



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

Paula de Oliveira Bezerra Diniz

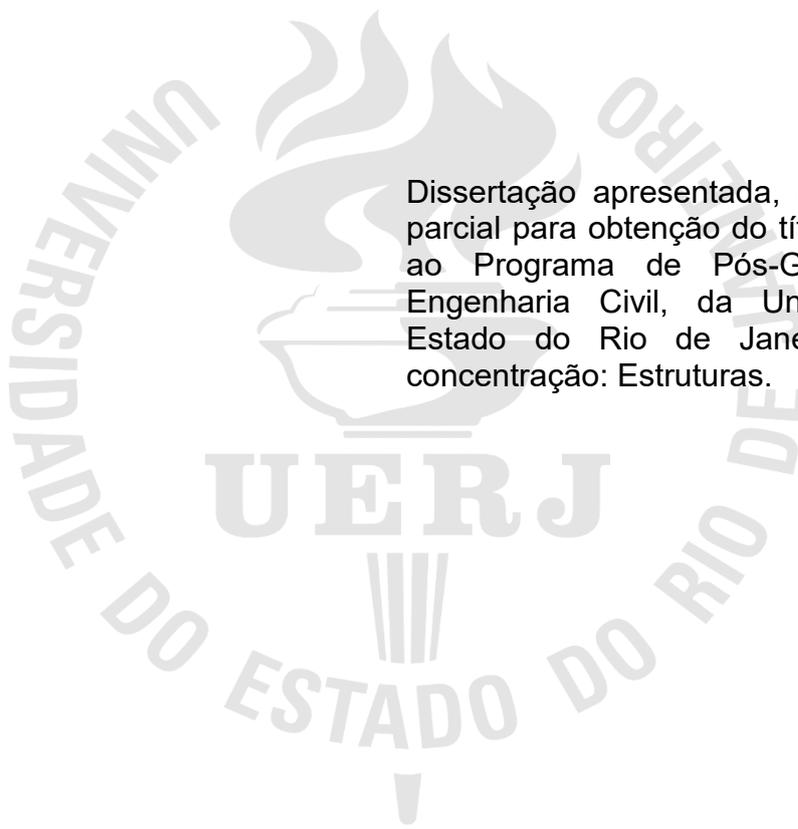
**Avaliação do conforto humano de passarelas de pedestres com
base no desenvolvimento de uma metodologia de análise
probabilística**

Rio de Janeiro

2024

Paula de Oliveira Bezerra Diniz

Avaliação do conforto humano de passarelas de pedestres com base no desenvolvimento de uma metodologia de análise probabilística



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.

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

Rio de Janeiro

2024

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

D585 Diniz, Paula de Oliveira Bezerra.
Avaliação do conforto humano de passarelas de pedestres com base no desenvolvimento de uma metodologia de análise probabilística / Paula de Oliveira Bezerra Diniz. – 2024.
160 f.

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

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

Paula de Oliveira Bezerra Diniz

Avaliação do conforto humano de passarelas de pedestres com base no desenvolvimento de uma metodologia de análise probabilística

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

Aprovada em:

Banca Examinadora:

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

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

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

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

Rio de Janeiro

2024

DEDICATÓRIA

A Deus e à minha família.

AGRADECIMENTOS

A Deus por sua graça e misericórdia. Por ser o refúgio e fortaleza durante todo o processo. A Ele seja toda honra, glória e louvor.

Ao meu esposo, Lucas Barbosa Botelho, por toda compreensão, companheirismo, ajuda, encorajamento e palavras de ânimo nos momentos de dedicação deste trabalho.

Ao Jorge Maurício por toda ajuda, auxílio e transmissão de conhecimento nesse trabalho de pesquisa.

Aos amigos e familiares por sempre estarem intercedendo em oração.

Ao meu orientador, Professor José Guilherme, por todos os conhecimentos passados, paciência, incentivo e direcionamento ao longo do desenvolvimento do trabalho de pesquisa.

Ao professor, Gilvan Debona, por todo auxílio, paciência e incentivo durante os ensaios experimentais.

Porque Dele e por Ele, e para Ele, são todas as coisas;
glória, pois, a Ele eternamente. Amém.

Romanos 11:36

RESUMO

DINIZ, Paula de Oliveira Bezerra. *Avaliação do conforto humano de passarelas de pedestres com base no desenvolvimento de uma metodologia de análise probabilística*. 2024. 160 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

Atualmente, os projetos estruturais de passarelas de pedestres têm se tornado cada vez mais arrojados, modernos, leves e esbeltos. Contudo, passarelas de pedestres esbeltas são mais sensíveis a excitações dinâmicas e podem sofrer alterações nos estados limites de serviço referentes a vibrações excessivas. As normas de projeto e guias técnicos recomendam o uso de modelos matemáticos determinísticos para avaliar o comportamento estrutural dinâmico de passarelas. Porém, o caminhar humano é um fenômeno estocástico e a força dinâmica gerada em cada passo depende do peso, da frequência do passo e do comprimento do passo de cada indivíduo. Assim sendo, este trabalho de pesquisa visa contribuir com os projetistas estruturais com base no desenvolvimento de uma metodologia de análise com abordagem probabilística para avaliação do comportamento dinâmico de passarelas de pedestres, com base na geração de espectros de resposta de projeto, considerando-se para tal a natureza estocástica do caminhar humano, objetivando analisar a resposta estrutural em relação às vibrações excessivas que possam causar desconforto humano. Deste modo, ao longo do estudo, o comportamento estrutural dinâmico de três passarelas de pedestres existentes e situadas na cidade do Rio de Janeiro/RJ é investigado. Com base na utilização da metodologia de análise probabilística desenvolvida, torna-se possível determinar a probabilidade dos valores de pico de aceleração das passarelas excederem ou não os critérios recomendados para avaliação do conforto humano. Os resultados obtidos neste trabalho de pesquisa revelam que as acelerações de pico determinadas via emprego dos métodos determinísticos podem ser superestimadas em situações de projeto.

Palavras-chave: Passarelas de pedestres; Análise dinâmica de estruturas; Métodos probabilísticos; Avaliação do conforto humano; Modelagem em elementos finitos.

ABSTRACT

DINIZ, Paula de Oliveira Bezerra. *Human comfort assessment of pedestrian footbridges based on the development of a probabilistic analysis methodology*. 2024. 160 f. Dissertation (Master's in Civil Engineering) - Faculty of Engineering, State University of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

Currently, the pedestrian footbridges structural projects have become increasingly bold, modern, light and slender. However, slender pedestrian footbridges are more sensitive to dynamic excitations and may undergo changes in serviceability limit states related to excessive vibrations. Design standards and technical guides recommend the use of deterministic mathematical models to assess the footbridges dynamic structural behaviour. However, the human walking is a stochastic phenomenon and the dynamic force generated in each step depends on the weight, step frequency and step length of each individual. Therefore, this research work aims to contribute to the structural designers based on the development of an analysis methodology with a probabilistic approach for assessing the pedestrian footbridges dynamic behaviour, based on the generation of design response spectra, considering the stochastic nature of the human walking, aiming to analyse the structural response in relation to excessive vibrations that may cause human discomfort. This way, throughout the study, the dynamic structural behaviour of three existing pedestrian footbridges located at the city of Rio de Janeiro/RJ is investigated. Based on the use of the developed probabilistic analysis methodology, it becomes possible to determine the probability of the footbridge's peak acceleration values exceeding or not the recommended criteria for human comfort assessment. The results obtained in this research work reveal that the peak accelerations determined using deterministic methods can be overestimated in design situations.

Keywords: Pedestrian footbridges; Dynamic analysis of structures; Probabilistic methods; Human comfort assessment; Finite element modelling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Desabamento de uma passarela em Carolina do Norte/EUA [1]	20
Figura 2 - Millennium Footbridge localizada em Londres sobre o Rio Tâmis [2]	21
Figura 3 - Passarela Simone de Beauviour sobre Rio Sena [3]	22
Figura 4 - Passarela Solferino localizada em Paris [4]	23
Figura 5 - Passarela Toda Park Bridge localizada no Japão [5]	23
Figura 6 - Estrutura utilizada para a realização de testes experimentais [23]	29
Figura 7 - Coeficiente relacionado a frequência natural da passarela [32]	36
Figura 8 - Fator de redução da resposta dinâmica. Casos 1 e 2 [15]	42
Figura 9 - Fator de redução da resposta dinâmica . Caso 3 [15]	42
Figura 10- Aceleração de pico recomendada para conforto humano em vibrações devido a atividades humanas ISO 2631/2 [55]	46
Figura 11 - Descrição variável aleatória discreta e continua	51
Figura 12 - Pontos de inflexão da curva de distribuição normal [58]	53
Figura 13 - Curva característica de uma distribuição normal	54
Figura 14 - Função de densidade de probabilidade da frequência de passo (f_p)	57
Figura 15 - Vista lateral da passarela I	59
Figura 16 - Vista frontal da passarela I	59
Figura 17 - Vista interna da passarela I	60
Figura 18 - Vista inferior da passarela I	60
Figura 19 - Vista do apoio da passarela I	60
Figura 20 - Projeto da passarela I. Vista superior	61
Figura 21 - Projeto da passarela I. Seção longitudinal	61
Figura 22 - Projeto da passarela I. Seção transversal	61
Figura 23 - Vista do trecho analisado da passarela II [63]	62
Figura 24 - Projeto da passarela II. Vista superior [63]	62
Figura 25 - Vista em detalhes dos perfis adicionais as longarinas [63]	63
Figura 26 - Seção transversal da passarela II [63]	63
Figura 27 - Vista do trecho analisado da passarela III [64]	64
Figura 28 - Vista amplificada do trecho analisado da passarela III [64]	64
Figura 29 - Vista inferior dos elementos da laje pré moldada [64]	65

Figura 30 - Projeto passarela III. Vista longitudinal e transversal [64].....	65
Figura 31 - Modelo em elementos finitos. Passarela I (ME-I).....	67
Figura 32 - Modelo em elementos finitos. Passarela II (ME-II) [63].....	68
Figura 33 - Modelo em elementos finitos. Passarela III (ME-III) [64].....	69
Figura 34 - Acelerômetro PCB Pieztronics	73
Figura 35 - Acelerômetro PCB e cabo de conexão	74
Figura 36 - Vistas do acelerômetro PCB Piezonics	74
Figura 37 - ADS 2500 (Sistema de aquisição de dados).....	75
Figura 38 - Software AqDados 7.5.8	75
Figura 39 - Software AqAnalysis 7.5	76
Figura 40 - Vistas do Shaker S 51140-M	77
Figura 41 - Amplificador de potência.....	78
Figura 42 - Aplicativo NCH ToneGenerator.....	78
Figura 43 - Localização dos acelerômetros.....	79
Figura 44 - Shaker S 51140-M	80
Figura 45 - Amplificador de potência e gerador de sinal (NCH ToneGenerator).....	81
Figura 46 - Posicionamento dos acelerômetros	81
Figura 47 - Acelerômetros conectados ao ADS 2500 e controlado por computador.	82
Figura 48 - 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).....	83
Figura 49 - 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).....	83
Figura 50 - 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 (Vertical).....	83
Figura 51 - 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).....	84
Figura 52 - 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).....	84

Figura 53 - 1º modo de vibração experimental ($\xi = 1,70\%$).....	85
Figura 54 - 2º modo de vibração experimental ($\xi = 1,15\%$).....	85
Figura 55 - 3º modo de vibração experimental ($\xi = 1,02\%$).....	86
Figura 56 - 1º modo de vibração f_{02} : 4,85 Hz	89
Figura 57 - 2º modo de vibração f_{02} : 8,35 Hz	89
Figura 58 - 3º modo de vibração f_{03} : 13,79 Hz	89
Figura 59 - 4º modo de vibração f_{04} : 15,77 Hz	90
Figura 60 - 5º modo de vibração f_{05} : 18,73 Hz	90
Figura 61 - 6º modo de vibração f_{06} :30,77 Hz	90
Figura 62 - 7º modo de vibração f_{07} : 31,84 Hz	91
Figura 63 - 8º modo de vibração f_{08} : 32,10 Hz	91
Figura 64 - 9º modo de vibração f_{09} : 41,91 Hz	91
Figura 65 - 10º modo de vibração f_{10} : 48,76 Hz	92
Figura 66 - 1º modo de vibração f_{01} : 3,83 Hz	93
Figura 67 - 1º modo de vibração f_{01} : 1,85 Hz	94
Figura 68 - Metrônomo	96
Figura 69 - Caixa de som	96
Figura 70 - Sistema de aquisição de dados	96
Figura 71 - Seção de análise da estrutura	97
Figura 72 - Posicionamento dos acelerômetros	97
Figura 73 - Caminhada em ressonância (2,40 Hz): 1 pessoa	98
Figura 74 - Uma pessoa caminhando (f_p - 2,40 Hz)	98
Figura 75 - Seção investigada: 1/2 do vão	99
Figura 76 - Resposta dinâmica estrutural da passarela. 1 pessoa (2,40 Hz)	99
Figura 77 - Caminhada em ressonância (2,40 Hz): 7 pessoas.....	100
Figura 78 - Sete pessoas caminhando (f_p - 2,40 Hz).....	100
Figura 79 - Seção investigada: 1/2 do vão	101
Figura 80 - Resposta dinâmica estrutural da passarela. 7 pessoas (2,40 Hz)	101
Figura 81 - Caminhada em ressonância (2,40 Hz): 12 pessoas.....	102
Figura 82 - Doze pessoas caminhando (f_p - 2,40 Hz).....	102
Figura 83 - Seção investigada: 1/2 do vão	103
Figura 84 - Resposta dinâmica estrutural da passarela. 12 pessoas (2,40 Hz)	103
Figura 85 - Geometria simplificada de uma passada [70]	105

Figura 86 - Caminhar de um único pedestre sobre a passarela.....	113
Figura 87 - Função densidade de probabilidade da frequência do passo	115
Figura 88 - Função densidade de probabilidade do comprimento do passo	115
Figura 89 - Função densidade de probabilidade da intravariabilidade do passo.....	116
Figura 90 - Função densidade de probabilidade do peso	116
Figura 91 - Coeficientes dinâmicos Rainer et al [67].....	118
Figura 92 - Coeficientes dinâmicos Young apud Haucksson [68]	118
Figura 93 - Comparação coeficientes dinâmicos 1º harmônico.....	119
Figura 94 - Comparação coeficientes dinâmicos 2º harmônico.....	119
Figura 95 - Comparação coeficientes dinâmicos 3º harmônico.....	120
Figura 96 - Comparação coeficientes dinâmicos 4º harmônico.....	120
Figura 97 - Comparação aceleração de pico experimental e analítica	122
Figura 98 - Metodologias de análises propostas para geração de espectros de respostas.....	126
Figura 99 - Espectro de resposta para aceleração de pico. Passarela I ($\xi = 1,7\%$)	128
Figura 100 - Espectro de resposta para aceleração de pico. Passarela II ($\xi = 1,5\%$)	128
Figura 101 - Espectro de resposta para aceleração de pico. Passarela III ($\xi = 0,23\%$)	129
Figura 102 - Espectro de resposta para aceleração de pico. M-I (RN): L=24,4 m ..	131
Figura 103 - Espectro de resposta para aceleração de pico. M-I (RN): L=53,5 m ..	131
Figura 104 - Espectro de resposta para aceleração de pico. M-I (RN): L=68,6 m ..	132
Figura 105 - Espectro de resposta para aceleração de pico. M-II (RN): L=24,4 m .	134
Figura 106 - Espectro de resposta para aceleração de pico. M-II (RN): L=58,5 m .	135
Figura 107 - Espectro de resposta para aceleração de pico. M-II (RN): L=68,6 m .	135
Figura 108 - Espectro de resposta para aceleração de pico. M-I (YG): L=24,4 m ..	137
Figura 109 - Espectro de resposta para aceleração de pico. M-I (YG): L=53,5 m ..	137
Figura 110 - Espectro de resposta para aceleração de pico. M-I (YG): L=68,6 m ..	138
Figura 111 - Espectro de resposta para aceleração de pico. M-II (YG): L=24,4 m .	141
Figura 112 - Espectro de resposta para aceleração de pico. M-II (YG): L=53,5 m .	141
Figura 113 - Espectro de resposta para aceleração de pico. M-II (YG): L=68,6 m .	142
Figura 114 - Resposta da aceleração: 1º harmônico L=24,4 m (M-II (RN))	144

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Determinação do conforto da passarela.....	38
Tabela 2 - Faixa de acelerações para vibrações verticais.....	38
Tabela 3 - Faixa de acelerações para vibrações horizontais	39
Tabela 4 - Risco de ressonância na direção vertical e longitudinal	39
Tabela 5 - Risco de ressonância na direção transversal	39
Tabela 6 - Casos de carga	40
Tabela 7 - Funções de carga para casos 1 e 2	40
Tabela 8 - Funções de carga para caso 3.....	40
Tabela 9 - Amortecimento recomendado pelo guia Sétra [15]	41
Tabela 10 - Classes de tráfego e densidade	43
Tabela 11 - Classe de conforto	44
Tabela 12 - Parâmetros recomendado pelo guia HIVOSS [16].....	45
Tabela 13 - Amortecimento recomendado pelo guia HIVOSS [16]	45
Tabela 14 - Frequência de excitação e coeficientes dinâmicos [48]	47
Tabela 15- Valores recomendados para os parâmetros P_0 , β e a_0/g [48].....	49
Tabela 16 - Acelerações máximas verticais propostas por normas e guias	49
Tabela 17 - Geração dos valores da frequência de passo	57
Tabela 18 - Frequências naturais numéricas da Passarela I (ME-I).....	88
Tabela 19 - Propriedades modais da Passarela I (ME-I).....	88
Tabela 20 - Comparação dos valores das frequências naturais	92
Tabela 21 - Ensaio de vibração forçada da Passarela I (ME-I)	97
Tabela 22 - Parâmetros estatísticos do caminhar humano	114
Tabela 23 - Coeficientes dinâmicos	117
Tabela 24 - Características das passarelas referenciais	123
Tabela 25 - Comparação as acelerações experimentais e $a_{95\%}$ (M-I)	127
Tabela 26 - Comparação as acelerações experimentais e $a_{95\%}$ (M-II)	127
Tabela 27 - Comparação entre as acelerações 95% e experimentais: M-I (RN).....	133
Tabela 28 - Análise do critério de conforto humano: M-I (RN)	133
Tabela 29 - Comparação entre as acelerações 95% e experimentais: M-II (RN)....	136
Tabela 30 - Análise do critério de conforto humano: M-II (RN)	136

Tabela 31 - Comparação entre as acelerações 95% e experimentais: M-I (YG).....	139
Tabela 32 - Análise do critério de conforto humano: M-I (YG)	139
Tabela 33 - Comparação entre as acelerações 95% e experimentais: M-II (YG)...	142
Tabela 34 - Análise do critério de conforto humano: M-II (YG)	142

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AISC	American Institute of Steel Construction
ANSYS	Swanson Analysis Systems
COPPE	Coordenação dos Programas de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia
bpm	Batidas por minuto
Eurocode	European Standard
fdp	Frequência de densidade de probabilidade
FEN	Faculdade de Engenharia
FFT	Fast Fourier Transform
HIVOSS	Human Induce Vibrations of Steel Structures
MEF	Método dos elementos finitos
ME	Modelo Estrutural
MMC	Método Monte Carlo
NBR	Norma Brasileira
OHDC	Ontario Highway Bridge Design Code
SMC	Simulação Monte Carlo
UERJ	Universidade do Estado do Rio de Janeiro
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro

LISTA DE SÍMBOLOS

$a_{lim,vert}$	Aceleração limite na direção vertical;
f_n	Frequência natural;
M	Massa total;
m	Massa linear;
L	Comprimento;
ξ	Taxa de amortecimento;
f_{ver}	Frequência natural de deformação vertical;
d	Densidade;
f_v	Frequência de passo;
N_{eq}	Número equivalente de pedestres;
n	Número de pedestres;
ψ	Fator de redução;
F	Força dinâmica;
ρ	Densidade linear;
f_s	Frequência do passo;
n'	Número equivalente de pedestre;
$F(t)$	Força representativa da ação dinâmica humana ao longo do tempo;
P	Peso do indivíduo;
a_i	Coefficiente de Fourier associado ao i -ésimo harmônico;
i	Múltiplo harmônico da frequência de passo;
t	Tempo;
g	Aceleração da gravidade
R	Fator de redução;
β	Taxa de amortecimento;
W	Peso efetivo do piso;
a/g	Razão entre aceleração do piso e aceleração da gravidade;
P_0	Força constante;
ϕ_i	Ângulo de fase;
σ^2	Variância;
σ	Desvio padrão;

X	Valores da amostra;
\bar{X}	Média amostral;
δ	Logaritmo natural do quociente de duas amplitudes;
u_0	Amplitude inicial;
u_n	Amplitude após n ciclos;
$a(t)$	Aceleração de pico;
$v(t)$	Velocidade;
$u(t)$	Deslocamento;
m_i	Massa modal do harmônico i ;
ω_i	Frequência angular da carga de excitação para o harmônico i ;
v_p	Velocidade do passo;
l_p	Comprimento do passo;
α	Coefficiente dinâmico;
ξ_i	Coefficiente de amortecimento modal;
$F(t)$	Força harmônica;
F_0	Amplitude de excitação;
FAD	Fator de amplificação dinâmico;
f_p	Frequência de passo;
L	Comprimento da passarela;
ω_n	Frequência natural;
P	Peso do pedestre;
$a_{máx,p}$	Aceleração máxima para um dado percentil;
$a_{espectro,p}$	Aceleração do espectro de resposta da passarela referencial;
k_m	Fator de correção de massa.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	20
1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	27
2. NORMAS E GUIAS DE PROJETOS	35
2.1. Introdução	35
2.2. Norma britânica BS 5400 [34]	35
2.3. Norma Eurocode 5 - Parte 2 [32]	35
2.4. Norma brasileira 6118/2014 [51]	37
2.5. Norma OHBDC [52]	37
2.6. Norma Bro [53]	38
2.7. Guia de Projeto do SÉTRA [15]	38
2.7.1. Determinação das Classes	38
2.7.2. Determinação do Nível do Conforto Humano e Aceleração Limite	39
2.7.3. Determinação da Frequência Natural	40
2.7.4. Cálculo da Aceleração Máxima	41
2.8. Guia de Projeto do HIVOSS [16]	43
2.8.1. Etapa 1: Avaliação das frequências naturais	43
2.8.2. Etapa 2: Verificação do intervalo de frequências críticas	44
2.8.3. Etapa 3: Determinação das situações de projeto	44
2.8.4. Etapa 4: Determinação dos critérios de conforto	45
2.8.5. Etapa 5: Determinação da aceleração máxima: Modelo ação harmônica	45
2.9. Guia de Projeto AISC [54]	46
2.10. Resumo	50
3. PARÂMETROS ESTATÍSTICOS E SIMULAÇÃO MONTE CARLOS (SMC)	51
3.1. Introdução	51
3.2. Variáveis aleatórias discretas e contínuas	51
3.3. Variância e desvio padrão de uma variável aleatória	52
3.4. Distribuição normal	53
3.5. Método Monte Carlos (MMC)	55
3.5.1. Geração de números aleatórios	57
3.5.2. Simulação Monte Carlos (SMC)	57

4.	MODELOS ESTRUTURAIS DAS PASSARELAS	59
4.1.	Introdução	59
4.2.	Modelo Estrutural da Passarela I: (ME-I)	59
4.3.	Modelo Estrutural da Passarela II: (ME-II) [63]	62
4.4.	Modelo Estrutural da Passarela III: (ME-III) [64]	64
5.	MODELAGEM EM ELEMENTOS FINITOS	67
5.1.	Considerações iniciais	67
5.2.	Modelo numérico: Passarela I (ME-I)	67
5.3.	Modelo numérico: Passarela II (ME-II) [63]	69
5.4.	Modelo numérico: Passarela III (ME-III) [66]	70
5.5.	Hipóteses simplificadoras adotadas nas análises	70
5.6.	Amortecimento estrutural	71
6.	EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NA MONITORAÇÃO EXPERIMENTAL	74
6.1.	Considerações iniciais	74
6.2.	Acelerômetro PCB (Piezotronics)	74
6.3.	ADS 2500 (Sistema de aquisição de dados)	76
6.4.	Shaker S 51140-M e Amplificador de potência BAA 1000.	77
6.5.	NCH ToneGenerator	79
7.	ANÁLISE MODAL EXPERIMENTAL	80
7.1.	Considerações iniciais	80
7.2.	Descrição dos ensaios experimentais	80
7.3.	Ensaio experimental: Shaker S 51140-M e ADS 2500	80
8.	Análise DOS AUTOVALORES E AUTOVETORES	88
8.1.	Considerações iniciais	88
8.2.	Análise modal da Passarela I (ME-I)	88
8.2.1.	Comparação análise modal experimental x análise modal numérica	93
8.3.	Análise modal da Passarela II (ME-II) [63]	94
8.4.	Análise modal da Passarela III (ME-III) [64]	95
9.	Análise DINÂMICA EXPERIMENTAL: VIBRAÇÃO FORÇADA	96
9.1.	Considerações iniciais	96
9.2.	Descrição dos testes experimentais	96
9.3.	Ensaio experimental I: 1 pessoa ($f_p = 2,40$ Hz)	99
9.4.	Ensaio experimental II: 7 pessoas ($f_p = 2,40$ Hz)	100

9.5. Ensaio experimental III: 12 pessoas ($f_p = 2,40$ Hz)	102
10. FORMULAÇÕES ANALÍTICAS PARA O CAMINHAR DE PEDESTRES ...	105
10.1. Considerações iniciais	105
10.2. Caracterização do caminhar humano	105
10.3. Equação de equilíbrio dinâmico [67].....	107
10.3.1. Solução analítica	108
10.4. Equação de equilíbrio dinâmico proposta por Zivanovic et al [33]	110
10.4.1. Solução analítica	111
11. SELEÇÃO DOS PARÂMETROS PARA AS ANÁLISES DINÂMICAS	114
11.1. Considerações iniciais	114
11.2. Parâmetros estatísticos do caminhar humano	114
11.3. Coeficientes dinâmicos (α)	117
12. METODOLOGIA PARA ANÁLISE DINÂMICA PROBABILÍSTICA.....	122
12.1. Considerações iniciais	122
12.2. Comparação solução analítica e experimental: Passarela I (ME-I)	122
12.3. Metodologia de análise probabilística	124
12.4. Estudo paramétrico	131
12.4.1. Espectros de respostas: M-I (RN).....	131
12.4.2. Espectros de respostas: M-II (RN).....	134
12.4.3. Espectros de respostas: M-I (YG).....	137
12.4.4. Espectros de respostas: M-II (YG).....	141
12.5. Determinação gráfica da resposta dinâmica	144
13. CONSIDERAÇÕES FINAIS	146
13.1. Introdução	146
13.2. Conclusões	146
13.2.1. Análise modal: modelo numérico <i>versus</i> testes experimentais	146
13.2.2. Análises de vibração forçada.....	147
13.2.3. Avaliação dos coeficientes dinâmicos	148
13.2.4. Solução analítica <i>versus</i> resultado experimental: Passarela I (ME-I).....	148
13.2.5. Análise probabilística via emprego dos espectros de resposta de projeto .	149
13.3. Sugestão de trabalhos futuros	151
REFERÊNCIAS.....	152

INTRODUÇÃO

O avanço tecnológico na construção civil em diz respeito ao desenvolvimento de materiais inovadores, mais resistentes, leves e econômicos tem proporcionado aos arquitetos maior liberdade de projetar, resultando em passarelas com concepções arquitetônicas cada vez mais modernas.

Devido à modernidade e avanço dos materiais na construção civil, as estruturas tem se tornado cada vez mais leves e esbeltas, e por vezes contribuindo para diminuição do amortecimento estrutural.

Logo, com essas novas tecnologias, inúmeros casos de problemas de vibração excessiva em passarelas estão surgindo ao longo dos anos, gerando desconforto humano aos pedestres e até mesmo o colapso da estrutura, como ocorreu em uma Passarela na Carolina do Norte/EUA durante a saída de uma multidão em um evento esportivo deixando mais de 100 pessoas feridas, conforme ilustra a Figura 1.



Figura 1 - Desabamento de uma passarela em Carolina do Norte/EUA [1]

A Figura 2 ilustra a passarela Millenium Footbridge [2], conhecida como a Passarela do Miênio de Londres, a qual é uma ponte pênsil em aço com mais de 300 m de comprimento que cruza o rio Tamisa, em Londres, Inglaterra, na inauguração em 10 de junho de 2000 apresentou oscilações laterais com amplitudes além daquelas previstas em projeto, devido à interação do caminhar de pessoas se movimentando sobre a mesma. As amplitudes foram de ordem de 75 mm com

frequências na faixa de 0,8 a 1,0 Hz, obrigando as autoridades fecharem a passarela três dias após a sua inauguração para que as medidas corretivas fossem adotadas, conforme citado por Newland [2].



Figura 2 - Millennium Footbridge localizada em Londres sobre o Rio Tâmisia [2]

A passarela Simone de Beauvoir [3], ilustrada na Figura 3, foi inaugurada em julho de 2006 se constituindo da quarta maior passagem parisiense sobre o rio Sena, para uso de pedestres e ciclistas. A estrutura metálica ondulada da passarela tem 304 m de extensão, dos quais 190 m são de vão livre.

Em algumas situações, os pedestres apresentavam uma percepção de desconforto. Esses fenômenos tinham sido considerados desde a fase de estudos mediante ensaios dinâmicos, e, já na concepção foram posicionados na obra amortecedores dinâmicos viscosos para garantir o conforto dos pedestres durante a caminhada.

Os ensaios dinâmicos foram realizados com a finalidade de verificar se as respostas da passarela induzidas pela passagem de vários pedestres coincidiam com os resultados obtidos pelos cálculos. As respostas da obra foram excelentes mediante diferentes formas de excitação, e, por fim a passarela Simone Beauvoir [3] foi aprovada para receber a multidão à sua inauguração.



Figura 3 - Passarela Simone de Beauvoir sobre Rio Sena [3]

A passarela Solferino localizada na cidade de Paris é composta por dois pisos e apresenta uma estrutura formada de arco em aço com traçados parabólicos. A estrutura de aço em arco tem comprimento total de 140 m e sua largura varia de 12 a 14,80 m, conforme ilustra a Figura 4.

Em sua inauguração em 15 de dezembro de 1999 apresentou vibrações excessivas na direção transversal horizontal durante a travessia de pedestres foi conseqüentemente foi fechada ao público. Foram realizados ensaios que envolveu testes modais da estrutura, testes de aglomeração de pedestres, testes de vibração e monitoramento da ponte. Em novembro de 2000, a passarela foi reaberta após quase um ano de fechamento (Kumar [4]).

A passarela Toda Bridge localizada no Japão, apresentou problemas excessivos de vibrações laterais logo após a sua inauguração, em 1989. A estrutura é sustentada por um sistema estaiado, com largura de 7,85 m e comprimento total de 179m, conforme Figura 5. A travessia de diversas pessoas provocou a excitação da estrutura trazendo desconforto para os pedestres. As verificações através de vídeos, além das medições realizadas, demonstraram que 20% das pessoas sincronizaram perfeitamente seus passos, de acordo com Nakamura e Fujino [5].



