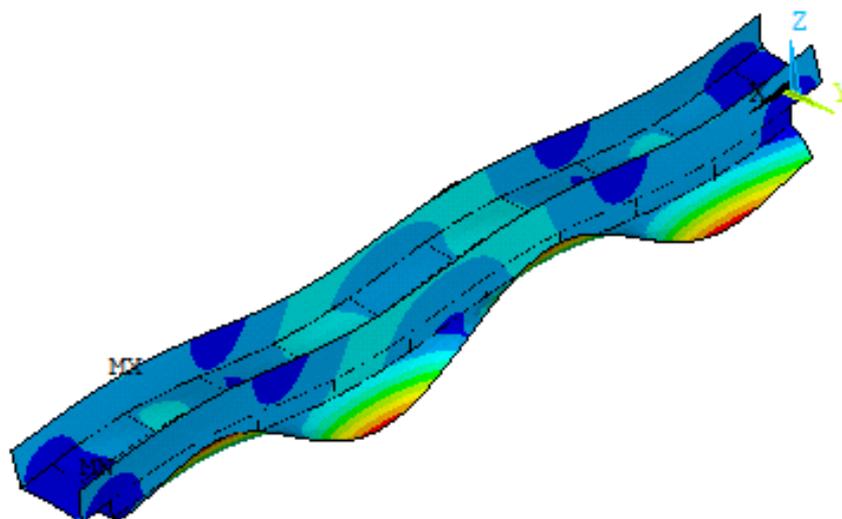


c) Vista lateral



d) Vista frontal

Figura 49: Modos de vibração do modelo relativo à 9ª frequência natural
 $f_{09} = 41,91$ Hz



a) Vista 3D

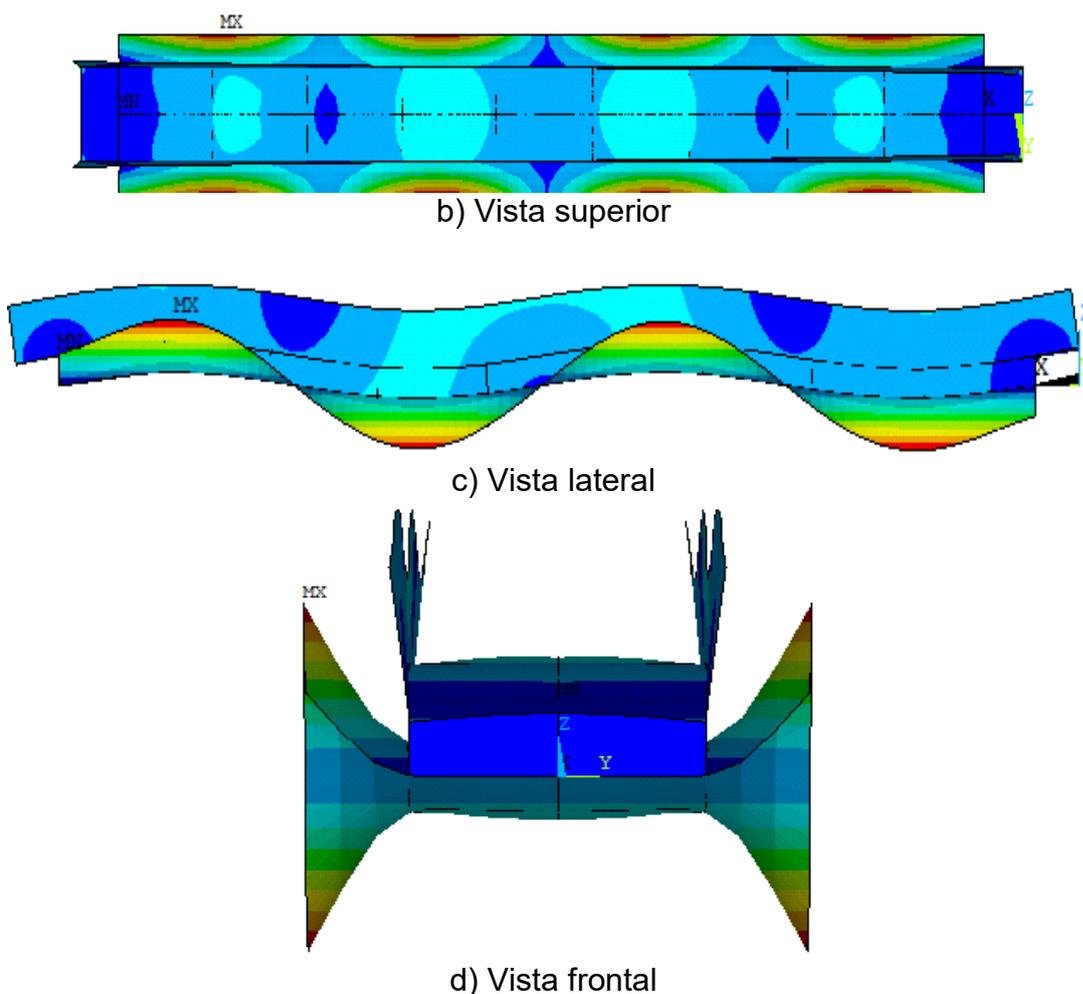


Figura 50: Modos de vibração do modelo relativo à 10ª frequência natural
 $f_{10} = 48,76$ Hz

Percebe-se, por meio das Figuras 43 a 52, que nos dez primeiros modos de vibração da estrutura, há uma predominância dos modos de flexão e torção do tabuleiro, bem como de torção das vigas laterais. O primeiro modo de vibração exibe uma predominância do primeiro modo vertical de vibração da passarela, com maior intensidade localizada no centro do vão, na direção do eixo z. No segundo modo, verifica-se uma predominância do primeiro modo de torção das vigas laterais da passarela, com maior intensidade no topo e no meio do vão das vigas, na direção do eixo y. O terceiro modo de vibração apresenta uma predominância do primeiro modo de torção do tabuleiro da passarela, com maior intensidade no centro do vão, na direção do eixo y. O quarto modo de vibração destaca-se pelo segundo modo vertical de vibração da passarela, com intensidade máxima em 1/4 e 3/4 do vão da estrutura, na direção do eixo z. O quinto modo de vibração exibe uma predominância

do segundo modo de torção das vigas laterais da passarela, com intensidade no topo e em 1/4 e 3/4 do vão das vigas, na direção do eixo y. O sexto modo de vibração apresenta uma predominância do terceiro modo de torção das vigas laterais da passarela, com intensidade no topo e em 1/6, 1/2 e 5/6 do vão das vigas, na direção do eixo y. O sétimo modo de vibração é caracterizado pelo terceiro modo vertical de vibração da passarela, com intensidade máxima em 1/6, 1/2 e 5/6 do vão da estrutura, na direção do eixo z. O oitavo modo de vibração apresenta uma predominância do segundo modo de torção do tabuleiro da passarela, com intensidade em 1/4 e 3/4 do vão, na direção do eixo y. O nono modo de vibração destaca-se pelo quarto modo de torção das vigas laterais da passarela, com intensidade no topo e em 1/8, 3/8, 5/8 e 7/8 do vão das vigas, na direção do eixo y. Por fim, o décimo modo de vibração apresenta predominância do quarto modo vertical de vibração da passarela, com intensidade máxima em 1/8, 3/8, 5/8 e 7/8 do vão da estrutura, na direção do eixo z.

8.4 Comparação: testes experimentais x modelo numérico

A Tabela 7 apresenta os valores das frequências naturais de vibração do modelo numérico, obtidas via emprego do programa computacional ANSYS [5], descrito anteriormente neste capítulo, em comparação com os valores destas frequências obtidas mediante testes experimentais realizados sobre a passarela de pedestres, conforme descrito no capítulo seis.

Tabela 7: Comparação dos valores das frequências naturais

Frequências naturais (Hz)				Diferença (%)
Testes experimentais		Modelagem numérica		
f ₀₁	4,76	f ₀₁	4,85	1,89
f ₀₂	17,58	f ₀₂	15,77	11,47
f ₀₃	36,26	f ₀₃	31,84	13,88

Comparando-se os valores das frequências naturais da passarela pode-se perceber que o modelo estrutural em estudo encontra-se bem representado numericamente pelo modelo computacional desenvolvido, via método dos elementos finitos (ANSYS [5]). As características dinâmicas do sistema, no que diz respeito às frequências naturais (massa e rigidez) estão bem representadas, pois a diferença existente entre os valores numéricos e experimentais são pequenos, com valores máximos da ordem de 1,89%, 11,47% e 13,88% em relação ao primeiro, segundo e terceiro modos de vibração verticais da estrutura, respectivamente.

Além disso, percebe-se que a primeira frequência obtida experimentalmente é inferior ao numérico, enquanto as frequências subsequentes apresentam-se superiores em relação ao numérico. Tal diferença pode ser justificada pelo fato de que a taxa de amortecimento referente ao primeiro modo é maior, dissipando a energia mais rapidamente em relação às simulações numéricas.

As massas modais do modelo em elementos finitos foram obtidas e comparadas com os valores dos modos de vibração experimentais (primeiro e segundo modo de vibração), obtido via método de obtenção dos picos (Peak-picking method). A Tabela 8 apresenta esta comparação entre os valores do modelo numérico e dos resultados experimentais.

Tabela 8: Comparação dos valores das massas obtidas

Massa modal (kg)				Diferença (%)
Teste experimental		Modelagem numérica		
f ₀₁	33402	f ₀₁	30265	10,36
f ₀₂	29529	f ₀₂	25787	14,51
f ₀₃	***	f ₀₃	11961	***
*** Valor não obtido devido à limitação do método de obtenção				

Com base nos resultados apresentados pela Tabela 8, pode-se perceber, a partir da comparação entre os valores das massas modais do modelo numérico e testes experimentais, que as diferenças existentes são da ordem de 10% a 15% para o primeiro e segundo modos de vibração, respectivamente.

9 ANÁLISE DINÂMICA EXPERIMENTAL (VIBRAÇÃO FORÇADA)

9.1 Considerações iniciais

Este capítulo apresenta os resultados das análises dinâmicas obtidos por meio da monitoração experimental da passarela de pedestres. Foram conduzidos ensaios de vibração forçada devido à excitação humana, mediante grupos de 1, 15 e 20 pessoas saltando sobre a passarela (vandalismo), em frequências de 2,20 Hz (quase ressonância), 2,4 Hz (ressonância) e livre. Esses ensaios envolveram a instalação de um acelerômetro na região de maior amplitude (vão central), acoplado a um sistema de aquisição de dados ADS 2500. Para o tratamento dos dados, utilizou-se o software AqDAnalysis 7.5, que possibilita a análise dos resultados no domínio do tempo e a realização da Transformada Rápida de Fourier (FFT), permitindo, assim, a análise dos dados no domínio da frequência.

9.2 Descrição dos testes experimentais

A excitação da passarela foi conduzida mediante a simulação de três grupos de pessoas saltando sobre a estrutura por vez (Figuras 53 a 55). O primeiro ensaio foi realizado com um único indivíduo saltando na região de maior amplitude da passarela em ressonância ($f_p = 2,40$ Hz); o segundo grupo de ensaios foi realizado com quinze indivíduos saltando em ressonância, quase ressonância e livre ($f_p = 2,40$ Hz, $f_p = 2,20$ Hz e $f_p =$ Livre, respectivamente); por fim, um terceiro grupo de ensaios foi realizado com vinte pessoas saltando em ressonância, quase ressonância e livre ($f_p = 2,40$ Hz, $f_p = 2,20$ Hz e $f_p =$ Livre).

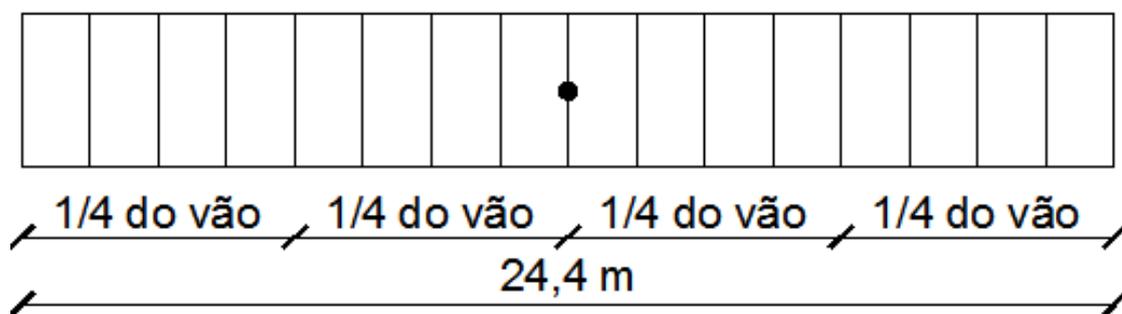


Figura 51: Grupo 1 - Um indivíduo saltando

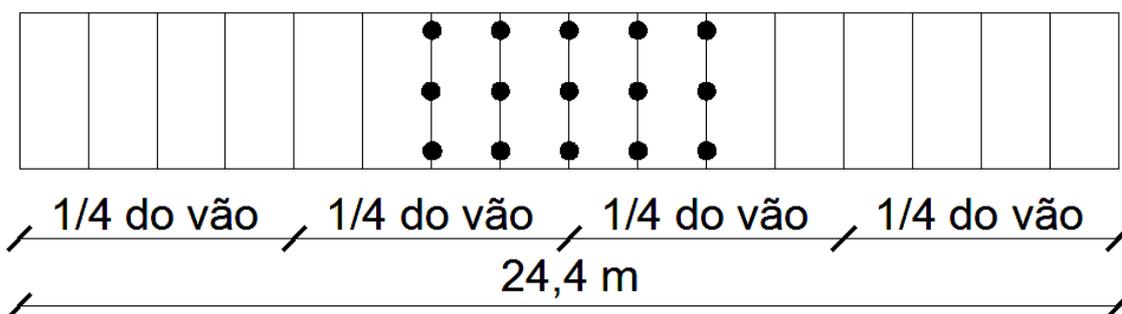


Figura 52: Grupo 2 - Quinze indivíduos saltando

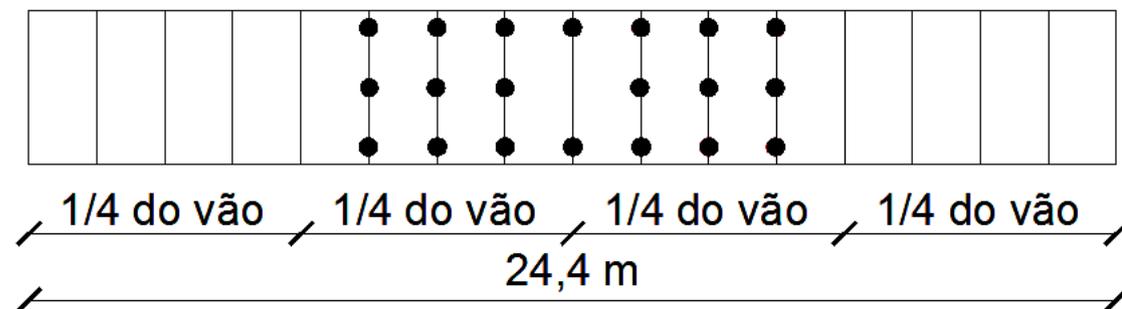


Figura 53: Grupo 3 - Vinte indivíduos saltando

Para controlar os saltos dos grupos de pessoas e preservar a sincronia do ritmo, empregou-se um metrônomo compatível com *smartphone*. Esse aplicativo foi conectado via *bluetooth* a uma caixa acústica, permitindo a geração de pulsos sonoros com duração regular. A unidade representativa do metrônomo é o “bpm” (batidas por minuto), ou seja, cada “batida” sonora corresponde ao contato do pé ao solo durante o salto do indivíduo sobre a passarela (Figuras 56 e 57).

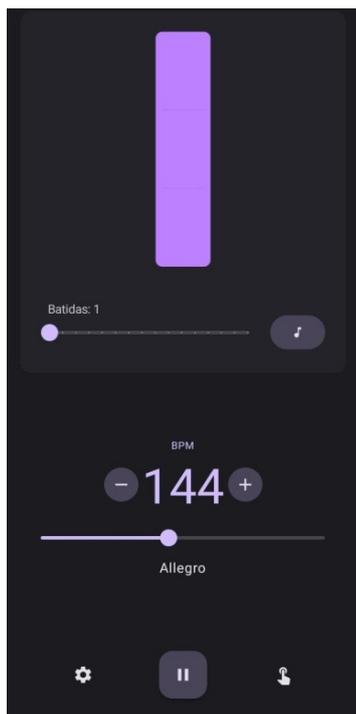


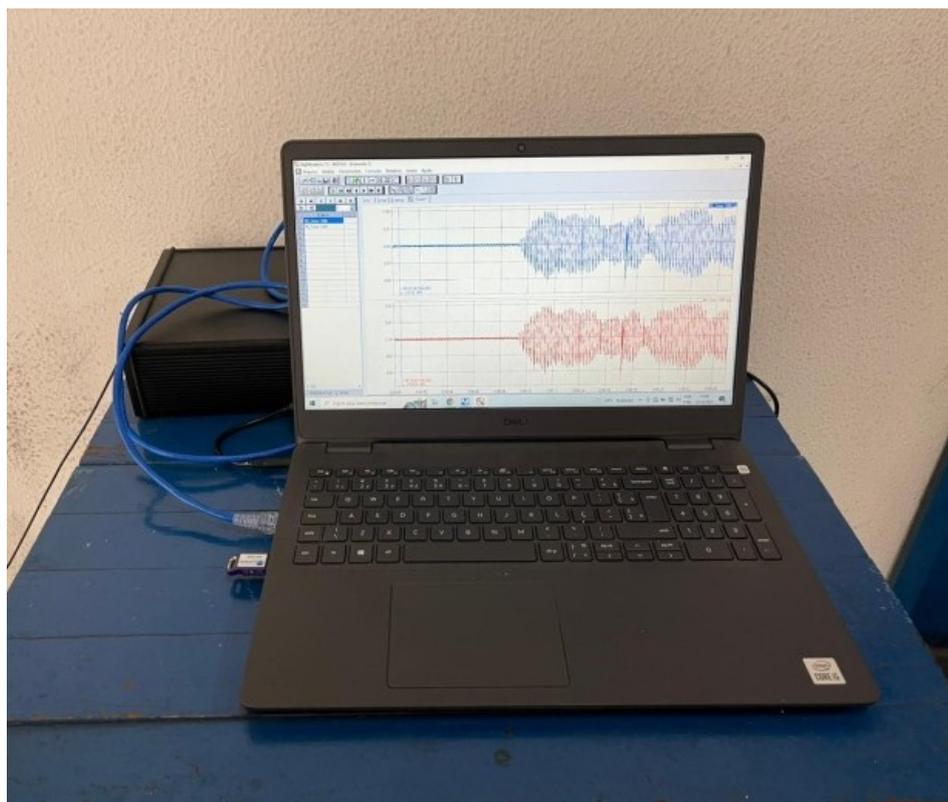
Figura 54: Metrônomo



Figura 55: Caixa acústica

Primeiramente, visando induzir um movimento ressonante alinhado com o primeiro modo de vibração vertical ($f_{01} = 4,90$ Hz) da estrutura, estabeleceu-se um valor de 144 bpm ($f_p = 2,40$ Hz) no metrônomo. Posteriormente, para analisar o comportamento da passarela em movimentos quase ressonantes, adotou-se uma frequência de 132 bpm ($f_p = 2,20$ Hz). É relevante salientar que as frequências mencionadas foram escolhidas para possibilitar comparações com os resultados dinâmicos numéricos, alinhando-se aos parâmetros analíticos estabelecidos por Faisca [41], haja vista que os múltiplos de 4,90 Hz abaixo de 2,40 Hz excedem esse limite.

Os resultados obtidos a partir dos ensaios experimentais foram registrados por meio de um sistema de aquisição de dados ADS 2500, conectado a dois acelerômetros PCB *piezotronics* estrategicamente posicionados no centro do vão da passarela (Figuras 58 a 60). Vale ressaltar que a utilização de dois acelerômetros teve como objetivo verificar a calibração desses dispositivos durante o ensaio. A Tabela 9 apresenta um resumo abrangente dos ensaios de vibração forçada.