Figura 4 - Passarela Solferino localizada em Paris [4]



Figura 5 - Passarela Toda Park Bridge localizada no Japão [5]

Os problemas dinâmicos se manifestam em passarelas com diferentes sistemas estruturais, conforme ilustrados nas Figuras 1 a 5, e, são consequência do não emprego da ação dinâmica na elaboração de projetos. No meio técnico, as estruturas, normalmente, são projetadas para solicitações estáticas e desconsideram a complexa interação dinâmica nesses tipos de estruturas.

Diante desse contexto ressalta-se a importância da análise do comportamento dinâmico estrutural, especialmente no que tange ao conforto humano, a fim de evitar vibrações excessivas. Desta maneira, esse estudo de pesquisa tem como objetivo desenvolver metodologias de análise dinâmica probabilística que permitem avaliar a estrutura de forma mais abrangente e melhorar as práticas de projeto.

Motivação

A principal motivação para o desenvolvimento deste trabalho de pesquisa diz respeito ao atual cenário de desenvolvimento da engenharia de estruturas, na qual se procura obter projetos que atendam às especificações do cliente e normas técnicas, mas também, que proporcionem custos menos elevados. Assim sendo, inúmeros trabalhos de pesquisa têm sido realizados com o objetivo de apresentar métodos probabilísticos para análise do comportamento estrutural dinâmico de passarelas de pedestres submetidas à ação do caminhar humano. Neste sentido, estes métodos probabilísticos são relevantes para levar em consideração a natureza estocástica do caminhar e conseqüentemente se constituem em análises mais realistas do comportamento de passarelas de pedestres quando submetidas a ações de atividades humanas.

Objetivos

O objetivo principal deste trabalho de pesquisa é o de desenvolver uma metodologia de análise probabilística para avaliar o conforto humano de passarelas de pedestres, submetidas ao caminhar de pessoas, considerando-se para tal a natureza estocástica do caminhar humano, com base no desenvolvimento de espectros de resposta de projeto com essência probabilística. Assim sendo, ao longo do estudo são considerados os projetos de três passarelas reais, existentes, situadas na cidade do Rio de Janeiro/RJ, de concreto armado e mista (aço-concreto) e aço, com vãos de 24,4 m, 53,5 m e 68,6 m, respectivamente. Ao longo da pesquisa serão desenvolvidos testes experimentais (vibração livre e vibração forçada) referentes à passarela de concreto, com vão de 24,4 m, localizada na Faculdade de Engenharia (FEN) da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ). Em seguida, a resposta dinâmica das passarelas investigadas será analisada com base na utilização dos espectros de respostas desenvolvidos via método analítico probabilístico. Finalmente, será realizado um estudo comparativo entre os valores das acelerações obtidas experimentalmente com aqueles os obtidos via emprego do método analítico probabilístico, tendo em mente a posterior avaliação do conforto humano.

Estrutura da Dissertação

No primeiro e segundo capítulo são apresentadas, respectivamente as referências bibliográficas referentes ao assunto investigado nesse estudo de pesquisa.

No segundo capítulo são apresentados os critérios e recomendações de projeto propostos por normas nacionais e estrangeiras.

No terceiro capítulo são descritos os parâmetros estatísticos necessários para realizar a avaliação do comportamento dinâmico de passarelas de pedestres empregando-se o método probabilístico e uma breve introdução dos fundamentos do Método Monte Carlo.

O quarto capítulo descreve os modelos estruturais das passarelas investigadas bem como as características físicas e geométricas.

O quinto capítulo apresenta a modelagem em elementos finitos das passarelas investigadas.

No sexto capítulo são apresentados os equipamentos utilizados nos ensaios de análise de vibração livre e forçada da Passarela I (ME-I).

No sétimo capítulo são descritos os resultados das frequências e modos de vibrações experimentais da Passarela I (ME-I) mediante uso dos equipamentos SHAKER S 51140-M e ADS 2500.

O oitavo capítulo apresenta os resultados das análises de vibração livre, realizadas para determinar as frequências naturais e os modos de vibração dos modelos estruturais.

No nono capítulo é apresentado o teste experimental de vibração forçada da Passarela I (ME-I).

No décimo capítulo são descritas as características do caminhar humano e as soluções analíticas determinísticas e probabilísticas para avaliação de passarelas de pedestres.

No décimo primeiro capítulo são apresentados os parâmetros probabilísticos do caminhar humano e as formulações dos coeficientes dinâmicos.

No décimo segundo capítulo é apresentado o comparativo entre os resultados da solução analítica probabilística e teste experimental de vibração forçada da

Passarela I e os resultados da análise probabilística do comportamento dinâmico de passarelas de pedestres submetidas a ação de um único pedestre.

O décimo terceiro capítulo apresentam as conclusões do trabalho de pesquisa, contendo as considerações e sugestões para continuação dessa pesquisa.

1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Tendo em vista que os projetos de passarelas de pedestres precisam ser elaborados levando em consideração os limites do conforto humano, diversos estudos e normas foram publicados com o objetivo de estabelecer métodos simplificados que analisam o comportamento dinâmico da estrutura. Esses métodos são conhecidos como analítico determinístico, que visam obter os valores das acelerações de pico da ação dinâmica do caminhar de um único pedestre em ressonância com a estrutura.

Contudo novos métodos analíticos foram surgindo em decorrência dos avanços tecnológicos, os quais levam em consideração o fenômeno estocástico do caminhar humano, sendo classificados como analítico probabilístico.

Em relevância ao estudo dessa dissertação, serão apresentados estudos de alguns autores que trataram de assuntos relacionados ao investigado nesse trabalho de pesquisa.

Brownjolln, Dumanoglu e Taylor [6] descreveram uma investigação analítica e experimental de uma passarela suspensa para pedestres com 50m de vão, localizada no centro de Gales, Reino Unido. Realizaram um teste protótipo excitando a estrutura com martelo de impacto e pedestre. A partir dos testes, concluíram que a instrumentação correta, em estruturas flexíveis, descrevem adequadamente as características de vibrações e que a modelação exata considerando os detalhes estruturais tem um efeito significativo na análise.

Živanović, Pavic e Reynolds [7] realizaram o estudo de uma passarela em escala real através de modelagem em elementos finitos e funções de respostas dinâmicas obtidas por dois acelerômetros. Para o sistema estrutural estudado a rigidez dos apoios das extremidades das vigas na direção vertical e a rigidez à flexão dos pilares foram parâmetros de detalhamento de modelagem que influenciaram significativamente os modos de vibração vertical e horizontal.

Živanović, Pavic e Reynolds [8] propuseram modelo analítico probabilístico para verificação do comportamento dinâmico de passarelas submetidas à ação de fluxos de pedestres. O modelo admite que a frequência e comprimento do passo são variáveis aleatórias que seguem uma distribuição normal. O modelo ainda considera a variação da frequência do passo do pedestre ao longo da travessia.

Živanović, Pavic e Reynolds [9] formularam por meio de análise probabilística um modelo de força multi-harmônica para calcular a resposta estrutural multimodo da travessia de um único pedestre na passarela. Nesta análise foram considerados não só os principais harmônicos, mas também os subharmônicos.

Picardo e Tubino [10] analisaram a capacidade de manutenção vibratória de passarelas submetidas a condições realistas de tráfegos de pedestres, por meio de uma caracterização probabilística de força induzidas por pedestres. Através de uma abordagem adimensional obtiveram a resposta dinâmica a três condições de carregamento permitindo a identificação dos parâmetros adimensionais essenciais. Além disso, aplicaram duas propostas de procedimentos simplificados que permitem a avaliação das vibrações desprezando o uso de análises numéricas.

Santos [11] avaliou o comportamento dinâmico de uma passarela mista, localizada em Brasília, quando submetida à ação dinâmica produzida por pedestres a partir do emprego de metodologias de projetos.

Zuo, Hua e Landuyt [12] estudaram as características da vibração induzida por pedestres em uma passarela de vigas de concreto protendido observadas através de medições em escala real. O efeito do carregamento de pedestres na frequência natural da estrutura, bem como sua implicação no mecanismo de interação pedestre-estrutura, foi investigado. Com base no entendimento da vibração do protótipo, um modelo foi desenvolvido para permitir a avaliação da amplitude da vibração da passarela induzida pela excitação de pedestres.

Souza [13] realizou a análise probabilística de uma passarela de pedestre mista, localizada no Instituto de Traumatologia e Ortopedia (INTO). A partir dessa análise foi concluído que os resultados referentes aos valores das acelerações de pico calculadas com base nos métodos determinísticos podem ser superestimados em algumas situações de projeto.

Queiroz *et al.* [14] realizaram o estudo de uma passarela metálica a partir das recomendações manuais de Sétra [15] e Hivoss [16]. Por meio da análise dinâmica observaram que aos resultados das acelerações foram superiores ao recomendado pelos guias de projeto. Empregaram controle das acelerações através de intervenções no sistema estrutural por meio da alteração de rigidez estrutural através do enrijecimento dos pilares, alteração na rigidez estrutural através de pórticos e

contraventamento, alteração da massa modal, inserção de atenuadores dinâmicos sintonizados.

Mendes [17] investigou o comportamento dinâmico de três passarelas de pedestres mistas (aço-concreto) a partir do desenvolvimento de modelos numéricos. As repostas dinâmicas foram obtidas em termos de acelerações de picos para avaliação do conforto humano comparando com os valores limites propostos por autores e normas.

Debona [18] realizou a monitoração experimental e modelagem numérica da resposta estrutural dinâmica de uma passarela com vão de 24,4m, localizada na UERJ, com base na consideração do efeito da interação dinâmica pedestre-estrutura. A partir dos resultados experimentais foi realizada a calibração do modelo numérico e a avaliação do conforto humano foi comparada com os critérios estabelecidos em normas e recomendações de projeto.

Silva, Sieira e Debona [19] modelaram via elementos finitos uma passarela mista (aço-concreto) com 82,5m de extensão para verificar o conforto humano quando submetida ao caminhar. A análise foi realizada com base na correlação de resultados experimentais e numérico. A partir dos resultados das acelerações máximas concluíram que o sistema estrutural pode atingir os níveis de vibrações que comprometem ao conforto humano da passarela.

Martins, Pinto e Porto [20] realizaram a análise numérica de uma passarela mista empregando a simulação do caminhar humano. A partir da análise avaliaram os níveis de vibrações do sistema estrutural comparando as repostas de acelerações com os critérios estabelecidos por normas.

Shahabpoor et al. [21] Estudaram as propriedades dinâmicas dos sistema interação pedestre-estrutura, ou seja, taxa de amortecimento da estrutura ocupada, frequência natural e massa modal, a partir de um conjunto abrangente de repostas de frequência medidas em uma estrutura de teste em escala real ocupada por vários pedestres caminhando em diferentes cenários. Com base nas análises constataram que a frequência natural do sistema interação pedestre-estrutura foi maior do que o da estrutura vazia e a taxa de amortecimento sendo também consideravelmente maior.

Tubino [22] realizou um estudo de um sistema acoplado de passarela modelado como um sistema contínuo e pedestre esquematizado como sistemas

móveis de um grau de liberdade sendo caracterizados por propriedades dinâmicas aleatórias

Vega *et al.* [23] realizaram um estudo paramétrico do comportamento dinâmico de passarelas submetidas a ação dinâmica do caminhar. O modelo foi validado por meio de medições experimentais com a utilização de um protótipo de passarela caracterizado por um sistema estrutural misto (aço-concreto), conforme ilustra a Figura 6, localizado no Laboratório de Estruturas da COPPE/UFRJ. A estrutura mista consiste em uma laje de concreto armado de 12,20 x 2,20x 0,1 e vigas compostas por perfis I metálicos longitudinais e transversais. A resposta dinâmica foi medida por um sistema de instrumentação com uso de seis acelerômetros resistivos.



a) Vista em perspectiva

b) Vista superior

Figura 6 - Estrutura utilizada para a realização de testes experimentais [23]

Viero *et al.* [24] investigaram o comportamento dinâmico de uma passarela construída em laboratório em função do número de pedestres. Os testes foram realizados por meio do martelo de impacto e quedas de calcanhar através do caminhar individual e em grupo.

Shahabpoor, Pavic e Racic [25] investigaram um modelo para representação da caminhada de pedestres em passarela. Para tal, foram avaliados os resultados de um conjunto abrangente de testes modais baseados em FRF (Função de resposta de frequência), em que, mais de cem pedestres andaram em diferentes tamanhos de grupo e também padrões de caminhada sobre uma estrutura de teste.

Nimmen *et al.* [26] perceberam que as vibrações induzidas por pedestres em passarelas requer uma abordagem probabilística, devido a incerteza do

comportamento dinâmico da estrutura e a variabilidade de múltiplos parâmetros de cargas. Dessa forma, desenvolveram uma abordagem espectral a partir de um modelo já disponível em literatura para prever a resposta dinâmica induzida pelo tráfego irrestrito de pedestres e dar conta de múltiplos harmônicos de carga de marcha vertical.

Picozzi, Avossa e Ricciardelli [27] realizaram um estudo probabilístico por meio das acelerações características de pico devido a ações induzidas por pedestres. A partir dos resultados, incorporaram os efeitos da intervariabilidade de passos e das propriedades dinâmicas das passarelas, e, desenvolveram um espectro de resposta de projeto para vibrações verticais e laterais.

Zivanovic *et al* [28] estudaram os parâmetros estatísticos, média e desvio padrão do caminhar humano. Neste estudo foi verificada a correlação entre os parâmetros de caminhada, frequência e comprimento do passo do pedestre.

Brownjohn *et al* [29] apresentaram um modelo probabilístico baseado na função densidade espectral para avaliação do comportamento dinâmico de passarelas de pedestres sob ação de um único indivíduo ou fluxo de pessoas. As respostas dinâmicas foram estudadas no domínio da frequência. O método proposto considera a variação da frequência do passo do pedestre ao longo da travessia.

Wan *et al* [30] propuseram método analítico probabilístico para verificar o comportamento dinâmico de passarelas de pedestres devido à ação dinâmica de um único indivíduo. O método considera a variação do passo entre pedestres (inter-sujeito) e a variação do passo do pedestre (intra-sujeito) ao longo da travessia.

Zivanovic, Pavic e Ingólfsson [31] realizaram a revisão de métodos analíticos sugeridos por normas e guias de projetos para análise da resposta dinâmica de passarelas de pedestres sob ação de fluxo espacialmente irrestrito de pedestres. O estudo aborda que o método determinado pela norma Eurocode 5 [32] é simplificado e desconsidera a natureza estocástica do caminhar do fluxo de pedestres.

Zivanovic, Pavic e Reynolds [33] propuseram um método probabilístico para verificação do comportamento dinâmico de passarelas de pedestres por meio de simulações empregando a simulação do método de Monte Carlo. O método considera a aleatoriedade das variáveis pesos, frequência e comprimento do passo do indivíduo, que seguem uma distribuição normal. Com base nas análises os

resultados das respostas dinâmicas adotando-se as recomendações da norma BS 5400 [34] apresentaram baixa probabilidade de ocorrência.

Zivanovic [35] apresentou a solução analítica para determinar a aceleração de passarelas de pedestres reduzidas a um sistema com um grau de liberdade, considerando o primeiro modo de vibração de flexão transversal vertical representado por uma meia senóide.

Zivanovic e Pavic [36] apresentaram um modelo analítico para quantificar o potencial dinâmico da carga de excitação devido ao caminhar do fluxo de pedestre sobre passarelas.

Pedersen e Frier [37] estudaram o comportamento dinâmico de passarelas empregando método de simulação Newmark e Monte Carlo. O método considera os parâmetros do caminhar, frequência e comprimento do passo, como variáveis aleatórias que seguem uma distribuição normal. Avaliaram a importância de modelar o comprimento e a velocidade do passo como variáveis aleatórias. Os resultados mostraram que não é necessário considerar a aleatoriedade em todos os parâmetros do caminhar para obter uma resposta qualitativa.

Bachmann [38] com análises em inúmeros tipos de estruturas, incluindo as de passarelas, diante da excitação originada pelo dinamismo humano na interação com tais estruturas, sendo identificado o surgimento de níveis de vibrações excessivas. Diante da problemática, o autor propõe alteração na frequência natural da estrutura de modo a evitar o harmônico crítico da frequência de excitação, contornando dessa forma o fenômeno da ressonância. Tal alteração é alcançada com modificações estruturais, tanto em níveis de projetos, por exemplo, mudanças no arranjo estrutural ou até mesmo alterações nas estruturas já construídas, neste caso podendo ser realizado um enrijecimento estrutural.

Pimentel *et al* [39] avaliaram o desempenho das normas utilizadas na prática de manutenção das vibrações em passarelas submetidas às cargas induzidas pelo homem devido ao caminhar. A avaliação presente no trabalho é sustentada por evidência experimental a partir de testes realizados pelos autores em passarelas que apresentavam vibrações excessivas. A descrição dos avanços nas pesquisas foi citada, bem como uma abordagem comparativa de algumas orientações de uso internacional no tocante à problemática vibracional em passarelas. Sugestões foram

feitas direcionando a atenção a uma definição mais realista do carregamento vertical devido ao caminhar sobre a passarela.

Hauksson [40] apresentou os resultados da resposta dinâmica da passarela do milênio, denominada “Millenium Bridge”, calculados a partir das recomendações das normas internacionais BS 5400 [34] e Eurocode [32]. Tendo sido verificado que estas normas são insuficientes para detectar problemas de vibrações laterais excessivas decorrentes da sincronização de pedestres

Mashaly *et al* [41] avaliaram através de espectros de respostas passarelas induzidas pelo caminhar de pedestres. As cargas foram aplicadas na direção vertical considerando duas possibilidades, respectivamente, carga estacionária no meio do vão e móvel ao longo da travessia. Os resultados das análises indicaram que os espectros de respostas é capaz de obter com precisão as respostas de vibração da passarela. Além disso, indicaram que os principais parâmetros que afetam as respostas nas passarelas devido as cargas de caminhada na direção vertical são a massa da passarela e a taxa de amortecimento.

Zivanovic *et al* [42] caracterizaram estatisticamente os parâmetros que descrevem o tráfego de pedestres, como frequência, comprimento e velocidade do passo a partir do monitoramento durante 6,5 horas de 939 pessoas cruzando uma passarela. Perceberam que a frequência e o comprimento do passo poderiam ser modelados como uma distribuição normal. Além disso, notaram que a velocidade de caminhada aumentava com o aumento da frequência de caminhada.

Picozzi *et al* [43] desenvolveram um espectro de resposta de projeto vibrações verticais e horizontais para modelos de passarelas simplesmente apoiados devido ao caminhar de um único pedestre incorporando o efeitos da variabilidade intersujeito dos parâmetros de caminhada e das incertezas nas propriedades dinâmicas da passarela. Os resultados mostraram que a amplitude das vibrações verticais é maior quando a frequência da passarela está na faixa do primeiro harmônico e diminui para os demais harmônicos.

Caprani *et al* [44] propuseram fatores de melhoria na previsão de acelerações geradas por um único pedestre ou por uma multidão. Realizaram, para tanto, uma abordagem probabilística numa passarela hipotética e comprovaram, por meio de distribuições estatísticas, intravariabilidade dos parâmetros de pedestres.

Tubino [45] realizou o estudo do efeito interação homem-estrutura na direção vertical com base em uma abordagem probabilística. A passarela estudada foi modelada como um sistema dinâmico contínuo e os pedestres foram esquematizados como sistema móveis de um grau de liberdade com propriedades dinâmicas aleatórias.

Rezende *et al* [46] proporam um método alternativo usando o algoritmo Random Walk para incorporar a variabilidade intrasujeito da caminhada nas frequências de estimulação de força ou biodinâmicos. Realizaram uma análise de sensibilidade para definir distribuições probabilísticas adequadas e a faixa de valores a serem utilizados no algoritmo de passeio aleatório, e, também um estudo com avaliação de desempenho vibratório em passarelas idealizadas com força de caminhada probabilística e modelos biodinâmicos.

Brunet *et al* [47] realizaram análises dinâmicas em uma passarela considerando modelos determinísticos e probabilísticos com duas formulações distintas de simulação de carga de caminhada humana, um modelo de força e um modelo biodinâmico. As análises probabilísticas foram baseadas no método de passeio aleatório apresentando de forma mais realista o movimento de pedestre empregando-se a intravariabilidade e a intervariabilidade. Realizaram, ainda, uma correlação teórico-experimental baseada em testes de uma e seis pessoas atravessando uma passarela metálica.

Yang e Jia [48] propuseram um método de análise da resposta de vibração estocástica induzida por multidão. O método proposto foi ilustrado pela análise de resposta de um sistema aleatório de interação multidão-estrutura onde a aleatoriedade do parâmetro de carga foi considerada.

Bayat e Tubino [49] investigaram a resposta dinâmica de pisos sob uma única carga de caminhada de pedestres, considerando a aleatoriedade dos parâmetros do caminhar humano. Adotaram, também, uma perspectiva probabilística para analisar a resposta dinâmica sob diferentes cenários de carregamento aleatório.

Pancaldi *et al* [50] propuseram uma abordagem estatística para modelar forças verticais de caminhada induzidas por um único pedestre. Consideraram um modelo de força baseado na descrição da distribuição multivariada das características de caminhada através da curva gaussiana.

2. NORMAS E GUIAS DE PROJETOS

2.1. Introdução

Neste capítulo serão apresentadas normas e recomendações de projeto utilizadas na verificação do nível do conforto humano em passarelas submetidas ao caminhar humano. As normas e guias avaliam, de forma simplificada, a máxima resposta dinâmica em termos de aceleração.

2.2. Norma britânica BS 5400 [34]

De acordo com norma britânica BS 5400 [34], passarelas com frequência natural superior a 5Hz não apresentam problemas de vibrações excessivas, logo, atendem ao conforto humano. Em contrapartida, recomenda para passarelas com frequência igual ou inferior a 5Hz a aceleração máxima calculado, conforme Equação (1).

$$\alpha_{\text{lim,vert}} = 0,5 \sqrt{f_n} \quad (1)$$

Onde:

$\alpha_{\text{lim,vert}}$: aceleração limite na direção vertical (m/s²);

f_n : frequência natural (Hz).

2.3. Norma Eurocode 5 - Parte 2 [32]

A norma europeia Eurocode 5 - Parte 2 [32] recomenda que sejam dispensadas das verificações de acelerações as passarelas que apresentem frequências naturais nas direções transversal vertical acima de 5,0 Hz.

A norma apresenta apenas diretrizes para projeto de passarelas simplesmente apoiadas de um único vão. A seguir são apresentados os cálculos das acelerações nas direções transversais, cujas frequências naturais da estrutura estejam abaixo dos limites estabelecidos. O cálculo da aceleração na direção transversal vertical para uma pessoa caminhando em uma passarela simplesmente

apoiada é dada pelas Equações (2) a (4). Já o cálculo da aceleração na direção vertical para várias pessoas caminhando é obtida através da Equação (5).

$$a_{\text{vert},1} = \frac{200}{M \xi} \quad \text{para } f_{\text{ver}} \leq 2,5 \text{ Hz} \quad (2)$$

$$a_{\text{vert},1} = \frac{100}{M \xi} \quad \text{para } 2,5 \text{ Hz} \leq f_{\text{ver}} \leq 5,0 \text{ Hz} \quad (3)$$

$$M = mL \quad (4)$$

Onde:

M: massa total da passarela (kg);

m: massa linear da passarela (kg/m);

L: comprimento da passarela (m);

ξ : taxa de amortecimento (%);

f_{ver} : frequência natural de deformação vertical (Hz).

$$a_{\text{vert},n} = 0,23 a_{\text{vert},1} n k_{1,\text{vert}} \quad (5)$$

Onde:

n: número de pedestres;

$k_{1,\text{vert}}$: coeficiente relacionado a primeira frequência natural da passarela na direção transversal vertical (Figura 7);

$a_{\text{vert},1}$: aceleração vertical de um pedestre determinado conforme as Equações (2) e (3).

Observa-se, na Figura 7, que o fator de grupo relacionado a primeira frequência da passarela ($k_{1,\text{vert}}$) apresenta valores máximos para passarelas com frequência fundamental na direção transversal vertical de 1,5 a 2,5 Hz. Essa faixa corresponde aos valores de frequência do passo do primeiro harmônico do caminhar humano. Nota-se também que o fator de grupo é máximo quando a frequência fundamental da passarela na direção vertical é igual ao valor da frequência de excitação do caminhar, ou seja, a estrutura encontra-se em ressonância com a força excitadora.

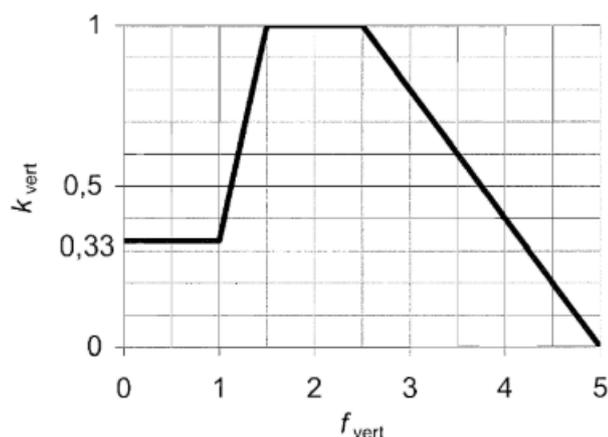


Figura 7 – Coeficiente relacionado a frequência natural da passarela ($k_{1,vert}$) [32]

2.4. Norma brasileira 6118/2023 [51]

A norma brasileira 6118/2023 [51] estabelece no item 23.3 que as ações dinâmicas podem provocar estados limites de serviço e estados limites últimos por vibração excessiva ou por fadiga dos materiais. Na consideração do estado limite de vibrações excessivas a referida norma afirma que a análise das vibrações pode ser feita em regime linear no caso das estruturas usuais. A norma orienta que para assegurar comportamento satisfatório das estruturas sujeitas a vibrações, deve-se afastar o máximo possível a frequência natural da estrutura (f_n) da frequência crítica ($f_{crítica}$), que depende da destinação da respectiva edificação, conforme a Equação (6). Para ação de pessoas na estrutura a norma delimita para passarela uma frequência crítica de 4,5Hz.

$$f_n > 1,2 f_{crítica} \quad (6)$$

Onde:

f_n : frequência natural;

$f_{crítica}$: frequência crítica.

2.5. Norma OHBDC [52]

A norma canadense OHBDC – Ontario Highway Bridge Design Code [46] recomenda que a aceleração seja verificada em estrutura cuja frequência fundamental na direção vertical transversal seja abaixo de 4Hz. A aceleração limite

recomendada pela norma não deve ultrapassar o valor obtido pela Equação (7). O cálculo da aceleração de pico é realizado adotando-se o método simplificado da norma Britânica BS 5400 [34], conforme a Equação (1).

$$a_{\text{lim,vert}} = 0,25 \sqrt{f_n^{0,78}} \quad (7)$$

Onde:

$a_{\text{lim,vert}}$: aceleração limite na direção transversal vertical;

f_n : frequência natural.

2.6. Norma Bro [53]

A norma Sueca Bro [53] recomenda que passarelas devam ter frequência natural superior a 3,5 Hz. Deve-se então proceder à verificação da aceleração para passarelas cujas frequências naturais sejam menores aos valores recomendados, sendo a aceleração limite ser inferior a 0,5 m/s².

2.7. Guia de Projeto do SÉTRA [15]

2.7.1. Determinação das Classes

O guia de projeto SÉTRA [15] apresenta uma metodologia fundamentada na classificação de passarelas segundo a intensidade do fluxo de pedestres sob o qual estas estruturas estão submetidas. As passarelas de pedestres são classificadas em quatro classes distintas:

- a) Classe I - Passarelas urbanas ligando áreas com alta densidade de pedestres ou que possam ser frequentemente atravessadas por multidões, como, por exemplo, áreas de interligações de transportes de massa, estádios, demonstrações festivas, culturais e zonas turísticas;
- b) Classe II - Passarelas urbanas ligando áreas densas, sujeitas a elevado fluxo de pedestres, que ocasionalmente possam preencher toda sua superfície;

- c) Classe III - Passarelas de uso padrão, ocasionalmente atravessadas por grupos grandes de pessoas, mas que nunca chegarão a preencher toda sua superfície;
- d) Classe IV - Passarelas raramente utilizadas, construídas como ligação entre áreas pouco povoadas, para assegurar continuidade de trajetos sobre rodovias, ferrovias, etc.

O guia considera para passarelas de Classe IV, que nenhuma verificação é necessária quanto ao comportamento dinâmico. Para passarelas muito leves o guia recomenda a Classe III, a fim de assegurar um controle mínimo dos riscos de vibração excessiva, já que passarelas muito esbeltas podem apresentar acelerações elevadas, sem que, necessariamente, estejam em ressonância.

2.7.2. Determinação do Nível do Conforto Humano e Aceleração Limite

O guia define o nível de conforto da passarela em função da aceleração de pico da estrutura, determinada através de funções de carga dinâmica. As Tabelas 1 a 3 apresentam, respectivamente, as definições referentes ao nível do conforto da passarela e as faixas de acelerações limites.

Tabela 1 - Determinação do conforto da passarela

Conforto máximo	acelerações da estrutura são praticamente imperceptíveis para os usuários
Conforto médio	acelerações da estrutura são pouco perceptíveis para os usuários
Conforto mínimo	acelerações da estrutura são perceptíveis aos usuários, porém ainda toleráveis. Deve ser considerado apenas para configurações de carga de ocorrência rara.

Tabela 2 - Faixa de acelerações para vibrações verticais

Aceleração Vertical (m/s ²)	0	0,5	1,0	2,5
Nível 1	Máximo			
Nível 2		Médio		
Nível 3			Mínimo	
Nível 4				Inaceitável

Tabela 3 - Faixa de acelerações para vibrações horizontais

Aceleração Vertical (m/s ²)	0	0,10	0,15	0,30	0,80
Nível 1	Máximo				
Nível 2			Médio		
Nível 3				Mínimo	
Nível 4					Inaceitável

2.7.3. Determinação da Frequência Natural

O guia estabelece que as frequências naturais da estrutura sejam determinadas em duas condições de massa: passarela vazia e a passarela carregada em toda área de tráfego com uma massa de 70kg/m², que corresponde a 1 pedestre/m².

As frequências naturais encontradas para essas duas condições são classificadas quanto ao risco de ressonância, ou seja, quando a frequência natural é igual ou próxima da frequência de excitação, conforme as Tabelas 4 e 5.

Tabela 4 - Risco de ressonância na direção vertical e longitudinal

Frequência (Hz)	0	1,0	1,7	2,1	2,6	5,0
Faixa 1			Máximo			
Faixa 2		Médio		Médio		
Faixa 3					Mínimo	
Faixa 4	Desprezível					Desprezível

Tabela 5 - Risco de ressonância na direção transversal

Frequência (Hz)	0	0,3	0,5	1,1	1,3	2,5
Faixa 1			Máximo			
Faixa 2		Médio		Médio		
Faixa 3					Mínimo	
Faixa 4	Desprezível					Desprezível

O guia correlaciona os casos de carga em função da classificação da passarela e do risco de ressonância, conforme Tabelas 4 e 5. A partir da

combinação desses parâmetros pode-se definir o caso para obter a função da resposta dinâmica, conforme Tabela 6.

Tabela 6 - Casos de carga

Classificação da Passarela	Risco de Ressonância		
	Faixa 1	Faixa 2	Faixa 3
Classe I	Caso 2	Caso 2	Caso 3
Classe II	Caso 1	Caso 1	Caso 3
Classe III	Caso 1	Dispensado de verificação	Dispensado de verificação

- a) Caso 1 – tráfego pouco denso a denso;
- b) Caso 2 – tráfego muito denso;
- c) Caso 3 – consideração do efeito do segundo harmônico

2.7.4. Cálculo da Aceleração Máxima

A determinação da aceleração máxima, resultante da ação de pedestres, é obtida por meio da aplicação de uma função de carga harmônica em uma superfície de tráfego. Essa carga harmônica é definida em função dos diferentes tipos de casos, e, das respectivas direções de vibração, conforme Tabelas 7 e 8.

Tabela 7 - Funções de carga para casos 1 e 2

Direção	Carregamento por m ²
Vertical	$d (280N) \cos(2 \pi f_v t) \frac{N_{eq}}{n} \psi$
Longitudinal	$d (140N) \cos(2 \pi f_v t) \frac{N_{eq}}{n} \psi$
Transversal	$d (35N) \cos(2 \pi f_v t) \frac{N_{eq}}{n} \psi$

Tabela 8 - Funções de carga para caso 3

Direção	Carregamento por m ²
Vertical	$d (70N) \cos(2 \pi f_v t) \frac{N_{eq}}{n} \psi$
Longitudinal	$d (35N) \cos(2 \pi f_v t) \frac{N_{eq}}{n} \psi$
Transversal	$d (7N) \cos(2 \pi f_v t) \frac{N_{eq}}{n} \psi$

Onde:

d: densidade (ped/m²);

f_v : frequência de passo (Hz);

N_{eq} : número equivalente de pedestres;

n: número de pedestres ($n = \text{área} \times d$);

ψ : fator de redução;

O número equivalente de pedestre é definido em função da densidade e deve satisfazer as condições descritas nas Equações (8) e (9).

$$N_{eq} = 10,8 \sqrt{n \xi} \text{ para } d < 1 \text{ ped/m}^2 \quad (8)$$

$$N_{eq} = 1,85 \sqrt{n} \text{ para } d \geq 1 \text{ ped/m} \quad (9)$$

Onde ξ é a taxa de amortecimento definida em função do tipo de construção, conforme Tabela 9

Tabela 9 - Amortecimento recomendado pela guia SÉTRA [15]

Tipo de Construção	Mínimo (%)	Médio (%)
Concreto Armado	0,8	1,3
Concreto Protendido	0,5	1,0
Aço	0,2	0,4
Mista - Concreto e aço	0,3	0,6
Madeira	1,5	3,0

Os fatores de redução da resposta dinâmica (ψ) são aplicados a considerar a probabilidade do risco de ressonância, ou seja, quando a frequência da estrutura é igual ou próxima da frequência de passo do pedestre, ou seja, quando o fator é igual a 1. As Figuras 8 e 9 apresentam os gráficos dos fatores de redução, respectivamente, para faixas de frequência de passos considerando primeiro harmônico e o segundo harmônico, ou seja, casos 1 e 2, e, caso 3.

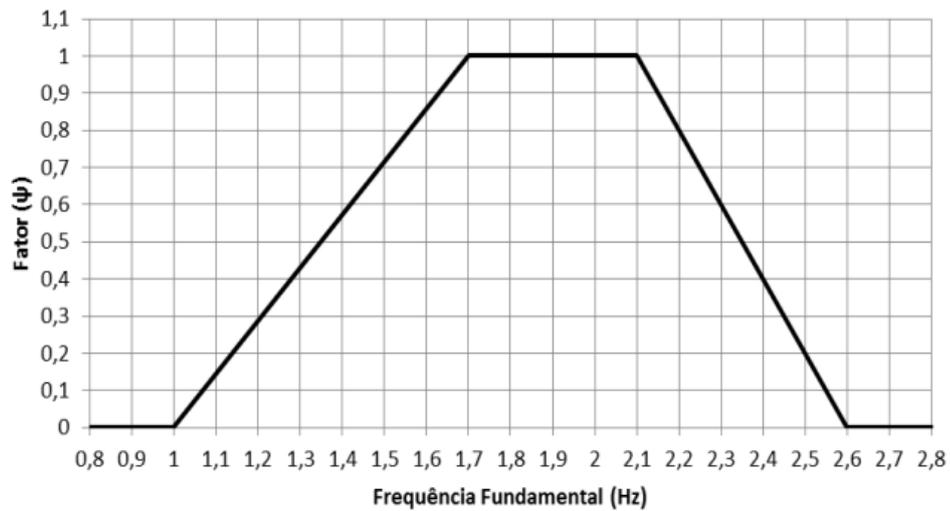


Figura 8 - Fator de redução da resposta dinâmica. Casos 1 e 2. [15]

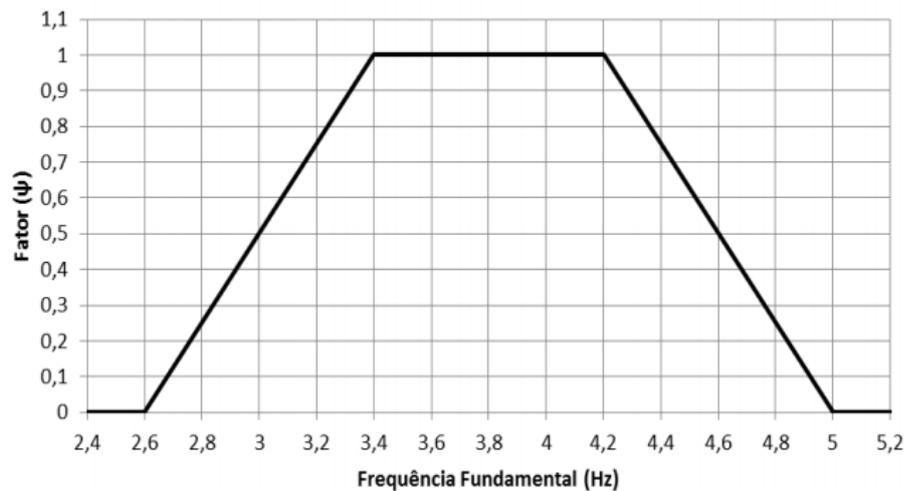


Figura 9 - Fator de redução da resposta dinâmica. Caso 3. [15]

2.8. Guia de Projeto do HIVOSS [16]

2.8.1. Etapa 1: Avaliação das frequências naturais

Human Induce Vibrations of Steel Structures [16] apresenta uma metodologia seguida por etapas assim como o guia Sétra [15], porém na primeira etapa de análise das frequências naturais, o guia do Hivoss, leva em consideração que a massa modal do pedestre deve ser considerada quando a relação entre a massa modal da estrutura for superior a 5% (cinco por cento).

2.8.2. Etapa 2: Verificação do intervalo de frequências críticas

As frequências naturais são avaliadas mediante a um intervalo crítico, sendo evitadas para vibrações verticais e longitudinais (1,25 a 2,3 Hz) e vibrações laterais (0,5 a 1,2 Hz). O guia sucede atribuindo um intervalo crítico para evitar que as estruturas sejam excitadas pelo segundo harmônico, dessa forma o guia recomenda que o intervalo crítico para vibrações verticais e longitudinais seja expandido de 1,25 a 4,6 Hz.

O guia orienta que caso as frequências da estrutura estejam fora do intervalo crítico, à verificação dinâmica é dispensada e as condições de conforto são atendidas. Caso contrário, deve ser feita a verificação da estrutura.

2.8.3. Etapa 3: Determinação das situações de projeto

Assim como Sétra [15], o guia classifica a estrutura segundo a intensidade de fluxo de pedestre sob a qual está submetida, sendo classificadas por cinco classes distintas, conforme Tabela 10.

Tabela 10 - Classes de tráfego e densidade

Classe de tráfego	Densidade	Descrição	Características
TC1	15 P/BL	Tráfego muito esparso	B é a largura do tabuleiro. L é o comprimento do tabuleiro.
TC2	0,2 P/m ²	Tráfego esparso	Passo livre e confortável; Ultrapassagem com facilidade. Pedestres isolados com passadas livres.
TC3	0,5 P/m ²	Tráfego denso	Ainda há liberdade de circulação com passadas livres. Ultrapassagem pontualmente dificultada.
TC4	1,0 P/m ²	Tráfego muito denso	Liberdade de circulação restringida. Ultrapassagem não é mais possível.
TC5	1,5 P/m ²	Tráfego muito denso	Circulação desagradável. Pedestres em multidão com passadas sincronizadas.

2.8.4. Etapa 4: Determinação dos critérios de conforto

Os critérios de conforto humano da estrutura são definidos em função da aceleração limite máxima. O guia recomenda quatro classes de conforto humano, conforme Tabela 11.

Tabela 11 - Classes de conforto

Classe de conforto	Nível de conforto	Aceleração limite vertical	Aceleração limite horizontal
CL1	Máximo	< 0,5 m/s ²	< 0,10 m/s ²
CL2	Médio	0,5 a 1,0 m/s ²	0,1 a 0,30 m/s ²
CL3	Mínimo	1,0 a 2,5 m/s ²	0,3 a 0,8 m/s ²
CL4	Inaceitável	> 2,5 m/s ²	> 0,8 m/s ²

2.8.5. Etapa 5: Determinação da aceleração máxima: Modelo ação harmônica

Pelo método de elementos finitos são aplicados modelos de cargas harmônicas para cada classe de tráfego, TC1 a TC3 ($d < 1 \text{ ped/m}^2$) e TC4 a TC5 ($d \geq 1 \text{ ped/m}^2$), definidos em função da densidade. A representação do modelo de carga é definida pela aplicação de uma carga harmônica uniformemente distribuída em uma área de tráfego (S) submetida a um número equivalente de pedestres, conforme Equação (10).

$$p(t) = P \cos(2 \pi f_s t) n' \psi \quad (10)$$

Onde:

$p(t)$: ação distribuída uniforme harmônica;

P: componente de força devido ao pedestre isolado com uma frequência de passada, que varia conforme a direção do modo de vibração em estudo, conforme indicado na Tabela 13;

F_s : frequência de passo (Hz);

n' : número equivalente de pedestre, definido em função da densidade de fluxo, conforme Tabela 12;

ψ : fator de redução que considera a probabilidade do risco de ressonância;

Tabela 12 - Parâmetros recomendado pelo guia HIVOSS [16]

P (N)		
Vertical	Longitudinal	Lateral
280	140	35
Coeficiente de redução ψ		
Vertical e longitudinal		Lateral
Número equivalente n' de pedestres sobre a superfície carregada S para o modelo de carga		
TC1 a TC3	(densidade $d < 1.0 \text{ P/m}^2$): $n = \frac{10,8 \sqrt{\xi n}}{S}$	
TC4 e TC5	(densidade $d \geq 1.0 \text{ P/m}^2$): $n = \frac{1,85 \sqrt{n}}{S}$	

Onde:

ξ : é o coeficiente de amortecimento definido em função do tipo de estrutura, conforme Tabela 13.

n : é o numero de pedestres ($n = S \times d$).

Tabela 13 - Amortecimento recomendado pela guia HIVOSS [14]

Tipo de construção	ξ Mínimo	ξ Médio
Concreto Armado	0,80%	1,30%
Concreto Protendido	0,50%	1,00%
Estrutura Mista	0,30%	0,60%
Estrutura Metálica	0,20%	0,40%
Estrutura de Madeira	1,00%	1,50%
Catenária	0,70%	1,00%

2.9. Guia de Projeto AISC [54]

O Guia de projeto “Floor Vibrations Due to Human Activity” foi desenvolvido pelo AISC - American Institute of Steel Construction e faz parte de uma série de guias intitulados “Steel Design Guide Séries 11”.

O objetivo desse guia de projeto é fornecer princípios básicos e ferramentas de análises simples para avaliação de pisos reticulados em aço e passarelas quanto a vibrações devido a atividades humanas.

O critério de Aceitação para o Conforto Humano pode ser empregado na avaliação da resposta dinâmica de sistemas estruturais associados a escritórios, shoppings, passarelas e ocupações similares, considerando as seguintes hipóteses propostas por Murray et al.

O guia apresenta a análise dinâmica em função dos valores alcançados da aceleração de pico na razão com a gravidade, a_p/g . Esses valores são examinados em conjunto com os valores limites determinados na curva base da ISO 2631/2 [55], determinados pela norma International Standard Organization.

A ISO Standard sugere limites em termos da raiz quadrada do erro quadrático médio, rms (root mean square) das acelerações, como um múltiplo da linha base da curva conforme, Figura 10. Para fins de projeto, esses limites podem ser considerados em uma faixa que varia entre 0,8 e 1,5 vezes os valores recomendados por norma, dependendo da duração da vibração e da frequência dos eventos referentes à vibração.

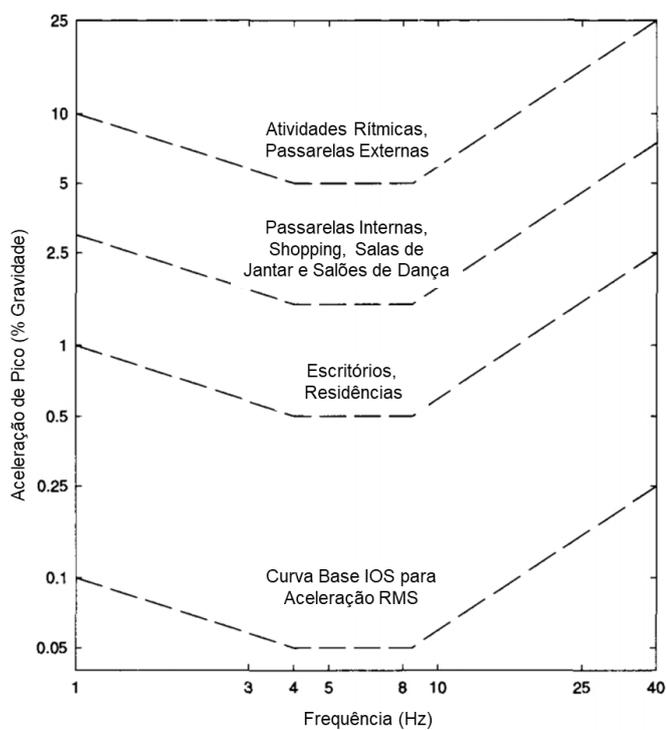


Figura 10 - Aceleração de pico recomendada para conforto humano em vibrações devidas a atividades humanas, ISO 2631/2 [55]

A metodologia considera que a ação dinâmica, será composta apenas pelo componente harmônico coincidente com a frequência natural da estrutura, para a ocorrência da ressonância, conforme a Equação (11), em virtude da reduzida contribuição das demais componentes harmônicas na resposta dinâmica. Na Tabela 14 são apresentados os valores da frequência de excitação (f_p) e os seus respectivos coeficiente dinâmicos (a_i).

$$F(t) = P a_i \cos(2\pi i f_p t) \quad (11)$$

Onde:

$F(t)$ - força representativa da ação dinâmica humana ao longo do tempo (N);

P - peso do indivíduo (N);

a_i - coeficiente de Fourier associado ao i -ésimo harmônico da ação dinâmica;

i - múltiplo harmônico da frequência de passo;

f_p - frequência do passo da ação dinâmica humana (Hz);

t - tempo (s).

Tabela 14 - Frequências de excitação e coeficientes dinâmicos [54]

Harmônico (i)	Caminhar	
	f_p (Hz)	a_i
1	1,6 – 2,2	0,5
2	3,2 – 4,4	0,2
3	4,8 – 6,6	0,1
4	6,4 – 8,8	0,05

De acordo com as hipóteses anteriores a aceleração do sistema estrutural, associada à condição de ressonância, é obtida conforme a Equação (12).

$$\frac{a_p}{g} = \frac{R a_1 P}{\beta W} \cos(2\pi i f_p t) \quad (12)$$

Onde:

P : força constante representando a excitação (kN);

g : aceleração da gravidade (m/s^2);

R : fator de redução;

β : taxa de amortecimento (%);

W: peso efetivo do piso (kN);

a/g: razão entre a aceleração de pico e a aceleração da gravidade.

O fator de redução R, leva em conta o fato de que o movimento ressonante permanente não é alcançado através da caminhada e que a pessoa que está caminhando e a pessoa que está sentindo a vibração não estão simultaneamente no local de máxima amplitude modal. É recomendado que seja igual a 0,7 para passarelas e 0,5 para estruturas de piso que possuam configurações modais associadas a duas direções, segundo Murray et al [54].

A aceleração de pico devido ao caminhar de pessoas é estimada com base no emprego da Equação (10), considerando o menor harmônico i para o qual a frequência da excitação, $f = i.f_p$, coincide com a frequência fundamental do piso. A aceleração de pico é então comparada com os valores limites proposta por norma, ISO 2631/2 [55], como apresentado na Figura 10. A Equação (12), pode, ainda, ser simplificada considerando-se que o coeficiente dinâmico para a componente força harmônica i, α_i , seja expresso em função da frequência da excitação, f, de acordo com a Equação (13):

$$a_i = 0,83 \exp(-0,35f_n) \quad (13)$$

Substituindo-se o coeficiente dinâmico, α_i , Equação (13), na Equação (12), resulta-se na Equação (14):

$$\frac{a_p}{g} = \frac{P_o \exp(-0,35f_n)}{\beta W} \quad (14)$$

Onde:

a_p/g : aceleração de pico estimada em unidades de g;

a_0/g : aceleração limite proposta por norma, ISO 2631/2 [55];

f_n : frequência natural do piso;

P_o : força constante, conforme Tabela 15.

Tabela 15 - Valores recomendados para os parâmetros P_0 , β e a_0/g [54]

	Força constante P_0	Taxa de amortecimento β	Aceleração limite $a_0/g \times 100\%$
Escritórios, residências, igrejas	0,29 kN	0,02-0,05	0,50%
Shopping	0,29 kN	0,02	1,50%
Passarela - interna	0,41 kN	0,01	1,50%
Passarela - externa	0,41 kN	0,01	5%

2.10. Resumo

Os critérios de normas e guias de projeto empregado nesse capítulo avaliam a resposta dinâmica da estrutura empregando valores determinísticos. A avaliação da resposta dinâmica de passarelas é obtida levando em consideração a frequência de excitação em ressonância com a frequência natural da passarela. A Tabela 16 apresenta o resumo de normas e guias de projeto com seus limites proposto em termo de aceleração ao modo de vibração vertical para o atendimento do conforto humano nas estruturas de passarela de pedestre.

Tabela 16 - Acelerações máximas verticais propostas por normas e guias

Normas e guias de projeto	Aceleração crítica (m/s ²) Modo vertical
BS 5400-2	$0,5 f_n^{1/2}$
Eurocode 5 – Parte 2	$a_{vert,1} = 200/M \xi$ se $f_{ver} \leq 2,5$ Hz
	$a_{vert,1} = 200/M \xi$ se $2,5 \leq f_{ver} \leq 5,0$ Hz
6118/2023	(*)
OHBDC	$a_{lim} = 0,25 (f_n^{1/2})^{0,78}$
BRO	<0,5
Sétra	Nível máximo de conforto: 0 - 0,5
	Nível médio de conforto: 0,5 - 1,0
	Nível mínimo de conforto: 1,0 – 2,5
	Nível intolerável de conforto: $\geq 2,5$
Hivoss	Nível máximo de conforto: < 0,5
	Nível médio de conforto: 0,5 - 1,0
	Nível mínimo de conforto: 1,0 – 2,5
	Nível intolerável de conforto: $\geq 2,5$

3. PARÂMETROS ESTATÍSTICOS E SIMULAÇÃO MONTE CARLOS (SMC)

3.1. Introdução

Os métodos determinísticos analíticos apresentados no capítulo 1 avaliam o comportamento dinâmico da estrutura mediante ao carregamento de um único pedestre, com valores médios de peso, frequência e comprimento de passo, caminhando em ressonância com a estrutura, ou seja, desconsiderando a natureza estocástica do caminhar humano. Os resultados das acelerações de pico são obtidos mediante o pior cenário de excitação da estrutura.

Segundo Zivanovic [33], os métodos determinísticos apresentam algumas deficiências, tais como: desconsideram a intervariabilidade e a intravariabilidade do passo e assumem que a condição ressonante da estrutura é alcançada por um único indivíduo.

O emprego da análise probabilística do comportamento dinâmico de passarelas de pedestre permite determinar valores de acelerações de pico considerando o fenômeno estocástico do caminhar humano, mediante a aleatoriedade do peso do pedestre, da frequência do passo e comprimento do passo. Desta forma as passarelas podem experimentar acelerações acima dos limites estabelecidos pelos critérios determinísticos. Diante desse contexto, serão apresentados a definição dos parâmetros estatísticos utilizados para realizar a avaliação do comportamento dinâmico de passarelas de pedestres nesse estudo de pesquisa.

3.2. Variáveis aleatórias discretas e contínuas

A variável é aleatória quando é possível assumir diferentes valores como resultado de um experimento probabilístico, podendo ser definida como variáveis aleatórias discretas e contínuas.

Ferreira [56] defini variáveis aleatórias discretas como aquelas que só podem assumir valores inteiros e que o contradomínio da função que envolve a variável é finito ou infinito enumerável. Já as variáveis aleatórias contínuas podem assumir

qualquer valor em certo intervalo de reta real e que o contradomínio é um intervalo ou um conjunto de intervalos (Figura 11).

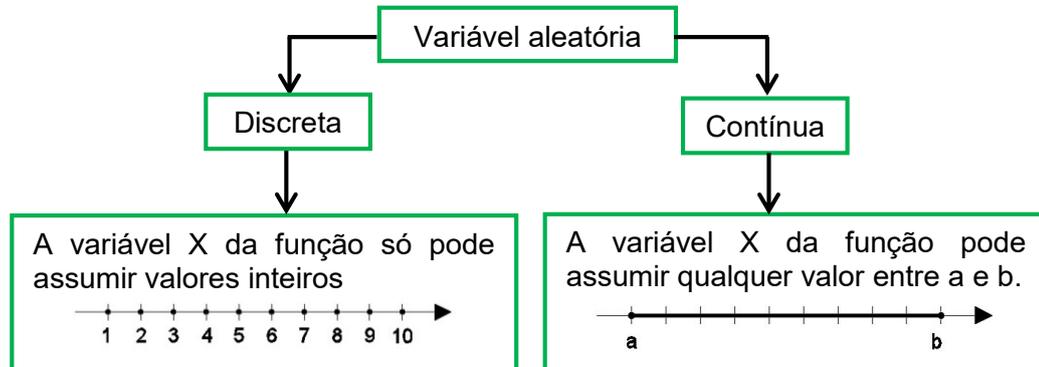


Figura 11 – Descrição variável aleatória discreta e contínua

As variáveis aleatórias, discretas e contínuas, são comumente caracterizadas por uma função de densidade de probabilidade (fdp). Essa função associa a cada valor amostral de uma variável aleatória, a probabilidade de ocorrência dos valores da amostra [57].

Os fatores que caracterizam o caminhar humano são definidos, nas condições estatísticas, como variáveis aleatórias, cujos valores só são conhecidos no momento que um determinado pedestre inicia a travessia da passarela, ou seja, não apresentam valores fixos e são independentes entre si. As variáveis características do caminhar humano são o peso, a frequência do passo e o comprimento do passo.

As variáveis do caminhar humano são consideradas como aleatórias contínuas, sendo, portanto definidas nesse estudo de pesquisa a partir de uma distribuição normal que serão descritas no Capítulo 10.

3.3. Variância e desvio padrão de uma variável aleatória

A variância é definida como a média dos desvios quadráticos da variável em relação à média. A Equação (15) expressa, matematicamente, a variância. Logo, o desvio padrão é resultante da raiz quadrada positiva da variância, conforme representado na Equação (16)

$$\sigma^2 = \frac{\sum (X - \bar{X})^2}{n-1} \quad (15)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (X-\bar{X})^2}{n-1}} \quad (16)$$

Onde:

σ^2 : variância;

X: valores da amostra;

\bar{X} : média amostral;

n: quantidade de valores amostrais;

σ : desvio padrão;

3.4. Distribuição normal

A distribuição normal é caracterizada por uma função de densidade de probabilidade cujo gráfico descreve uma curva em forma de sino, que evidencia a maior probabilidade da variável aleatória assumir valores próximos aos valores centrais. A curva de distribuição normal assume as seguintes características (Ferreira [50]):

- a) A curva da distribuição é simétrica em relação a sua média μ . Assim, se tivermos calculando uma área a certa distância a direita da média de distribuição, esta área será igual a uma área que se situar a uma mesma distância a esquerda desta média.
- b) A curva prolonga-se de $-\infty$ a $+\infty$. Ou seja, podemos encontrar probabilidades intervalares através de áreas sob esta curva normal, desde um menor valor possível que esta variável pode assumir até um maior valor possível.
- c) A distribuição é especificada por uma média μ e um desvio padrão σ . Ou seja, para calcular qualquer probabilidade de uma variável que siga uma normal, devemos conhecer a média e o desvio padrão desta variável.
- d) A área total sob a curva é de 100% que seria o mesmo calculando toda a área sob a curva normal.

Conforme Ferreira [56], se uma variável X segue uma distribuição normal com média μ e desvio padrão σ terá a possibilidade de assumir um valor entre dois

pontos quaisquer $P(a \leq X \leq b)$, logo, sendo igual a área compreendida entre esses dois pontos $\int_a^b f(X)dx$. A curva característica de uma distribuição normal é dada pela Equação (17)

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (17)$$

Onde:

σ : desvio padrão;

μ : média

$f(X)$: distribuição normal de uma variável X .

A curva de distribuição possui dois pontos de inflexão, respectivamente em $\mu - \sigma$ e $\mu + \sigma$. Se uma variável está normalmente distribuída cerca de 68,3% das observações dessa variável recaem no intervalo de um desvio padrão em torno da média, 95,5% recaem no intervalo de +/- 2 desvios em torno da média e 99,7% no intervalo de +/- 3 desvios em torno da média (Figura 12).

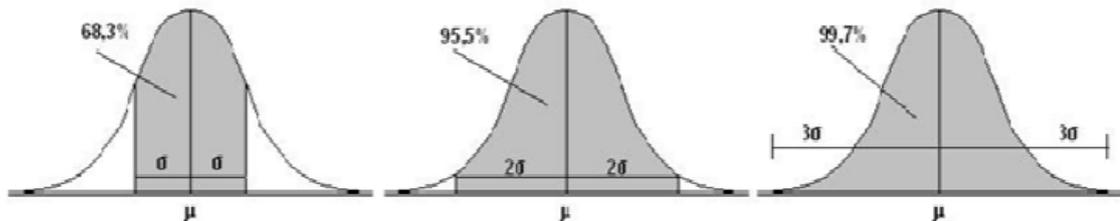


Figura 12 - Pontos de inflexão da curva de distribuição normal [58]

Por exemplo, segundo Bachmann et al [59] a frequência de passo do pedestre segue uma distribuição normal com média de 2,0 Hz e desvio padrão de 0,2. Sendo assim, a representatividade percentual de 99,7% no intervalo de +/- 3 desvios padrão da faixa de valores mais prováveis da frequência na direção transversal vertical estão entre 1,4 a 2,6 Hz.

Uma variável aleatória tem distribuição normal se sua função de densidade de probabilidade tiver a forma de um sino, conforme a Figura 13, representativa da resposta dinâmica de uma passarela de pedestres submetida ao carregamento

deum único pedestre, cujo peso, frequência e comprimento do passo são variáveis aleatórias.

A Figura 13 representa a resposta dinâmica de uma passarela de pedestres investigada nesse trabalho de pesquisa, quando submetida ao carregamento de um único pedestre, cujo peso, frequência e comprimento do passo são variáveis aleatórias. As respostas dinâmicas variam em função das características individuais de cada pedestre, logo, o comportamento dinâmico é melhor representado por sua respectiva função de probabilidade.

É possível observar que os valores centrais possuem maior probabilidade de ocorrência quando comparados com os extremos. Por exemplo, a aceleração de $0,16 \text{ m/s}^2$ possui probabilidade de ocorrência igual a $7,1\%$, enquanto que a aceleração de $0,28 \text{ m/s}^2$ possui apenas $0,7\%$ de ocorrência.

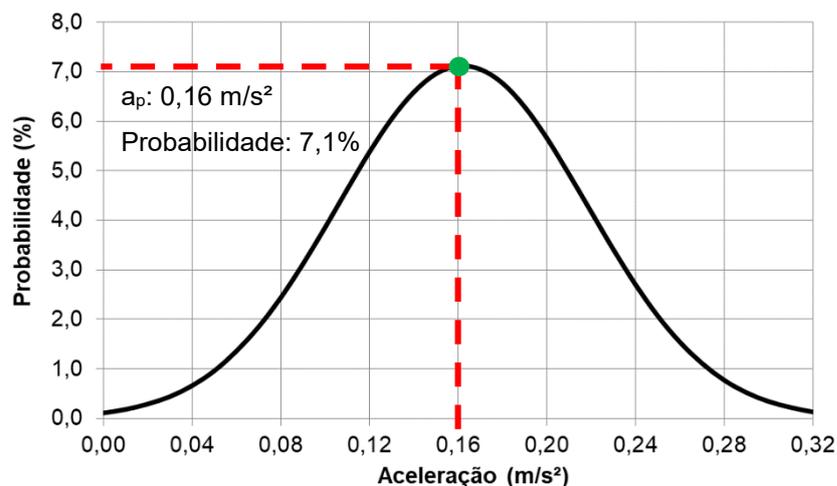


Figura 13 - Curva característica de uma distribuição normal

3.5. Método Monte Carlos (MMC)

O Método de Monte Carlo (MMC) é descrito como um método estatístico, onde se utiliza uma sequência de números aleatórios para a realização de uma simulação. Este método já era conhecido há séculos, mas começou a ser utilizado efetivamente, somente nas últimas décadas. O nome “Monte Carlo” foi denominado por Metrópolis, inspirado no interesse do pesquisador Ulam por poker durante o projeto Manhattan na segunda guerra mundial, devido a similaridade da simulação

estatística de jogos de azar e por causa da capital de Mônaco conhecido como a capital mundial dos jogos de azar (Youriaz [60]).

O método de Monte Carlo (MMC) é uma técnica utilizada para simular fenômenos probabilísticos por meio da geração de números randômicos atribuídos as variáveis independentes simulando cenários e possíveis resultados, também aleatórios e posterior cálculo da probabilidade de determinado valor esperado (Rodrigues [61])

Esse método é empregado na solução de problemas que envolvem variáveis aleatórias com funções de probabilidade conhecidas ou assumidas. A base do método Monte Carlo é a utilização de funções de probabilidades obtidas a partir da teoria apropriada. As principais componentes de uma simulação pelo Método Monte Carlo são (Carvalho [62]):

- a) Função densidade de probabilidade: modelo matemático em questão
- b) Geradores de números aleatórios;
- c) Amostragem de dados a serem simulados;
- d) Contagem dos dados: os resultados de interesse são armazenados;
- e) Estimativa de erro: uma estimativa de erro estatístico como função do número de testes pode ser avaliada;

Em muitas aplicações práticas de Monte Carlos o processo físico é simulado diretamente, sem necessidade de descrever as equações matemáticas que apresentam o compartimento do sistema, sendo que, o único requisito necessário é que o processo físico seja descrito por funções de densidade de probabilidade (fdp) (Youriaz [60]). Uma vez conhecida às funções de densidade de probabilidade a simulação de Monte Carlos é realizada através da amostragem aleatória dessas funções.