(a) AqDados 7.5.2



(b) ADS 2500 com os acelerômetros acoplados
Figura 56: Sistema de aquisição de dados

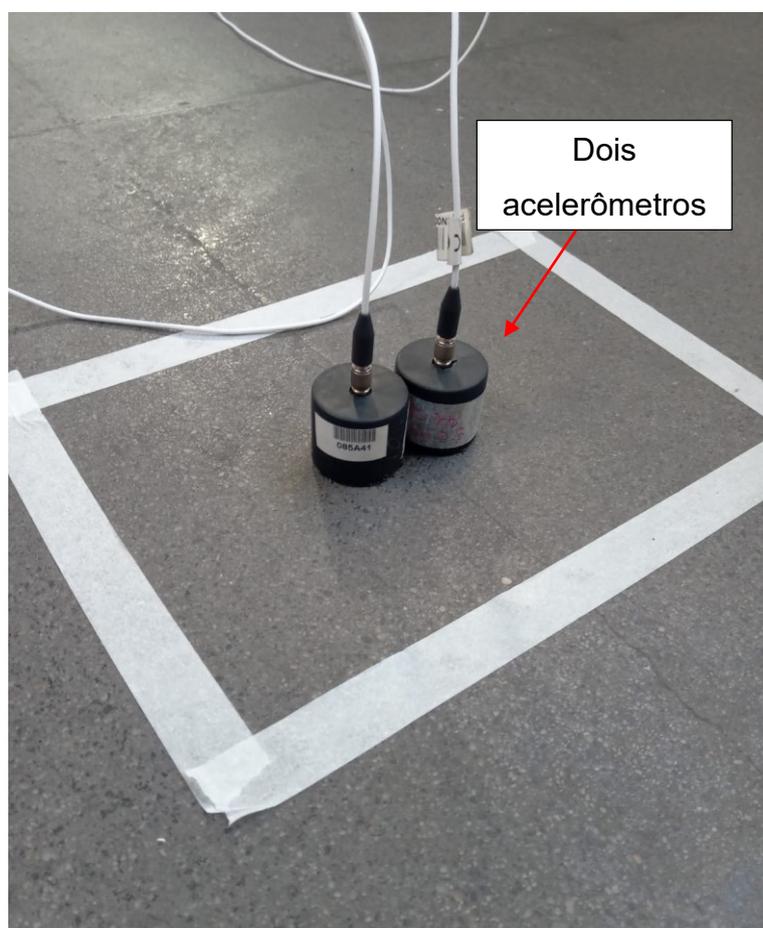


Figura 57: Acelerômetros posicionados no centro do vão da passarela

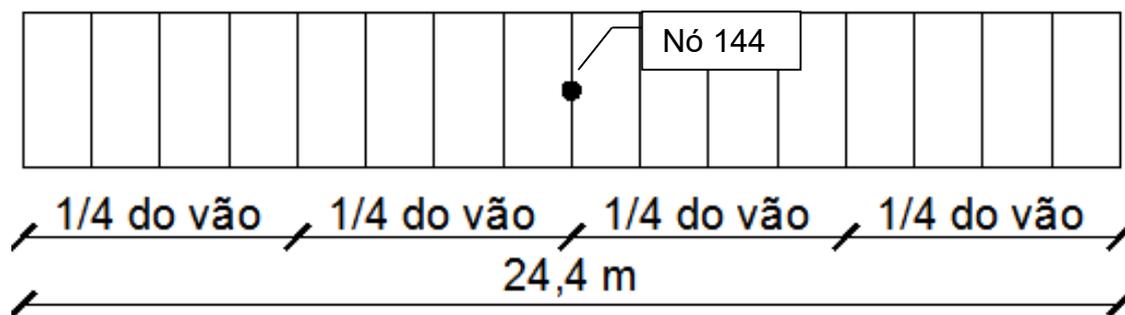


Figura 58: Ponto de análise da estrutura

Tabela 9: Ensaios de vibração forçada

Ensaio	Descrição dos ensaios	
	Frequência do salto (f_p)	Número de pessoas
1	2,40	1
2	2,40	15
3	2,20	15
4	Livre	15
5	2,40	20
6	2,20	20
7	Livre	20

9.3 Testes experimentais I: 1 pessoa

O primeiro ensaio de vibração forçada foi realizado de tal forma que a estrutura fosse excitada através de salto realizado por apenas uma pessoa no meio do vão da passarela com frequências de excitação de 2,40 Hz (ressonância) (Figura 61). Um metrônomo foi utilizado para controlar as frequências de salto, sendo estas representadas no dispositivo em *bpm* (batidas por minuto), com 2,40 Hz convertido para 144 *bpm*.

O resultado obtido a partir dos ensaios experimentais é mostrado na Figura 62, descrito nos domínios do tempo e da frequência. O resultado foi tratado mediante o emprego de filtros passa alta e passa baixa para melhor representação do sinal no tempo sem “ruído”.



Figura 59: Salto com frequência de excitação: 2,40 Hz ($f_p = 2,40$ Hz) (1 pessoa)

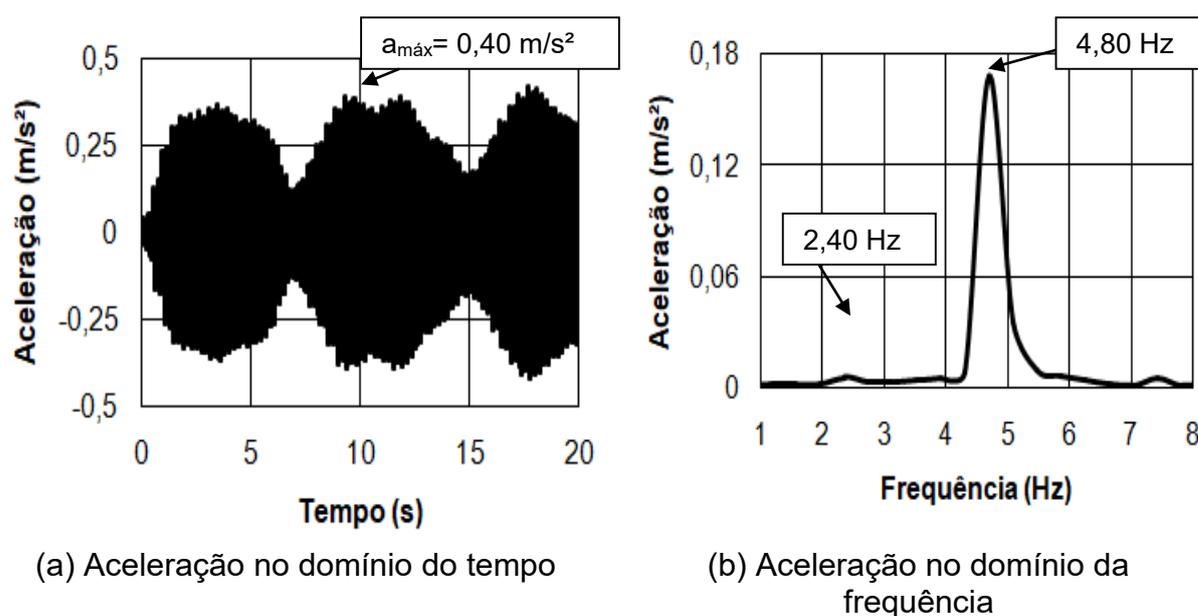


Figura 60: Resposta dinâmica experimental da passarela (1 pessoa; $f = 2,40$ Hz)

Conforme Figura 62, para o salto de 2,40 Hz a aceleração máxima no domínio do tempo foi de $0,40 \text{ m/s}^2$ no tempo de 10 segundos ($t = 10 \text{ s}$).

O espectro de resposta de vibração da estrutura investigada é apresentado pela FFT (*Fast Fourier Transform* – Transformada Rápida de Fourier), correspondente à resposta de saída associada ao acelerômetro posicionado no meio do vão da passarela. Portanto, observa-se a predominância da frequência de 4,80 Hz, o que corresponde a um valor muito próximo à ressonância numérica ($f_{01} = 4,85 \text{ Hz}$) do modelo estrutural estudado (Figura 62b).

9.4 Testes experimentais II: 15 pessoas

O segundo grupo de ensaios de vibração forçada foi realizado de tal forma que a estrutura fosse excitada por um grupo de quinze pessoas posicionado na região de maior amplitude da passarela, distanciando-se cada indivíduo a 1,5 metros entre si. As frequências de excitação utilizadas foram de 2,20 Hz (quase ressonância), 2,40 Hz (ressonância) e livre (Figuras 63 e 66).



Figura 61: Salto com frequências de excitação: 2,20 Hz ($f_p = 2,20$ Hz) e 2,40 Hz ($f_p = 2,40$ Hz) (15 pessoas)

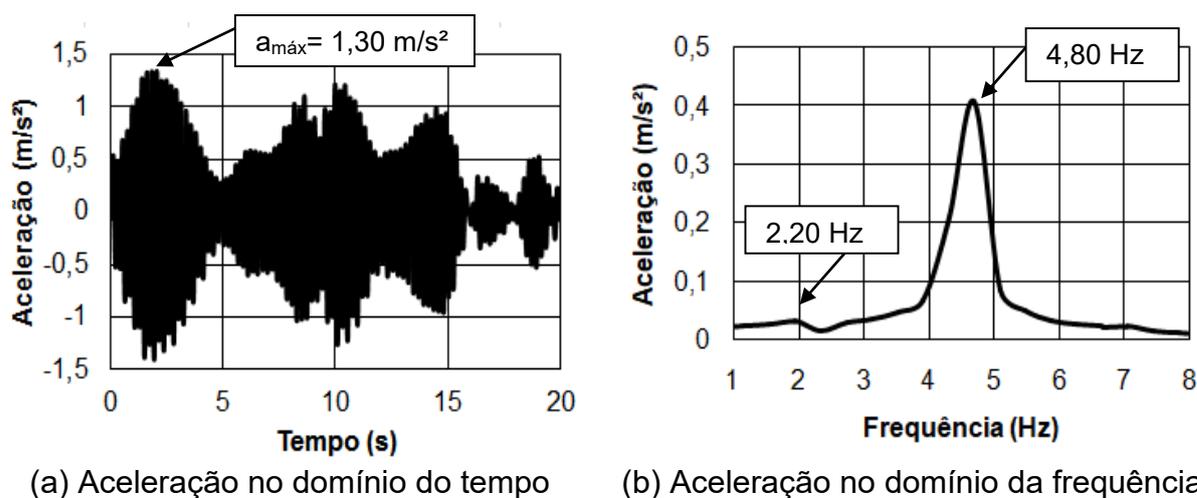


Figura 62: Resposta dinâmica experimental (15 pessoas; $f = 2,20 \text{ Hz}$)

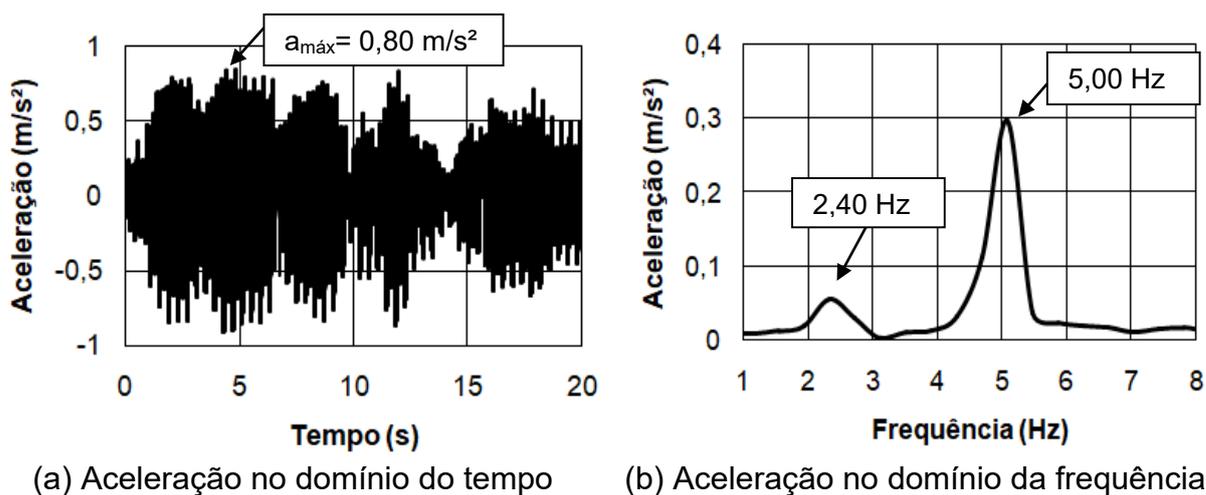


Figura 63: Resposta dinâmica experimental (15 pessoas; $f = 2,40 \text{ Hz}$)

Conforme Figura 64, observa-se que para o salto de 2,20 Hz a aceleração máxima no domínio do tempo foi de $1,30 \text{ m/s}^2$ no tempo de 2 segundos ($t = 2 \text{ s}$). Para o salto de 2,40 Hz (Figura 65) a aceleração máxima no domínio do tempo foi de $0,80 \text{ m/s}^2$ no tempo de 4,5 segundos ($t = 4,5 \text{ s}$).

Cabe ressaltar que a condição de ressonância não foi alcançada, haja vista que não foi possível obter a sincronia dos indivíduos durante a realização dos testes experimentais, além do fato dos participantes não conseguirem se manter a todo momento na posição correta.



Figura 64: Salto com frequências de excitação livre (15 pessoas)

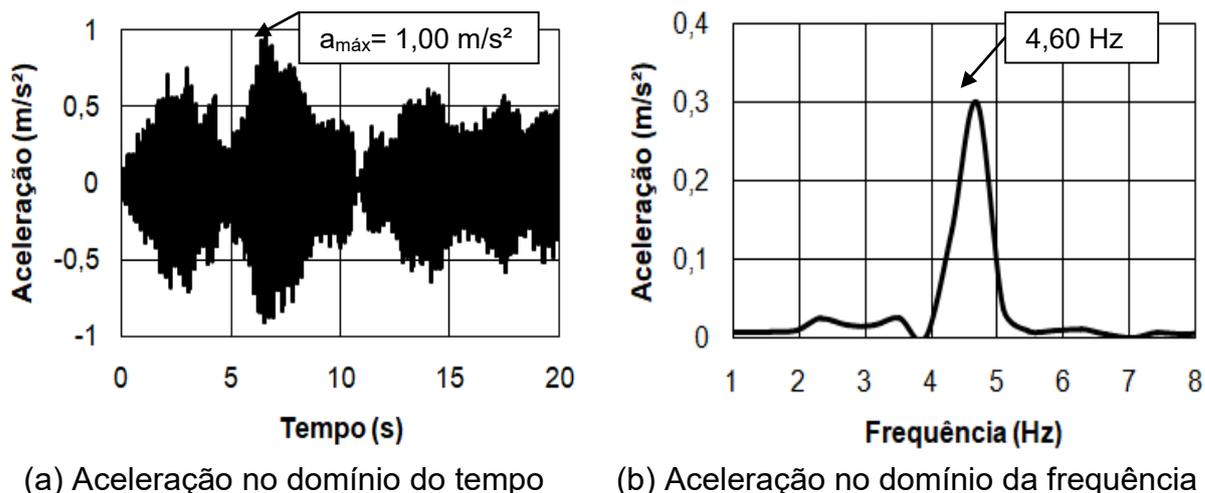


Figura 65: Resposta dinâmica experimental (15 pessoas; $f = \text{Livre}$)

A Figura 67 apresenta aceleração máxima referente ao salto livre de $1,00 \text{ m/s}^2$ no tempo de 7 segundos ($t = 7 \text{ s}$). Além disso, no gráfico do domínio da frequência (Figura 67b) percebe-se a falta do pico de ressonância, pois a maioria das frequências de excitação foi distante da frequência natural da passarela, porque cada participante saltou sobre a estrutura em frequências diferentes, conforme o objetivo deste ensaio ($f_p = \text{Livre}$).

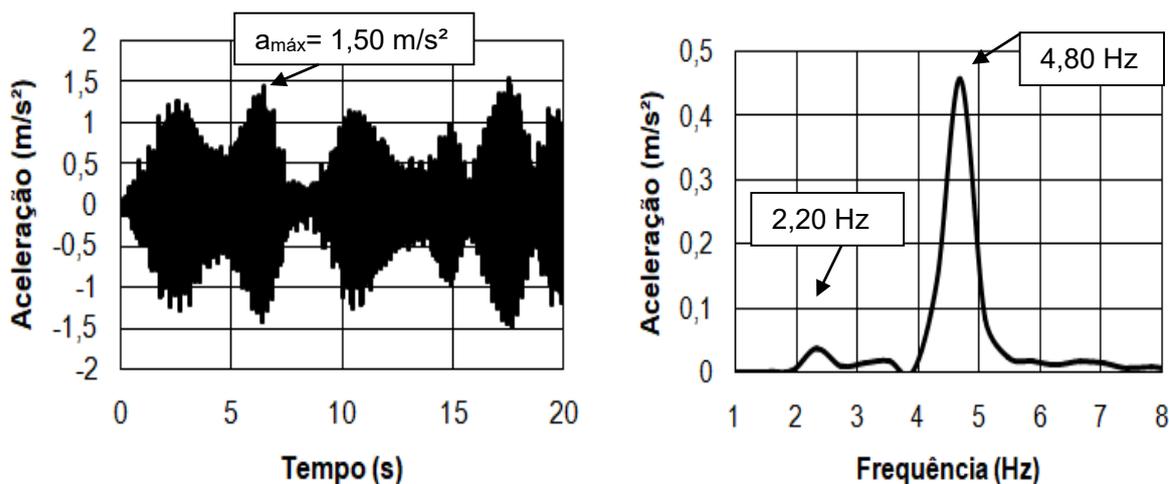
Entretanto, o gráfico evidencia um pico de $4,60 \text{ Hz}$, indicando que alguns indivíduos saltaram a uma frequência próxima da natural da estrutura.

9.5 Testes experimentais III: 20 pessoas

O terceiro e último grupo de ensaios de vibração forçada foi realizado de tal forma que a estrutura fosse excitada através de saltos realizados por vinte pessoas posicionados na região de maior amplitude da passarela, distanciando-se cada indivíduo a $1,5$ metros entre si. Igualmente ao teste anterior, as frequências de excitação utilizadas foram de $2,20 \text{ Hz}$ (quase ressonância), $2,40 \text{ Hz}$ (ressonância) e livre (Figuras 68 e 71).

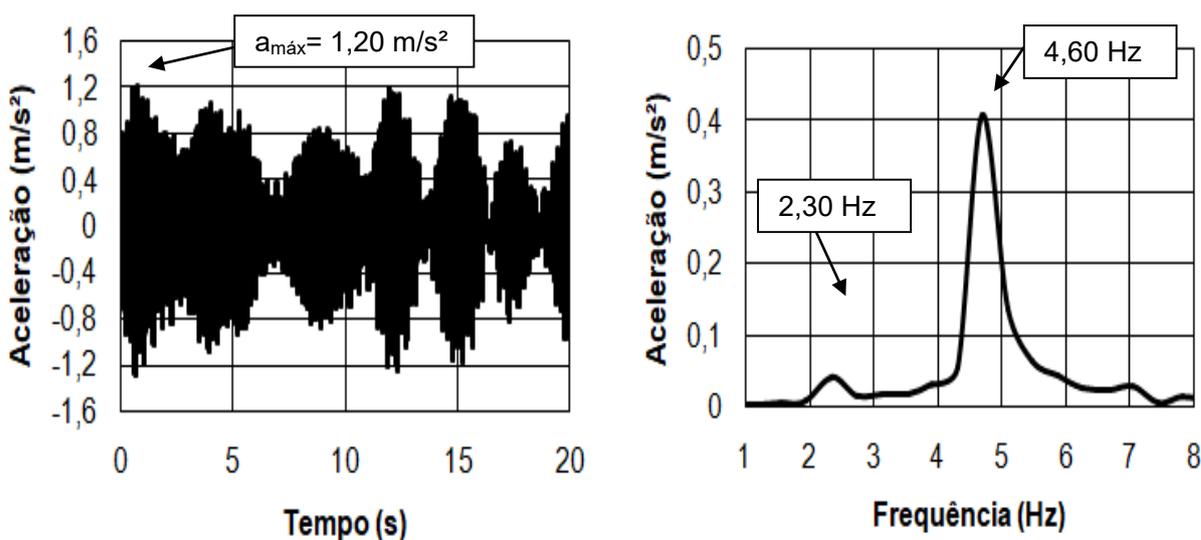


Figura 66: Salto com frequências de excitação: 2,20 Hz ($f_p = 2,20$ Hz) e 2,40 Hz ($f_p = 2,40$ Hz) (15 pessoas) (20 pessoas)



(a) Aceleração no domínio do tempo (b) Aceleração no domínio da frequência

Figura 67: Resposta dinâmica experimental (20 pessoas; $f = 2,20$ Hz)



(a) Aceleração no domínio do tempo (b) Aceleração no domínio da frequência

Figura 68: Resposta dinâmica experimental (20 pessoas; $f = 2,40$ Hz)

Conforme Figura 69, observa-se que para o salto de 2,20 Hz a aceleração máxima no domínio do tempo foi de $1,50 m/s^2$ no tempo de 6 segundos ($t = 6 s$). No que tange ao salto de 2,40 Hz (Figura 70) a aceleração máxima no domínio do tempo foi de $1,20 m/s^2$ no tempo de 2 segundos ($t = 2 s$).

Percebe-se que a aceleração máxima no gráfico do domínio do tempo da Figura 69 apresentou um valor maior em relação à aceleração máxima referente à frequência de 2,40 Hz (ressonância) (Figura 70). Tal fato pode ser explicado pela

falta de sincronia entre os participantes, que tiveram dificuldade em saltar na frequência de 2,40 Hz, apresentando falta de sincronia.