No campo da dinâmica estrutural as simulações estatísticas contradizem com os métodos convencionais determinísticos utilizados na avaliação do comportamento de estruturas submetidas a ações randômicas, ou seja, aleatórias.

A resposta dinâmica de passarelas de pedestres submetidas à ação do caminhar é obtida em função das variáveis aleatórias e independentes como o peso, frequência e comprimento do passo do pedestre. Logo, conhecendo-se a função de densidade de probabilidade de tais variáveis torna-se possível simular cenários

distintos para obter a resposta dinâmica probabilística de uma determinada estrutura.

3.5.1. Geração de números aleatórios

Uma fase muito importante no cálculo de Monte Carlo é a seleção de variáveis aleatórias a partir das funções de densidade de probabilidade ou função de densidade cumulativa (Youriaz [60]).

Todo número aleatório ao ser gerado pertence a uma sequência X de números aleatórios, $x = x_1, x_2, x_3, \dots, x_{n-1}, x_n$ e terá sempre como uniformidade a independência. Todo número aleatório x_i é uma amostra independente de uma distribuição uniforme e continua no intervalo de $[0,1]$ (Carvalho [62]).

Em simulações computacionais utilizam-se geradores de números pseudo-aleatórios, ou seja, se aproxima de algumas propriedades dos números aleatórios, que são sub-rotinas para fornecer um número aleatório toda vez que for necessário realizar um amostragem (Youriaz [60]).

O Microsoft Excel tem em sua base o gerador de números aleatórios, que pode ser gerado através da função “=ALEATÓRIO”, na qual geram-se um número pseudoaleatório entre 0 e 1. Neste caso, essa função “=ALEATÓRIO” é uma função de probabilidade distribuída uniformemente no intervalo $[0,1]$ (Carvalho [62]).

No presente trabalho, os números aleatórios das variáveis características do caminhar humano (peso, frequência, comprimento e intravariabilidade do passo) foram gerados através da função “=INV.NORM.(ALEATÓRIO()); μ ; σ).

3.5.2. Simulação Monte Carlos (SMC)

Como visto o método de Monte Carlo pode ser utilizado para se determinar as probabilidades de ocorrência dos valores de uma determinada variável aleatória.

Desta maneira, pode-se determinar a probabilidade de ocorrência da frequência de passo caminhar de um único pedestre, sendo portanto, a média μ e o desvio padrão σ conhecida.

Sabendo-se que a média da frequência de passo do caminhar é igual a 2 Hz e o desvio padrão é 0,2, sendo portanto a distribuição normal representada

conforme a Figura 14, é possível gerar, aleatoriamente, através da função “=INV.NORM.(ALEATÓRIO(); μ ; σ)” do programa Excel números inteiros que caracterizam a frequência do passo de cada pedestre. A Tabela 17 apresenta a geração dos valores da frequência de passo de cada pedestre.

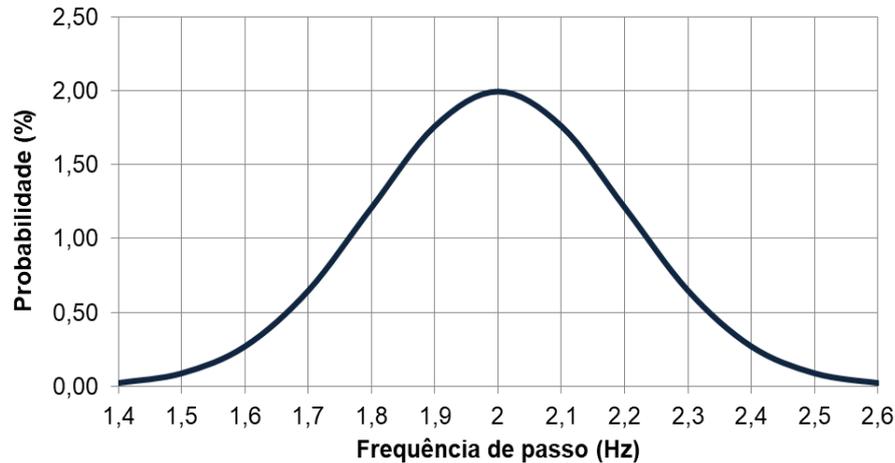


Figura 14 - Função de densidade de probabilidade da frequência do passo (f_p)

Tabela 17 – Geração dos valores da frequência de passo

Pedestres	Frequência do passo (Hz)
1	2,18
2	1,84
3	1,75
4	1,96
5	1,98
6	1,68
7	1,99
8	2,26
9	2,20
10	2,28
...	2,26
X_n	2,06

Função Excel
=inv(aleatório());2;0,2)

Nesse estudo de pesquisa os parâmetros do caminhar do pedestre (peso, frequência e comprimento do passo) seguem uma distribuição normal e serão descritos no Capítulo 11. Com base nisso, a simulação Monte Carlo foi utilizada, nesse estudo de pesquisa, gerando-se aleatoriamente, mediante ao emprego de 2000 simulações, números reais representando as características do caminhar de cada pedestre

4. MODELOS ESTRUTURAIS DAS PASSARELAS

4.1. Introdução

Este capítulo apresenta as características físicas e geométricas das passarelas referenciais reais utilizadas na investigação desse estudo. A Passarela I (ME-I) investigada e analisada numérica e experimentalmente ao longo desse trabalho, e, portanto a mais discretizada, é composta por um sistema estrutural de concreto armado. A Passarela II (ME-II) analisada numérica e experimentalmente por Silva [63] é constituída por um sistema estrutural misto (aço-concreto). A Passarela III (ME-III) analisada numérica e experimentalmente por Varela [64] é composta por um sistema estrutural de aço tipo treliça invertida. As passarelas são suscetíveis a vibrações provenientes da caminhada humana.

4.2. Modelo Estrutural da Passarela I: (ME-I)

O modelo estrutural investigado mediante análise numérica e testes experimentais ao longo desse estudo corresponde a uma estrutura real, existente, associada a uma passarela interna do 5º andar, localizadas entre o Bloco A e B da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ). A passarela possui 3,4 m de largura e 24,4 m de extensão, e, é atualmente utilizada para travessia de pedestres.

O sistema estrutural é caracterizado por 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”, conforme Figuras 15 a 22.

A superestrutura é constituída por duas vigas invertidas longitudinais com seção de 20 x 167 cm e uma viga longitudinal intermediária de 10 x 62 cm interligadas 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 conectadas a dentes “gerber” de 60 cm que fazem o apoio da passarela junto à estrutura dos blocos A e B. O piso da passarela é composto por duas lajes formando um sistema “sanduíche” conectando as extremidades das vigas, com espessuras de 7 e 8 cm para as lajes superior e inferior.

Em relação às características físicas do concreto, este possui uma resistência característica à compressão igual a 14,0 MPa ($f_{ck} = 14,0 \text{ MPa}$), módulo de elasticidade longitudinal igual a 17,8 GPa ($E_c = 17,8 \text{ GPa}$), coeficiente de Poisson igual a 0,2 ($\nu = 0,2$) e densidade de 2550 kg/m³ ($\rho = 2550 \text{ kg/m}^3$). A massa total da estrutura é de 66200 kg.



Figura 15 - Vista lateral da passarela I



Figura 16 - Vista frontal da passarela I



Figura 17 - Vista interna da passarela I



Figura 18 - Vista inferior da passarela I

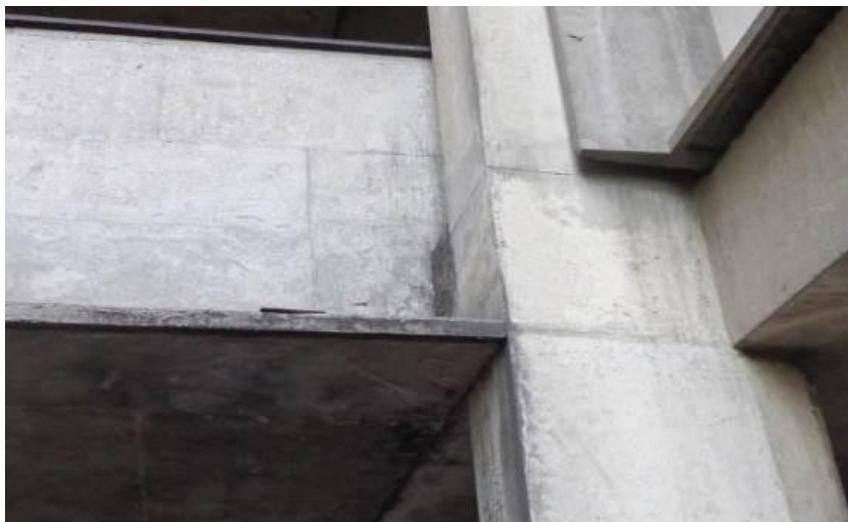


Figura 19 - Vista do apoio da passarela I

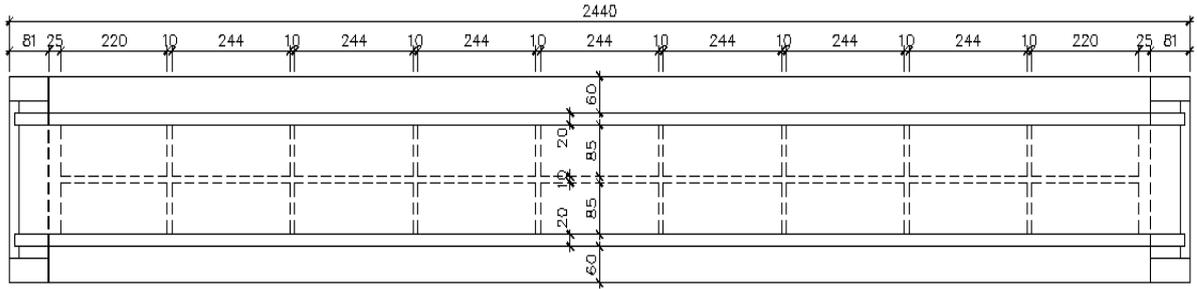


Figura 20 - Vista superior da passarela I

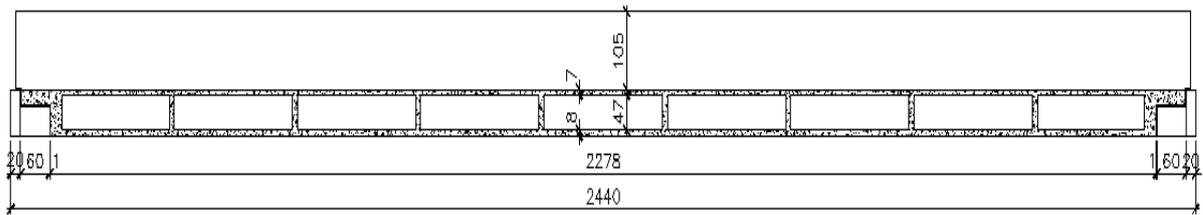


Figura 21 - Seção longitudinal da passarela I

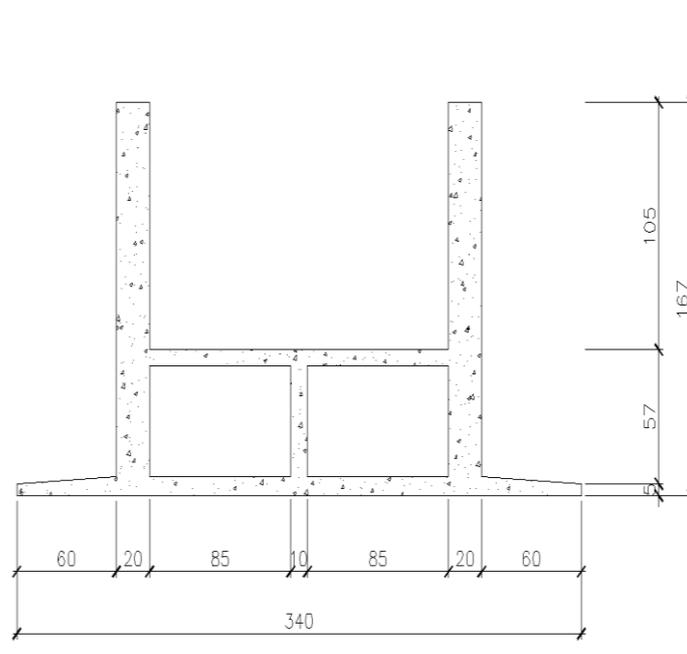


Figura 22 - Seção transversal da passarela I

4.3. Modelo Estrutural da Passarela II: (ME-II) [63]

O modelo estrutural analisado experimental e numericamente desenvolvido em trabalho de pesquisa anterior por Silva [63] corresponde a uma estrutura real de uma passarela externa, localizada na Rua Osvaldo Aranha, no Rio de Janeiro/RJ. A

passarela é composta por um sistema estrutural misto aço-concreto, e, é caracterizada por dois vãos com comprimento igual a 29,5m e 24,0m, respectivamente, e comprimento total de 53,5m (Figuras 23 e 24).

Em termos de materiais, possui infra e mesoestrutura em concreto armado e superestrutura totalmente em aço (estrutura metálica), ressaltando-se a presença de perfis metálicos adicionais soldados à mesa inferior de cada uma das longarinas no vão em estudo da passarela (Figura 25).

As longarinas são formadas por perfis metálicos soldados, cujas mesas possuem 300mm de largura com 5/16" (7,94mm) de espessura e a alma com 775mm de altura por 1/2" (12,7mm) de espessura. As transversinas são constituídos por perfis cantoneiras de abas iguais L 2 1/2" x 2 1/2" x 1/4". As chapas de piso são do tipo xadrez com espessura de 5/16" (Figura 26).

Em relação às propriedades físicas do aço, este possuem módulo de elasticidade de 210 GPa, coeficiente de Poisson igual a 0,3 ($\nu = 0,3$) e densidade igual a 7850 kg/m³ ($\rho = 7850$ kg/m³).



Figura 23 - Vista do trecho analisado da passarela II [63]

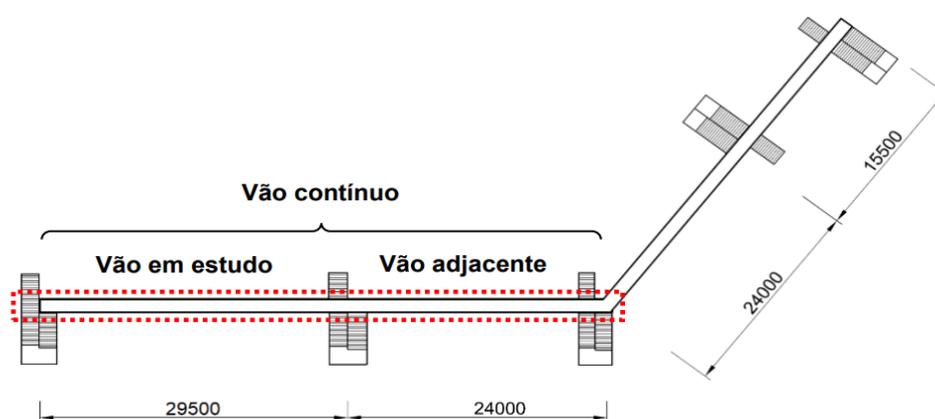


Figura 24: Projeto da passarela II. Vista superior [63]



Figura 25 - Vista em detalhes dos perfis adicionais as longarinas [63]

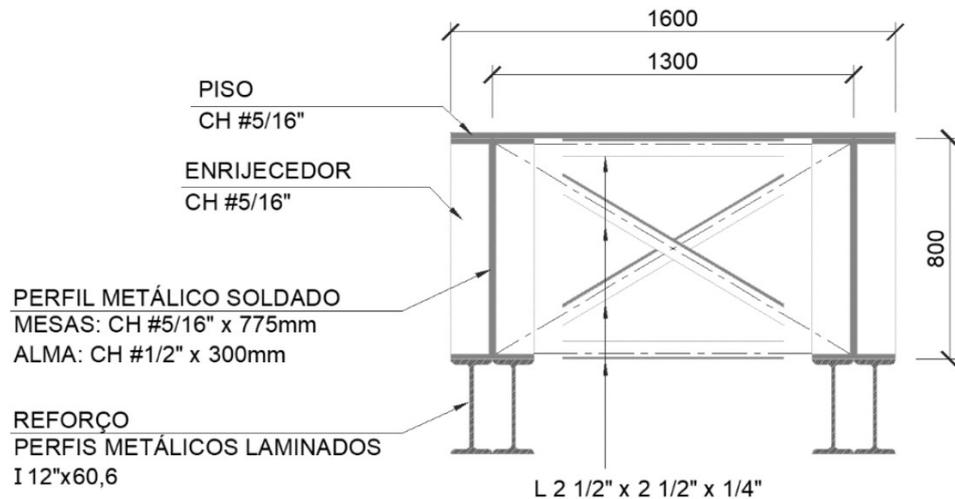


Figura 26 - Seção transversal da passarela II [63]

4.4. Modelo Estrutural da Passarela III: (ME-III) [64]

O modelo estrutural analisado experimental e numericamente desenvolvido em trabalho de pesquisa anterior por Rezende *et al* [64] corresponde a uma estrutura real de uma passarela externa, existente, localizada no trecho da Avenida Ayrton Senna, no Rio de Janeiro/RJ. A estrutura é formada por perfis vazados de aço estrutural e lajes de concreto pré-moldadas apoiadas nos perfis de travamento entre as duas faces laterais da treliça, formando um sistema misto de aço-concreto.

Os perfis vazados de formato retangular são formados por chapas dobradas de aço do tipo soldadas em suas extremidades, com espessura variável ao longo do comprimento da passarela (Figuras 27 a 29).

A passarela é constituída por três vãos biapoiados, o vão central possui 68,6m de comprimento, divididos em 28 módulos simétricos de 2,45m cada, altura de 2,60m e largura de 2,55m (Figura 30).

Em relação às propriedades físicas do concreto, este possuem resistência característica de compressão de 20 MPa ($f_{ck} = 20$ MPa), cobrimento igual a 2,5 cm, módulo de elasticidade longitudinal igual a 21,3 GPa ($E_c = 21,3$ GPa), coeficiente de Poisson igual a 0,2 ($\nu = 0,2$) e densidade igual a 2500 kg/m³ ($\rho = 2500$ kg/m³). Tratando-se das propriedades físicas do aço, este possuem módulo de elasticidade de 205,0 GPa ($E = 205,0$ GPa), coeficiente de Poisson igual a 0,3 ($\nu = 0,3$) e densidade igual a 7850 kg/m³ ($\rho = 7850$ kg/m³).



Figura 27 - Vista do trecho analisado da passarela III [64]



Figura 28 - Vista ampliada do trecho analisado da passarela III [64]



Figura 29: Vista inferior dos elementos da laje pré moldada [64].

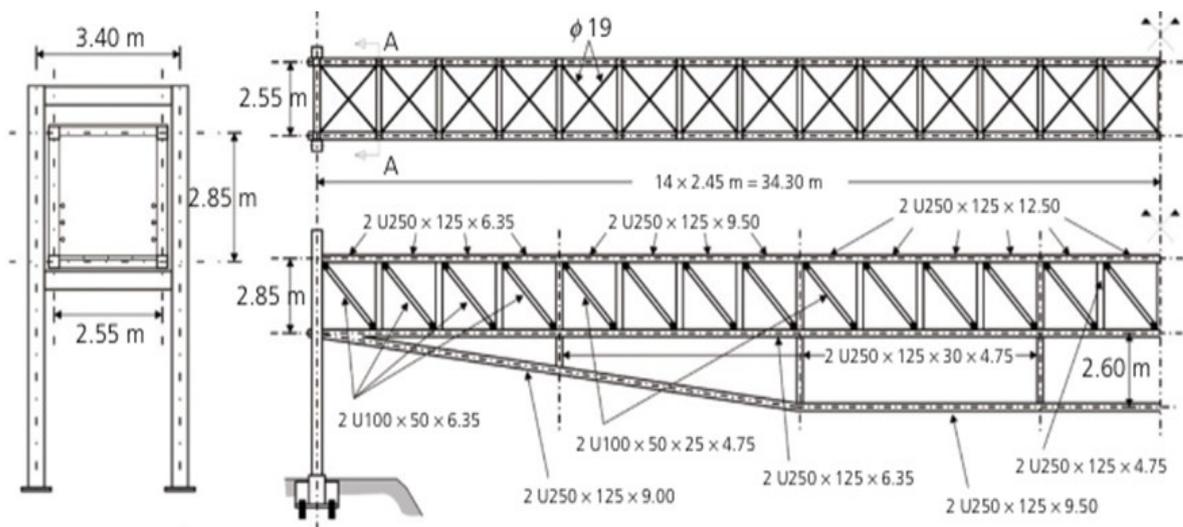


Figura 30 - Projeto da passarela III. Vista longitudinal e transversal [64]

5. MODELAGEM EM ELEMENTOS FINITOS

5.1. Considerações iniciais

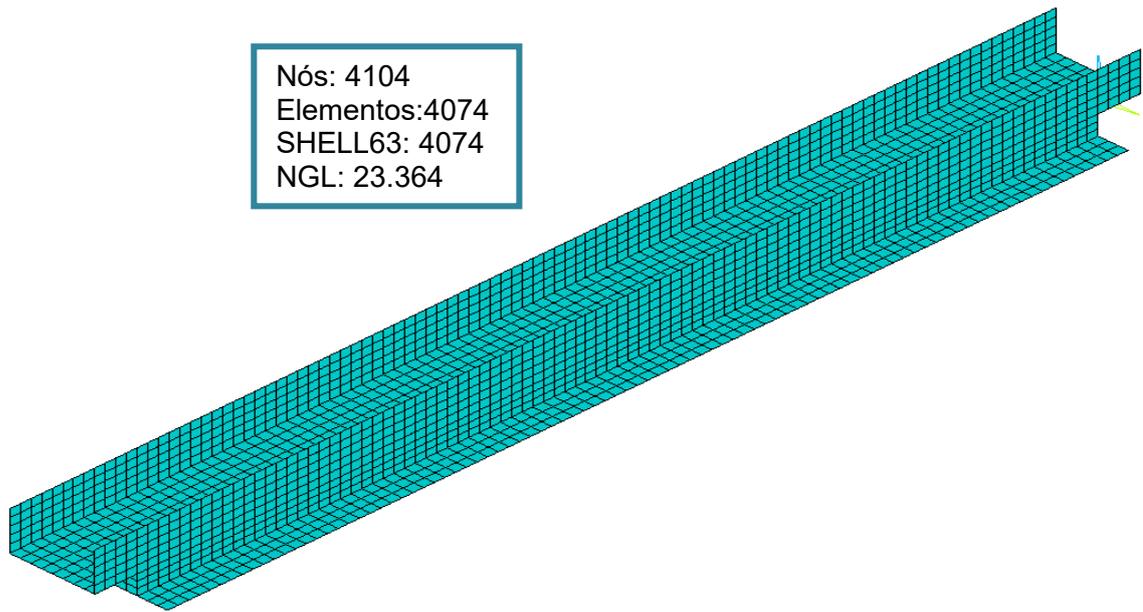
No presente capítulo serão apresentados os modelos tridimensionais das passarelas investigadas empregando-se técnica usuais de discretização, via método dos elementos finitos por meio do emprego do programa ANSYS [65]. No modelo da Passarela I (ME-I) as vigas e a laje foram modeladas por elemento finito de casca SHELL63 [65]. No modelo da Passarela II (ME-II) desenvolvido em trabalho de pesquisa anterior por Silva [63] foram utilizados os elementos BEAM44 [65] e SHELL63 [65]. No modelo da Passarela III (ME-III) desenvolvido em trabalho de pesquisa anterior por Rezende *et al* [64] e Duarte [66] foram utilizados os elementos BEAM44 [65], SHELL63 [65] e LINK8 [65].

5.2. Modelo numérico: Passarela I (ME-I)

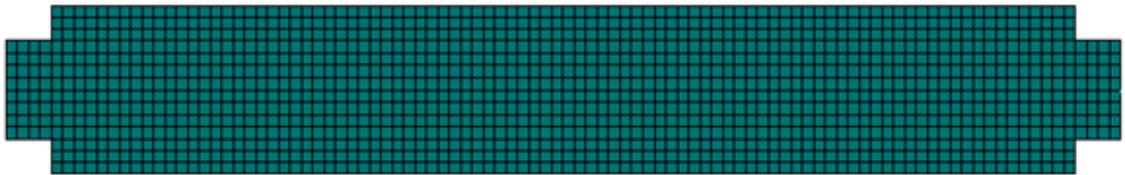
O modelo numérico-computacional da Passarela I (ME-I) foi desenvolvido de maneira a representar da forma mais real possível, o comportamento estrutural da passarela de pedestres investigada. Este modelo foi utilizado na análise modal (vibração livre), visando avaliar o comportamento dinâmico da estrutura.

O modelo computacional tridimensional, desenvolvido para a análise dinâmica do piso da Passarela I (ME-I), foi gerado utilizando-se técnicas usuais de refinamento de malha presente nas simulações do método dos elementos finitos implementadas pelo programa computacional de análise estrutural ANSYS [65]. O refinamento da malha foi realizado de forma a serem gerados elementos finitos uniformemente distribuídos da ordem de 25 por 25 centímetros, demonstrando um bom refinamento para a passarela de pedestre investigada ao longo desse trabalho.

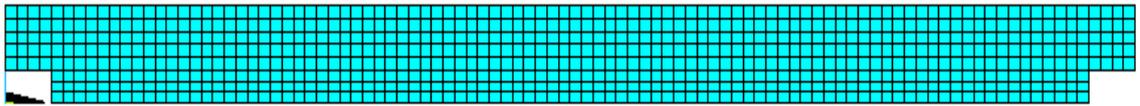
Em seguida a Figura 31 mostra o modelo numérico-computacional da Passarela I (ME-I), sendo portanto, verificada uma discretização eficiente da malha de elementos finitos e as características gerais (número de nós, grau de liberdade e elemento).



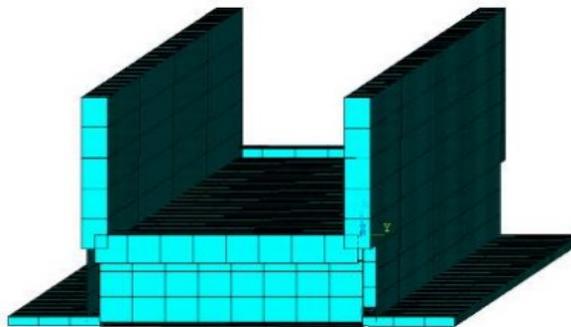
a) Vista isométrica.



b) Vista superior



c) Vista lateral



d) Vista frontal

Figura 31 - Modelo em elementos finitos. Passarela I (ME-I)

5.3. Modelo numérico: Passarela II (ME-II) [63]

O modelo numérico-computacional da Passarela II (ME-II) foi desenvolvido em trabalho de pesquisa anterior por Silva [63] de maneira a representar da forma mais real possível o comportamento estrutural da passarela de pedestres

O modelo computacional tridimensional, desenvolvido para a análise dinâmica do piso da Passarela II (ME-II), foi gerado utilizando-se técnicas usuais de refinamento de malha presente nas simulações do método dos elementos finitos implementadas pelo programa computacional de análise estrutural ANSYS [65].

A Figura 32 mostra o modelo numérico-computacional da Passarela II (ME-II) analisado numericamente (análise modal) por Silva [63], sendo, portanto, verificada a discretização eficiente da malha de elementos finitos e as características gerais do modelo.

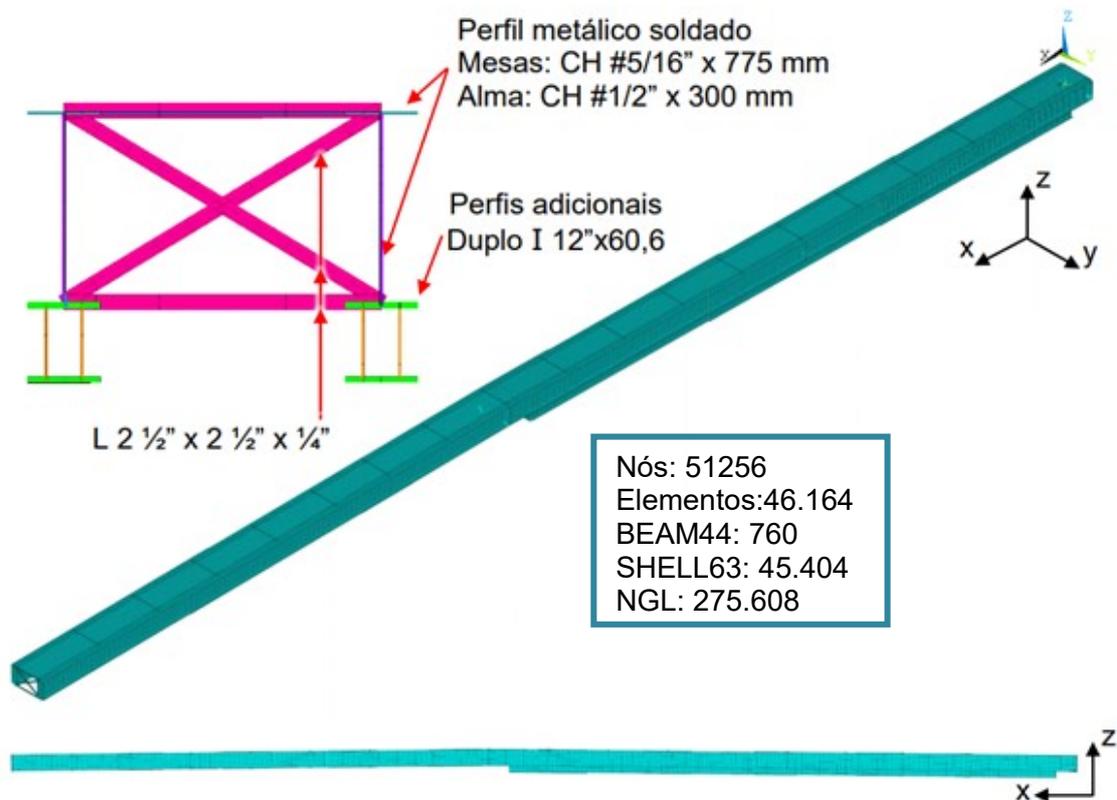


Figura 32 - Modelo em elementos finitos. Passarela II (ME-II) [63]

5.4. Modelo numérico: Passarela III (ME-III) [66]

O modelo numérico-computacional da Passarela III (ME-III) foi desenvolvido em trabalho de pesquisa anterior por Duarte [66] de maneira a representar da forma mais real possível o comportamento estrutural da passarela de pedestres

O modelo computacional tridimensional, desenvolvido para a análise dinâmica do piso da Passarela III (ME-III), foi gerado utilizando-se técnicas usuais de refinamento de malha presente nas simulações do método dos elementos finitos implementadas pelo programa computacional de análise estrutural ANSYS [65].