Figura 69: Salto com frequências de excitação livre

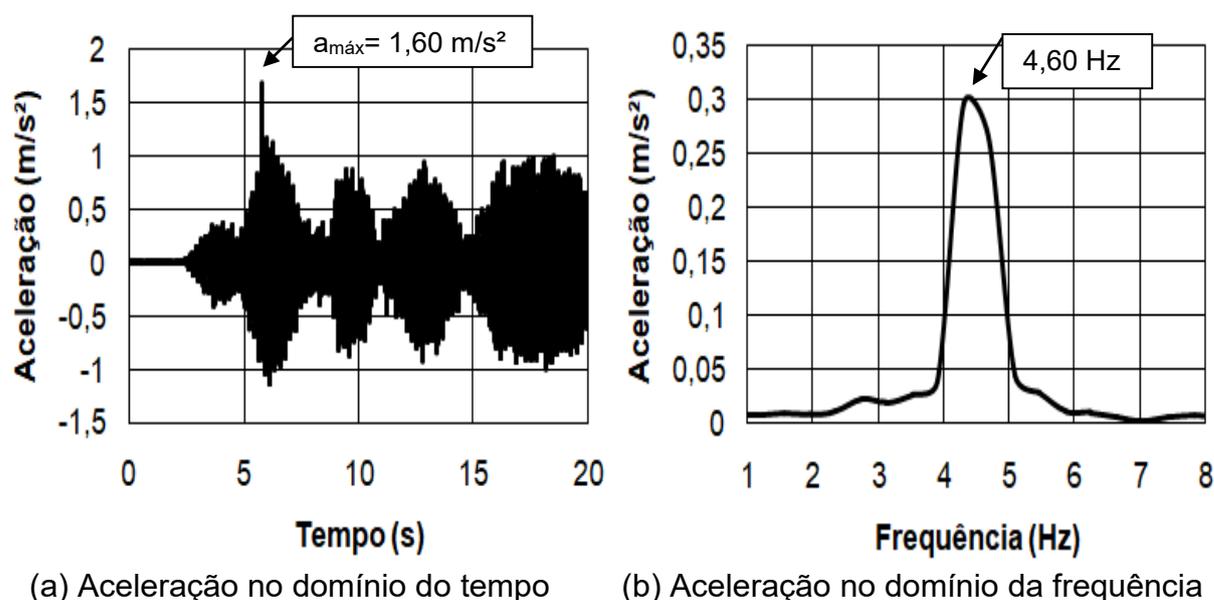


Figura 70: Resposta din\^amica experimental (20 pessoas; $f = \text{Livre}$)

A Figura 72 apresenta acelera\c{c}\~ao m\^axima referente ao salto livre de $1,60 \text{ m/s}^2$ no tempo de 6 segundos ($t = 6 \text{ s}$). Percebe-se, conforme Figura 72b, que a resson\^ancia n\~ao foi alcan\c{c}ada, pois as frequ\^encias de excita\c{c}\~ao foram distantes da frequ\^encia natural da passarela, haja vista que cada indiv\^duo saltou sobre a estrutura em frequ\^encias distintas ($f_p = \text{Livre}$).

Portanto, \^e poss\^ivel perceber que \^e muito dif\^icil que um grupo de muitos indiv\^duos induza a resson\^ancia de uma estrutura, que neste caso \^e considerada uma frequ\^encia alta para os padr\~oes humanos, e alcance a possibilidade de um colapso, haja vista que a falta de sincronia durante os movimentos livres impede que a frequ\^encia de excita\c{c}\~ao se alinhe \^a frequ\^encia natural, impedindo, dessa forma, grandes vibra\c{c}\~oes do sistema estrutural.

9.6 Resumo das acelera\c{c}\~oes de pico experimentais

A Tabela 10 apresenta o resumo das acelera\c{c}\~oes de pico obtidas mediante testes experimentais de uma, quinze e vinte pessoas saltando em resson\^ancia ($f_p = 2,40 \text{ Hz}$), e quinze e vinte pessoas saltando em quase resson\^ancia e livremente ($f_p = 2,20 \text{ Hz}$ e $f_p = \text{Livre}$).

Tabela 10: Acelerações de pico experimentais

Número de pessoas	Frequência de excitação (Hz)	Experimental a_p (m/s ²)
1	2,40	0,40
15	2,20	1,30
15	2,40	0,80
15	Livre	1,00
20	2,20	1,50
20	2,40	1,20
20	Livre	1,60

Conforme os resultados demonstrados na Tabela 10, para os casos de uma, quinze e vinte pessoas excitando a passarela em situação de ressonância ($f_p = 2,40$ Hz), as acelerações de pico são, respectivamente, $0,40$ m/s² ($a_p = 0,40$ m/s²), $0,80$ m/s² ($a_p = 0,80$ m/s²) e $1,20$ m/s² ($a_p = 1,20$ m/s²). Em relação a quinze e vinte pessoas saltando em situação próximo à ressonância ($f_p = 2,20$ Hz), as acelerações de pico são, respectivamente, $1,30$ m/s² ($a_p = 1,30$ m/s²) e $1,50$ m/s² ($a_p = 1,50$ m/s²). No que tange aos saltos livres, para quinze pessoas o valor da aceleração de pico é de $1,00$ m/s² ($a_p = 1,00$ m/s²), enquanto que para vinte pessoas a aceleração de pico é de $1,60$ m/s² ($a_p = 1,60$ m/s²).

Vale ressaltar que as respostas dinâmicas referentes a quinze e vinte pessoas excitando a passarela em ressonância não obtiveram valores significativos para este estudo, haja vista que os participantes tiveram dificuldades em saltar sobre a estrutura na frequência correta, havendo falta de sincronia na realização do ensaio.

10 ANÁLISE DINÂMICA NUMÉRICA (VIBRAÇÃO FORÇADA)

10.1 Considerações iniciais

Neste capítulo, é apresentada a resposta dinâmica obtida mediante o carregamento representativo de pessoas saltando sobre a passarela em estudo (vandalismo), via emprego do método dos elementos finitos (MEF [46]), sob uso do programa computacional ANSYS [5]. Neste sentido, foi considerado o movimento de 1, 15 e 20 pessoas com as seguintes frequências: 2,40 Hz (1, 15 e 20 pessoas [ressonância]) e 2,20 Hz (15 e 20 pessoas [quase ressonância]). Portanto, objetiva-se demonstrar o comportamento dos gráficos de aceleração e deslocamento nos domínios do tempo e da frequência, e seus respectivos picos máximos.

10.2 Modelo de carregamento dinâmico investigado

A modelagem dos carregamentos dinâmicos teve como base os modelos das funções Hanning (Faisca [41]), semi-senoidal e triangular (Bachmann et. al [42]), conforme apresentado no Capítulo 2. Além disso, a análise dinâmica realizada é do tipo Transiente, a partir da utilização do método de integração direta de Newmark [47]. As frequências de excitação utilizadas foram de 2,20 Hz (quase ressonância) e 2,40 Hz (ressonância). Além disso, o tempo total de cada análise foi de 10 s, com intervalo de integração de 0,0025 s.

Os parâmetros utilizados para representação da carga dinâmica nos modelos tradicionais são vistos conforme Tabelas 11 e 12. Com referência à Faisca [41] e Bachmann et al. [42], o período de atividade é representado pelos autores por T e T_p , respectivamente. No que tange ao tempo de contato do pé ao solo, este parâmetro é representado como T_c e t_p por Faisca [41] e Bachmann et al. [42], respectivamente. Em relação ao peso do indivíduo, este parâmetro é apresentado como P e G , conforme Faisca [41] e Bachmann et al. [42], respectivamente.

Tabela 11: Parâmetros de representação para a carga dinâmica ($f_p = 2,20$ Hz)

Faisca [41]	
15	20
T = 0,45 s	
$T_c = 0,27$ s	
P = 800 N	
$k_p = 3,33$	
CD = 0,95	
Semi-senoidal [42]	
$T_p = 0,45$ s	
$t_p = 0,27$ s	
G = 800 N	
$k_p = 3,33$	
Triangular [42]	
$T_p = 0,45$ s	
$t_p = 0,27$ s	
G = 800 N	
$k_p = 3,33$	
$f_p = 2,20$ Hz	

Tabela 12: Parâmetros de representação para a carga dinâmica ($f_p = 2,40$ Hz)

Faisca [41]		
1	15	20
T = 0,41 s		
$T_c = 0,25$ s		
P = 800 N		
$k_p = 3,28$		
CD = 1	CD = 0,95	CD = 0,95
Semi-senoidal [42]		
$T_p = 0,41$ s		
$t_p = 0,25$ s		
G = 800 N		
$k_p = 3,28$		
Triangular [42]		
$T_p = 0,41$ s		
$t_p = 0,25$ s		
G = 800 N		
$k_p = 3,28$		
$f_p = 2,40$ Hz		

Tendo em mente os parâmetros investigados conforme Tabelas 11 e 12 e com o objetivo de apresentar o comportamento dos carregamentos referentes aos modelos de Faisca [41], semi-senoidal e triangular [42], foram obtidas as cargas dinâmicas nos domínios do tempo e da frequência representadas por um indivíduo considerando a frequência de passo de 2,40 Hz (ressonância), conforme as Figuras 73 a 75.

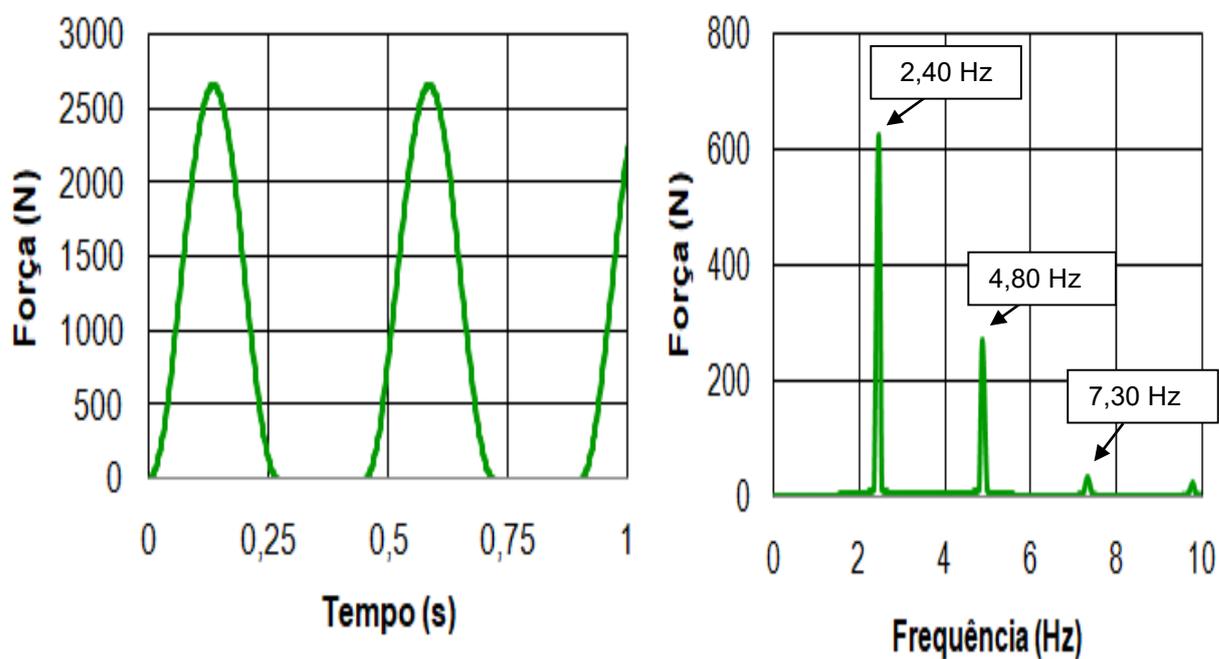


Figura 71: Carga dinâmica modelada através de Faisca [41] ($f_p = 2,40$ Hz)

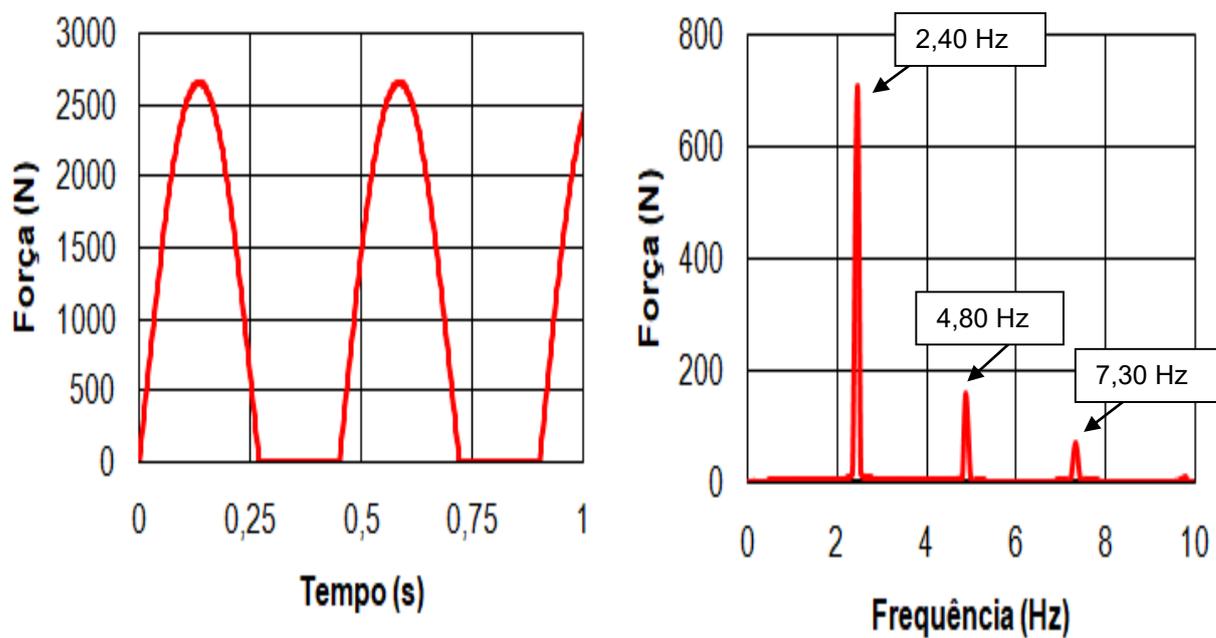


Figura 72: Carga dinâmica modelada através da função semi-senoidal [42] ($f_p = 2,40$ Hz)

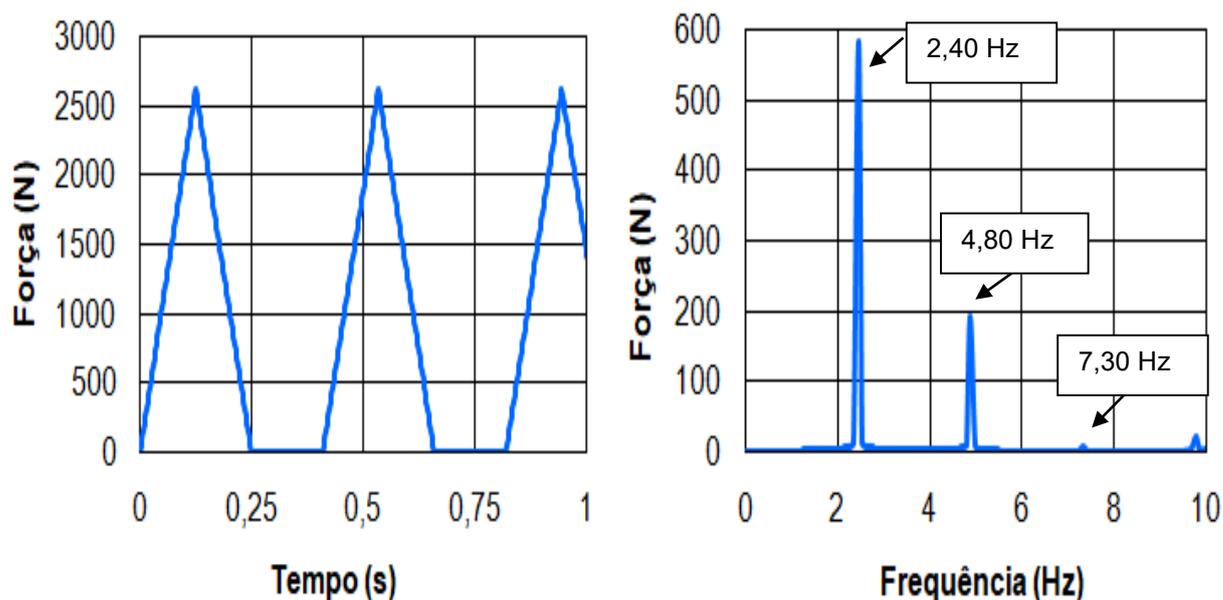


Figura 73: Carga dinâmica modelada através da função triangular [42] ($f_p = 2,40$ Hz)

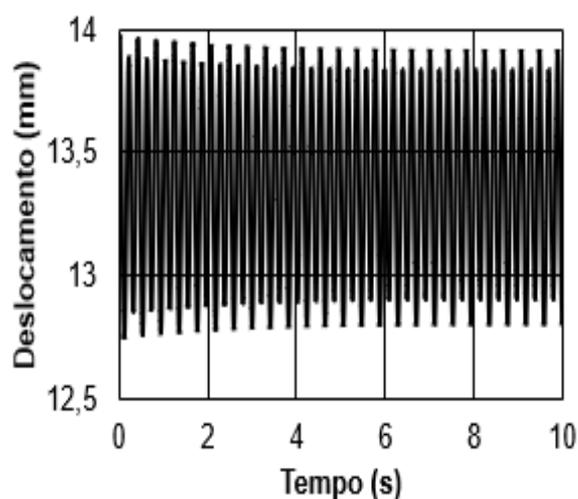
Com o objetivo de calibrar os resultados numéricos aos experimentais, empregou-se o coeficiente de impacto (k_p), conforme Faisca [41], nos modelos semi-senoidal e triangular, de acordo com as frequências de passo (f_p) utilizadas. Para a frequência de excitação de 2,20 Hz (quase ressonância), o coeficiente de impacto (k_p) é igual a 3,33. No que tange à frequência de 2,40 Hz (ressonância), o valor é igual a 3,28.

Conforme a Figura 12, Faisca [41] propôs o coeficiente de defasagem (CD) para cada tipo de atividade humana rítmica. Para ajustar os resultados dinâmicos, recorreu-se ao coeficiente de defasagem (CD) associado à atividade de ginástica aeróbica, dado que a autora [41] não vincula a força de carregamento oriunda de vandalismo a nenhuma atividade rítmica específica. Além disso, vale ressaltar que os modelos semi-senoidal [42] e triangular [42] não contemplam o coeficiente de defasagem (CD) em sua formulação, ao contrário de Faisca [41].

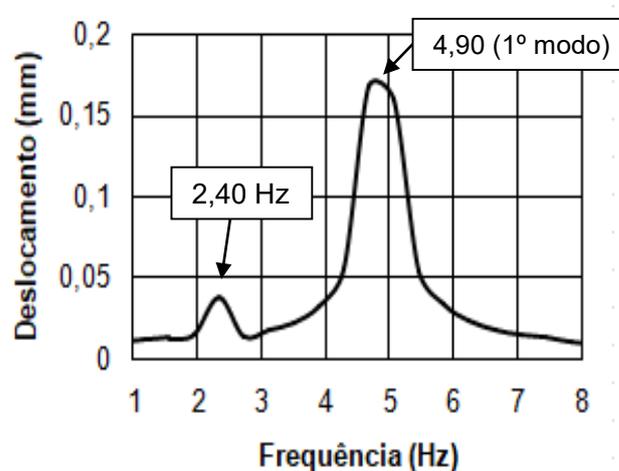
Na próxima seção, são expostos os resultados numéricos gerados por 1 indivíduo [$f_p = 2,40$ Hz (ressonância)], e 15 e 20 indivíduos [$f_p = 2,20$ Hz (quase ressonância) e $f_p = 2,40$ Hz (ressonância)] saltando sobre a passarela. Desse modo, é possível visualizar as seguintes respostas dinâmicas: deslocamento e aceleração nos domínios do tempo e da frequência.

10.2.1 Modelo de carregamento dinâmico: 1 pessoa

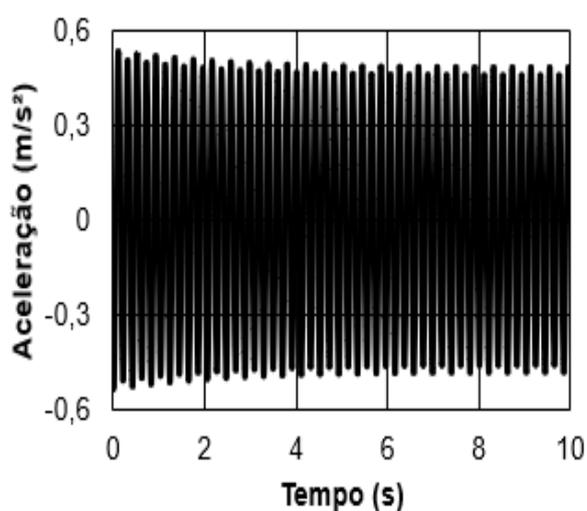
Nesta seção, as Figuras 76 a 78 exibem os gráficos dos deslocamentos e acelerações numéricos, tanto no domínio do tempo quanto no da frequência, relacionados a uma pessoa saltando a frequências de 2,40 Hz (ressonância). Os três modelos matemáticos de carga dinâmica utilizados para representar as pessoas são considerados nas análises.