A Figura 33 mostra o modelo numérico-computacional da Passarela III (ME-III) analisado numericamente (análise modal) por Rezende *et al* [64] e Duarte [66], sendo, portanto, verificada a discretização eficiente da malha de elementos finitos e as características gerais do modelo.

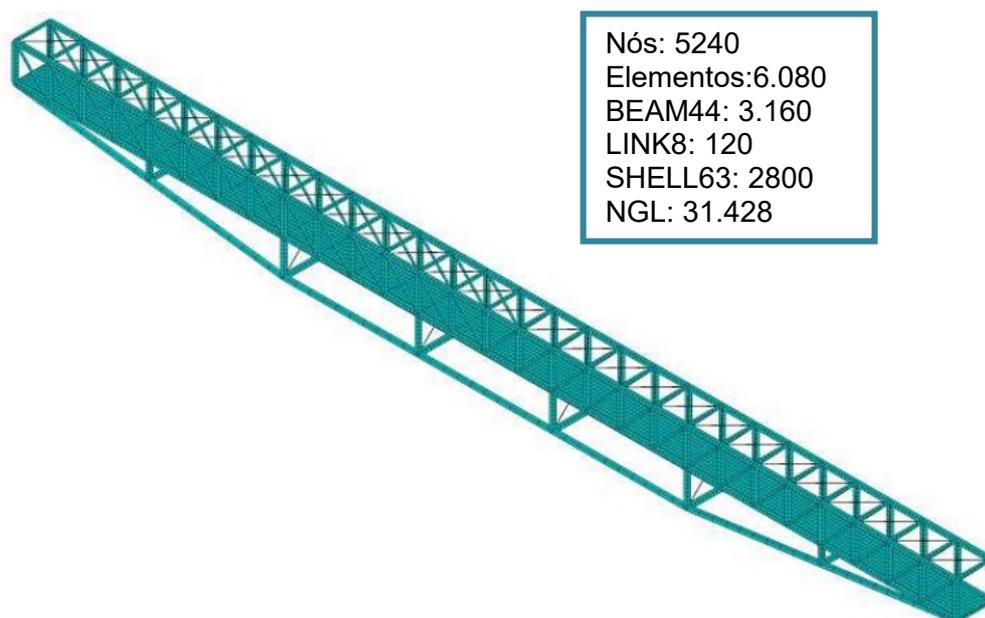


Figura 33 - Modelo computacional em elementos finitos. Passarela III (ME-III) [66]

5.5. Hipóteses simplificadoras adotadas nas análises

A análise estrutural é uma etapa de projeto na qual é realizado uma previsão do comportamento da estrutura, considerando-se todas as teorias físicas e matemáticas do caso analisado.

A etapa inicial consiste na representação da estrutura real construída em um modelo a ser analisado. Na sequência tem-se o modelo estrutural ou matemático que incorpora teorias e hipóteses sobre o comportamento estrutural, sob solicitações baseados em leis físicas, tais como o equilíbrio entre tensões, compatibilidade entre deslocamentos e deformações e as leis constitutivas dos materiais. A terceira etapa corresponde ao modelo discreto, idealizado dentro das metodologias de cálculo dos métodos de análises. E por fim, tem-se o modelo computacional descreve toda simulação do comportamento de estruturas.

Na concepção do modelo estrutural é realizada uma idealização do comportamento da estrutura real adotando uma série de hipóteses simplificadoras, baseadas em teorias físicas e em resultados experimentais e estatísticos. Desta forma, para o desenvolvimento dos modelos estruturais desse estudo, foram adotadas as seguintes hipóteses:

- Material homogêneo, isotrópico e elástico;
- Considera-se a interação completa entre piso e vigas;
- Modelo de massa consistente com massa distribuída nos elementos;
- A estrutura trabalha no regime linear elástico (linearidade física);
- Não consideração da geométrica deformada (linearidade geométrica);

5.6. Amortecimento estrutural

Amortecimento é um processo pelo qual a energia proveniente do movimento vibratório de um determinado sistema estrutural é dissipada. Contudo, avaliar o amortecimento de uma estrutura é uma tarefa bastante difícil, pois o amortecimento não depende apenas das propriedades intrínsecas dos materiais que compõem o sistema, mas também de materiais e elementos que estejam acoplados a estrutura, segundo Clough e Penzien [67].

Determinar a matriz de amortecimento de um sistema estrutural através das propriedades de amortecimento de cada elemento que compõe a estrutura da maneira, como por exemplo, se determina a matriz de rigidez, é impossível segundo Chopra [68]. Isto se deve ao fato de as propriedades de amortecimento dos

materiais não serem bem estabelecidas, ao contrário do módulo de elasticidade que é computado no cálculo da rigidez.

Ainda que estas propriedades fossem conhecidas, de acordo com Chopra [68], 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 micro fissuras 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.

A avaliação física do amortecimento de uma estrutura só é considerada corretamente medida se seus valores são obtidos através de ensaios experimentais. Entretanto, 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, Clough e Penzien [67].

Com este intuito, é habitual utilizar-se 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 (β), conforme pode ser observado através da Equação (18). Define-se M a matriz de massa e K a matriz de rigidez do sistema, Craig Jr. [69], Clough e Penzien [67] e Chopra [68]

$$C = \alpha M + \beta K \quad (18)$$

A Equação (18) pode ser reescrita, em termos de taxa de amortecimento modal e frequência natural circular (rad/s), como:

$$\xi_i = \frac{\alpha}{2 \omega_{0i}} + \frac{\beta \omega_{0i}}{2} \quad (19)$$

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 (19), para duas frequências naturais mais importantes, obtêm-se as Equações (20) e (21).

$$\alpha = 2 \xi_1 \omega_{01} - \beta \omega_{01} \omega_{01} \quad (20)$$

$$\beta = \frac{2 (\xi_1 \omega_{01} - \xi_1 \omega_{01})}{\omega_{02} \omega_{02} - \omega_{01} \omega_{01}} \quad (21)$$

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 . Em geral, a frequência natural ω_{01} é tomada como a menor frequência natural, ou frequência fundamental da estrutura, e ω_{02} como a segunda frequência mais importante no carregamento.

Nesse estudo de pesquisa não foram obtidos as respostas dinâmicas mediante a análise numérica de vibração forçada via ANSYS [65], sendo, portando, obtidos somente por meio de testes experimentais. Desta forma não foram empregadas os parâmetros α e β na análise dos modelos estruturais investigados.

Tendo por base esse contexto, o amortecimento estrutural dos modelos estruturais investigados foi obtido através de resultados experimentais de análise modal empregando-se a formulação descrita no Capítulo 7.

Com base nos resultados experimentais obtidos dos ensaios realizados ao longo deste trabalho de pesquisa sobre a passarela de pedestres, referente ao modelo estrutural I (ME-I), foi obtido um coeficiente de amortecimento de 1,7% ($\xi = 1,7\%$ ou 0,017). Esta taxa de amortecimento leva em conta a existência de poucos elementos que contribuem para o amortecimento da estrutura.

As taxas de amortecimento estrutural das passarelas II e III foram obtidas mediante testes experimentais realizados em trabalho de pesquisa anterior por Silva [63] e Rezende *et al* [64] resultando-se respectivamente, em 1,5% ($\xi = 1,5\%$ ou 0,015) e 0,23% ($\xi = 0,23\%$ ou 0,0023).

6. EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NA MONITORAÇÃO EXPERIMENTAL

6.1. Considerações iniciais

Este capítulo apresenta as funcionalidades específicas dos equipamentos utilizados na monitoração dinâmica para realização dos ensaios experimentais de análise modal (vibração livre) e análise de vibração forçada da Passarela I (ME-I).

6.2. Acelerômetro PCB (Piezotronics)

Os acelerômetros têm como finalidade monitorar e medir a aceleração de uma estrutura que esteja submetida a alguma ação dinâmica (atividades humanas, ventos e/ou terremotos). Os dados obtidos a partir dessa monitoração permite avaliar a segurança da estrutura e aplicar possíveis medidas preventivas caso a estrutura esteja em condições desfavoráveis ao estabelecido por normas.

Para a monitoração experimental da passarela em estudo foi utilizado o acelerômetro capacitivo da marca Dytran (Figura 34 a 36). Esse dispositivo está relacionado à capacitância variável do circuito em função da oscilação, podendo-se medir, conseqüentemente, a voltagem.



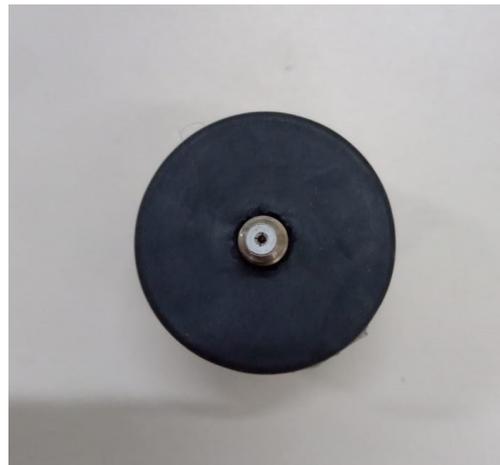
Figura 34 - Acelerômetro PCB Piezotronics



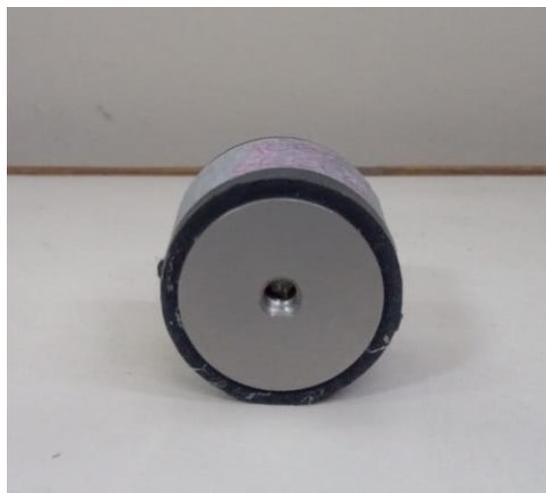
Figura 35 - Acelerômetro PCB Pieztronics e cabo de conexão



(a) Vista frontal



(b) Vista superior



(c) Vista superior

Figura 36 - Vistas do acelerômetro PCB Pieztronics

6.3. ADS 2500 (Sistema de aquisição de dados)

O sistema de aquisição de dados ADS 2500 (Figura 37) foi utilizado para medir e gravar as respostas das acelerações obtidas nos ensaios experimentais. O sistema ADS 2500 é fabricado pela LINX Tecnologia Eletrônica LTDA, e, é composto por entradas que permitem conectar diversos tipos de sensores que são configurados e controlados através do software AqDados 7.5. Além deste software, a LINX também fornece o AqAnalysis 7.5 que permite realizar o pós processamento dos sinais armazenados em séries temporais (Figuras 38 e 39)



Figura 37 - ADS 2500 (Sistema de aquisição de dados)

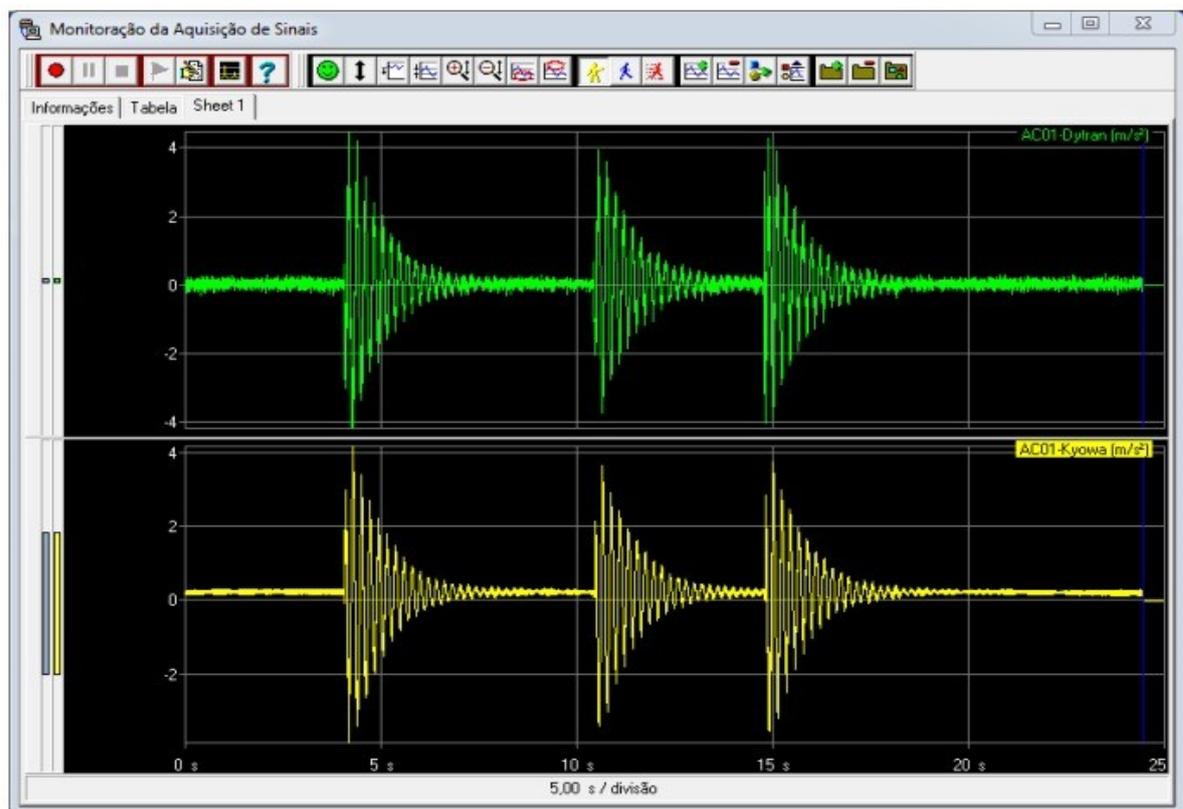


Figura 38 - Software AqDados 7.5

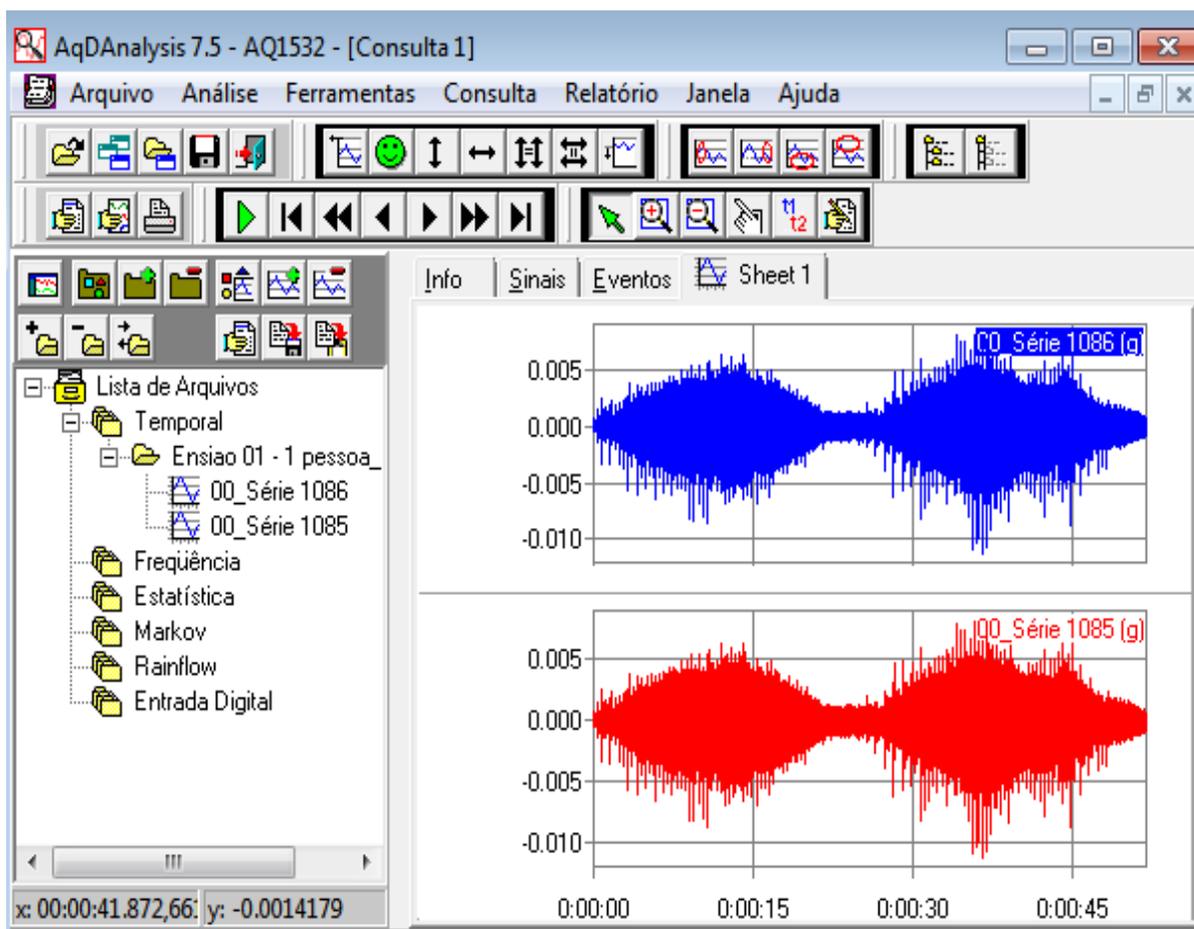


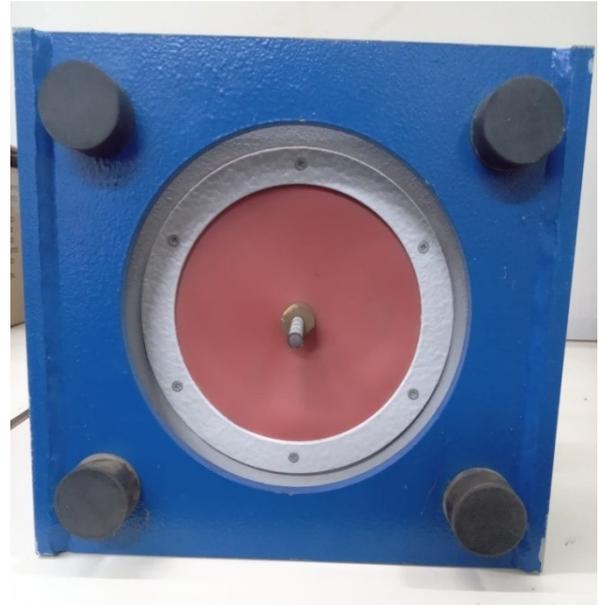
Figura 39 - Software AqAnalysis 7.5

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

O Shaker (excitador de vibração do tipo TIRAvib- S 51140-M), conforme mostra a Figura 40, é um excitador de vibração que utiliza um transdutor eletromagnético com uma vasta gama de frequências, que pode gerar uma força de 400N. Este equipamento funciona dentro de um intervalo de frequência que varia de 5 a 5000Hz, apresentando um sinal de onda sinusoidal ou aleatório. A vibração produzida por esse equipamento é realizada a partir do acionamento de um amplificador de potência com saída de 1200VA, conforme ilustrado na Figura 41, e por um gerador de sinal, que será descrito no próximo item.



(a) Vista superior



(b) Vista inferior



(c) Vista frontal



(b) Vista lateral

Figura 40 - Vistas do Shaker S 51140-M



Figura 41 - Amplificador de potência

6.5. NCH ToneGenerator

O NCH ToneGenerator é um aplicativo que realiza a geração de sinais com ampla frequência (1Hz a 20.000Hz) a partir do uso de computador ou palm. Esse aplicativo tem capacidade de criar ondas senoidais, quadradas, triangulares, dente de serras e ruído branco, conforme ilustrado na Figura 42. O aplicativo foi acoplado ao amplificador de potência em conjunto com o Shaker para o ensaio de vibração livre da passarela investigada.

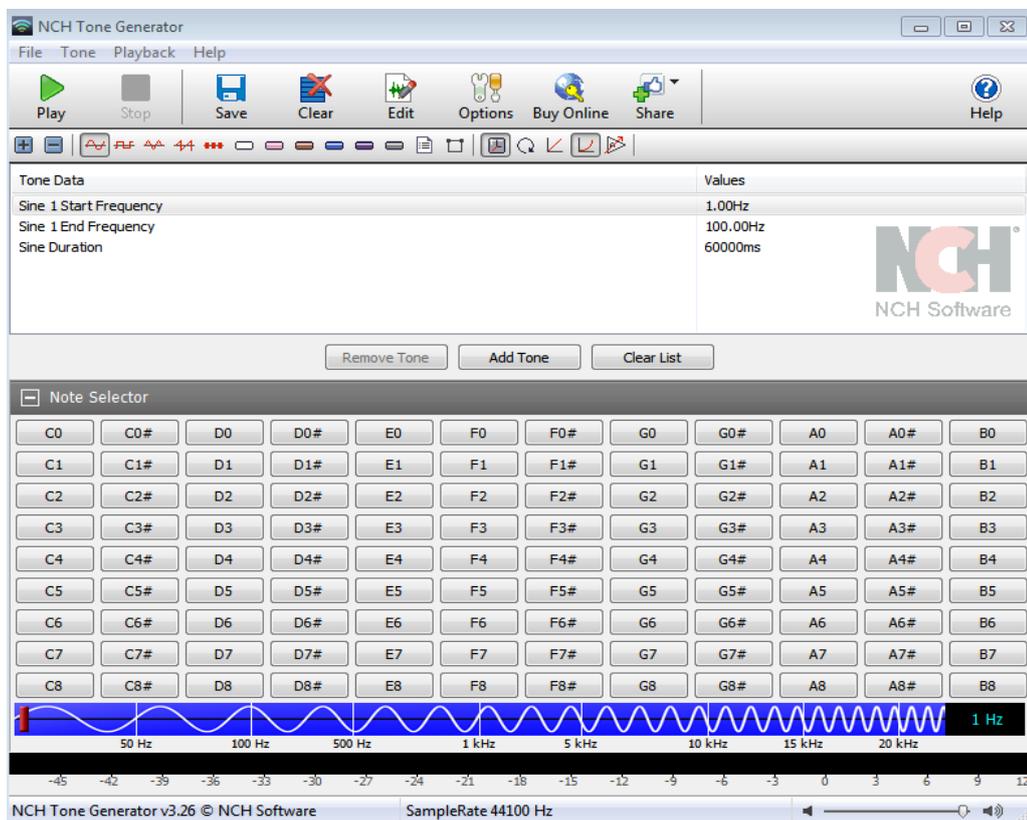


Figura 42 - Aplicativo NCH ToneGenerator

7. ANÁLISE MODAL EXPERIMENTAL

7.1. Considerações iniciais

Este capítulo descreve o ensaio de análise modal experimental mediante a monitoração dinâmica “in loco” empregando a instalação de acelerômetros na estrutura ligados a um sistema de aquisição de dados ADS 2500. O teste de vibração livre foi realizado pelo equipamento de excitação Shaker tendo por finalidade obter as frequências naturais e os modos de vibração da Passarela I (ME I) investigada ao longo desse estudo de pesquisa.

7.2. Descrição dos ensaios experimentais

Nos ensaios, cinco acelerômetros foram posicionados em pontos distintos ao longo do vão da passarela, tais são: $1/6$, $1/4$, $1/2$, $3/4$ e $5/6$, conforme ilustrado na Figura 43, e, respectivamente, representados por AC₀₁, AC₀₂, AC₀₃, AC₀₄ e AC₀₅. Os testes experimentais de vibração livre foram realizados utilizando o excitador Shaker em conjunto com todo sistema descrito no capítulo anterior, com a finalidade de obter as frequências naturais e os três primeiros modos de vibração de flexão vertical.

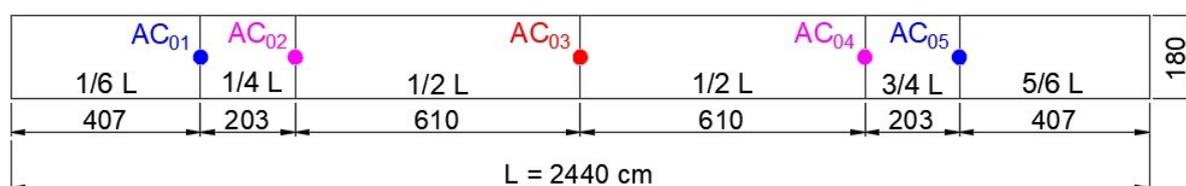


Figura 43 - Localização dos acelerômetros (dimensões em cm)

7.3. Ensaio experimental: Shaker S 51140-M e ADS 2500

O ensaio foi realizado utilizando o excitador Shaker S 51140-M, posicionado no centro do vão da passarela ($1/2$ do vão), em conjunto com o amplificador de potência e gerador de sinal, conforme ilustrado nas Figuras 44 e 45. A excitação da estrutura foi realizada por uma varredura de 1 a 50 Hz durante 60 segundos

($t = 60$ s) com a finalidade de obter as três frequências naturais fundamentais analisadas nesse estudo. As respostas dinâmicas foram obtidas por intermédio dos cinco acelerômetros posicionados em $1/6$, $1/4$, $1/2$, $3/4$ e $5/6$ do vão da passarela, conforme Figura 46.

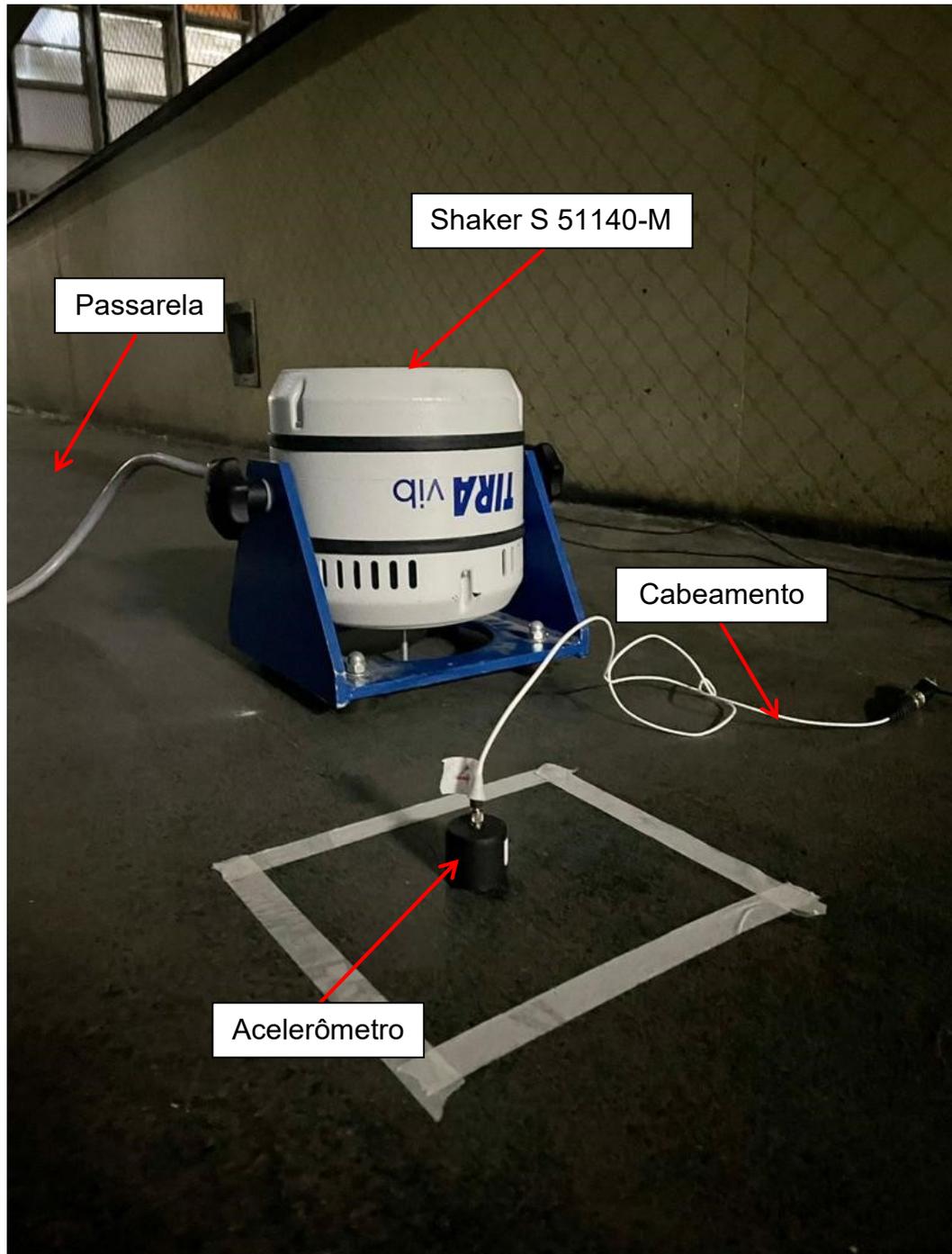


Figura 44 - Shaker S 51140-M

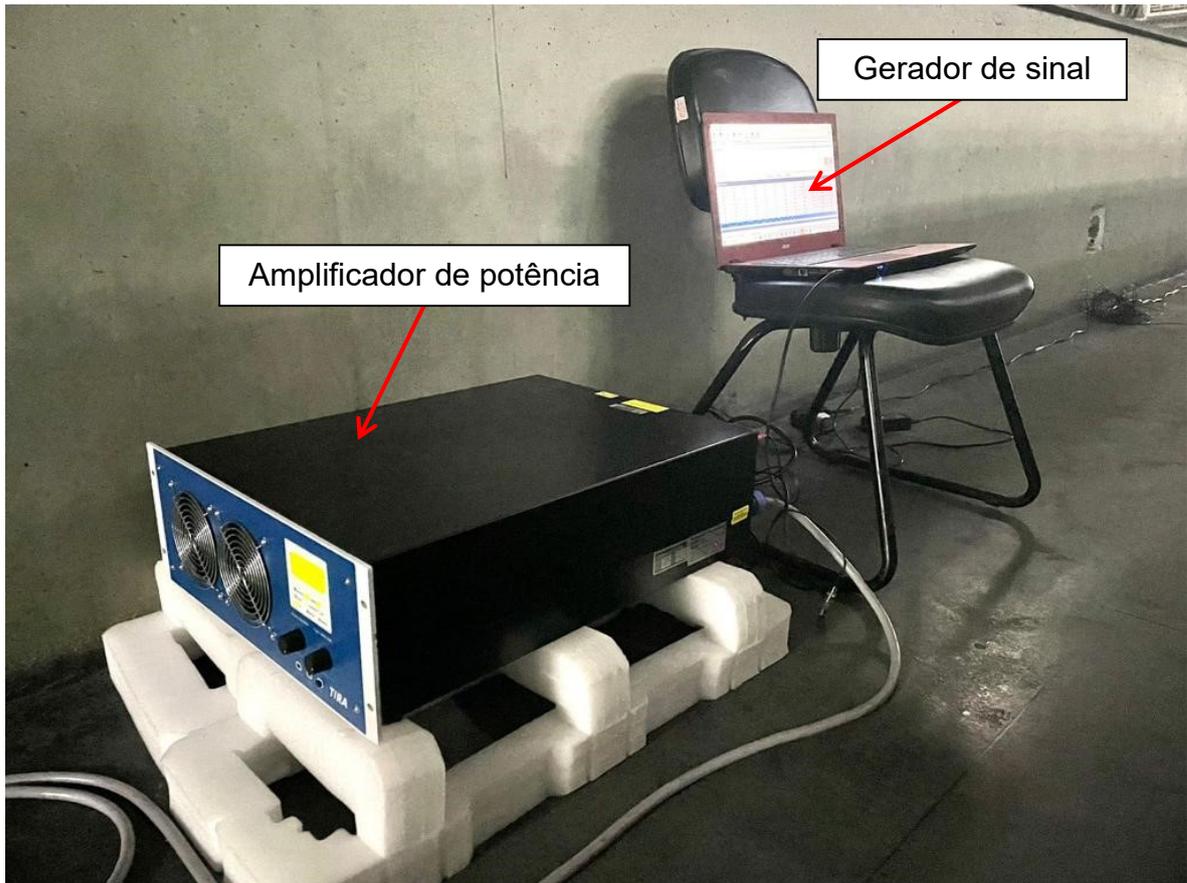


Figura 45 - Amplificador de potência e gerador de sinal (NCH ToneGenerator)

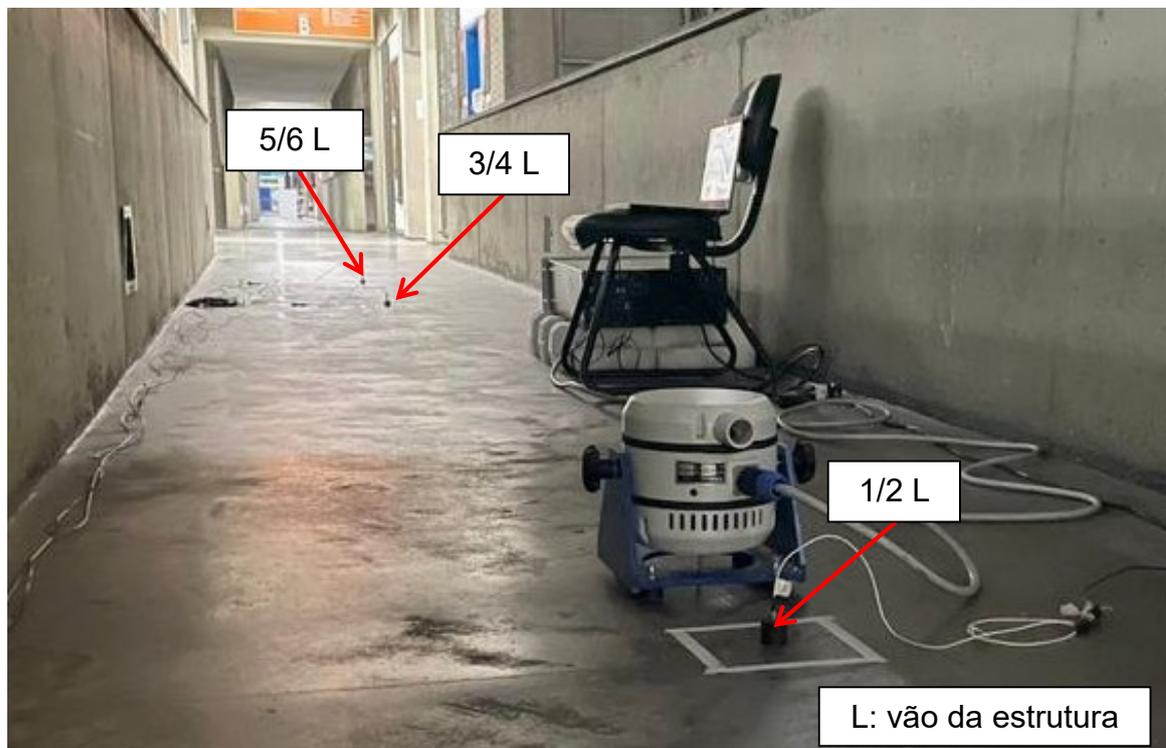


Figura 46 - Posicionamento dos acelerômetros

Os acelerômetros estão ligados a um sistema de aquisição de dados ADS 2500 fabricado pela empresa LYNX Tecnologia Eletrônica (Figura 47). Esse sistema, através da placa condicionadora e controladora, converte o sinal de variação elétrica em valor de engenharia (deformação específica, aceleração e força), sendo controlado por um computador.