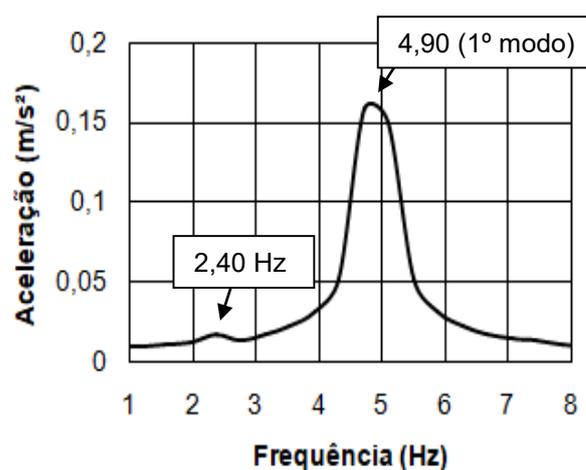
(a) Deslocamento no domínio do tempo



(b) Deslocamento no domínio da frequência

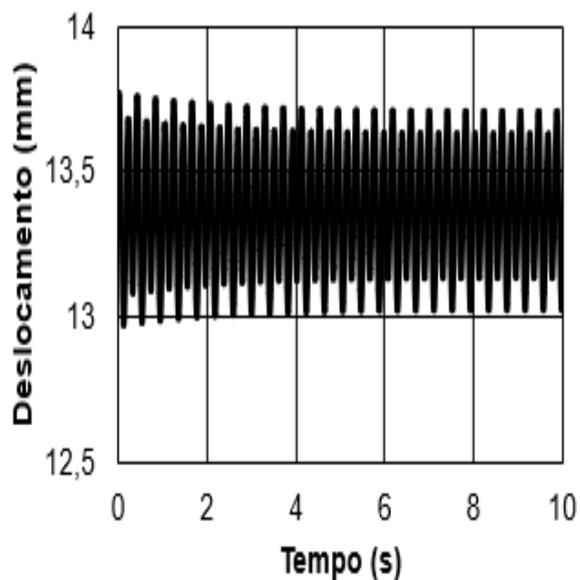


(c) Aceleração no domínio do tempo

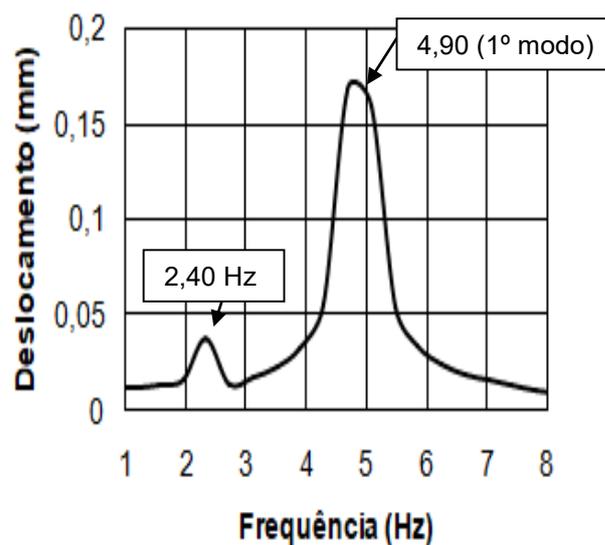


(d) Aceleração no domínio da frequência

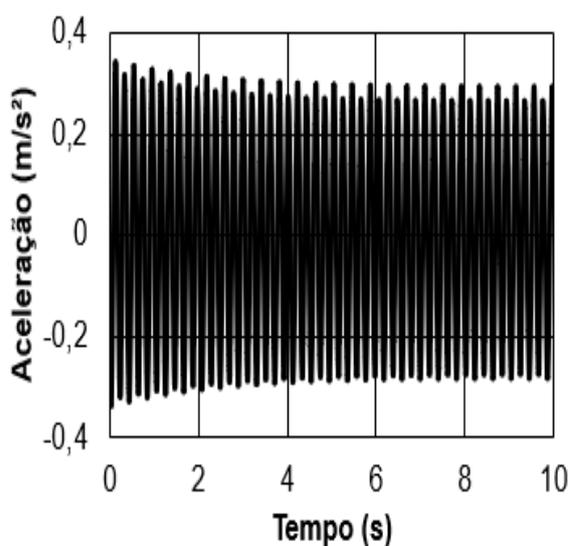
Figura 74: Resposta dinâmica da passarela. Ressonância ($f = 2,40$ Hz; $T = 0,41$ s; $T_c = 0,25$ s; $CD = 1$; $k_p = 3,28$) (Faisca [41])



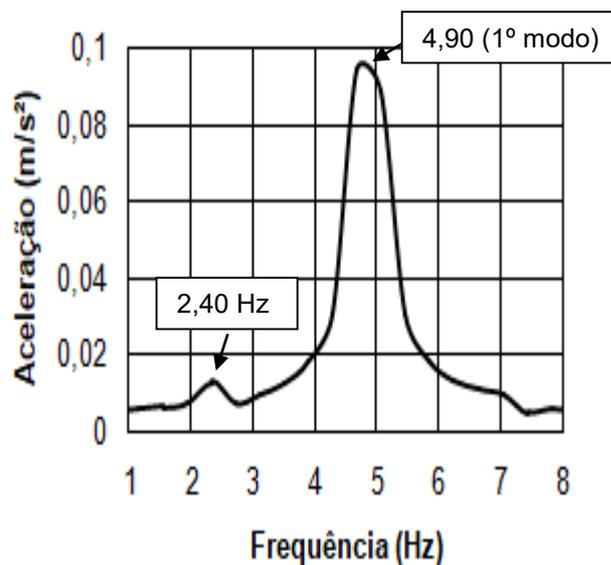
(a) Deslocamento no domínio do tempo



(b) Deslocamento no domínio da frequência

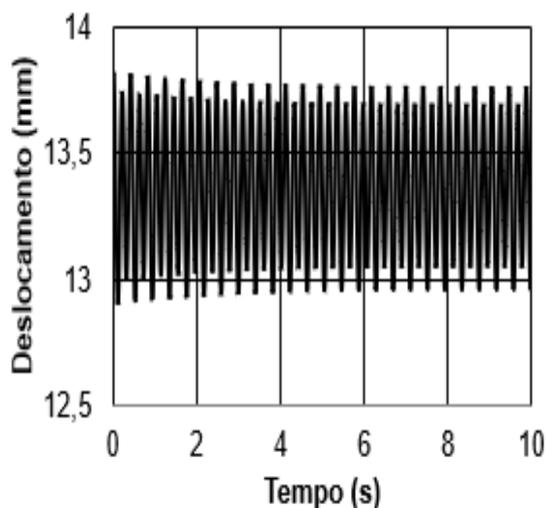


(c) Aceleração no domínio do tempo

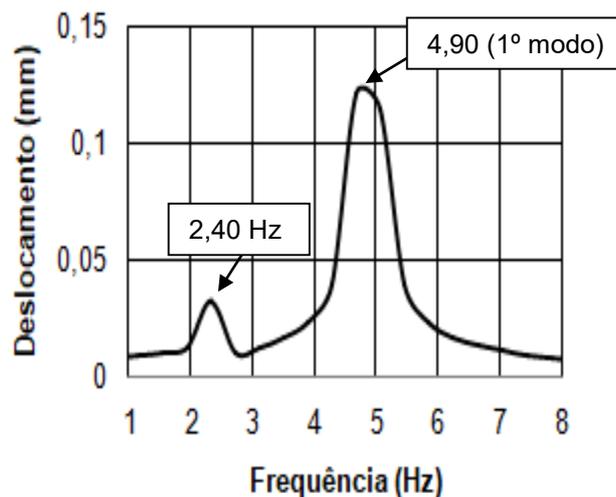


(d) Aceleração no domínio da frequência

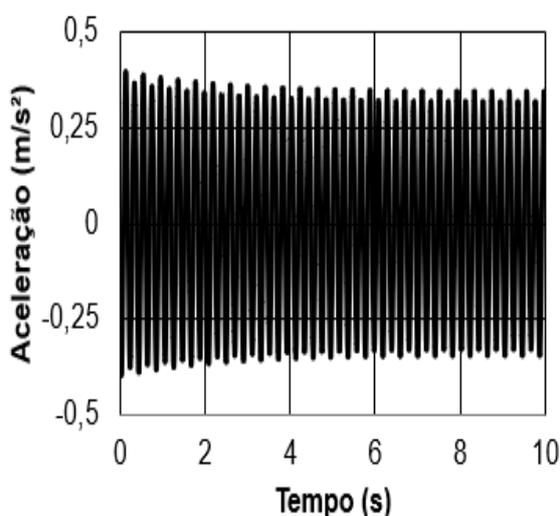
Figura 75: Resposta dinâmica da passarela. Ressonância ($f = 2,40$ Hz; $T = 0,41$ s; $t_p = 0,25$ s; $k_p = 3,28$) (Função semi-senoidal [42])



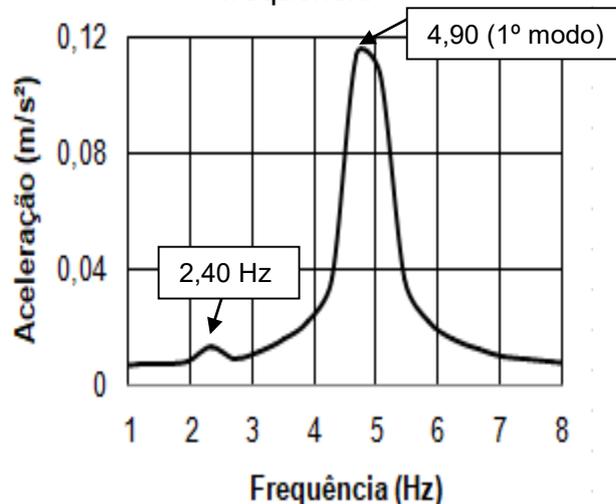
(a) Deslocamento no domínio do tempo



(b) Deslocamento no domínio da frequência



(c) Aceleração no domínio do tempo



(d) Aceleração no domínio da frequência

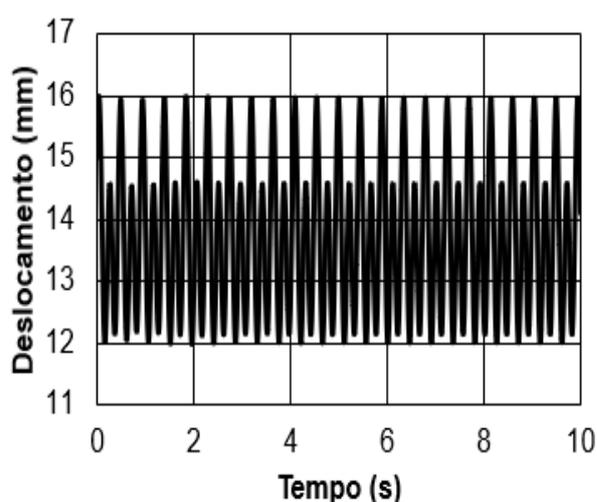
Figura 76: Resposta dinâmica da passarela. Ressonância ($f = 2,40$ Hz; $T = 0,41$ s; $t_p = 0,25$ s; $k_p = 3,28$) (Função triangular [42])

A partir dos resultados alcançados do salto em ressonância no vão central da passarela, o modelo de carregamento Hanning (Faisca) apresentou aceleração e deslocamentos máximos de $0,50$ m/s^2 e $13,70$ mm, respectivamente (Figura 76). No contexto do modelo de carregamento Semi-senoidal, os valores máximos de aceleração e deslocamento foram de $0,30$ m/s^2 e $13,60$ mm (Figura 77). Em relação ao modelo de carregamento Triangular, as máximas acelerações e deslocamentos atingiram valores de $0,35$ m/s^2 e $13,70$ mm (Figura 78).

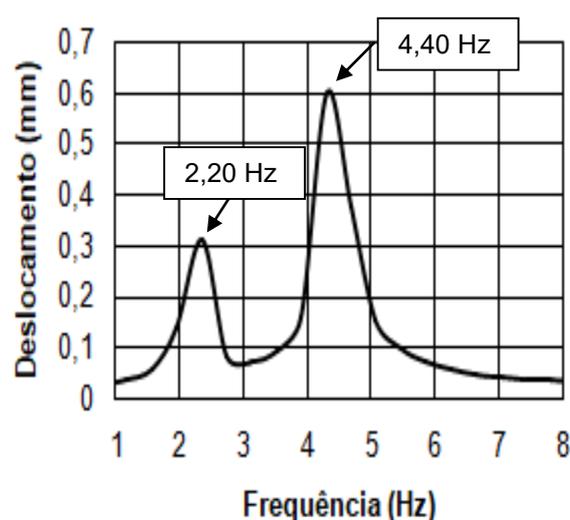
Cabe ressaltar que, nas próximas seções deste capítulo, serão apresentadas apenas os gráficos de deslocamentos relativos ao modelo de carregamento dinâmico de Faisca [41]. Isso se deve ao fato de que, em termos qualitativos, os gráficos de deslocamentos associados aos modelos semi-senoidal [42] e triangular [42] são parecidos ao modelo da autora [41], mudando apenas em aspectos quantitativos. Dessa forma, os gráficos de deslocamentos encontram-se no Apêndice.

10.2.2 Modelo de carregamento dinâmico: 15 pessoas

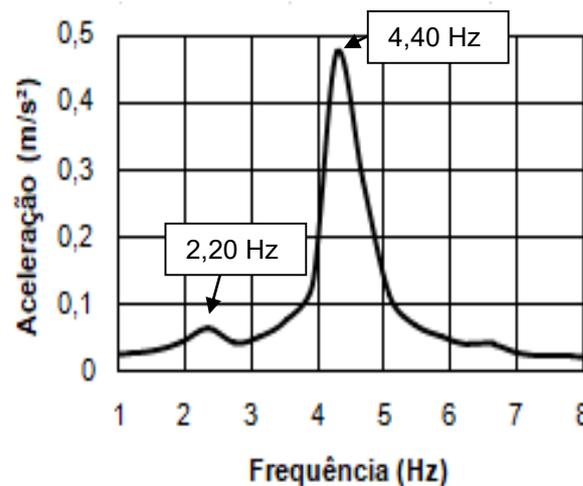
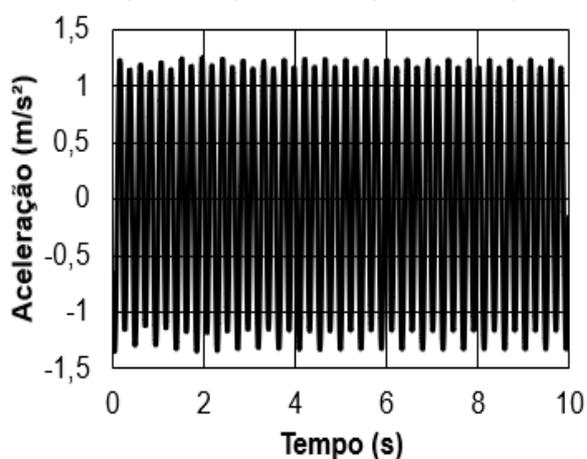
Nesta seção, as Figuras 79 e 80 apresentam os gráficos das acelerações e deslocamentos numéricos, tanto no domínio do tempo quanto no da frequência, associados ao modelo de Faisca [41], relacionados a quinze pessoas saltando a frequências de 2,20 Hz (quase ressonância) e 2,40 Hz (ressonância). No que concerne aos modelos semi-senoidal [42] e triangular [42], serão apresentados apenas os gráficos da aceleração nos domínios do tempo e da frequência (Figuras 81 a 84). As respostas referentes aos deslocamentos podem ser encontradas no Apêndice.



(a) Deslocamento no domínio do tempo



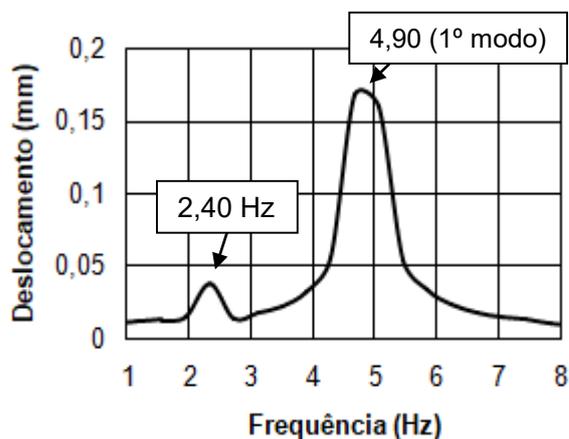
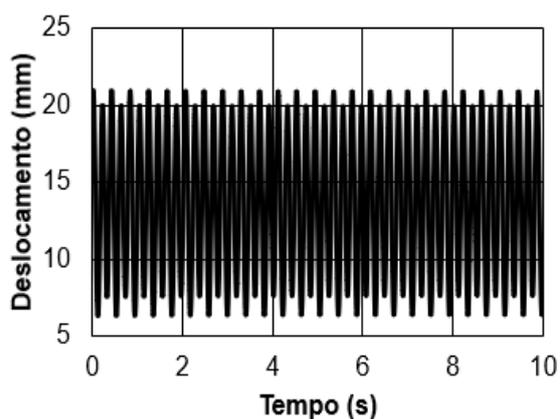
(b) Deslocamento no domínio da frequência



(c) Aceleração no domínio do tempo

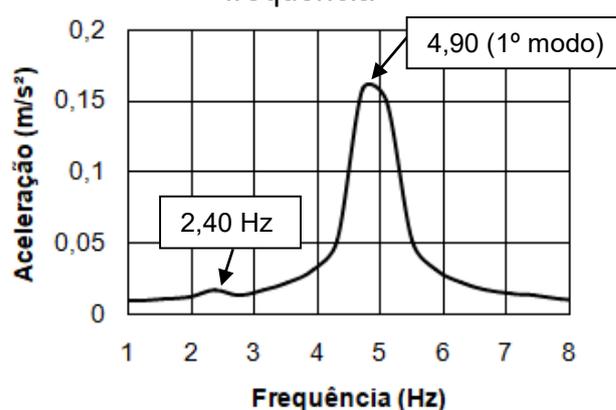
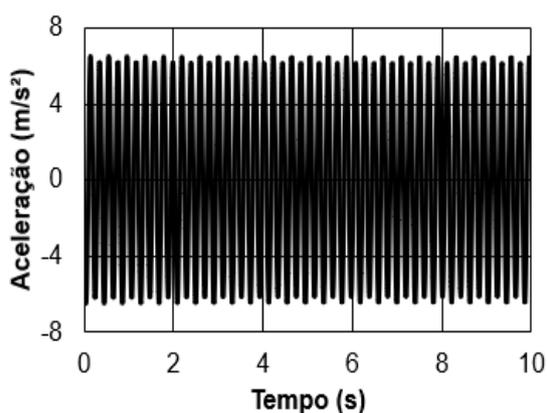
(d) Aceleração no domínio da frequência

Figura 77: Resposta dinâmica da passarela. Quase ressonância ($f = 2,20$ Hz;
 $T = 0,45$ s; $T_c = 0,27$ s; $CD = 0,95$; $k_p = 3,33$) (Faisca [41])



(a) Deslocamento no domínio do tempo

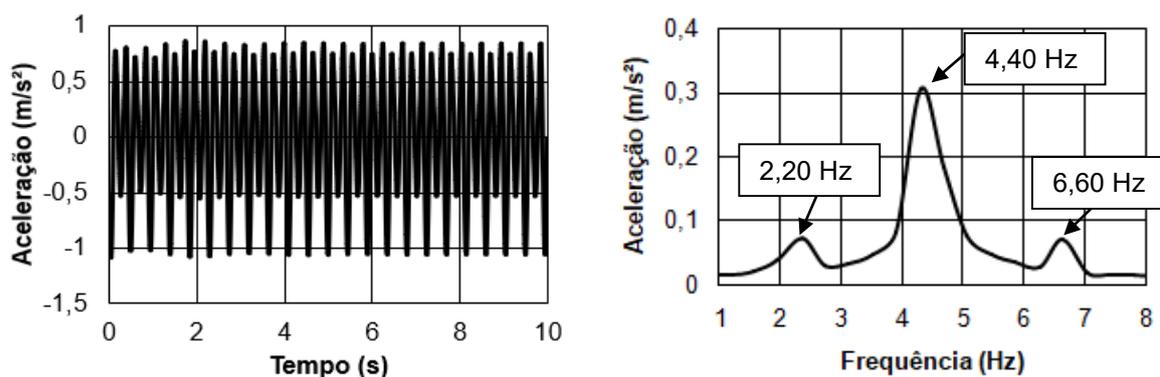
(b) Deslocamento no domínio da frequência



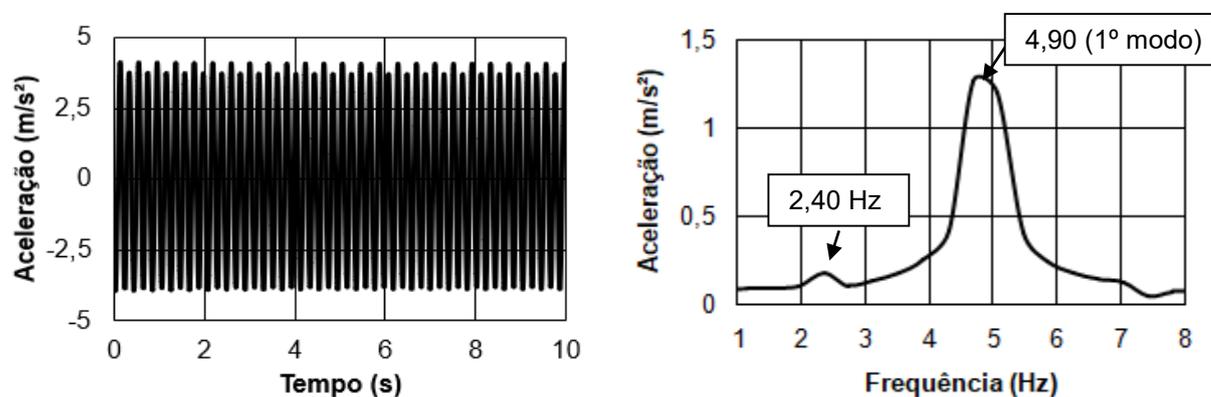
(c) Aceleração no domínio do tempo

(d) Aceleração no domínio da frequência

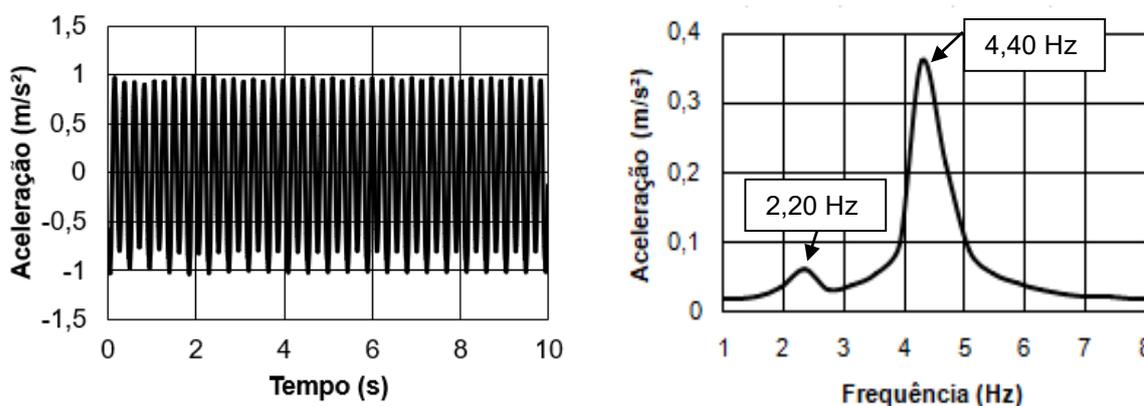
Figura 78: Resposta dinâmica da passarela. Ressonância ($f = 2,40$ Hz; $T = 0,41$ s;
 $T_c = 0,25$ s; $CD = 0,95$; $k_p = 3,28$) (Faisca [41])



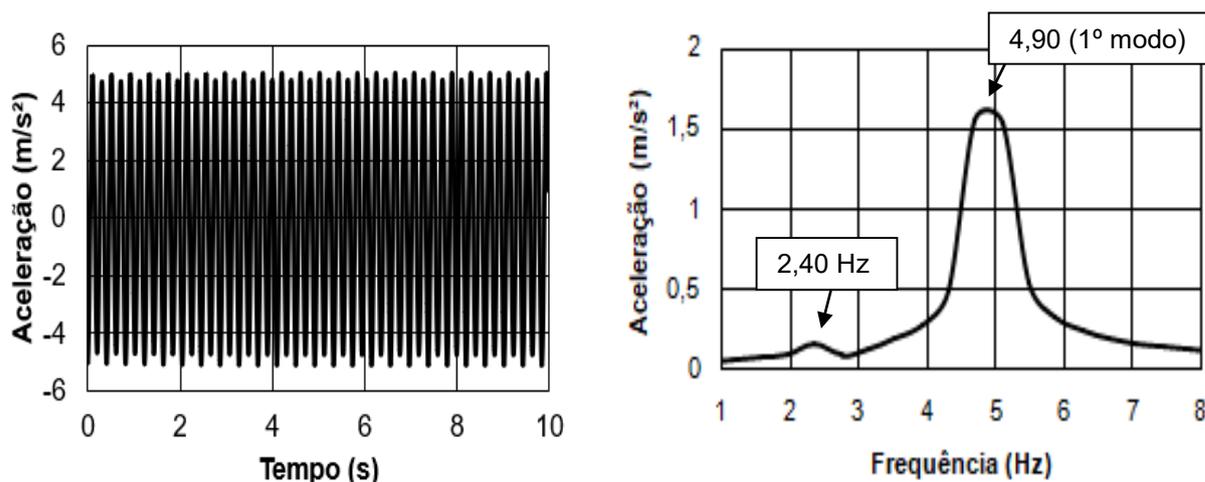
(a) Aceleração no domínio do tempo (b) Aceleração no domínio da frequência
 Figura 79: Resposta dinâmica da passarela. Quase ressonância ($f = 2,20$ Hz;
 $T = 0,45$ s; $t_p = 0,27$ s; $k_p = 3,33$) (Função semi-senoidal [42])



(a) Aceleração no domínio do tempo (b) Aceleração no domínio da frequência
 Figura 80: Resposta dinâmica da passarela. Ressonância ($f = 2,40$ Hz; $T = 0,41$ s;
 $t_p = 0,25$ s; $k_p = 3,28$) (Função semi-senoidal [42])



(a) Aceleração no domínio do tempo (b) Aceleração no domínio da frequência
 Figura 81: Resposta dinâmica da passarela. Quase ressonância ($f = 2,20$ Hz;
 $T = 0,45$ s; $t_p = 0,27$ s; $k_p = 3,33$) (Função triangular [42])



(a) Aceleração no domínio do tempo (b) Aceleração no domínio da frequência
 Figura 82: Resposta dinâmica da passarela. Ressonância ($f = 2,40$ Hz; $T = 0,41$ s;
 $t_p = 0,25$ s; $k_p = 3,28$) (Função triangular [42])

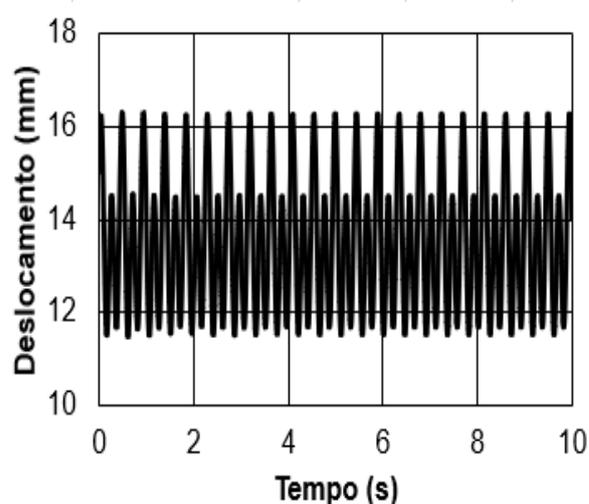
Com base nos resultados obtidos a partir de saltos em quase ressonância, o modelo de carregamento Hanning (Faisca [41]) apresentou aceleração máxima de $1,35$ m/s² (Figura 79). No contexto do modelo de carregamento semi-senoidal [42], o valor máximo de aceleração foi de $1,10$ m/s² (Figura 81). Em relação ao modelo de carregamento triangular [42], a máxima aceleração foi de $1,00$ m/s² (Figura 83).

Em relação aos resultados alcançados com base em salto em ressonância, o modelo de carregamento Hanning (Faisca [41]) apresentou aceleração máxima de $6,00$ m/s² (Figura 80). No contexto do modelo de carregamento semi-senoidal [42], o valor máximo de aceleração foi de $4,00$ m/s² (Figura 82). Em relação ao modelo de carregamento triangular [42], a máxima aceleração atingiu valor de $5,00$ m/s² (Figura 84). Percebe-se que tais valores estão fora da realidade, pois não existe possibilidade de alcançar valores tão altos de aceleração, como a de $5,00$ m/s² obtida através do modelo triangular [42], em uma passarela real.

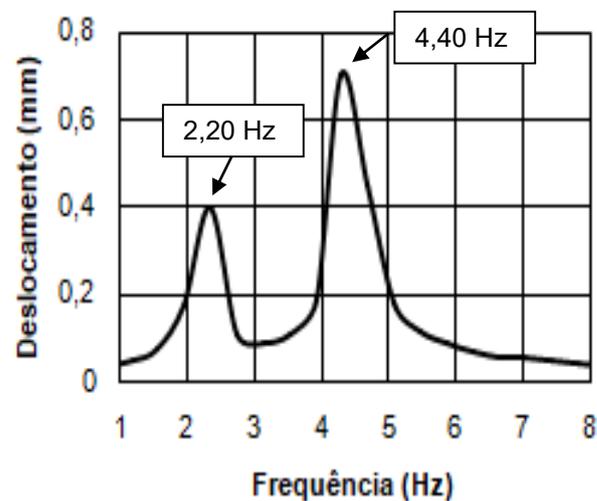
10.2.3 Modelo de carregamento dinâmico: 20 pessoas

Nesta seção, as Figuras 85 e 86 apresentam os gráficos dos deslocamentos e acelerações numéricos, tanto no domínio do tempo quanto no da frequência, associados ao modelo de Faisca [41], relacionados a vinte pessoas saltando a frequências de $2,20$ Hz (quase ressonância) e $2,40$ Hz (ressonância). Em relação aos modelos semi-senoidal [42] e triangular [42], serão apresentados apenas os

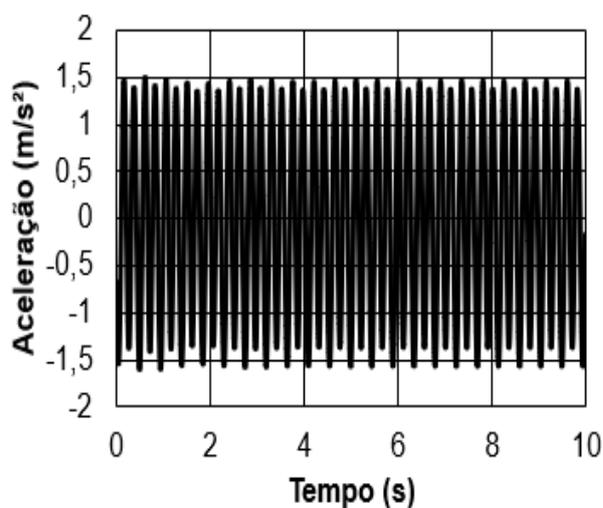
gráficos da aceleração nos domínios do tempo e da frequência (Figuras 87 a 88). As respostas referentes aos deslocamentos podem ser encontradas no Apêndice.



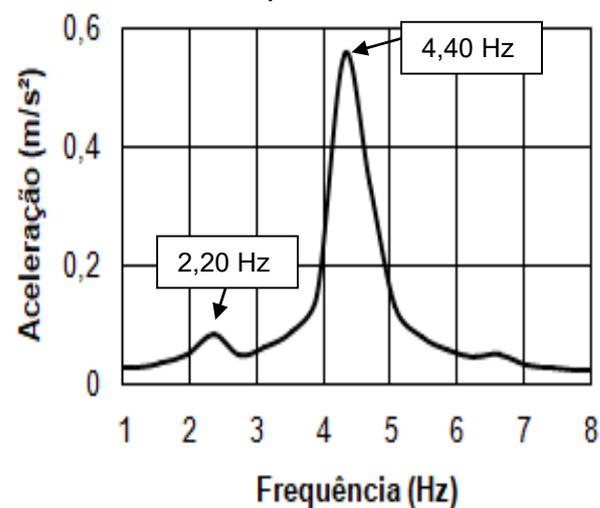
(a) Deslocamento no domínio do tempo



(b) Deslocamento no domínio da frequência

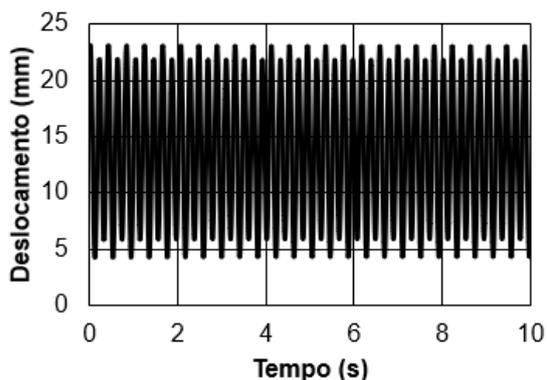


(c) Aceleração no domínio do tempo

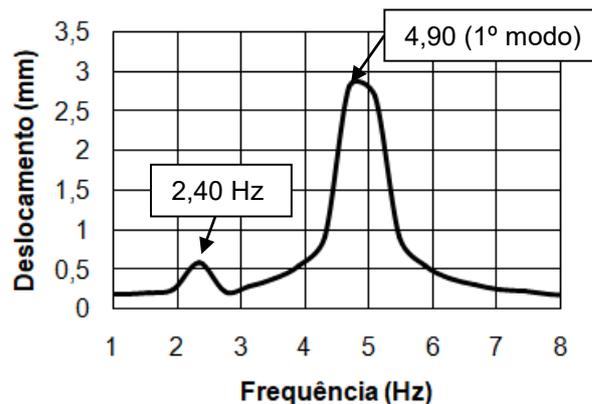


(d) Aceleração no domínio da frequência

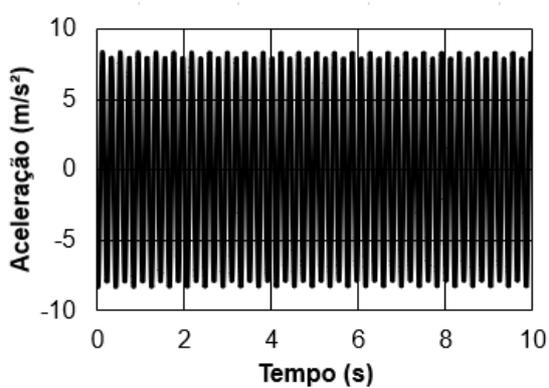
Figura 83: Resposta dinâmica da passarela. Quase ressonância ($f = 2,20$ Hz; $T = 0,45$ s; $T_c = 0,27$ s; $k_p = 3,33$) (Faisca [41])



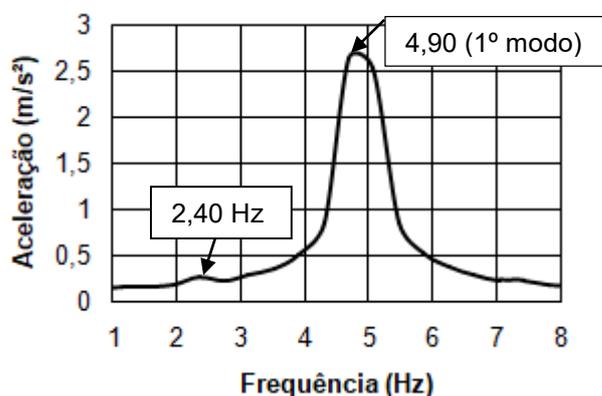
(a) Deslocamento no domínio do tempo



(b) Deslocamento no domínio da frequência

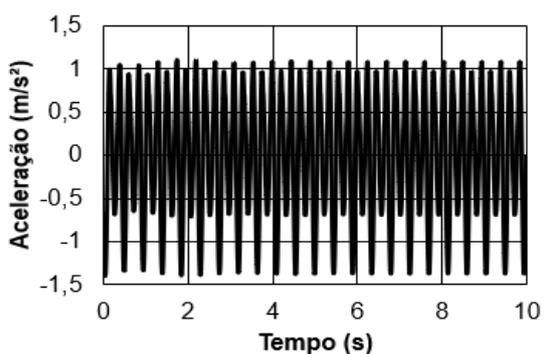


(c) Aceleração no domínio do tempo

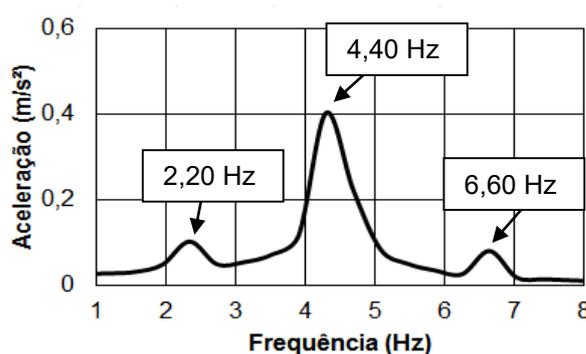


(d) Aceleração no domínio da frequência

Figura 84: Resposta dinâmica da passarela. Ressonância ($f = 2,40$ Hz; $T = 0,41$ s; $T_c = 0,25$ s; $CD = 0,95$; $k_p = 3,28$) (Faisca [41])

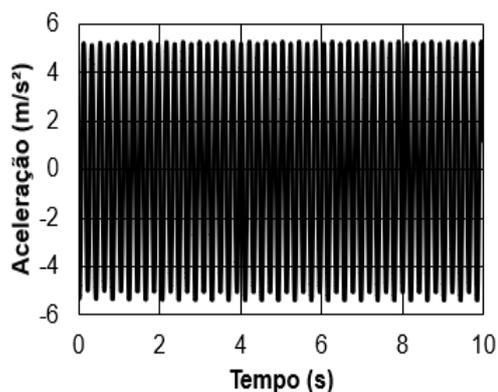


(a) Aceleração no domínio do tempo

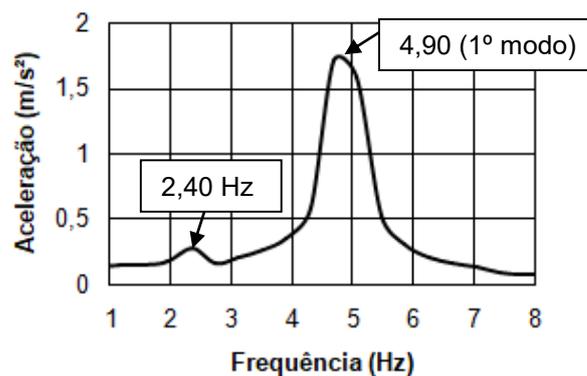


(b) Aceleração no domínio da frequência

Figura 85: Resposta dinâmica da passarela. Quase ressonância ($f = 2,20$ Hz; $T = 0,45$ s; $t_p = 0,27$ s; $k_p = 3,33$) (Função semi-senoidal [42])

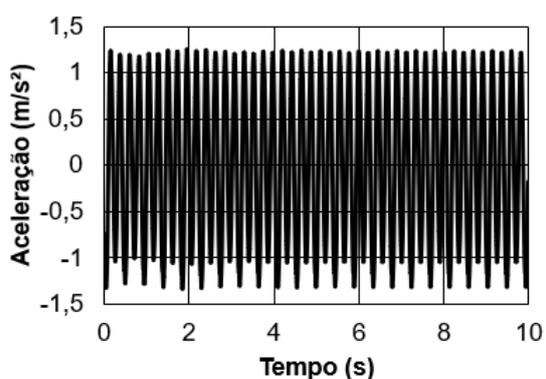


(a) Aceleração no domínio do tempo

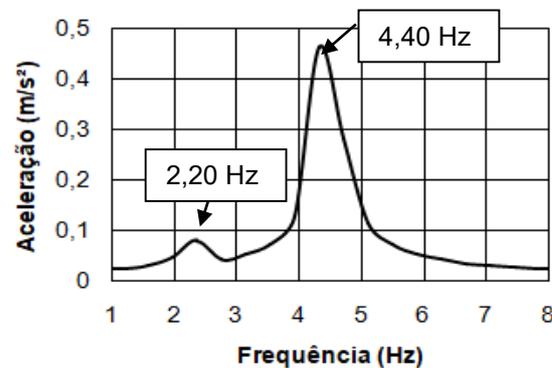


(b) Aceleração no domínio da frequência

Figura 86: Resposta dinâmica da passarela. Ressonância ($f = 2,40$ Hz; $T = 0,41$ s; $t_p = 0,25$ s; $k_p = 3,28$) (Função semi-senoidal [42])

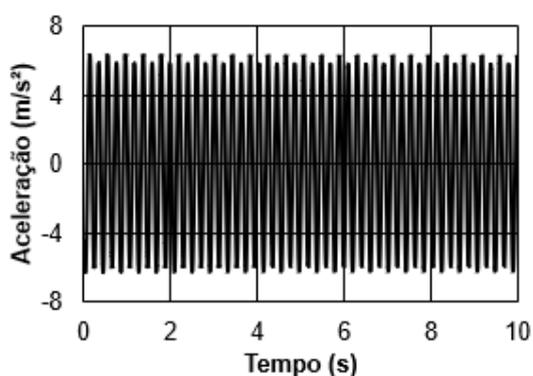


(a) Aceleração no domínio do tempo

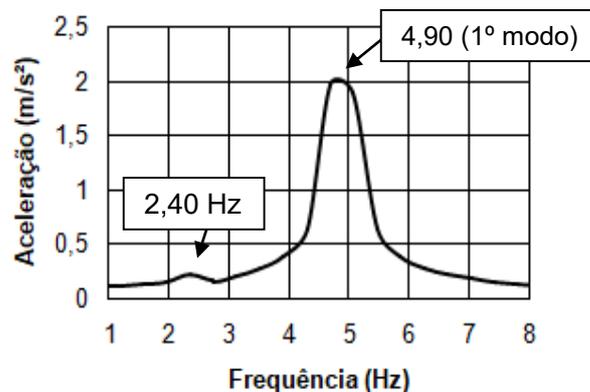


(b) Aceleração no domínio da frequência

Figura 87: Resposta dinâmica da passarela. Quase ressonância ($f = 2,20$ Hz; $T = 0,45$ s; $t_p = 0,27$ s; $k_p = 3,33$) (Função triangular [42])



(a) Aceleração no domínio do tempo



(b) Aceleração no domínio da frequência

Figura 88: Resposta dinâmica da passarela. Ressonância ($f = 2,40$ Hz; $T = 0,41$ s; $t_p = 0,25$ s; $k_p = 3,28$) (Função triangular [42])

À luz dos resultados obtidos a partir de salto em quase ressonância, o modelo de carregamento Hanning (Faisca [41]) apresentou aceleração máxima de $1,60 \text{ m/s}^2$ (Figura 85). No contexto do modelo de carregamento semi-senoidal [42], o valor máximo de aceleração foi de $1,40 \text{ m/s}^2$ (Figura 87). Em relação ao modelo de carregamento triangular [42], a máxima aceleração atingiu valor de $1,30 \text{ m/s}^2$ (Figura 89).

Em relação aos resultados alcançados a partir de salto em ressonância, o modelo de carregamento Hanning (Faisca [41]) apresentou aceleração máxima de $8,00 \text{ m/s}^2$ (Figura 86). No contexto do modelo de carregamento semi-senoidal [42], o valor máximo de aceleração foi de $5,00 \text{ m/s}^2$ (Figura 88). Em relação ao modelo de carregamento triangular [42], a máxima aceleração atingiu valor de $6,00 \text{ m/s}^2$ (Figura 90). Percebe-se que tais valores são irrealistas, haja vista que não é possível alcançar valores tão altos de aceleração em uma passarela existente, como a que se refere esta pesquisa.

10.2.4 Comparação: testes experimentais x modelo numérico

A Tabela 13 apresenta os resultados das acelerações verticais dos modelos numéricos com base nas funções matemáticas de Faisca [41], semi-senoidal [42] e triangular [42], obtidos via emprego do programa computacional ANSYS [5], descrito anteriormente neste capítulo, em comparação com os valores das acelerações de pico obtidas mediante testes experimentais realizados sobre a passarela de pedestres, conforme descrito no Capítulo 8. Os resultados abrangem cenários de uma pessoa saltando em frequência de $2,40 \text{ Hz}$ (ressonância), e quinze e vinte pessoas saltando em frequências de $2,20 \text{ Hz}$ (quase ressonância), $2,40 \text{ Hz}$ (ressonância) e sob condições livres sobre a passarela.