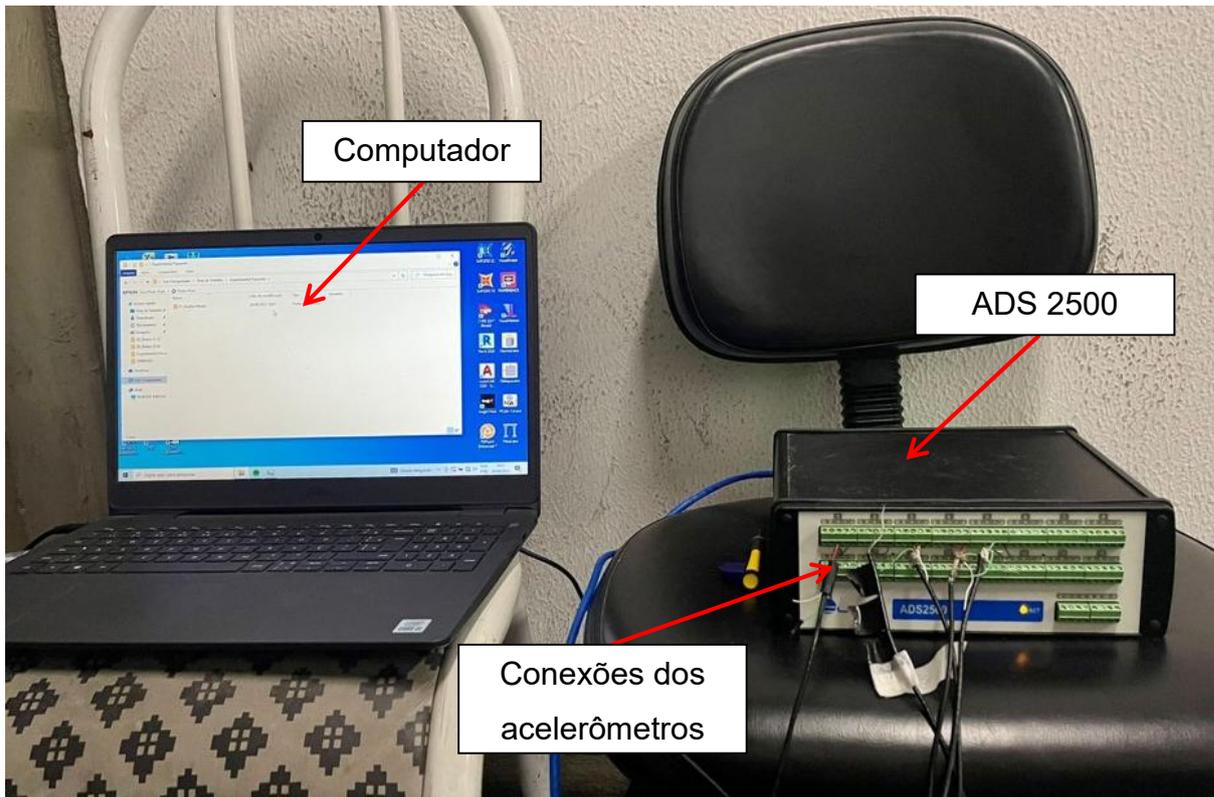
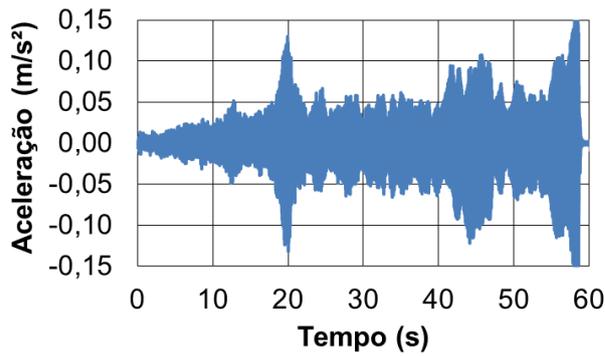
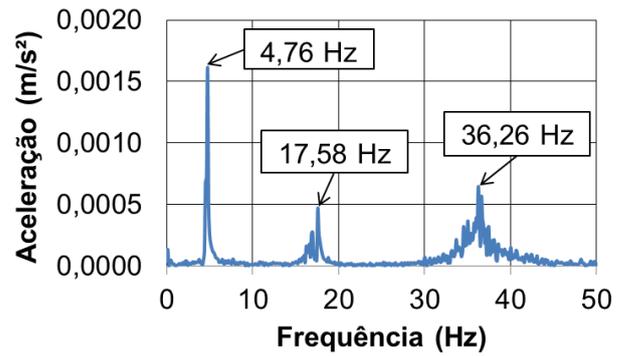


Figura 47 - Acelerômetros conectados ao ADS 2500 e controlado por computador

Através dos ensaios experimentais realizados pelo excitador Shaker, foram obtidos os resultados no domínio do tempo e da frequência, que estão descritos nas Figuras 48 a 52. Os espectros de respostas da vibração da estrutura dos cinco pontos ($1/6$, $1/4$, $1/2$, $3/4$ e $5/6$) são apresentados através da Transformada de Fourier (FFT - Fast Fourier Transform), correspondente as respostas de saída associada aos cinco acelerômetros utilizados na análise modal da passarela. Essas respostas foram extraídas do software AqAnalysis e são apresentadas nas Figuras 48b a 52b.

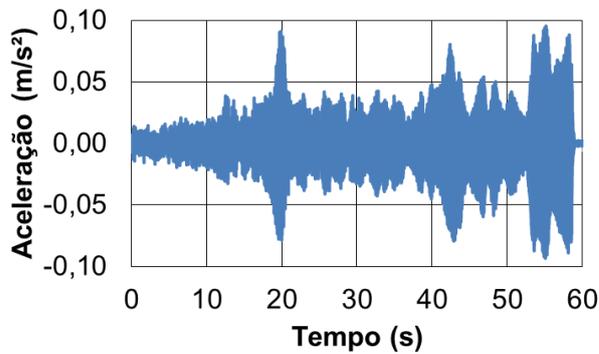


(a) Aceleração no domínio do tempo

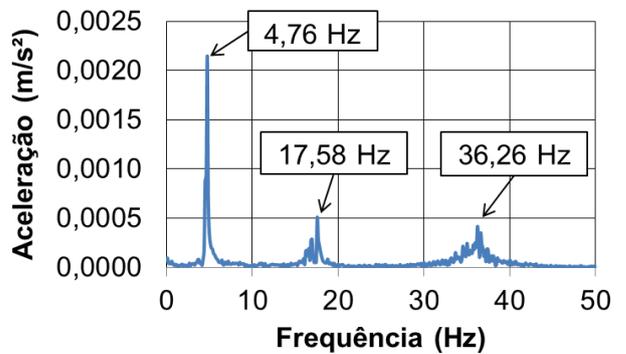


(b) Aceleração no domínio da frequência

Figura 48 - 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)

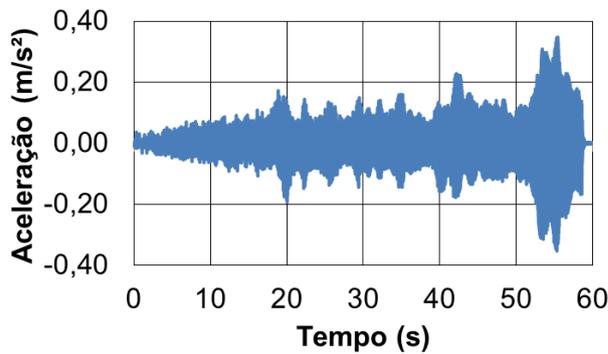


(a) Aceleração no domínio do tempo

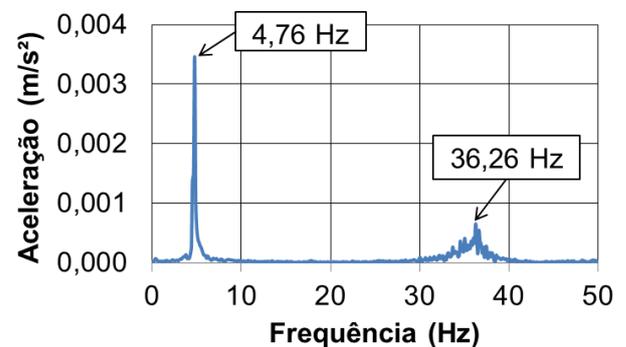


(b) Aceleração no domínio da frequência

Figura 49 - 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)

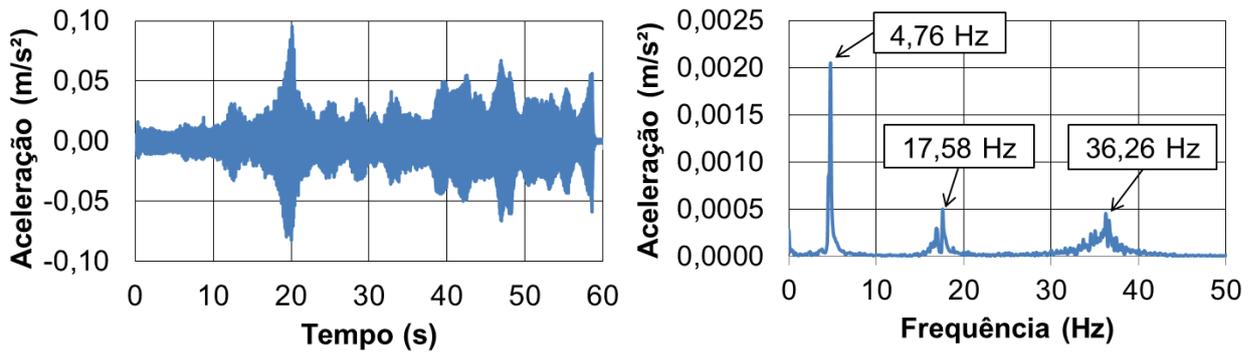


(a) Aceleração no domínio do tempo

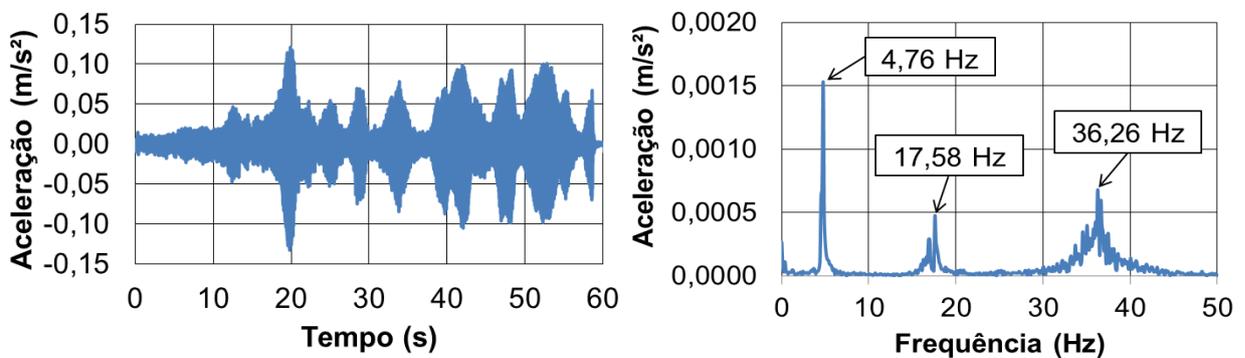


(b) Aceleração no domínio da frequência

Figura 50 - 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. (Vertical)



(a) Aceleração no domínio do tempo (b) Aceleração no domínio da frequência
 Figura 51 - 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)



(a) Aceleração no domínio do tempo (b) Aceleração no domínio da frequência
 Figura 52 - 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 48b a 52b é possível identificar os três primeiros picos de frequências correspondentes aos três primeiros modos de vibração de flexão vertical ($f_{01} = 4,76$ Hz; $f_{02} = 17,58$ Hz; $f_{03} = 36,26$ Hz). Nota-se que o segundo modo de vibração não é visualizado na Figura 50b, isso ocorre, devido à resposta está relacionada ao acelerômetro AC_{03} posicionado no 1/2, região onde o valor da amplitude de oscilação é nulo. Porém é perceptível que o primeiro modo de vibração atinge amplitude máxima nesse ponto (1/2 do vão), quando comparado aos outros gráficos.

As Figuras 53 a 55 apresentam, respectivamente, os três primeiros modos de vibração de flexão vertical, gerados a partir da correlação entre as amplitudes obtidas nos gráficos de domínio da frequência, conforme apresentado anteriormente, e, representativos de cada acelerômetro utilizado na passarela AC_{01} , AC_{02} , AC_{03} , AC_{04} e AC_{05} .

Os pontos posicionados em 0 e 24,4m estão relacionados aos apoios da passarela e os pontos posicionados em 4,07m, 6,10m, 12,20m, 18,30m e 20,33m são correspondente aos acelerômetros, AC₀₁, AC₀₂, AC₀₃, AC₀₄ e AC₀₅, respectivamente, em 1/6, 1/4, 1/2, 3/4 e 5/6 do vão.

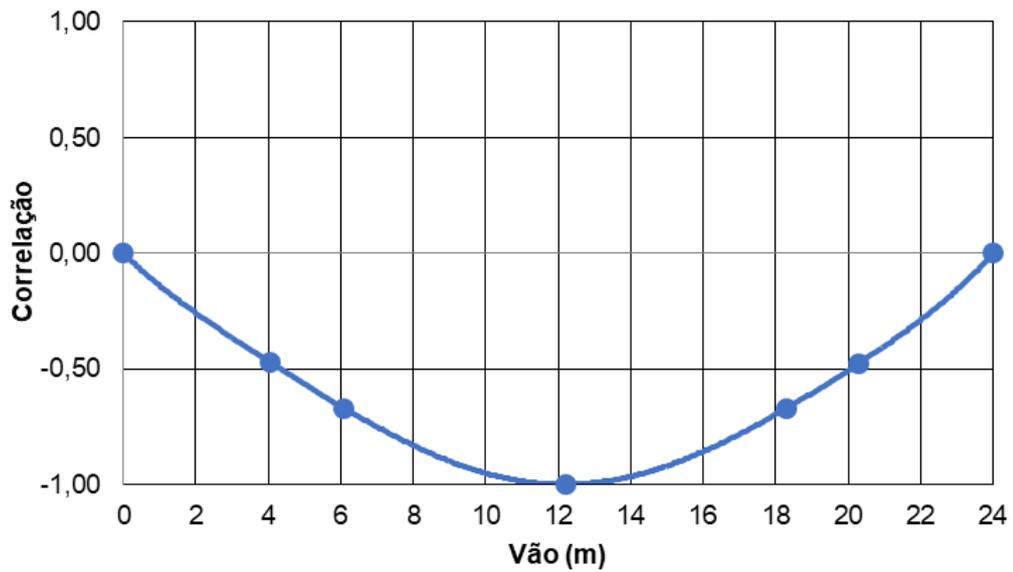


Figura 53 - 1º modo de vibração experimental ($\xi=1,70\%$)

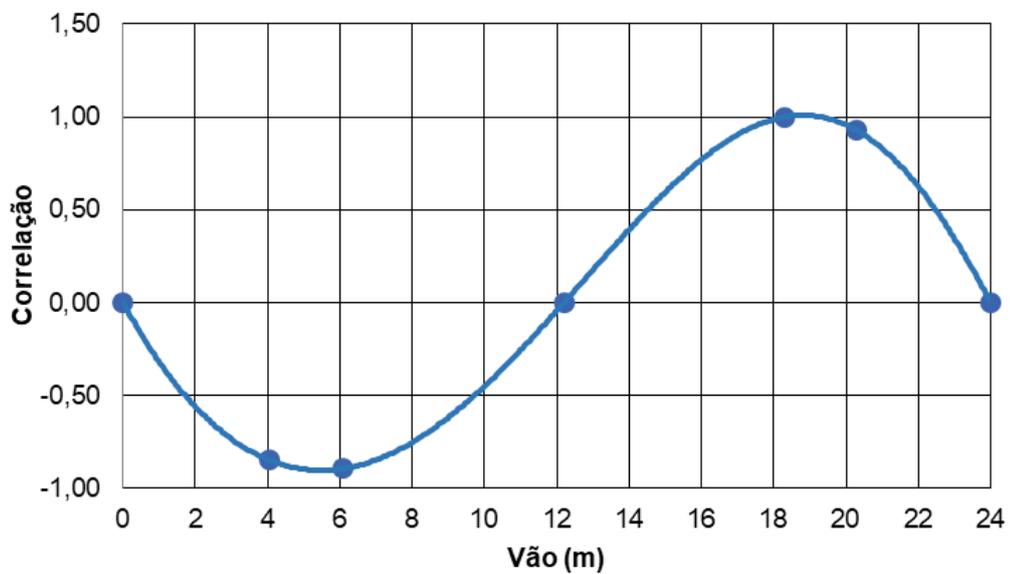


Figura 54 - 2º modo de vibração experimental ($\xi=1,15\%$)

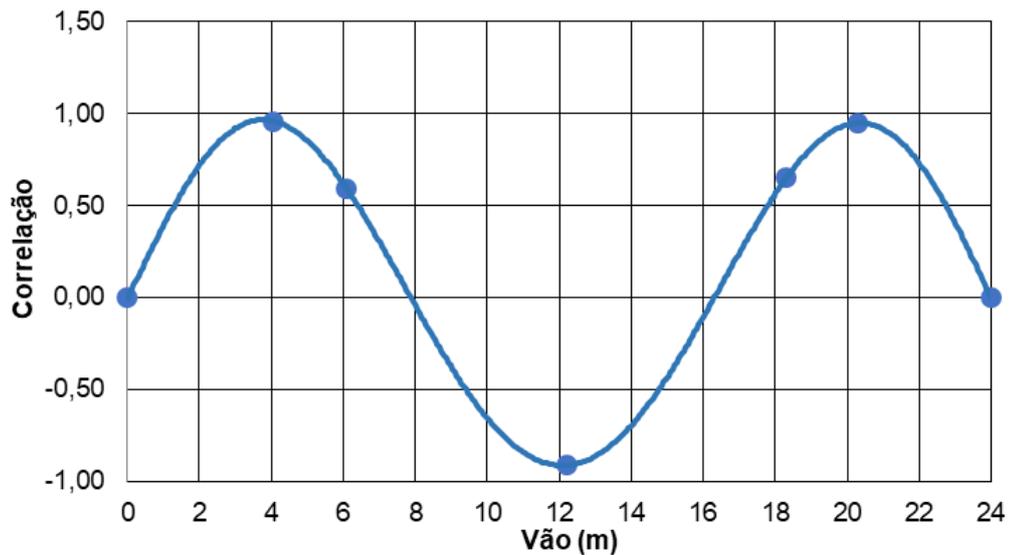


Figura 55 - 3º modo de vibração experimental ($\xi=1,02\%$)

Os valores das taxas de amortecimento referentes aos três primeiros modos de vibração, apresentados nas Figuras 53 a 55, foram obtidos através do método do decremento logarítmico, conforme Equações (22) e (23).

Os resultados obtidos foram, respectivamente, 1,70% para o primeiro modo, 1,15% para o segundo modo e 1,02% para o terceiro modo.

$$\delta = \frac{1}{n} \ln \frac{u_0}{u_n} \quad (22)$$

$$\xi = \frac{\delta}{\sqrt{4\pi^2 + \delta^2}} \quad (23)$$

Onde:

δ - logaritmo natural do quociente de duas amplitudes;

n – número de ciclos;

u_0 - amplitude inicial;

u_n – amplitude após n ciclos;

ξ - taxa de amortecimento;

8. ANÁLISE DOS AUTOVALORES E AUTOVETORES

8.1. Considerações iniciais

Neste capítulo são obtidos, através da análise de vibração livre, os autovalores (frequências naturais) e os autovetores (modos de vibração), referentes aos modelos estruturais das passarelas referenciais I, II e III (ME-I, ME-II [63] e ME-III [64]). O objetivo dessa análise consiste em identificar as frequências naturais dos modelos em elementos finitos e os modos de vibrações correspondentes. São apresentados as dez primeiras frequências naturais e respectivos modos de vibração do modelo estrutural referente à Passarela I (ME-I), sendo esta analisada e investigada numérica e experimentalmente ao longo desse trabalho de pesquisa. Enquanto que para as Passarelas II (ME-II [63]) e III (ME-III [64]) são apresentados somente à primeira frequência correspondente ao primeiro modo de flexão vertical.

8.2. Análise modal da Passarela I (ME-I)

Os valores das frequências naturais (autovalores) e os respectivos modos de vibrações (autovetores) foram obtidos através da análise de vibração livre, utilizando o programa computacional ANSYS [65]. A Tabela 18 apresenta as dez primeiras frequências naturais da passarela investigada, onde as três primeiras frequências referentes à flexão vertical do tabuleiro são comparadas com o ensaio experimental de vibração livre. A análise das frequências naturais é de grande importância para este estudo, visto que se objetiva analisar a questão do conforto humano e da resposta da estrutura quando aplicamos um carregamento dinâmico devido à caminhada de pedestres.

De acordo com os resultados numéricos dispostos na Tabela 18, observa-se que as frequências naturais empregadas para este estudo, foram: a primeira frequência com um valor de 4,85 Hz referente ao primeiro modo de vibração vertical do tabuleiro; a quarta frequência com valor de 15,77 Hz, associada ao segundo modo de vibração vertical do tabuleiro; e a sétima frequência com um valor de 31,84 Hz correspondente ao terceiro modo de vibração vertical do tabuleiro.

Tabela 18 - Frequências naturais numéricas da Passarela I (ME-I)

Frequências naturais (Hz)		Modo 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 e torção das vigas
f ₁₀	48,76	Modo 10	4º Modo de flexão vertical do tabuleiro

A Tabela 19 apresenta as propriedades modais das dez primeiras frequências naturais da Passarela I (ME-I).

Tabela 19 - Propriedades modais da Passarela I (ME-I)

Modo de vibração	Frequência Natural (Hz)	Massa modal (kg)	Rigidez modal (N/m)	Amortecimento modal (Ns/m)
f ₀₁	4,85	30869,93	28.684.468,70	31.994,12
f ₀₂	8,35	14763,27	40.588.528,50	22.353,39
f ₀₃	13,79	17339,12	13.022.4591,00	47.920,96
f ₀₄	15,77	25793,08	253.101.516,00	86.871,62
f ₀₅	18,73	13500,29	186.888.331,00	59.750,65
f ₀₆	30,77	9942,79	371.737.652,00	105.447,25
f ₀₇	31,84	12200,11	488.196.979,00	137.802,47
f ₀₈	32,10	7395,96	300.817.952,00	84.815,02
f ₀₉	41,91	4642,60	321.867.847,00	88.157,70
f ₁₀	48,76	1318,86	123.768.703,00	33.529,90

As Figuras 56 a 65 demonstram as dez primeiras formas modais correspondentes às dez primeiras frequências naturais da estrutura, caracterizadas quantitativamente e qualitativamente na Tabela 18.

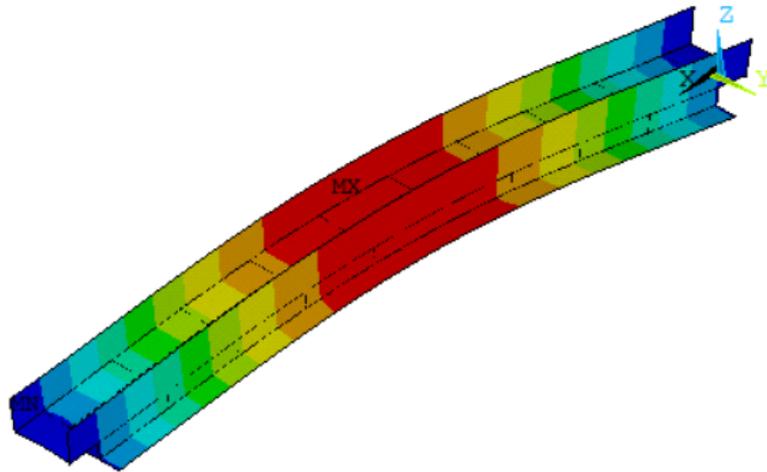


Figura 56 - 1º modo de vibração f_{01} : 4,85 Hz

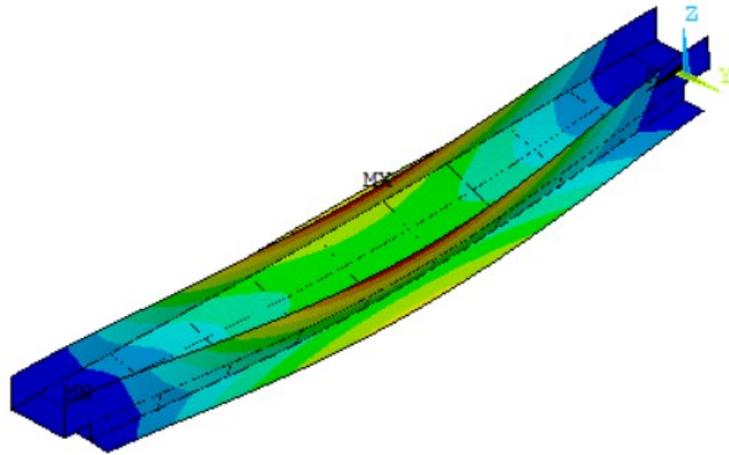


Figura 57 - 2º modo de vibração f_{02} : 8,35 Hz

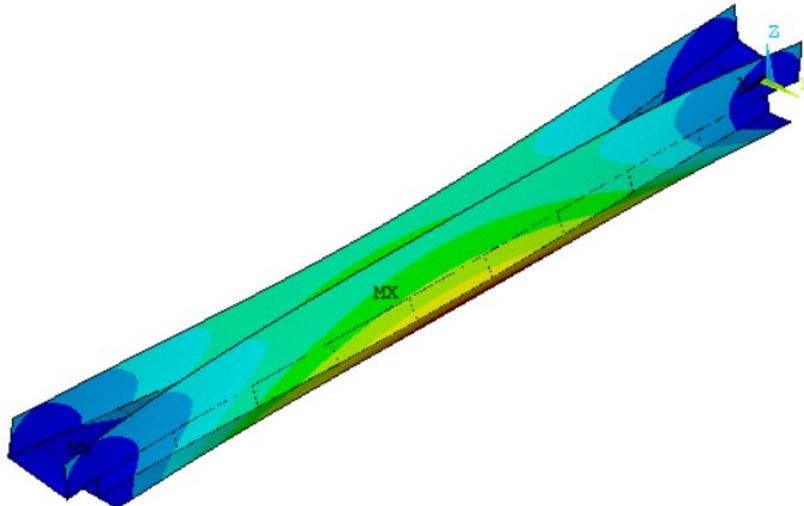


Figura 58 - 3º modo de vibração f_{03} : 13,79 Hz

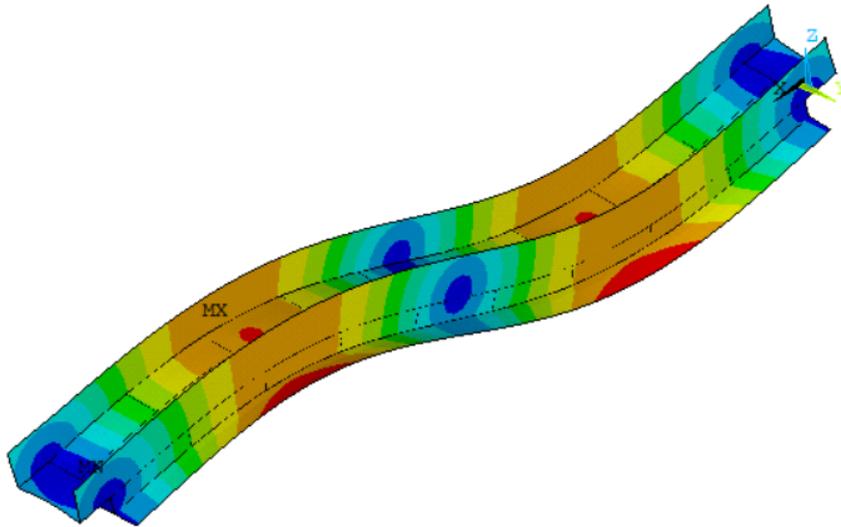


Figura 59 - 4º modo de vibração f_{04} : 15,77 Hz

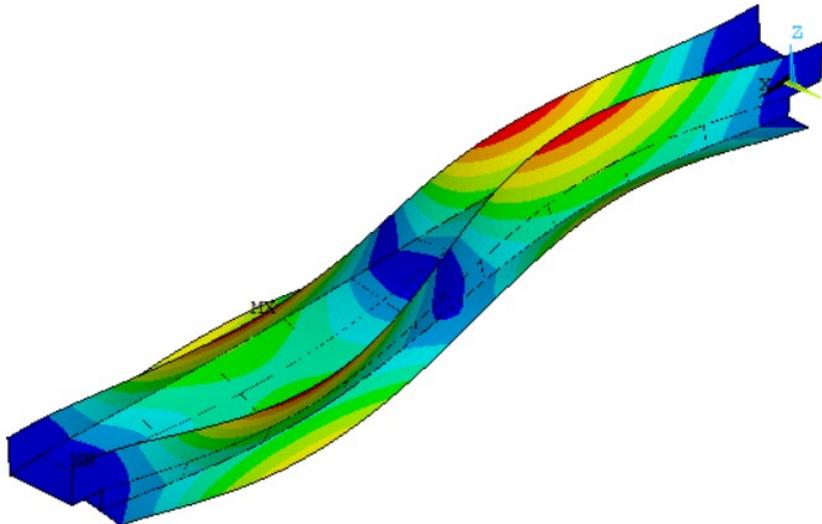


Figura 60 - 5º modo de vibração f_{05} : 18,73 Hz

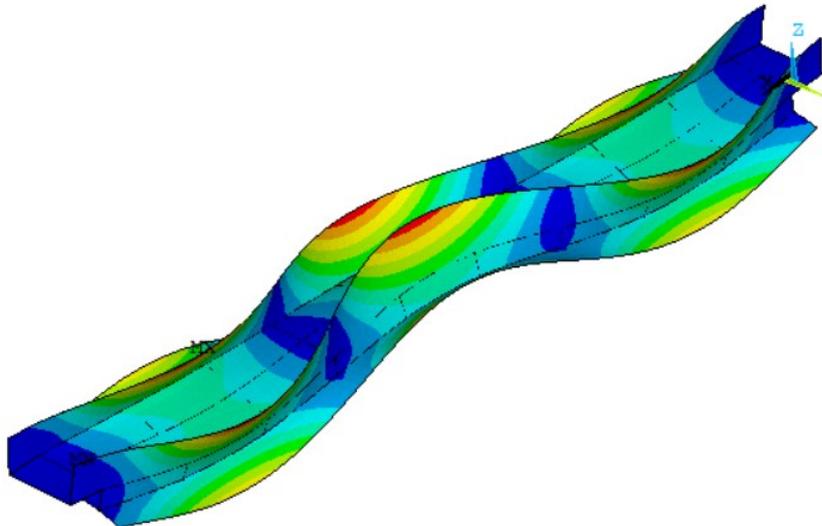


Figura 61 - 6º modo de vibração f_{06} : 30,77 Hz

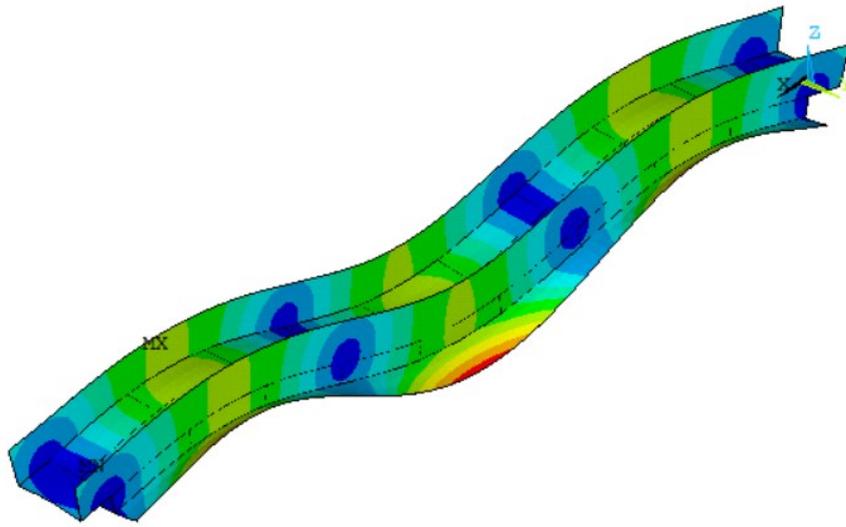


Figura 62 - 7º modo de vibração f_{07} : 31,84 Hz

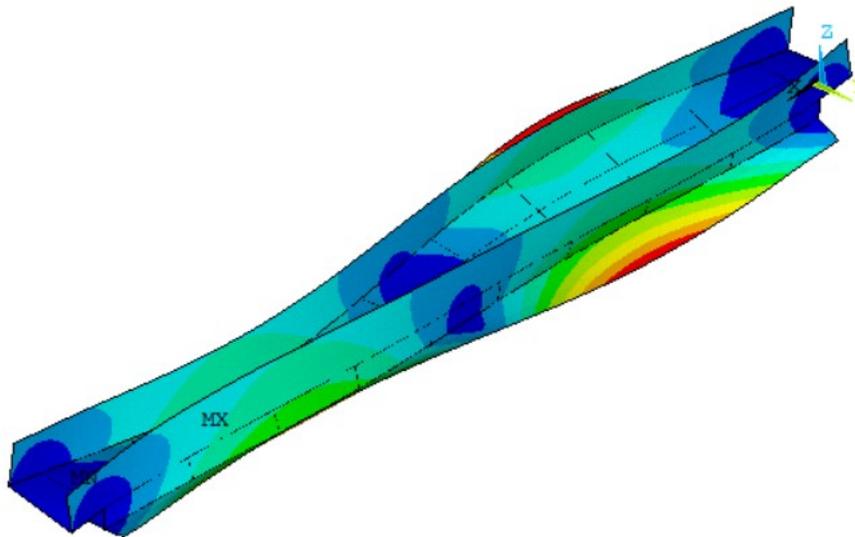


Figura 63 - 8º modo de vibração f_{08} : 32,10 Hz

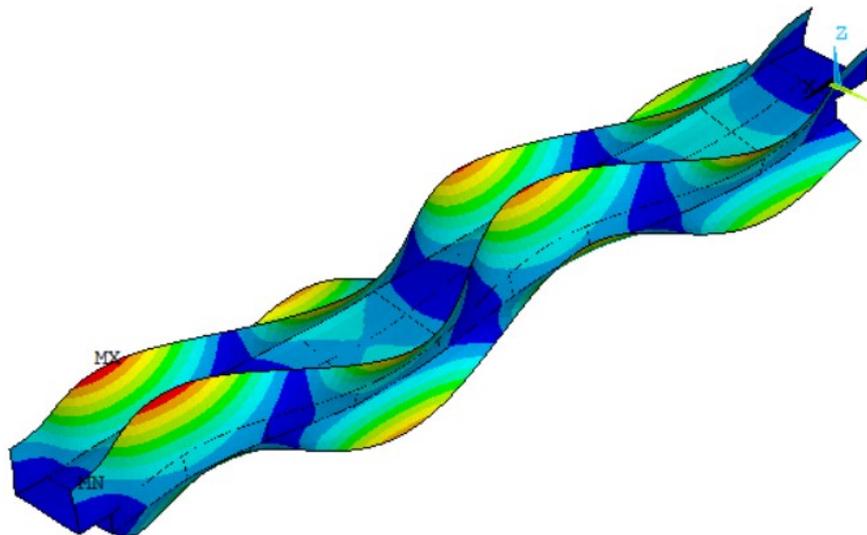


Figura 64 - 9º modo de vibração f_{09} : 41,91 Hz

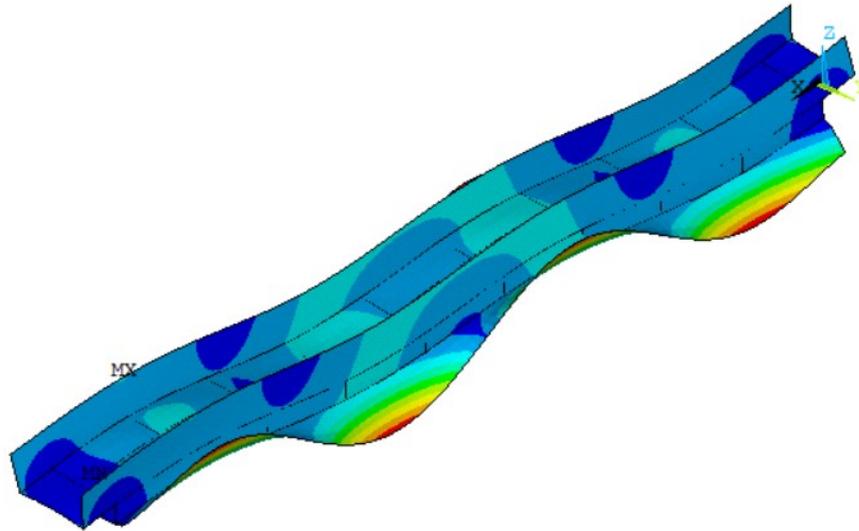


Figura 65 - 10^o modo de vibração f_{10} : 48,76 Hz

8.2.1. Comparação análise modal experimental x análise modal numérica

A Tabela 20 apresenta os valores das frequências naturais de vibração do modelo numérico, obtidas via emprego do software computacional ANSYS [59], descrito anteriormente neste capítulo, em comparação com os valores das frequências obtidas por testes experimentais realizados sobre a Passarela I ME-I, conforme descrito no Capítulo 7.

Tabela 20 - Comparação dos valores das frequências naturais

Frequências naturais (Hz)				Diferença (%)
Testes experimentais		Modelagem numérica		
f_{01}	4,76	f_{01}	4,85	1,85
f_{02}	17,58	f_{04}	15,77	11,47
f_{03}	36,26	f_{07}	31,84	13,88

Comparando-se os valores das frequências naturais pode-se perceber que o modelo estrutural investigado encontra-se bem representado numericamente pelo modelo computacional desenvolvido, via método dos elementos finitos (ANSYS [59]). As características dinâmicas do sistema relacionadas às frequências naturais f_{01} , f_{02} e f_{03} (massa e rigidez) estão bem representadas, visto que a diferença entre os valores numéricos e experimentais são pequenos, respectivamente, com valores máximos de 1,85%, 11,47% e 13,88%, representativos aos três primeiros modos de vibração de flexão vertical da estrutura.

8.3. Análise modal da Passarela II (ME-II) [63]

O valor da frequência natural (autovalores) e o respectivo modo de vibração (autovetores) da Passarela II (ME-II) foram obtidos através da análise numérica de vibração livre realizada em trabalho de pesquisa anterior por Silva [63]. A Figura 66 apresenta à primeira frequência natural da Passarela II ($f_{01} = 3,83 \text{ Hz}$) referente ao primeiro modo de vibração vertical de flexão do tabuleiro.

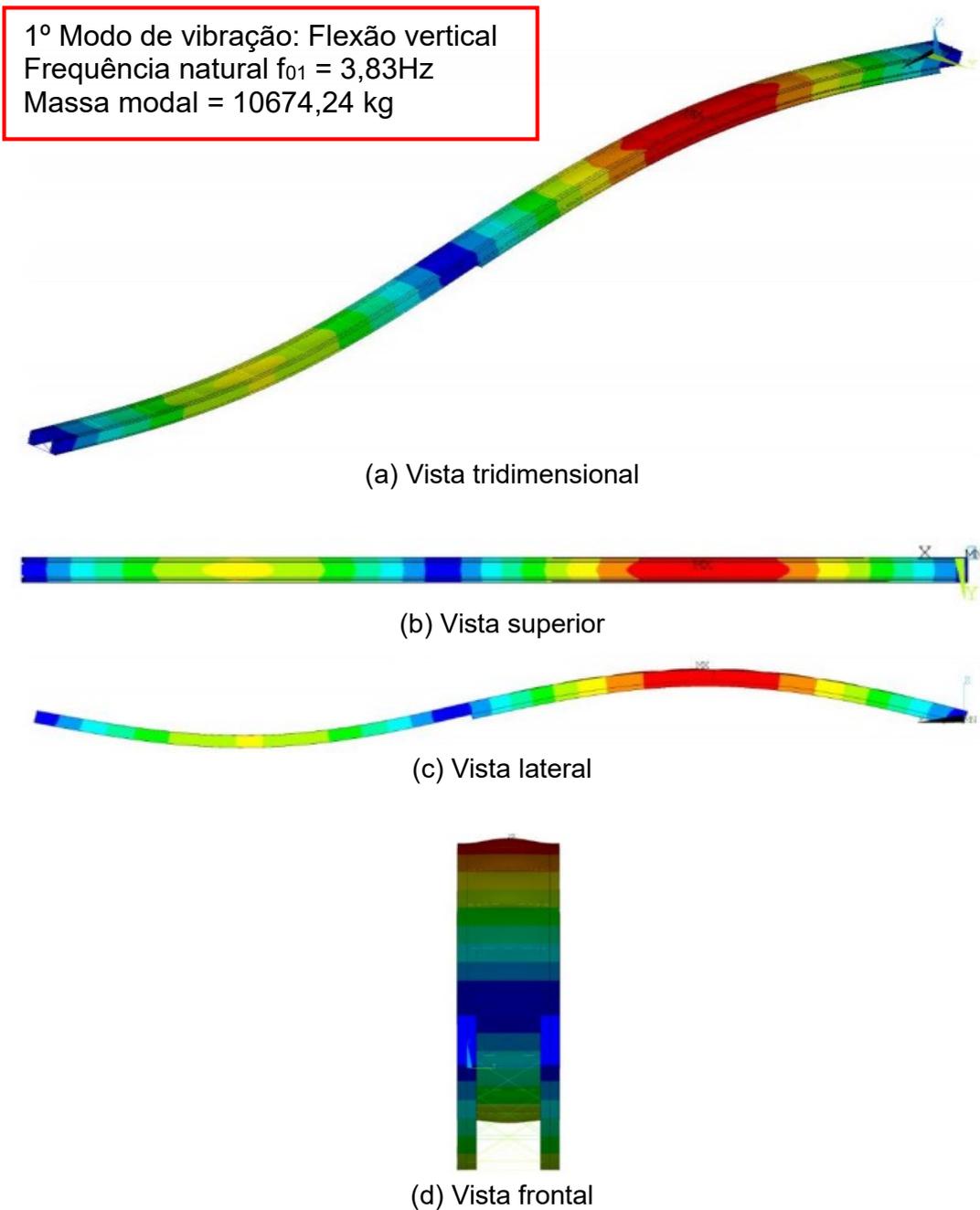


Figura 66 - 1º modo de vibração f_{01} : 3,83 Hz

8.4. Análise modal da Passarela III (ME-III) [64]

O valor da frequência natural (autovalores) e o respectivo modo de vibração (autovetores) da Passarela III (ME-III) foram obtidos através da análise numérica de vibração livre realizada em trabalho de pesquisa anterior por Varela [64] e Duarte [66]. A Figura 67 apresenta à primeira frequência natural da Passarela II ($f_{01} = 1,85$ Hz) referente ao primeiro modo de vibração vertical de flexão do tabuleiro.

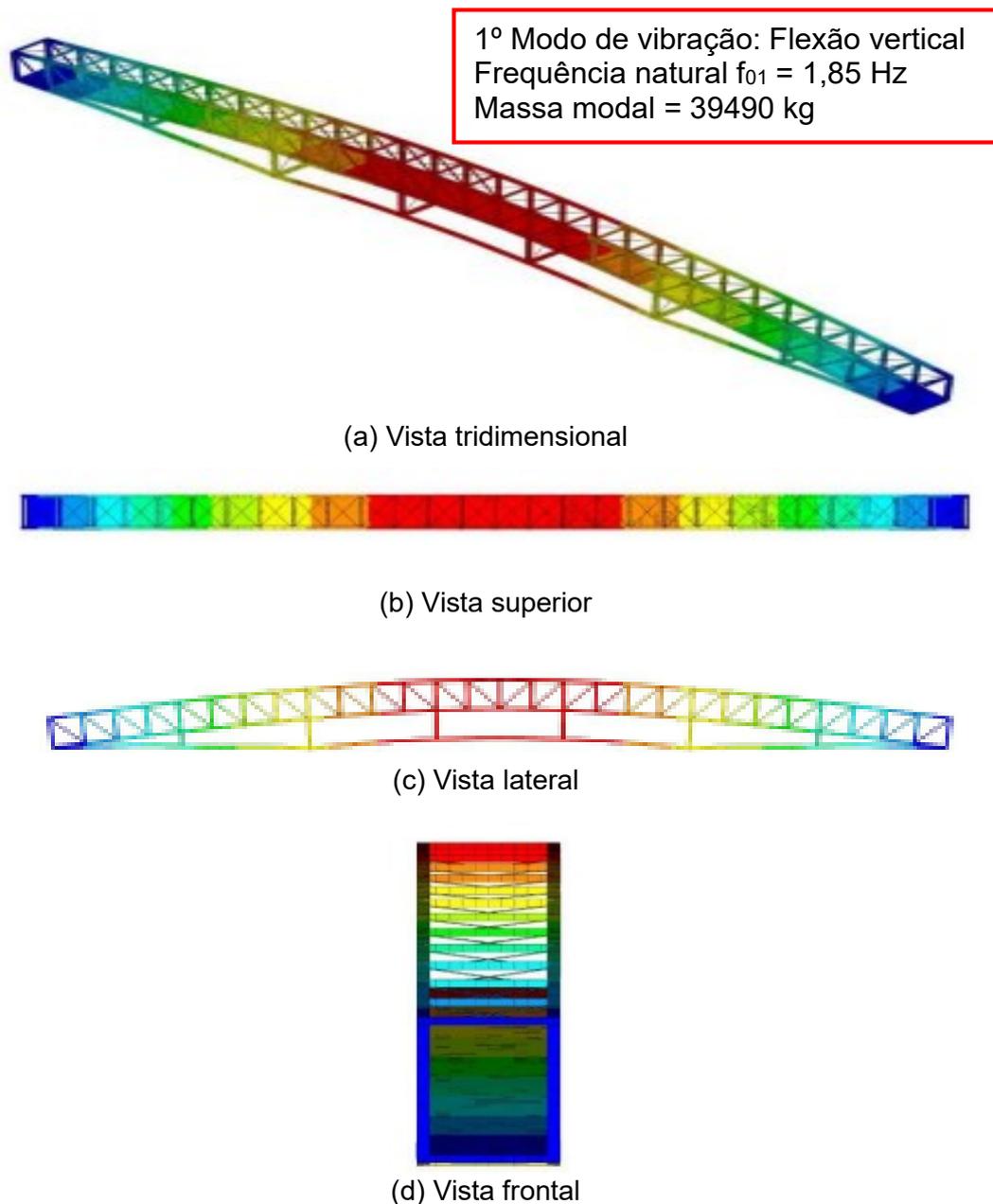


Figura 67 - 1º modo de vibração f_{01} : 1,85 Hz

9. ANÁLISE DINÂMICA EXPERIMENTAL: VIBRAÇÃO FORÇADA

9.1. Considerações iniciais

Este capítulo apresenta os resultados obtidos a partir das análises dinâmicas obtidas via monitoração experimental, “in loco”, realizada na Passarela I (ME-I). Para avaliar o comportamento dinâmico da estrutura, as análises foram feitas a partir da instalação de acelerômetros na região de maior amplitude (1/2 do vão) em conjunto com o sistema de aquisição de dados (ADS 2500) utilizando o software Aqdados 7.5 para armazenamento dos sinais. Os tratamentos de dados foram realizados por meio do software Aqanalysis 7.5, obtendo os resultados no domínio do tempo e no domínio da frequência. As respostas dinâmicas de análise forçada referente às Passarelas II (ME-II) e III (ME-III) foram obtidas por testes experimentais realizados em trabalho de pesquisa anterior, respectivamente, por Silva [63] e Rezende et al [64].

9.2. Descrição dos testes experimentais

A excitação da passarela de pedestre investigada foi conduzida através de três grupos de pessoas caminhando (ida e volta) sobre a estrutura. O primeiro ensaio foi realizado por um único pedestre caminhando no eixo longitudinal do vão da passarela em ressonância com a estrutura ($f_p = 2,40$ Hz); o segundo ensaio foi realizado com sete pessoas caminhando em fila única no eixo longitudinal do vão da passarela em ressonância com a estrutura ($f_p = 2,40$ Hz); o terceiro ensaio foi realizado com doze pessoas distribuídas em duplas caminhando em ressonância com a estrutura ($f_p = 2,40$ Hz).

De forma a controlar o passo de cada pedestre e garantir a sincronização do caminhar, utilizou-se um metrônomo instalado no smartphone. Este foi conectado via bluetooth a uma caixa de som, de forma a produzir pulsos sonoros com duração regular. A unidade representativa do metrônomo é o “bpm” (batidas por minuto). Isso significa que cada “batida” sonora corresponde ao contato de cada passo do pedestre sobre a estrutura (Figuras 68 e 69).



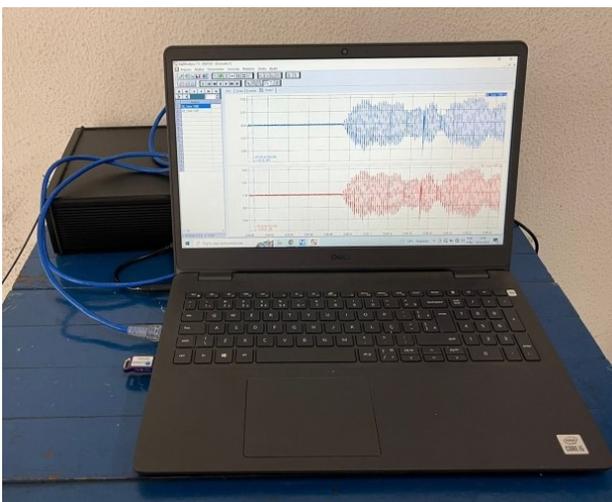
Figura 68 - Metrônomo



Figura 69 - Caixa de som

O ensaio experimental foi realizado mediante o caminhar de uma, sete e doze pessoas com uma frequência de passo de 2,40Hz (144 bpm) de forma que o segundo harmônico do caminhar permitisse induzir um movimento ressonante com o primeiro modo de vibração vertical da Passarela I ($ME-I: f_p = 4,85 \text{ Hz}$).

Os resultados das análises foram armazenados mediante o uso do sistema de aquisição de dados ADS 2500 conectados a dois acelerômetros PCB piezotronics instalado na região de maior amplitude da passarela, correspondente ao centro longitudinal do vão (Figuras 70 a 72). O uso dos dois acelerômetros teve como finalidade verificar a calibração desses dispositivos durante o ensaio.



(a) AqDados 7.5.2



(b) ADS 2500 com acelerômetros instalados

Figura 70 - Sistema de aquisição de dados



Figura 71 - Seção de análise da estrutura

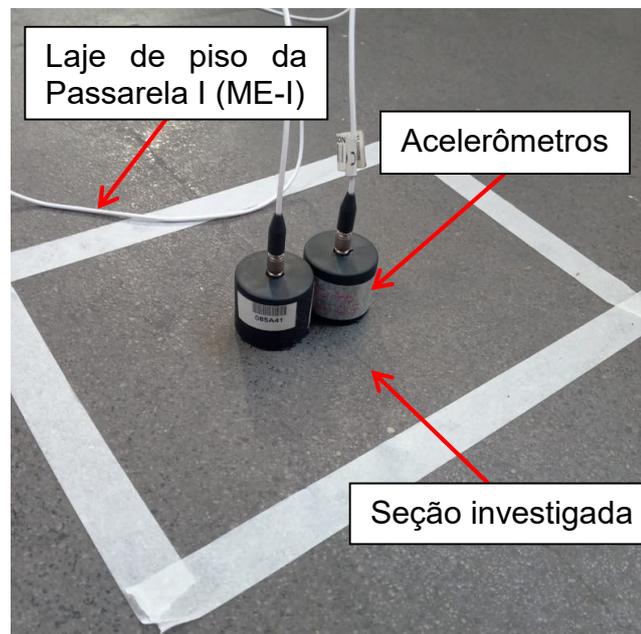


Figura 72 - Posicionamento dos acelerômetros

A Tabela 21 apresenta as descrições dos ensaios de vibração forçada realizados na Passarela I (ME-I). Vale ressaltar que dentre os três ensaios realizados, somente foi analisado probabilisticamente, ao longo desse trabalho de pesquisa, o ensaio referente ao caminhar de um único pedestre em ressonância com a estrutura. Tendo em mente que os resultados serão analisados comparativamente com os valores obtidos com base na análise probabilística descrita no Capítulo 12.

Tabela 21 - Ensaios de vibração forçada da Passarela I (ME-I)

Ensaio	Descrição dos ensaios	
	Frequência de passo (f_p)	Número de pessoas
1	2,40 Hz	1 (eixo longitudinal do vão)
2	2,40 Hz	7 (fila única)
3	2,40 Hz	12 (caminhando em duplas)

9.3. Ensaio experimental I: 1 pessoa ($f_p = 2,40$ Hz)

O primeiro ensaio de vibração forçada foi realizado objetivando causar o movimento ressonante da estrutura a partir do caminhar de uma pessoa com massa de 95,9 kg e com frequência de passo de $f_p = 2,40$ Hz no eixo longitudinal do vão, correspondente a 144 bpm (batidas por minutos), conforme Figuras 73 e 74. A Figura 75 ilustra a seção investigada da passarela, sendo portanto, a região de maior amplitude. Os resultados da análise, ida e volta, no domínio do tempo e da frequência são demonstrados nas Figuras 76a e 76b.

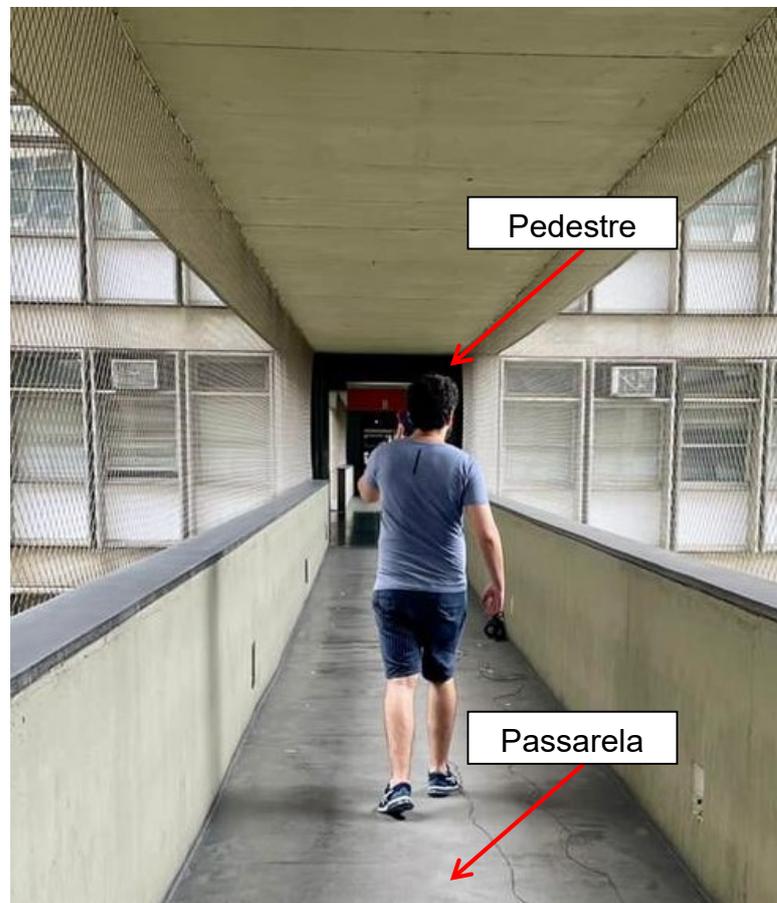


Figura 73 - Caminhada em ressonância (2,40 Hz). 1 pessoa

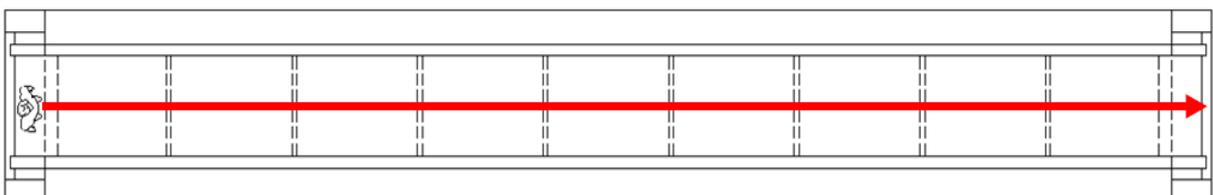


Figura 74 - Uma pessoa caminhando ($f_p = 2,40$ Hz)

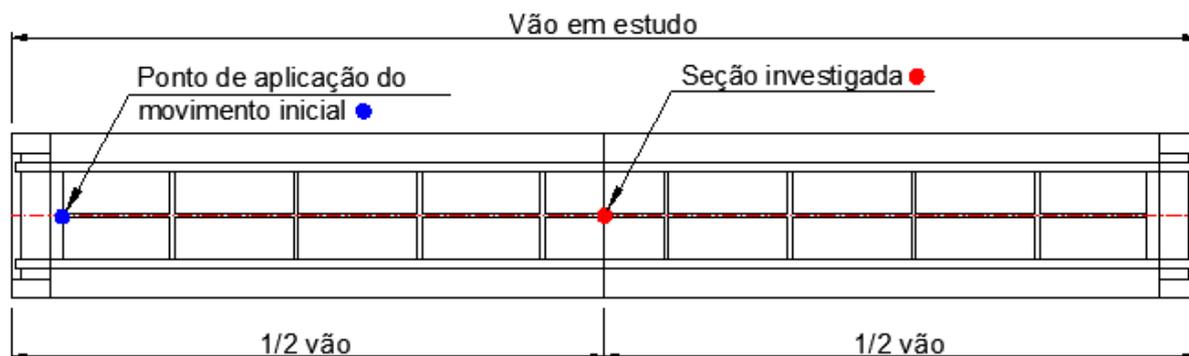
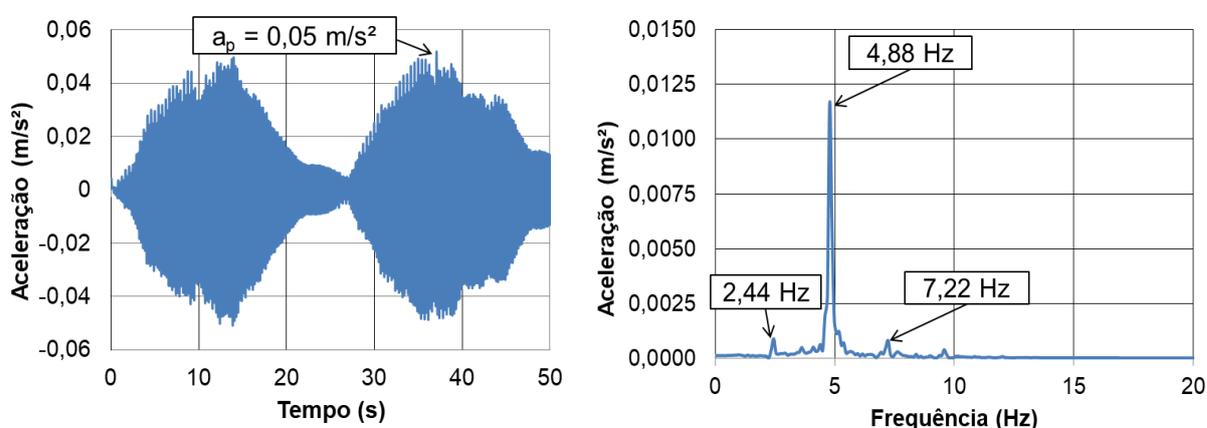


Figura 75 - Seção investigada: 1/2 do vão



(a) Aceleração no domínio do tempo

(b) Aceleração no domínio da frequência

Figura 76 - Resposta dinâmica experimental da passarela. 1 pessoa (2,40 Hz).