Conforme a Tabela 13, os resultados mais favoráveis correspondem a uma pessoa saltando a $2,40 \text{ Hz}$ (ressonância) e a quinze e vinte pessoas saltando a $2,20 \text{ Hz}$ (quase ressonância).

Tabela 13: Comparação das acelerações de pico experimentais x numérico

Número de pessoas	Frequência de excitação (Hz)	Experimental a_p (m/s ²)	Numérico $a_{máx}$ (m/s ²)	Diferença (%)	Modelo de carregamento
1	2,40	0,40	0,50	25,00	Faisca
			0,30	33,00	Semi-senoidal
			0,35	14,00	Triangular
15	2,20	1,30	1,35	4,00	Faisca
			1,10	18,00	Semi-senoidal
			1,00	30,00	Triangular
15	2,40	0,80	6,00	650,00	Faisca
			4,00	400,00	Semi-senoidal
			5,00	525,00	Triangular
15	Livre	1,00	*	*	*
20	2,20	1,50	1,60	6,50	Faisca
			1,40	7,00	Semi-senoidal
			1,30	15,00	Triangular
20	2,40	1,20	8,00	567,00	Faisca
			5,00	317,00	Semi-senoidal
			6,00	400,00	Triangular
20	Livre	1,60	*	*	*

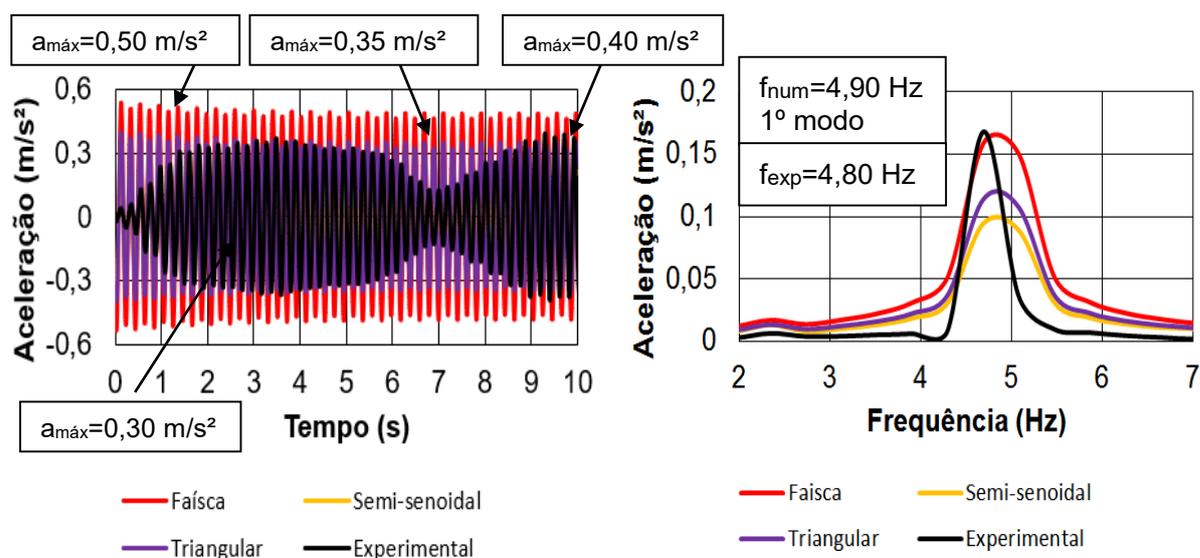
Comparando-se os valores das acelerações máximas da Tabela 12, percebe-se que os melhores resultados estão associados a uma pessoa saltando em uma frequência de 2,40 Hz (ressonância); quinze e vinte pessoas em 2,20 Hz (quase ressonância). No que tange à uma pessoa em ressonância, a diferença percentual é de 25% para o modelo de Faisca [41], 33% para o modelo semi-senoidal [42] e 14% para o modelo triangular [42]. Considerando quinze pessoas saltando em quase ressonância, a variação percentual para o modelo de Faisca [41] é de 4%; para o modelo semi-senoidal [42] é de 18% e 30% para o modelo triangular [42]. Por fim, em relação a vinte pessoas em quase ressonância, a diferença percentual para o

modelo de Faisca [41] é de 6,5% e semi-senoidal [42] é de 7%, enquanto para o modelo triangular [42] a diferença é de 15%.

Entretanto, percebe-se que para os casos nos quais quinze e vinte pessoas saltaram em ressonância, as diferenças percentuais foram bem discrepantes, apresentando uma diferença percentual na ordem de 477%. Tal ocorrência é explicada pela ausência de sincronismo dos participantes durante o ensaio experimental na frequência ressonante. A falta de sincronia é esclarecida pela dificuldade dos indivíduos de saltar em uma frequência de 2,40 Hz (144 *bpm*) e pela influência dos saltos de outros participantes no decorrer do ensaio, que fez com que a maioria das pessoas perdesse o foco do metrônomo. Ainda, há o fato de que as respostas numéricas apresentaram valores irrealistas, haja vista que o ANSYS [5] considera que as forças de carregamento atuam perfeitamente na frequência de passo imposta, o que não ocorre durante o monitoramento experimental. Além disso, considera-se ainda o fato do modelo de carregamento utilizado ser de “força-dura”, desconsiderando as características dos indivíduos.

Em seguida, as Figuras 91 a 94 apresentam a comparação gráfica dos resultados obtidos pelos ensaios experimentais com as respostas dinâmicas dos modelos numéricos computacionais desenvolvidos, via método dos elementos finitos (ANSYS [5]), de uma e vinte pessoas saltando em ressonância [$f_p = 2,40$ Hz], e de quinze e vinte pessoas saltando em uma frequência próxima à ressonância [$f_p = 2,20$ Hz].

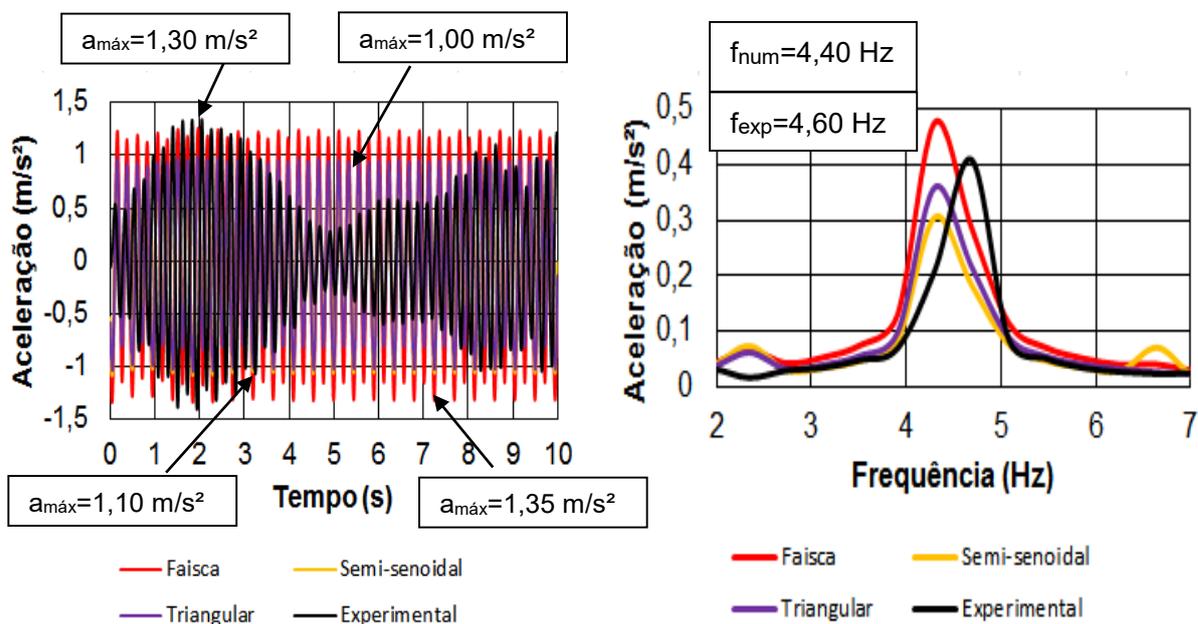
Vale salientar que a ausência do gráfico referente à frequência de 2,40 Hz ($f_p = 2,40$ Hz) para 15 pessoas se deve à falta de coerência nos resultados obtidos. Durante a análise dos dados experimentais e numéricos, verificou-se que os valores registrados não se alinhavam, haja vista que as respostas numéricas apresentam valores irrealistas, enquanto o resultado experimental é oriundo de testes nos quais os participantes tiveram dificuldade em saltar na frequência correta. No entanto, o gráfico correspondente à frequência de 2,40 Hz ($f_p = 2,40$ Hz) para 20 pessoas foi incluído nesta seção para demonstrar a inconsistência dos resultados de um caso mais crítico, além de evidenciar que a utilização exclusiva dos modelos matemáticos de força-dura pode não ser suficiente para uma avaliação de projeto realista, no que diz respeito a avaliação de vibrações excessivas de passarelas de pedestres.



(a) Aceleração no domínio do tempo

(b) Aceleração no domínio do tempo

Figura 89: Comparação da aceleração vertical numérica e experimental devido a uma pessoa saltando em ressonância ($f_p = 2,40 \text{ Hz}$)



(a) Aceleração no domínio do tempo

(b) Aceleração no domínio da frequência

Figura 90: Comparação da aceleração vertical numérica e experimental devido a quinze pessoas saltando em quase ressonância ($f_p = 2,20 \text{ Hz}$)

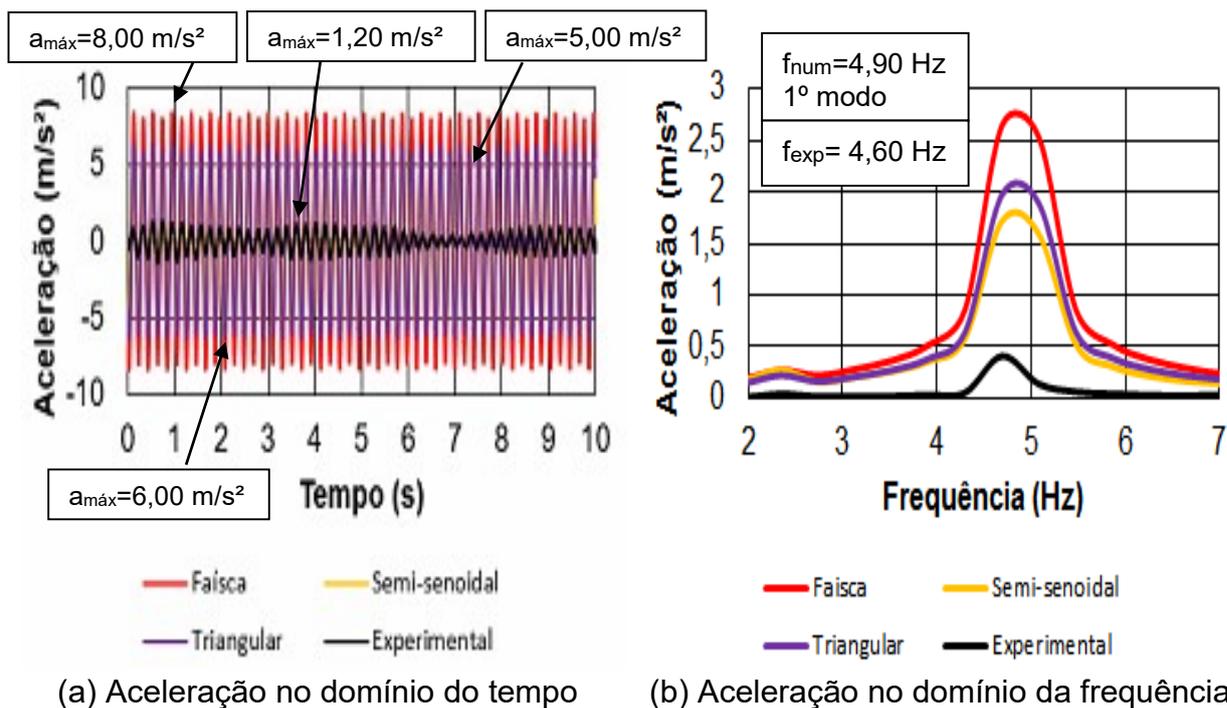


Figura 91: Comparação da aceleração vertical numérica e experimental devido a vinte pessoas saltando em ressonância ($f_p = 2,40$ Hz)

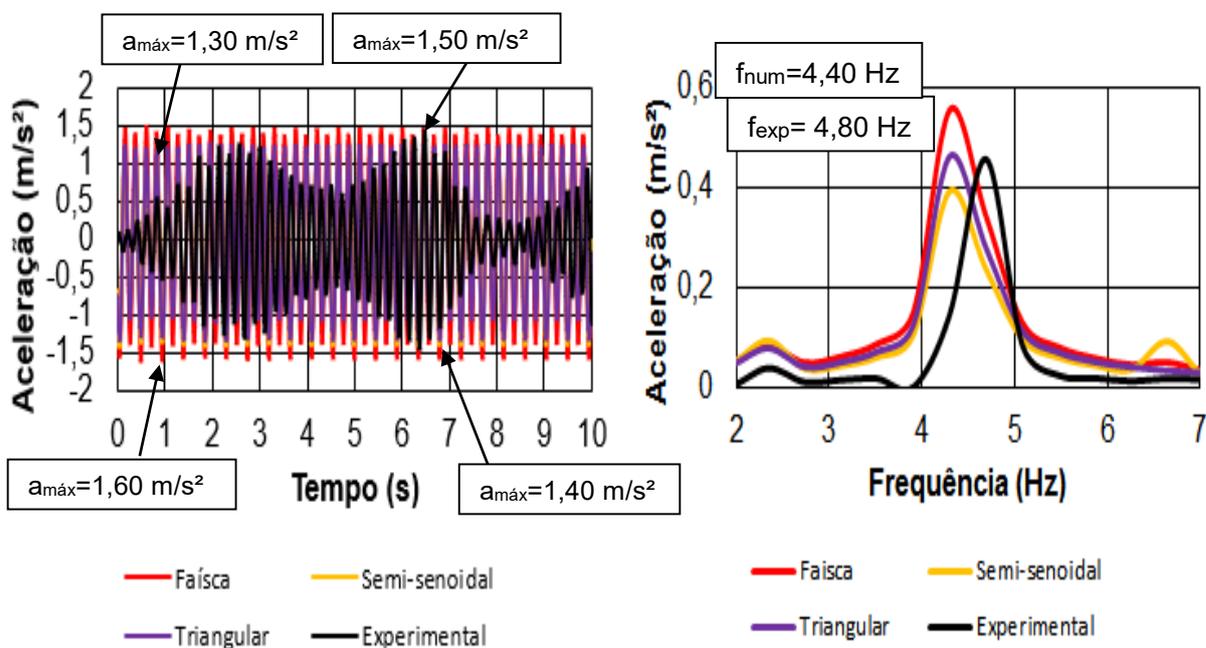


Figura 92: Comparação da aceleração vertical numérica e experimental a vinte pessoas saltando em quase ressonância ($f_p = 2,20$ Hz)

A partir dos gráficos de comparação dos resultados dos testes experimentais e das respostas dos modelos numéricos apresentados nesta seção (Figuras 91 a 94), pode-se observar que no que concerne a uma pessoa em ressonância ($f_p = 2,40$ Hz), e quinze e vinte em quase ressonância ($f_p = 2,20$ Hz), os resultados tiveram ótimo comportamento ao longo do tempo e da frequência com picos de aceleração muito bem definidos. Dessa forma, demonstra-se que os testes experimentais foram bem representados pelos modelos em elementos finitos (MEF), salvo a diferença analisada quando vinte pessoas saltaram em ressonância, devido à dificuldade de sincronismo dos participantes com a frequência do passo e de manterem a mesma distância, entre indivíduos, durante o ensaio experimental.

Além disso, existe o fato de que os modelos de força dura não levam em conta o efeito da interação dinâmica indivíduo-estrutura, o efeito da diferença de fase existente entre as excitações dinâmicas produzidas pelas pessoas, assim como também não consideram o amortecimento dos indivíduos. Dessa forma, os valores das acelerações de pico calculadas, via elementos finitos (MEF), mediante o emprego destes modelos matemáticos, em especial na condição de ressonância, são muito altos, conforme Figura 93, não correspondendo a realidade prática de projeto.

11 AVALIAÇÃO DO CONFORTO HUMANO

11.1 Considerações iniciais

Este capítulo pretende avaliar o comportamento dinâmico da passarela, no que tange ao desconforto humano oriundo de ações dinâmicas oriundas de vandalismo. Ressalta-se que as acelerações verticais máximas da passarela foram obtidas mediante método dos elementos finitos (MEF [46]) ($f_p = 2,20$ Hz e $f_p = 2,40$ Hz), descrito na seção anterior e comparadas com os limites propostos por normas e recomendações de projeto (Eurocode [38]; BS 5400 [39] e SÉTRA [40]). Tal comparação é feita objetivando verificar a ocorrência de níveis de vibrações indesejáveis e desconforto humano na estrutura. O ponto da estrutura analisado corresponde à seção central do vão da passarela (Figura 60).

11.2 Análise das acelerações máximas numéricas

As Tabelas 14 e 15 apresentam os resultados numéricos das acelerações verticais de pico para a passarela, que são comparados com os valores limites propostos na literatura técnica (Eurocode [38]; BS 5400 [39]; SÉTRA [40]). Na presente investigação foi analisado o caso de carregamento correspondente a 1 pessoa [$f_p = 2,40$ Hz (ressonância)], 15 e 20 pessoas [$f_p = 2,40$ Hz (ressonância) e $f_p = 2,20$ Hz (quase ressonância)].

Conforme o Eurocode [38] e a norma BS 5400 [39], os limites de aceleração vertical são, respectivamente, $0,7$ m/s² e $1,10$ m/s². No que tange ao SÉTRA [40], o máximo conforto humano é definido pela Classe I, que abrange valores de aceleração entre 0 e $0,5$ m/s². Para o conforto humano médio, este é classificado como Classe II, com limites de $0,5$ m/s² a 1 m/s². O mínimo conforto humano está na Classe III, correspondendo a acelerações de 1 m/s² a $2,5$ m/s². Por fim, o conforto humano inaceitável é classificado como Classe IV, com acelerações superiores a $2,5$ m/s².

Tabela 14: Análise comparativa com o critério de conforto humano (SÉTRA [40])

Número de pessoas	Frequência de excitação (Hz)	Numérico $a_{máx}$ (m/s ²)	Modelo de carregamento	Nível de conforto *
1	2,40	0,50	Faisca	Máximo
		0,30	Semi-senoidal	Máximo
		0,35	Triangular	Máximo
15	2,20	1,35	Faisca	Mínimo
		1,10	Semi-senoidal	Mínimo
		1,00	Triangular	Mínimo
15	2,40	6,00	Faisca	**
		4,00	Semi-senoidal	**
		5,00	Triangular	**
20	2,20	1,60	Faisca	Mínimo
		1,40	Semi-senoidal	Mínimo
		1,30	Triangular	Mínimo
20	2,40	8,00	Faisca	**
		5,00	Semi-senoidal	**
		6,00	Triangular	**
* Máximo (Classe I: 0 - 0,5); Médio (Classe II: 0,5 - 1); Mínimo (Classe III: 1 - 2,5) e Inaceitável (Classe IV: >2,5)				
** Comparação inadequada				

Considerando-se uma, quinze e vinte pessoas saltando a uma frequência de 2,40 Hz (ressonância), as acelerações máximas demonstram os seguintes valores no que concerne aos modelos de Faisca [41], semi-senoidal [42] e triangular [42], respectivamente: 0,50 m/s² ($a_{máx} = 0,50$ m/s²), 0,30 m/s² ($a_{máx} = 0,30$ m/s²) e 0,35 m/s² ($a_{máx} = 0,35$ m/s²) [1 pessoa]; 6,00 m/s² ($a_{máx} = 6,00$ m/s²), 4,00 m/s² ($a_{máx} = 4,00$ m/s²) e 5,00 m/s² ($a_{máx} = 5,00$ m/s²) [15 pessoas]; e 8,00 m/s²

($a_{m\acute{a}x} = 8,00 \text{ m/s}^2$), $5,00 \text{ m/s}^2$ ($a_{m\acute{a}x} = 5,00 \text{ m/s}^2$) e 6 m/s^2 ($a_{m\acute{a}x} = 6,00 \text{ m/s}^2$) [20 pessoas].

No que tange a quinze e vinte pessoas saltando a uma frequ\ecancia de 2,20 Hz (quase resson\ancia), os valores de acelera\c3o\moxima referentes aos modelos de Faisca [41], semi-senoidal [42] e triangular [42] s\ao, respectivamente: $1,35 \text{ m/s}^2$ ($a_p = 1,35 \text{ m/s}^2$), $1,10 \text{ m/s}^2$ ($a_{m\acute{a}x} = 1,10 \text{ m/s}^2$) e $1,00 \text{ m/s}^2$ ($a_{m\acute{a}x} = 1,00 \text{ m/s}^2$) [15 pessoas]; e $1,60 \text{ m/s}^2$ ($a_{m\acute{a}x} = 1,60 \text{ m/s}^2$), $1,40 \text{ m/s}^2$ ($a_{m\acute{a}x} = 1,40 \text{ m/s}^2$) e $1,30 \text{ m/s}^2$ ($a_{m\acute{a}x} = 1,30 \text{ m/s}^2$) [20 pessoas].

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 14, verifica-se que para o caso de uma pessoa saltando em resson\ancia ($f_p = 2,40 \text{ Hz}$), o n\ivel de conforto limita-se \a Classe I, o que corresponde a um m\aximo de conforto humano. Em rela\c3o\aos casos de quinze e vinte pessoas excitando a passarela em quase resson\ancia, a acelera\c3o\moxima relacionada aos modelos de Faisca [41], semi-senoidal [42] e triangular [42] enquadra-se na Classe III, correspondendo a um m\aximo de conforto humano ($a_{lim} = 1 - 2,50 \text{ m/s}^2$).

Ressalta-se que, os resultados num\ericos obtidos para quinze e vinte pessoas saltando em resson\ancia s\ao considerados irrealistas, dado que \e invi\avel alcan\car valores exorbitantes de acelera\c3o\em uma passarela existente, como a utilizada nesta pesquisa. Portanto, qualquer compara\c3o\desses resultados com crit\erios de projeto de conforto humano se torna inadequada.

A Tabela 15 apresenta uma an\alise comparativa dos resultados num\ericos com o crit\erio de conforto humano proposto pelas normas Eurocode [38] e BS 5400 [39]. Conforme Tabela 15, apenas a acelera\c3o\referente a uma pessoa saltando sobre a passarela enquadrou-se no n\ivel de conforto humano aceit\avel de acordo com as duas normas adotadas como refer\encias nesta pesquisa.

Tabela 15: Análise comparativa com o critério de conforto humano (Eurocode [38] e BS 5400 [39])

Número de pessoas	Frequência de excitação (Hz)	Numérico $a_{máx}$ (m/s ²)	Modelo de carregamento	Nível de conforto *
1	2,40	0,50	Faisca	Aceitável
		0,30	Semi-senoidal	Aceitável
		0,35	Triangular	Aceitável
15	2,20	1,35	Faisca	Inaceitável
		1,10	Semi-senoidal	Inaceitável
		1,00	Triangular	Inaceitável
15	2,40	6,00	Faisca	**
		4,00	Semi-senoidal	**
		5,00	Triangular	**
20	2,20	1,60	Faisca	Inaceitável
		1,40	Semi-senoidal	Inaceitável
		1,30	Triangular	Inaceitável
20	2,40	8,00	Faisca	**
		5,00	Semi-senoidal	**
		6,00	Triangular	**
* Eurocode [38] ($a_{lim} = 0,7$ m/s ²); BS 5400 [39] ($a_{lim} = 1,10$ m/s ²)				
** Comparação inadequada				

Comparando os resultados com os critérios de conforto humano apresentados pelo Eurocode [38] e BS 5400 [39], as acelerações máximas de todos os modelos matemáticos para uma pessoa excitando em ressonância estão abaixo dos limites propostos pelas normas, que são 0,7 m/s² e 1,10 m/s² ($a_{lim} = 0,7$ m/s² e $a_{lim} = 1,10$ m/s²), respectivamente. Em relação a quinze e vinte pessoas excitando a passarela em quase ressonância ($f_p = 2,20$ Hz), todos os modelos ultrapassam os critérios de conforto humano estabelecidos pelas normas [38] e [39], sendo destacado em negrito na Tabela 15.

Diante disso, a análise conjunta dos resultados, abrangendo todos os casos de carregamento dinâmico, bem como todos os critérios de conforto humano, revela uma tendência de conservadorismo por parte do Guia de Projeto SÉTRA [40] em comparação com a Eurocode [38] e BS 5400 [39].

Além disso, é importante ressaltar que as normas e o guia de critérios de conforto humano utilizados nesta pesquisa não incluem o vandalismo como um tipo de carga humana a ser comparado com os critérios estabelecidos. No entanto, esses documentos técnicos são os disponíveis e adotados como referência para estabelecer limites.

12 CONSIDERAÇÕES FINAIS

12.1 Introdução

O objetivo deste trabalho de pesquisa diz respeito à análise de vibrações e avaliação do conforto humano de passarelas de pedestres submetidas a carregamentos dinâmicos humanos representativos de ações de vandalismo. Para tal, inicialmente, foram desenvolvidos de testes experimentais (vibração livre e vibração forçada), de maneira a caracterizar o comportamento dinâmico de uma passarela de concreto existente, simplesmente apoiada, com vão de 24,4 m, utilizada para a travessia de pedestres, localizada na Faculdade de Engenharia (FEN) da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ). A passarela investigada foi representada numericamente, via modelagem em elementos finitos, por meio do programa ANSYS [5]. Após a calibração do modelo em elementos finitos da estrutura, foram desenvolvidas simulações numéricas tendo em mente análises de vibração livre (frequências naturais e modos de vibração) e de vibração forçada (deslocamentos e acelerações), visando o estudo do conforto humano do sistema. Assim sendo, neste capítulo são apresentadas as principais conclusões alcançadas a partir do desenvolvimento da pesquisa.

12.2 Conclusões

Neste item da dissertação são apresentadas as principais conclusões alcançadas ao longo do desenvolvimento deste trabalho de pesquisa, com base na realização de uma investigação de natureza numérica e experimental, considerando-se para tal, análises do tipo modal e vibração forçada da passarela de pedestre investigada, além de uma avaliação acerca do conforto humano da estrutura.

12.2.1 Análise modal: modelo numérico versus testes experimentais

Os resultados da análise modal numérica e experimental apresentaram boa convergência, considerando-se que o valor da primeira frequência natural da

passarela investigada, igual a 4,85 Hz (modelo numérico), apresentou diferença percentual da ordem de 1,89%, com referência ao valor da frequência determinada experimentalmente, igual a 4,76 Hz. De acordo com este contexto, no que tange aos valores da segunda frequência natural da estrutura, estes foram de 13,79 Hz (modelo numérico) e 17,58 Hz (teste experimental), respectivamente, com uma diferença percentual da ordem de 27,48%. Considerando-se, agora, os valores da terceira frequência natural do modelo estrutural, iguais a 31,84 Hz e 36,26 Hz, modelo numérico e teste experimental, respectivamente, a diferença percentual foi da ordem de 13,88%. Ressalta-se que a segunda e terceira frequências naturais da passarela apresentaram valores elevados, superiores a 10 Hz, e desta maneira pode-se considerar que o modelo em elementos finitos foi simulado de maneira satisfatória, tendo em mente que a frequência fundamental da estrutura (teste experimental: $f_{01} = 4,76$ Hz; modo de vibração de flexão) foi bem representada.

12.2.2 Análise de vibração forçada e modelos de carregamento dinâmico

Objetivando o desenvolvimento das análises de vibração forçada visando posterior avaliação das vibrações excessivas e níveis de conforto humano da passarela, foram considerados neste trabalho de pesquisa modelos matemáticos tradicionais, denominados comumente de “força-dura”, desenvolvidos por Faisca [41] (função Hanning), e Bachmann et al. [42] (funções semi-senoidal e função triangular), de maneira a simular numericamente as ações dinâmicas humanas oriundas de vandalismo.

Assim sendo, foram elaborados modelos de carregamentos para a simulação das cargas dinâmicas provenientes das atividades humanas rítmicas, considerando-se para tais grupos de 1, 15 e 20 pessoas atuando sobre as lajes de concreto da passarela. Em seguida, a resposta estrutural dinâmica da estrutura foi obtida experimentalmente e numericamente em termos dos valores máximos dos deslocamentos translacionais verticais ($u_{máx}$) e dos valores das acelerações máximas ou de pico (a_p).

Com o objetivo de calibrar o modelo numérico, determinando a resposta estrutural dinâmica da passarela analisada (deslocamentos e acelerações) no domínio do tempo e da frequência, foram realizados ensaios experimentais sobre a

estrutura, considerando-se grupos de pessoas divididos em 1, 15 e 20 indivíduos. Assim sendo, para uma pessoa a frequência de excitação foi adotada igual a 2,40 Hz (ressonância); e para quinze e vinte pessoas foram consideradas frequências de excitação de 2,20 Hz (quase ressonância), 2,40 Hz (ressonância), e em uma terceira etapa dos testes experimentais as pessoas saltaram livremente sobre as lajes de concreto da passarela.

Inicialmente, cabe destacar que a comparação entre os resultados numéricos e experimentais obteve melhores aproximações, sob o ponto de vista qualitativo e quantitativo, com base no emprego de uma pessoa excitando a estrutura na condição de ressonância ($f_p = 2,40$ Hz), e mediante a utilização de quinze e vinte pessoas, respectivamente, saltando sobre as lajes de concreto da passarela em uma situação de projeto de quase ressonância ($f_p = 2,20$ Hz). O fato é que foi constatado, via realização dos testes experimentais, a impossibilidade de que quinze ou mesmo vinte pessoas pudessem se manter sincronizadas com referência à frequência ressonante ($f_p = 2,40$ Hz) durante os ensaios.

Assim sendo, tendo em mente, inicialmente, a análise quantitativa dos valores das acelerações máximas (acelerações de pico), determinadas via testes experimentais, considerando-se uma pessoa em ressonância ($f_p = 2,40$ Hz), a aceleração de pico obtida foi igual a $0,40$ m/s² ($a_p = 0,40$ m/s), representando um nível máximo de conforto humano [Classe I do Guia SÉTRA [40]: $a_{lim} = 0 - 0,5$ m/s²].

Considerando-se quinze e vinte pessoas excitando a passarela com uma frequência de excitação muito próxima da ressonância ($f_p = 2,20$ Hz), os valores das acelerações de pico experimentais foram, respectivamente, iguais a $1,30$ m/s² e $1,50$ m/s² ($a_p = 1,30$ m/s² e $a_p = 1,50$ m/s²), sendo que ambos estão associados à Classe III do guia de projeto SÉTRA [40], correspondendo a um nível mínimo de conforto humano [Classe III do Guia SÉTRA [40]: $a_{lim} = 1,0$ m/s² - $2,5$ m/s² - conforto mínimo]. Por outro lado, saltando livremente os valores das acelerações de pico provocados por quinze e vinte pessoas foram, respectivamente, iguais a $1,00$ m/s² e $1,60$ m/s² [Classe II do Guia SÉTRA [40] (15 pessoas): $a_{lim} = 0,5$ m/s² - $1,0$ m/s² - conforto médio. Classe III do Guia SÉTRA [40]: $a_{lim} = 1,0$ m/s² - $2,5$ m/s² - conforto mínimo].

De outra maneira, quando quinze e vinte pessoas, respectivamente, em situação de ressonância ($f_p = 2,40$ Hz) foram utilizadas nos ensaios, os valores das acelerações máximas foram iguais a $0,80 \text{ m/s}^2$ e $1,20 \text{ m/s}^2$ ($a_p = 0,80 \text{ m/s}^2$ e $a_p = 1,20 \text{ m/s}^2$) [Classe II do Guia SÉTRA [40] (15 pessoas): $a_{lim} = 0,5 \text{ m/s}^2 - 1,0 \text{ m/s}^2$ - conforto médio. Classe III do Guia SÉTRA [40] (20 pessoas): $a_{lim} = 1,0 \text{ m/s}^2 - 2,5 \text{ m/s}^2$ - conforto mínimo]. Todavia, novamente, deve-se ressaltar que a condição de ressonância não foi alcançada devido ao fato de que não foi possível obter a sincronia dos indivíduos durante a realização dos testes experimentais.

Destaca-se que em relação ao estado limite de serviço da passarela de concreto investigada (vibrações excessivas), e tomando-se como base os valores dos deslocamentos translacionais verticais máximos, calculados sobre a seção estrutural de maior amplitude da resposta, da ordem de 13 mm e 20 mm, considerando-se para tal uma e vinte pessoas excitando a estrutura na frequência de ressonância ($f_p = 2,40$ Hz), respectivamente, estes valores não ultrapassam o limite estabelecido pela norma brasileira de projeto NBR 6118-2014 [48] ($u_{lim} = \text{vão da estrutura}/350 = 69 \text{ mm}$).

Considerando, agora, a avaliação da resposta estrutural dinâmica da passarela tendo como base os valores das acelerações de pico determinadas via emprego do modelo em elementos finitos, considerando-se uma pessoa excitando a estrutura em ressonância ($f_p = 2,40$ Hz), o valor máximo de aceleração foi calculado via emprego do modelo de carregamento dinâmico proposto por Faisca [41] ($a_p = 0,50 \text{ m/s}^2$), e se encontra em consonância com a Classe I do Guia SÉTRA [40]: $a_{lim} = 0 - 0,5 \text{ m/s}^2$ - conforto máximo.

Por outro lado, quando quinze e vinte pessoas, respectivamente, excitam a estrutura com uma frequência próxima da ressonância ($f_p = 2,20$ Hz), os valores das acelerações de pico, calculadas com base na utilização do modelo de carga dinâmica proposto por Faisca [41], foram iguais a $1,35 \text{ m/s}^2$ e $1,60 \text{ m/s}^2$ ($a_p = 1,35 \text{ m/s}^2$ e $a_p = 1,60 \text{ m/s}^2$) [Classe III do Guia SÉTRA [40]: $a_{lim} = 1,0 \text{ m/s}^2 - 2,5 \text{ m/s}^2$ - conforto mínimo], próximos àqueles determinados a partir dos ensaios experimentais.

De outra maneira, considerando-se quinze pessoas ($f_p = 2,20$ Hz), as acelerações máximas calculadas com base no uso dos modelos de carregamento semi-senoidal [42] e triangular [42] se referem à Classe III do Guia SÉTRA [40], com valores distintos daqueles determinados via testes experimentais, representando assim um nível conforto humano mínimo ($a_{lim} = 1,0$ m/s² - 2,5 m/s² - conforto mínimo) [15 pessoas: $a_p = 1,10$ m/s² (semi-senoidal); $a_p = 1,0$ m/s² (triangular)]. Levando-se em conta, agora, 20 pessoas ($f_p = 2,20$ Hz), novamente o quadro é modificado [$a_p = 1,40$ m/s² (semi-senoidal); 1,30 m/s² (triangular)], o que corresponde a Classe III do Guia SÉTRA [40]: $a_{lim} = 1,0$ m/s² - 2,5 m/s² - conforto mínimo.

Tomando-se como base as normas de projeto Eurocode [38] e BS 5400 [39], o valor da aceleração de pico determinado com base nos modelos matemáticos investigados neste estudo considerando-se uma pessoa excitando a estrutura em ressonância ($f_p = 2,40$ Hz) está abaixo dos limites estabelecidos pelas referidas normas ($a_{lim} = 0,7$ m/s² [38] e $a_{lim} = 1,10$ m/s² [39]). No que tange ao aumento do número de pessoas para quinze e vinte pessoas excitando a passarela, e considerando-se as duas frequências de excitação investigada ao longo do estudo ($f_p = 2,20$ Hz e $f_p = 2,40$ Hz), de maneira geral, os modelos de carregamento dinâmico geram valores de acelerações máximas que violam os limites propostos pelo projeto Eurocode [38]; e, na maioria dos casos também ultrapassam o limite recomendado pela norma BS 5400 [39].

Um ponto que merece destaque nas análises diz respeito ao emprego dos modelos de carregamento dinâmico (modelos numéricos: Faisca [41], semi-senoidal [42] e triangular [42]), na condição de ressonância ($f_p = 2,40$ Hz). O fato é que estes modelos de força dura não levam em conta o efeito da interação dinâmica indivíduo-estrutura, o efeito da diferença de fase existente entre as excitações dinâmicas produzidas pelos indivíduos, assim como também não consideram o amortecimento das pessoas. Portanto, os valores das acelerações de pico calculadas numericamente, com base no emprego destes modelos matemáticos, em especial na condição de ressonância, são demasiadamente elevados (da ordem de 4 m/s² a 8 m/s²), e não correspondem a realidade prática de projeto, conforme foi constatado a partir dos resultados obtidos via testes experimentais.

Neste sentido, como conclusão final deste trabalho de pesquisa, ressalta-se que as respostas dinâmicas obtidas mediante a utilização dos modelos matemáticos

de força-dura (modelagem numérica) podem não ser suficientes para uma avaliação de projeto mais econômico e realista, no que tange a avaliação de vibrações excessivas e dos níveis de conforto humano de passarelas de pedestres. Deste modo, torna-se imperativo o desenvolvimento de modelos matemáticos biodinâmicos, via campanhas de testes experimentais e modelagem numérica, objetivando incorporar na análise estrutural o efeito da interação dinâmica pedestre-estrutura, o efeito do faseamento das ações dinâmicas produzidas pelos diferentes indivíduos; e, ainda, o efeito do amortecimento das pessoas.

12.2.2 Sugestões para trabalhos futuros

A continuação do desenvolvimento desta dissertação de mestrado indica as seguintes sugestões para trabalhos de pesquisa futuros:

- a) Desenvolvimento de testes experimentais e modelagem numérica através do uso de modelos biodinâmicos, objetivando uma representação mais fidedigna dos indivíduos, no que tange a consideração do efeito da interação dinâmica pedestre-estrutura. Inicialmente, deverão ser utilizados modelos matemáticos simples com apenas um grau de liberdade, composto por um sistema de massa, mola e amortecedor.
- b) Desenvolver estudos paramétricos de maneira a modificar a geometria dos elementos estruturais (lajes, vigas e pilares), e também de outras grandezas relevantes para a resposta dinâmica, tal como o amortecimento estrutural.
- c) Desenvolvimento de estudos numéricos e experimentais com sistemas estruturais de passarelas com diferentes tipos de materiais (aço, aço-concreto, e madeira), objetivando a realização de estudos comparativos.
- d) Considerar sistemas estruturais de passarelas mais flexíveis, com diferentes faixas de frequências naturais, de modo a investigar a ressonância estrutural em relação ao primeiro harmônico da excitação dinâmica.

e) Desenvolvimento de simulações numéricas, com base no emprego do método de Monte Carlo, no que tange a geração aleatória dos parâmetros dos modelos biodinâmicos.

f) Desenvolvimento de testes experimentais com os indivíduos utilizando fone de ouvido conectado via *bluetooth* a uma caixa acústica, onde cada indivíduo escuta de forma individual os pulsos sonoros referentes às frequências de excitação dos ensaios.

REFERÊNCIAS

- [1] RIBEIRO, LUCAS ALVES. Passarela e Fé! Temos Engenharia em Aparecida do Norte ? Publicado em 12 de outubro de 2021. Disponível em: https://blogdaengenharia.com/engenharia/engenhariacivil/arquitetura/passarela_da_fe/, Acesso em: 10 de fevereiro de 2024.
- [2] STRUCTURAE. Trumpf Footbridge. Disponível em: <https://structurae.net/en/structures/trumpf-footbridge/>, Acesso em: 10 de fevereiro de 2024.
- [3] BEHANCE. Pedestrian & Cycle Bridges. Disponível em: <https://www.behance.net/gallery/35459475/Pedestrian-Cycle-Bridges/>, Acesso em: 10 de fevereiro de 2024.
- [4] BBC NEWS. Scores hurt as US bridge collapses. Publicado em 21 de Maio de 2000. Disponível em: <http://news.bbc.co.uk/1/hi/world/americas/757611.stm>, Acesso em: 10 de fevereiro de 2024.
- [5] ANSYS Swanson Analysis Systems, Inc., P. O. Box 65, Johnson Road, Houston, PA, 15342-0065. Release 11.0, SP1 UP20070830, ANSYS, Inc. is a UL registered ISO 9001:2000 Company. Products ANSYS AcademicResearch, 2012.
- [6] BROWNJOHN, J.M.W., DUMANOGLU, A.A., TAYLOR, C.A. Dynamic Investigation of a Suspension Footbridge. *Engineering Structures*, 16 (6), p.395- 406, 1994.
- [7] BALTAR, Ana Cecília Uchôa Cavalcanti Vasconcelos. Vibrações induzidas por atividades humanas em passarelas. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil , PECC. Universidade De Brasília, UNB, Brasília, DF, Brasil, 161p, 2000.
- [8] CAETANO, E., CUNHA, A. Study of the potential of collapse of a footbridge under vandalism loads, Portugal. IABSE symposium Lisbon, p.1-9, Elsevier 2005.

- [9] FIGUEIREDO, F.P. Estudo do comportamento dinâmico de passarelas devido ao caminhar de pedestres. Dissertação de Mestrado, Programa de PósGraduação em Engenharia Civil, PGE CIV, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2005.
- [10] ŽIVANOVIĆ, S., PAVIĆ, A., REYNOLDS, P. Vibration serviceability of footbridges under human-induced excitation: a literature review. *International Journal of Sound and Vibration*, v. 279, No. 1-2, p.1-74, 2005.
- [11] HUANGA, M.H., THAMBIRATNAMA, D.P., PERERA N.J. Dynamic Performance of Slender Suspension Footbridges Under Eccentric Walking Dynamic Loads. *Journal of Sound and Vibration*, 303, p.239-254, 2007.
- [12] BROWNJOHN, J.M.W., PAVIC, A. Experimental Methods for Estimating Modal Mass in Footbridges Using Human-Induced Dynamic Excitation. *Engineering Structures*, 29, p.2833-2843, 2007.
- [13] NHLEKO, S., ZINGONI, A., MOYO P. A Variable Mass Model for Describing Load Impulses Due to Periodic Jumping. *Engineering Structures*, v.30, n 6, p.1760-1769, 2008.
- [14] NÁPRSTEK, J., FISCHER, C. Auto-Parametric Semi-Trivial and Post-Critical Response of a Spherical Pendulum Damper. *Computers and Structures*, 87, p.1204-1215, 2009.
- [15] NAKAMURA, S., KAWASAKI, T. A Method for Predicting the Lateral Girder Response of Footbridges Induced by Pedestrians. *Journal of Constructional Steel Research*, 65, p.1705-1711, 2009.
- [16] BRUNO, L., VENUTI, F. Crowd–Structure Interaction in Footbridges: Modelling, Application to a Real Case-Study and Sensitivity Analyses. *Journal of Sound and Vibration*, 323, p.475-493, 2009.

[17] CAETANO, E., CUNHA, A., MAGALHAES, F. e MOUTINHO, C. Studies for controlling human-induced vibration of the Pedro e Inês footbridge, Portugal. Part1: Assessment of dynamic behavior, p.1069-1081, Elsevier 2010.

[18] DEBONA, Gilvan Lunz.; Monitoração experimental e modelagem numérica sobre a resposta estrutural dinâmica de passarela de pedestres. Tese de Doutorado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, PGECIV. Universidade do estado do Rio de Janeiro, UERJ., Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 349p.

[19] PICCARDO, G., TUBINO F. Equivalent Spectral Model and Maximum Dynamic Response for the Serviceability Analysis of Footbridges. Engineering Structures, 40, p. 445-456, 2012.

[20] ZÚÑIGA, J. E. V.; Análise da resposta dinâmica experimental de uma passarela tubular mista, aço-concreto, submetida ao caminhar humano. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, PGECIV. Universidade do estado do Rio de Janeiro, UERJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 187p, 2011.

[21] BOCIAN, M., MACDONALD, J. H. G., BURN, J. F., Biomechanically Inspired Modeling of Pedestrian-Induced Vertical Self-Excited Forces, American Society of Civil Engineers, 2013.

[22] DUARTE, I. F. B.; Resposta estrutural dinâmica e análise do conforto humano em passarelas de pedestres. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, PGECIV. Universidade do estado do Rio de Janeiro, UERJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 180p, 2016.

[23] PEREIRA, S. P. Desempenho dinâmico de sistemas estruturais de passarelas. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil, PECC. Universidade De Brasília, UNB, Brasília, DF, Brasil, 130p, 2017.

[24] 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.

- [25] BASSOLI, E., GAMBARELLI, P., & VINCENZI, L. (2018). Human-induced vibrations of a curved cable-stayed footbridge. *Journal of Constructional Steel Research*, 146, 84–96. doi:10.1016/j.jcsr.2018.02.001.
- [26] BATISTA, M. D. Análise dinâmica e controle de vibrações em passarela da octogonal - Brasília. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Brasília Universidade de Brasília, UNB, Brasília, DF, Brasil, 2018.
- [27] KUMAR, P., KUMAR, A., RACIC, V., & ERLICHER, S. (2018). Modelling vertical human walking forces using self-sustained oscillator. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 99, 345–363. doi:10.1016/j.ymsp.2017.06.014.
- [28] SILVA, I. A. R. Análise experimental e modelagem numérica para avaliação do efeito da interação pedestre-estrutura sobre o comportamento dinâmico de passarelas. Tese de Doutorado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, PGECIV. Universidade do estado do Rio de Janeiro, UERJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 208p, 2020.
- [29] GONZAGA, I. B. N. Interação entre estrutura de passarela e multidão via uso de modelos biodinâmicos. Dissertação de mestrado. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro/RJ, Brasil, 114p, 2021.
- [30] GÓRSKI, P.; TATARA, M.; STANKIEWICZ, B.; Vibration serviceability of allGFRP cable-stayed footbridge under various service excitations. *Science Direct, Measurement*, 2021.
- [31] HAWRYSZKÓW, P. Assessment of pedestrian comfort and safety of footbridges in dynamic conditions: case study of a landmark arch footbridge Polônia. *Builder Science I Assessment of pedestrian comfort and Safety of footbridge*, p.1-5, Elsevier 2021.
- [32] RUIZ, D. V.; Verificação experimental de modelo de caminhada bípede para a simulação de cargas verticais induzidas por humanos. Tese de Doutorado. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro/RJ, Brasil, 2021.

[33] HE, W.; HE, K.; CUI, H.; WANG, G.; Using a rhythmic human shaker to identify modal properties of a stationary human body on a footbridge. *Journal of Sound and Vibration*, 2022.

[34] RODRÍGUEZ-SUESCA, A. R.; GUTIÉRREZ-JUNCO, O. J.; HERNÁNDEZMONTES, E.; Vibration performance assessment of deteriorating footbridges: A study of Tunja's public footbridges. *Science Direct, Engineering Structures*, 2022.

[35] SANTOS, E. A. R. Análise de vibrações e avaliação do conforto humano de pisos mistos (aço-concreto) submetidos a carregamentos dinâmicos humanos rítmicos. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, PGECIV. Universidade do estado do Rio de Janeiro, UERJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 150p, 2022.

[36] YAHIA, M. A.; RAJAI, Z. A.; AMEEN, A. L.; ONUR, A.; Vibration serviceability investigation of a curved footbridge. *American Society of Civil Engineers (ASCE)*, 2022.

[37] MOREIRA, L. S. S. Análise de vibrações e avaliação do conforto humano de passarelas mistas (aço-concreto) submetidas a carregamentos induzidos por pedestres. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, PGECIV. Universidade do estado do Rio de Janeiro, UERJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 187p, 2023.

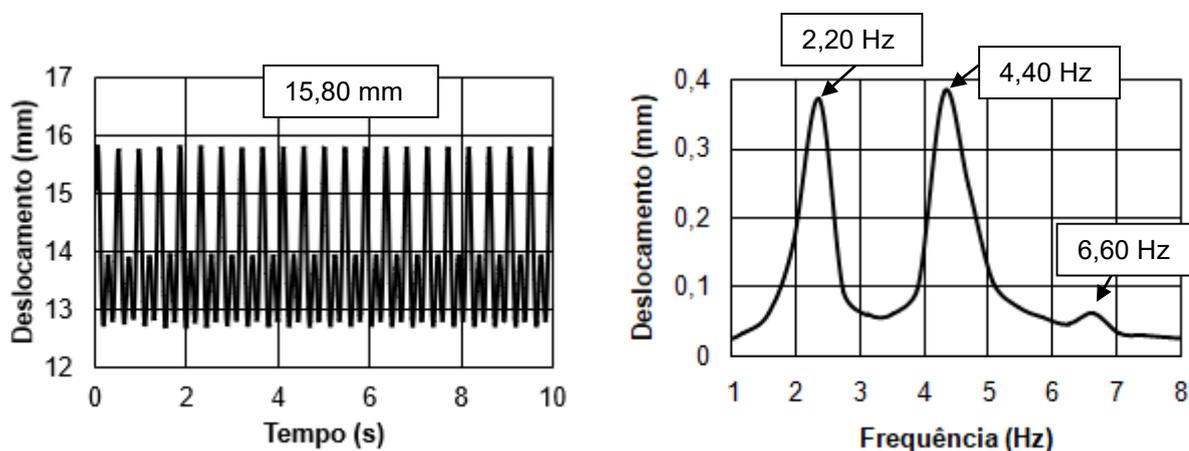
[38] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. EUROCODE 5 (prEN1995- 1-2): design of timber structures, Part 1-2: Bridges. Brussels, 1993.

[39] BRITISH STANDARDS INSTITUTION. BS5400: Steel, concrete and composite bridges: specification for loads: Part 2, Appendix C. London: British Standards Association, 1978.

- [40] SÉTRA Footbridge - Assessment of Vibrational Behaviour of Footbridge Under Pedestrian Loading, Technical guide. Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes, Paris, 2006.
- [41] FAISCA, R. G. Caracterização de Cargas Dinâmicas Geradas por Atividades Humanas, 230f. Tese de Doutorado - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, BRASIL, 2003.
- [42] BACHMANN, H. e AMMANN, W. Vibrations in structures induced by man and machines, Structural Engineering Document 3e, International Association for Bridges and Structural Engineering, 1987.
- [43] CHOPRA, A. K. Dynamics of structures – Theory and applications to earthquake engineering. Prentice-Hall, Inc. New Jersey, 1995.
- [44] CLOUGH, R. W., PENZIEN, J; Dynamics of Structures; McGraw-Hill, 634p, 1993.
- [45] CRAIG JR., R. R. Structural Dynamics. John Wiley & Sons, 527 p, 198.
- [46] AVELINO, Alves Filho. Elementos Finitos: A base da tecnologia CAE: Análise Dinâmica. Ed Érica, 2008. 304 p.
- [47] NEWMARK, Nathan M. A Method of Computation for Structural Dynamics. Journal of Engineering Mechanics Division. Volume 85 Issue 3. Urbana, USA. 1959.
- [48] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto: Procedimento. Rio de Janeiro, 2014. 238 p.

APÊNDICE

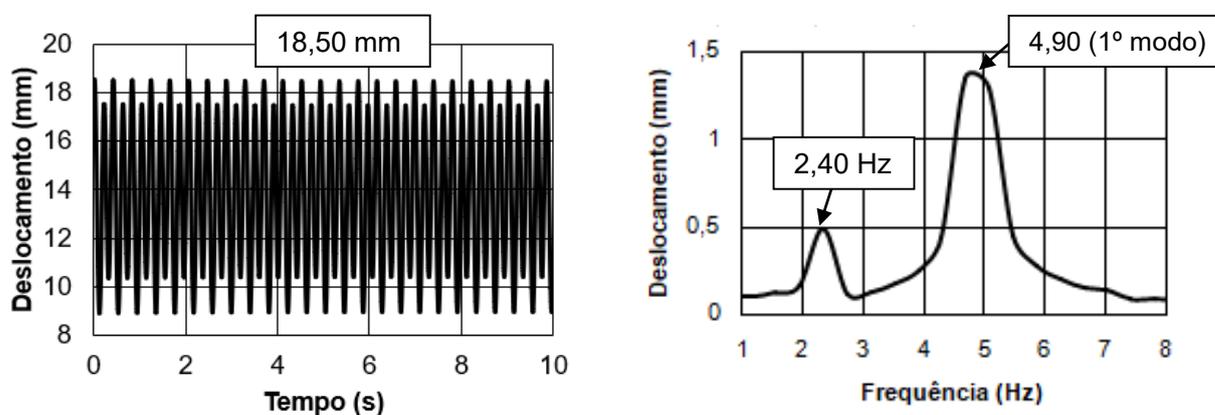
I. Modelo de carregamento dinâmico: 15 pessoas



(a) Deslocamento no domínio do tempo

(b) Deslocamento no domínio da frequência

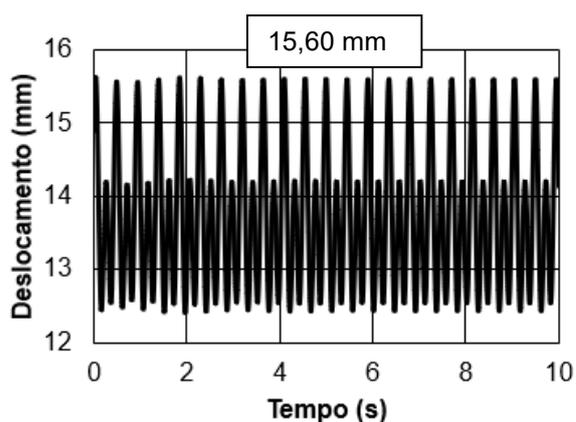
Figura 93: Deslocamento. Quase ressonância ($f = 2,20$ Hz; $T = 0,45$ s; $T_p = 0,27$ s; $k_p = 3,33$) (Função semi-senoidal [42])



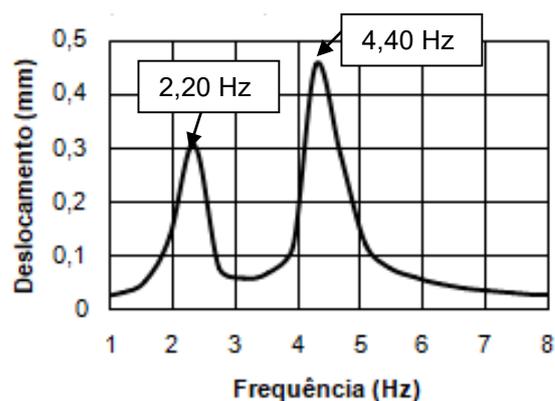
(a) Deslocamento no domínio do tempo

(b) Deslocamento no domínio da frequência

Figura 94: Deslocamento. Ressonância ($f = 2,40$ Hz; $T = 0,41$ s; $T_p = 0,25$ s; $k_p = 3,28$) (Função semi-senoidal [42])

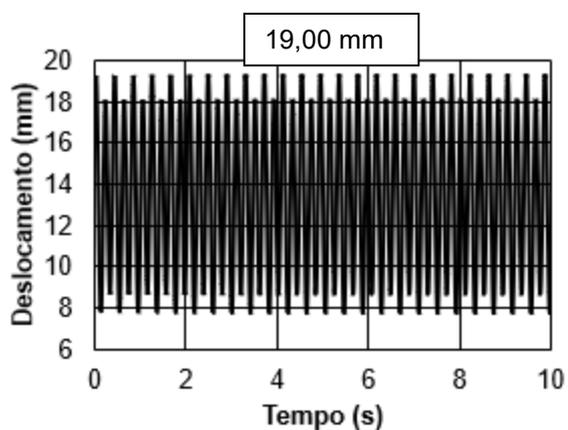


(a) Deslocamento no domínio do tempo

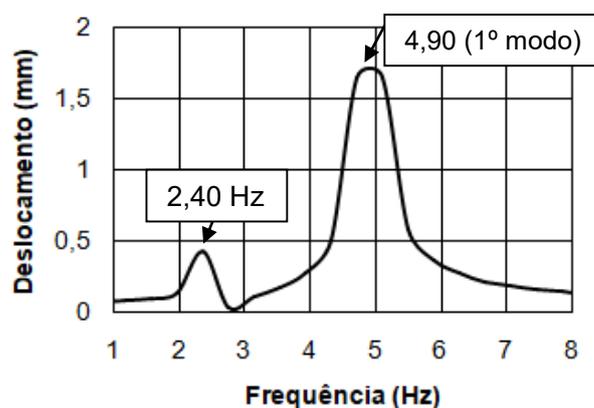


(b) Deslocamento no domínio da frequência

Figura 95: Deslocamento. Quase ressonância ($f = 2,20$ Hz; $T = 0,45$ s; $T_p = 0,27$ s; $k_p = 3,33$) (Função triangular [42])



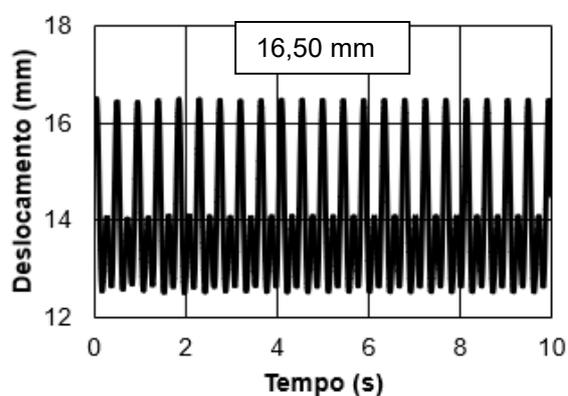
(a) Deslocamento no domínio do tempo



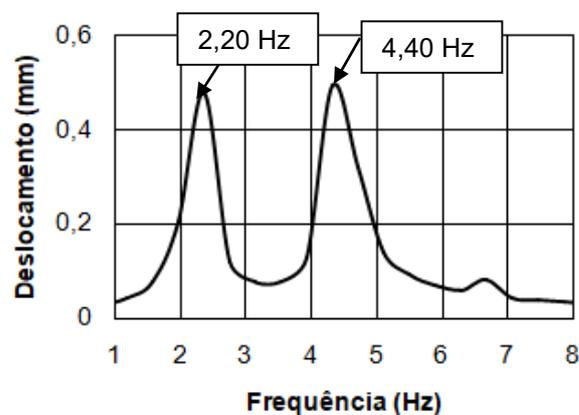
(b) Deslocamento no domínio da frequência

Figura 96: Deslocamento. Ressonância ($f = 2,40$ Hz; $T = 0,41$ s; $T_p = 0,25$ s; $k_p = 3,28$) (Função triangular [42])

II. Modelo de carregamento dinâmico: 20 pessoas

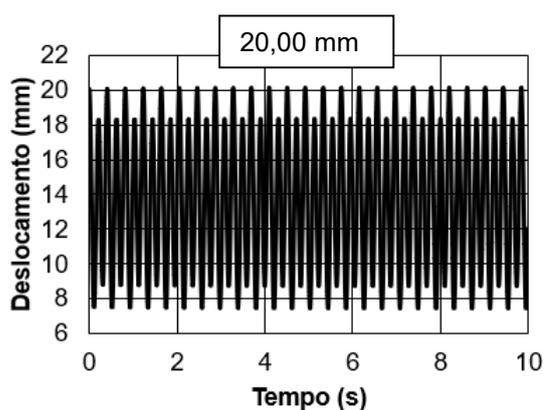


(a) Deslocamento no domínio do tempo

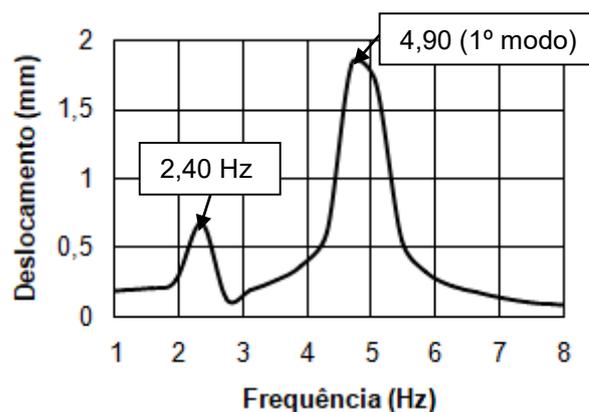


(b) Deslocamento no domínio da frequência

Figura 97: Deslocamento. Quase ressonância ($f = 2,20$ Hz; $T = 0,45$ s; $T_p = 0,27$ s; $k_p = 3,33$) (Função semi-senoidal [42])

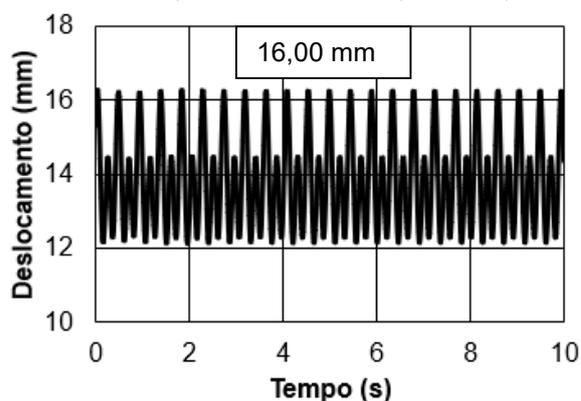


(a) Deslocamento no domínio do tempo

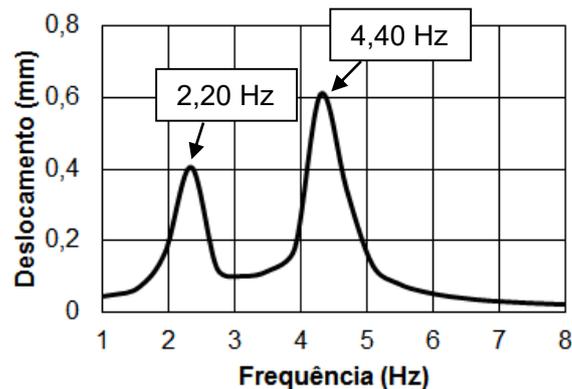


(b) Deslocamento no domínio da frequência

Figura 98: Deslocamento. Ressonância ($f = 2,40$ Hz; $T = 0,41$ s; $T_p = 0,25$ s; $k_p = 3,28$) (Função semi-senoidal [42])

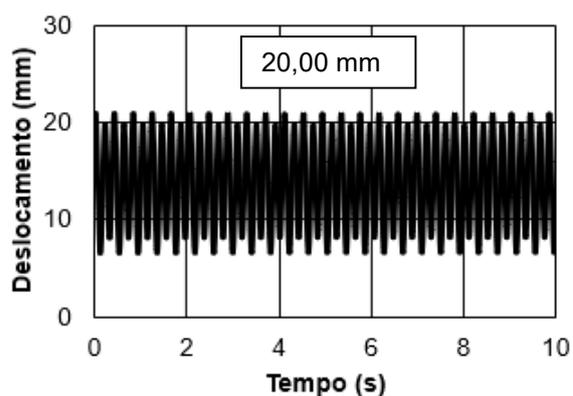


(a) Deslocamento no domínio do tempo

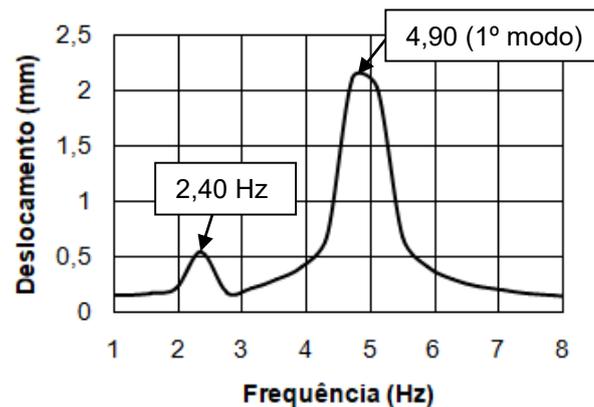


(b) Deslocamento no domínio da frequência

Figura 99: Deslocamento. Quase ressonância ($f = 2,20$ Hz; $T = 0,45$ s; $T_p = 0,27$ s; $k_p = 3,33$) (Função triangular [42])



(a) Deslocamento no domínio do tempo



(b) Deslocamento no domínio da frequência

Figura 100: Deslocamento. Ressonância ($f = 2,40$ Hz; $T = 0,41$ s; $T_p = 0,25$ s; $k_p = 3,28$) (Função triangular [42])