Na Figura 76a observa-se que a aceleração máxima da estrutura foi de $0,05\text{m/s}^2$ no tempo (t) igual a 13,75 segundos ($t = 13,75\text{ s}$). Já na Figura 76b é possível visualizar os três harmônicos de excitação, respectivamente, com valores iguais a $f = 2,44\text{ Hz}$, $f = 4,88\text{ Hz}$ e $f = 7,22\text{ Hz}$. Cabe ressaltar a predominância da frequência de 4,88 Hz ($f = 4,88\text{ Hz}$), no domínio da frequência, correspondente a ressonância do modelo estrutural ($f_{01} = 4,85\text{ Hz}$).

9.4. Ensaio experimental II: 7 pessoas ($f_p = 2,40\text{ Hz}$)

O segundo ensaio de vibração forçada foi realizado objetivando causar o movimento ressonante da estrutura a partir do caminhar de sete pessoas com frequência de passo de $f_p = 2,40\text{ Hz}$ no eixo longitudinal do vão, correspondente a 144 bpm (batidas por minutos), conforme Figuras 77 e 78. A Figura 79 ilustra a seção investigada da passarela, sendo, portanto, a região de maior amplitude. Os

resultados da análise, ida e volta, no domínio do tempo e da frequência são demonstrados nas Figuras 80a e 80b.

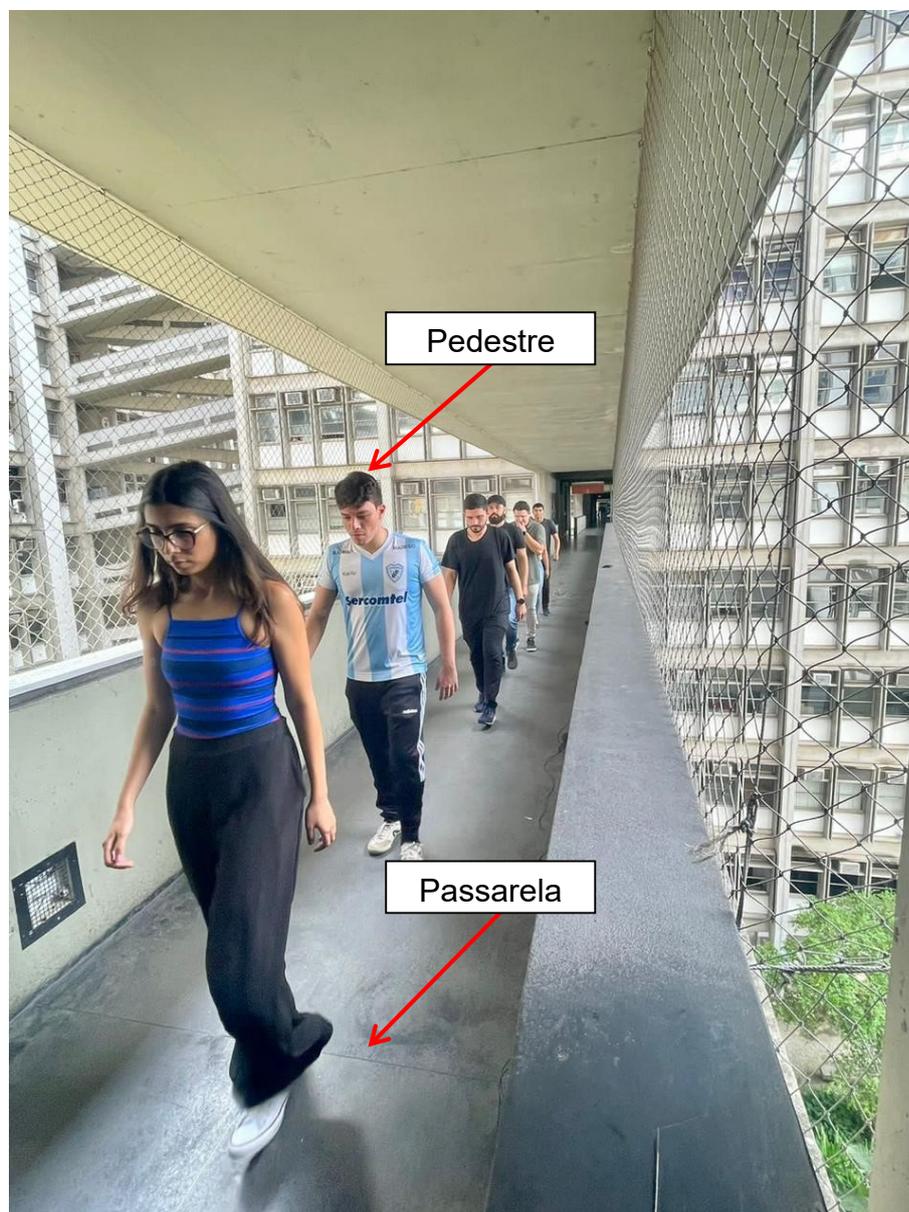


Figura 77 - Caminhada em ressonância (2,40 Hz). 7 pessoas

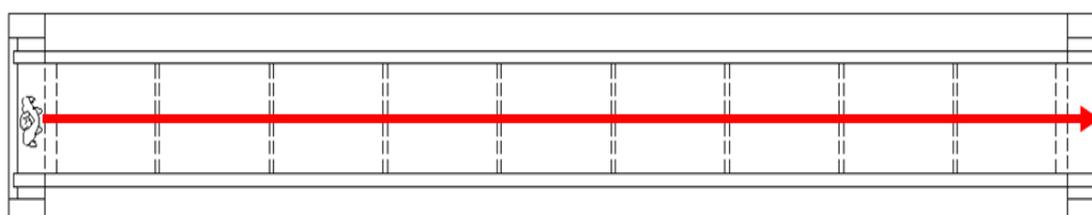


Figura 78 - Sete pessoas caminhando ($f_p = 2,40$ Hz)

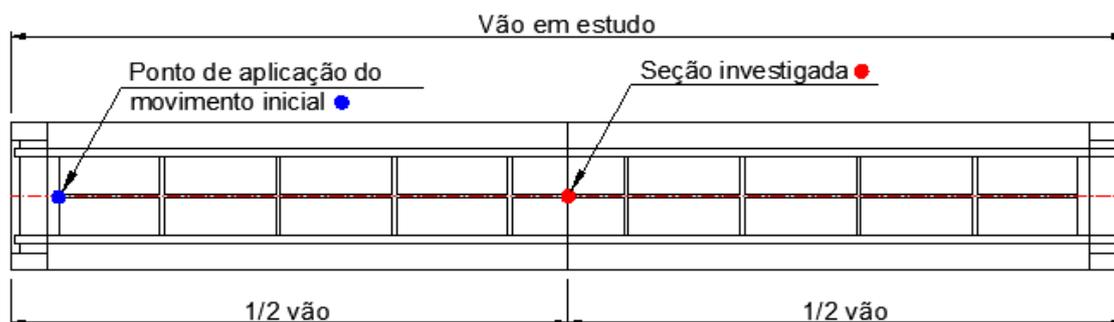
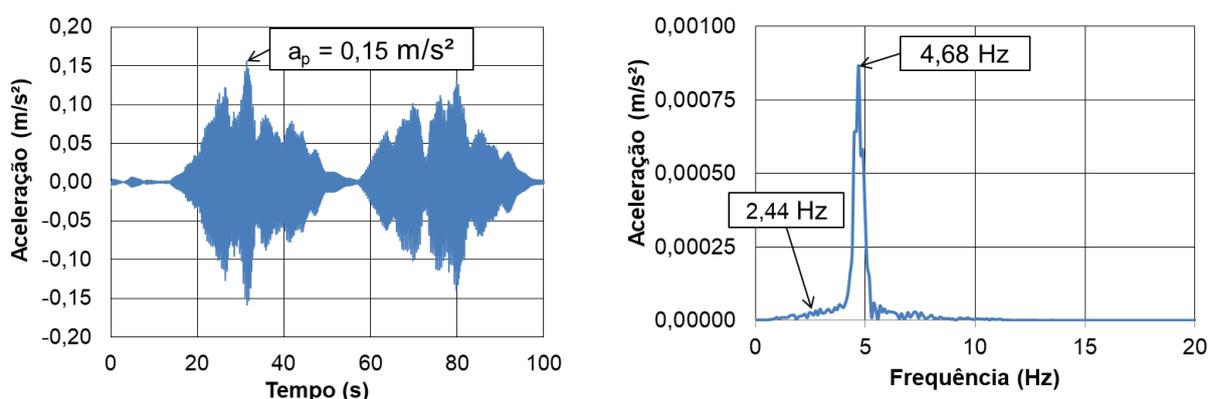


Figura 79 - Seção investigada: 1/2 do vão



(a) Aceleração no domínio do tempo

(b) Aceleração no domínio da frequência

Figura 80 - Resposta dinâmica experimental da passarela. 7 pessoas (2,40 Hz).

Na Figura 80a observa-se que a aceleração máxima da estrutura foi de $0,15 \text{ m/s}^2$ no tempo (t) igual a 31,0 segundos ($t = 31,0 \text{ s}$). Na Figura 80b é possível observar que a condição de ressonância não foi alcançada resultando um pico de frequência igual a 4,68 Hz ($f = 4,68 \text{ Hz}$). Esse fato pode ser explicado devido os indivíduos não estarem em sincronismo durante a realização do teste experimental, logo, cada pedestre obteve uma determinada frequência passo preferencial ao longo da travessia da passarela.

9.5. Ensaio experimental III: 12 pessoas ($f_p = 2,40 \text{ Hz}$)

O terceiro ensaio de vibração forçada foi realizado objetivando causar o movimento ressonante da estrutura a partir do caminhar de doze pessoas distribuídas em duplas com frequência de passo de $f_p = 2,40 \text{ Hz}$, correspondente a 144 bpm (batidas por minutos), conforme Figuras 81 e 82. A Figura 83 ilustra a seção investigada da passarela, sendo, portanto, a região de maior amplitude. Os

resultados da análise, ida e volta, no domínio do tempo e da frequência são demonstrados nas Figuras 84a e 84b.

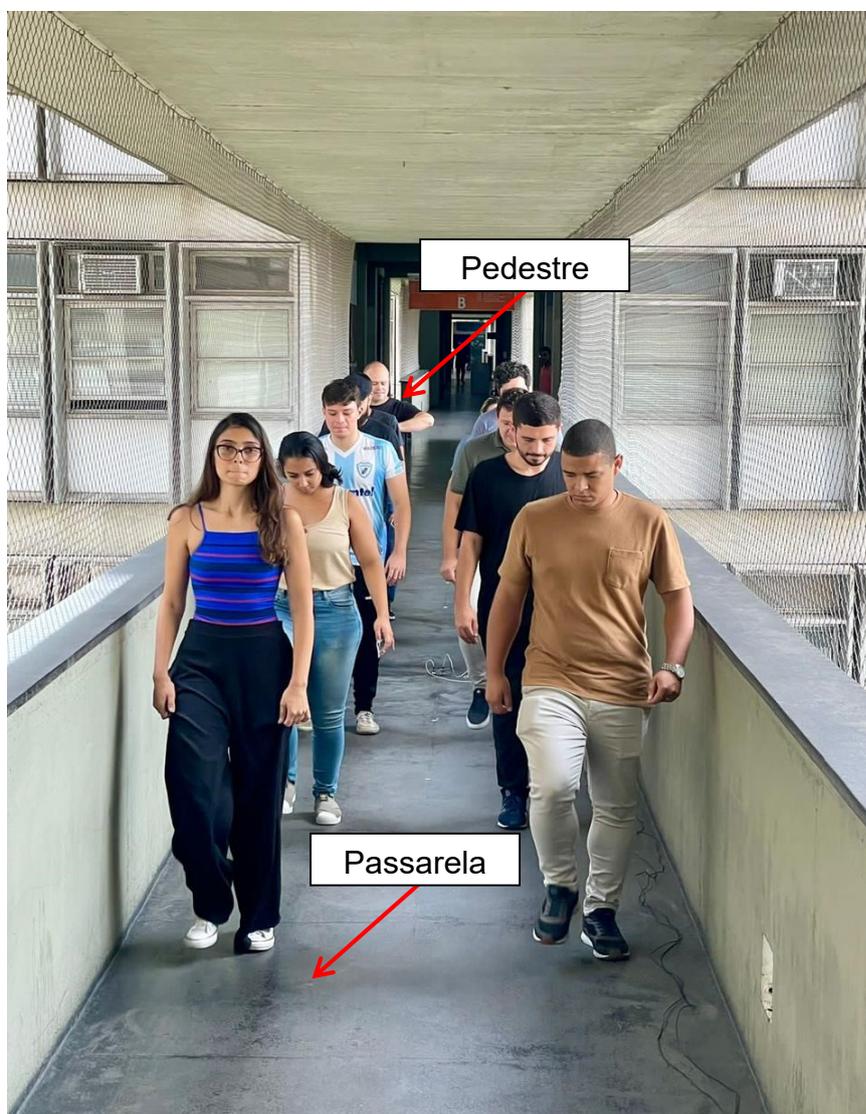


Figura 81 - Caminhada em ressonância (2,40 Hz). 12 pessoas

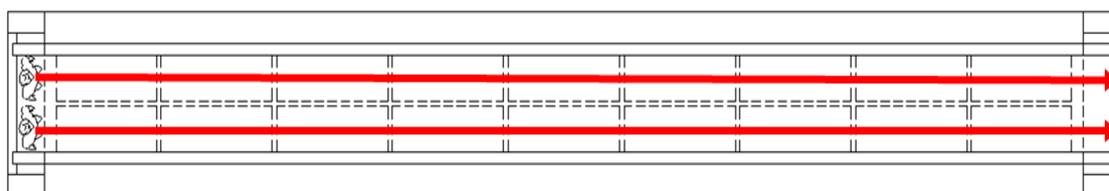


Figura 82 - Doze pessoas caminhando ($f_p = 2,40$ Hz)

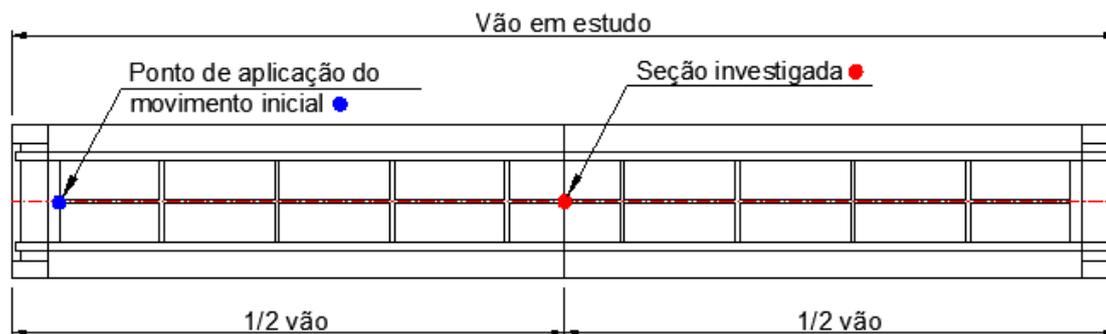
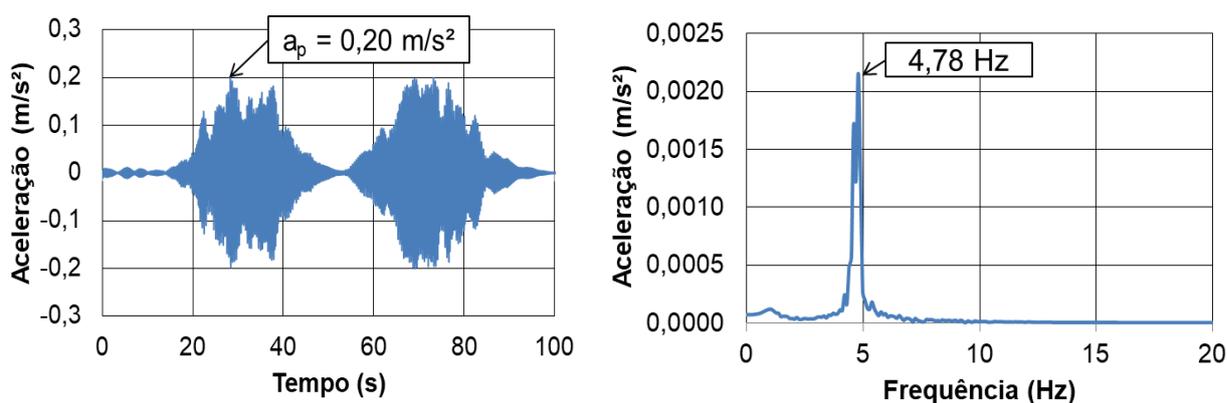


Figura 83 – Seção investigada: 1/2 do vão



(a) Aceleração no domínio do tempo

(b) Aceleração no domínio da frequência

Figura 84 - Resposta dinâmica experimental da passarela. 12 pessoas (2,40 Hz).

Na Figura 84a observa-se que a aceleração máxima da estrutura foi de $0,20 \text{ m/s}^2$ no tempo (t) igual a 28,3 segundos ($t = 28,3 \text{ s}$). Na Figura 84b é possível observar que o pico da frequência de excitação não é evidenciado e que condição de ressonância não foi alcançada resultando um pico de frequência igual a 4,78 Hz ($f = 4,78 \text{ Hz}$). Esse fato pode ser explicado devido os indivíduos não estarem em sincronismo durante a realização do teste experimental, logo, cada pedestre obteve uma determinada frequência passo preferencial ao longo da travessia da passarela.

10. FORMULAÇÕES ANALÍTICAS PARA O CAMINHAR DE PEDESTRES

10.1. Considerações iniciais

Neste capítulo será apresentada a formulação matemática característica do caminhar humano bem como as soluções analíticas utilizadas para análise do caminhar de um único pedestre. Essas soluções reduzem o sistema estrutural para um único grau de liberdade (S1GL) permitindo uma análise simplificada do comportamento dinâmico da estrutura.

10.2. Caracterização do caminhar humano

A ação dinâmica do caminhar humano é caracterizada, por guias e normas de projeto, como uma força representativa de uma função perfeitamente periódica representada por uma série de Fourier. As cargas dinâmicas periódicas, como o caminhar, são caracterizadas por excitações repetidas ao longo do tempo.

A formulação matemática da série de Fourier é composta por uma parcela estática que corresponde ao peso de uma pessoa e por uma parcela correspondente a carga dinâmica composta por harmônicos cujas frequências são múltiplos da frequência básica da força de repetição, por exemplo, a frequência de passo do pedestre. Esses harmônicos surgem devido à interação entre a carga crescente representada por um pé e pelo simultâneo carregamento do outro pé. A representação matemática da ação humana do caminhar na direção transversal vertical é dada conforme a Equação (24).

$$F(t) = P \left[1 + \sum \alpha_i \cos (2 \pi i f_p t + \phi_i) \right] \quad (24)$$

Onde:

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

P : peso de uma pessoa;

α_i : coeficiente dinâmico para a força harmônica;

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

f_p : frequência do passo humano;

ϕ_i : ângulo de fase para harmônico i ;
 t : tempo.

Durante o caminhar, os pedestres induzem forças dinâmicas que se deslocam sobre as estruturas. Estas forças geram componentes em três direções: vertical, transversal e longitudinal. Todas elas dependem de parâmetros associados à frequência e comprimento do passo e à velocidade da caminhada. Na direção vertical, a componente é produzida pelo impacto periódico das passadas e pelo movimento de oscilação vertical da pessoa ao caminhar. Na direção transversal, as forças são resultantes do movimento oscilatório em torno do centro de gravidade do corpo humano que ocorre entre as passadas Nakamura & Kawasaki [5]. Já na direção longitudinal, as forças são geradas devido ao atrito entre os pés e o piso.

O carregamento dinâmico devido ao caminhar humano é resultante do movimento de subir e descer das pernas e da massa efetiva do corpo do indivíduo em cada passo, desenvolvendo um esforço variável no tempo e no espaço, conforme ilustra a Figura 85. Essa variação espaço-temporal depende de parâmetros do caminhar humano tais como: a frequência de passo (f_p), comprimento (L_p) e velocidade do passo (v_p).

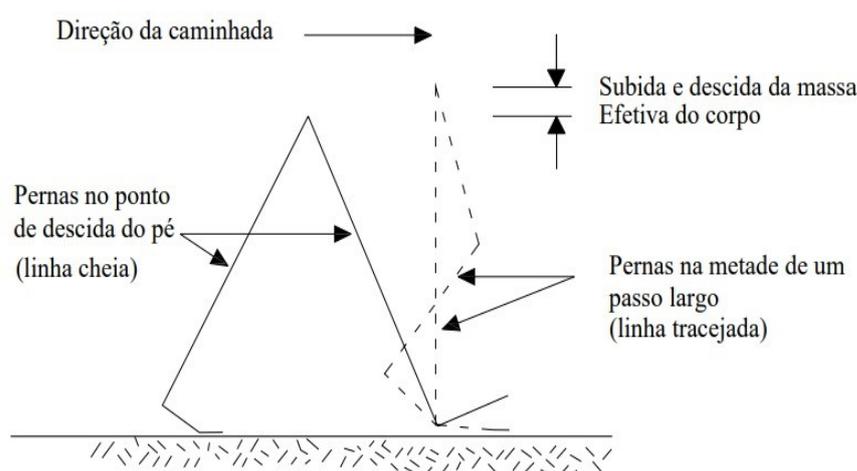


Figura 85 - Geometria simplificada de uma passada [70]

As forças dinâmicas causadas por ações humanas, tal como o caminhar, são altamente complexas em natureza e interpretação. Essa complexidade se dá pelo fato de cada indivíduo possuir características próprias e preferenciais, tais como, por exemplo, frequência de passo e peso. Desta maneira, o número de pedestres que

passam por uma passarela, por exemplo, e o grau de sincronismo entre si é de difícil generalização.

Os parâmetros que definem o caminhar humano são aplicados por guias de projetos, como valores determinísticos, que não leva em conta a variação aleatória, e, portanto sugere um modelo de força de caminhada uniforme para cada pedestre. Porém alguns estudos demonstram que o pedestre não consegue caminhar em um passo constante e caracterizam essa ação dinâmica como um fenômeno estocástico, ou seja, considera que os parâmetros do caminhar de cada pedestre são aleatórios e são definidos mediante a probabilidade de ocorrência representada por função de probabilidade de densidade.

A aleatoriedade do caminhar humano é perceptível devido cada pedestre experimentar uma maneira singular de caminhar. Essas pequenas diferenças no padrão de caminhada humana podem influenciar consideravelmente a resposta dinâmica podendo aproximar ou afastar a estrutura da ressonância.

10.3. Equação de equilíbrio dinâmico [67]

A análise do comportamento dinâmico de passarelas submetidas à ação do caminhar humano é realizada mediante critérios de conforto humano definido por guias e normas de projetos empregando-se valores determinísticos. Analiticamente, torna-se complexo a análise quando se trata de uma estrutura com infinitos graus de liberdade, mediante a isso são propostas formulações analíticas que reduzem as passarelas de pedestres com infinitos graus de liberdade para um sistema de um único grau de liberdade. Desta forma pode-se avaliar o comportamento dinâmico para um determinado modo de vibração i considerando a equação de equilíbrio dinâmico apresentada na Equação (25).

$$a(t) + 2\xi_i\omega_i v(t) + \omega_i^2 u(t) = \frac{\phi_i F(t)}{m_i} \quad (25)$$

Onde:

$a(t)$: aceleração de pico (m/s^2);

$v(t)$: velocidade (m/s);

$u(t)$: deslocamento (m);

ξ : coeficiente de amortecimento modal;

t: tempo;

m_i : massa modal do harmônico i;

ω_i : frequência angular da carga de excitação para o harmônico i;

ϕ_i : função do modo de vibração i;

F(t): força harmônica.

10.3.1. Solução analítica

Existem duas maneiras de se calcular a resposta dinâmica determinística de passarelas de pedestres. Na primeira opção, a frequência da carga de excitação escolhida é igual a frequência natural do sistema, de modo que a estrutura esteja em ressonância com algum harmônico do caminhar humano. Nesta opção a resposta dinâmica da estrutura, ao menos do ponto de vista estatístico, é superestimada por não considerar a distribuição normal da frequência do passo dos pedestres. Ou seja, nem todos os pedestres caminham com frequência de passo em ressonância com a estrutura.

Sendo F(t) uma função harmônica $F(t) = F_0 \cos(\omega_i t)$ em ressonância com a estrutura, o deslocamento e a aceleração de pico para o estado permanente podem ser obtidos pelas Equações (26) e (27), respectivamente [61].

$$u(t) = \frac{1}{2} \frac{\phi_i F_0}{\xi_i \omega_i m_i} \cos(\omega_i t) \quad (26)$$

$$a(t) = \frac{1}{2} \frac{\phi_i F_0}{\xi_i m_i} \cos(\omega_i t) \quad (27)$$

Onde:

a(t): aceleração de pico (m/s^2);

v(t): velocidade (m/s);

u(t): deslocamento (m);

ξ : coeficiente de amortecimento modal;

t: tempo.

m_i : massa modal do harmônico i ;

ω_i : frequência angular da carga de excitação para o harmônico i ;

ϕ_i : função do modo de vibração i ;

F_0 : Amplitude da excitação.

Na segunda opção, a frequência da carga de excitação corresponde ao valor médio da frequência do passo (2 Hz), neste caso a estrutura pode ou não se encontrar em ressonância com a carga de excitação. O deslocamento e a aceleração, neste caso, podem ser obtidos pelas Equações 28 a 32. Neste caso a resposta dinâmica da estrutura pode ser superestimada ou subestimada. Caso a estrutura encontre-se em ressonância com o valor médio da frequência do passo, o valor da resposta dinâmica, do ponto de vista estatístico, é superestimada. Quando a estrutura não se encontra em ressonância com a carga de excitação (valor médio da frequência do passo 2 Hz), a resposta dinâmica é subestimada.

$$u(t) = \frac{1}{\sqrt{(1-\beta^2)^2 + 4\xi_i^2\beta^2}} \frac{\phi_i F_0}{\omega_i^2 m_i} \cos(\omega_i t) \quad (28)$$

$$a(t) = \frac{1}{\sqrt{(1-\beta^2)^2 + 4\xi_i^2\beta^2}} \frac{\phi_i F_0}{m_i} \cos(\omega_i t) \quad (29)$$

$$FAD = \frac{1}{\sqrt{(1-\beta^2)^2 + 4\xi_i^2\beta^2}} \text{ para } \beta \neq 1 \quad (30)$$

$$FAD = \frac{1}{2\xi_i} \text{ para } \beta = 1 \quad (31)$$

$$\beta = \frac{f}{f_n} \quad (32)$$

Onde:

$a(t)$: aceleração de pico (m/s^2);

$u(t)$: deslocamento (m);

ξ : coeficiente de amortecimento modal;

t: tempo;

m_i : massa modal do harmônico i;

F_0 : amplitude da excitação;

ω_i : frequência angular da carga de excitação para o harmônico i;

FAD: fator de amplificação dinâmico.

10.4. Equação de equilíbrio dinâmico proposta por Zivanovic et al [33]

Conforme descrito no item 10.2, o caminhar humano apresenta característica estocástica onde o pedestre não apresenta constância na caminhada. Logo, os parâmetros do caminhar (peso, frequência e comprimento de passo) são aleatórios e característicos de cada pedestre, e, portanto tornando mais complexa a análise do comportamento dinâmico de passarelas quando submetida ao caminhar humano.

Sendo assim, Zivanovic, Pavic e Reynolds [33] propuseram uma formulação para o cálculo da aceleração de pico de passarelas por meio da equação dinâmica para o modo de vibração i dada pela Equação (25). Considerando que o primeiro modo de vibração é representado por uma meia senóide $\sin(\pi v_p t/L)$ a equação de equilíbrio representativa aplicada ao primeiro modo de vibração é dada pela Equação (33).

$$a(t) + 2\xi\omega_0 \dot{v}(t) + \omega_0^2 u(t) = \frac{1}{m} \alpha P \sin(2\pi f_p t) \sin\left(\frac{\pi v_p t}{L}\right) \quad (33)$$

$$v_p = f_p l_p \quad (34)$$

Onde:

a(t): aceleração de pico (m/s^2);

v(t): velocidade (m/s);

u(t): deslocamento (m);

ξ : taxa de amortecimento (%);

t: tempo (s);

m: massa modal (kg);

f_p : frequência da carga de excitação (Hz);

v_p : velocidade do passo (m/s);

l_p : comprimento do passo (m);

α : coeficiente dinâmico;

L: é o comprimento da passarela (m);

P: peso do pedestre.

Segundo Clough [67] a amplitude da resposta dinâmica de um sistema com um grau de liberdade submetido a uma carga senoidal ressonante varia até atingir o estado permanente, sendo uma função da duração do carregamento e do coeficiente de amortecimento estrutural.

A variação da amplitude até atingir o estado permanente de um sistema massa mola com um grau de liberdade (S1GL) em ressonância com a carga de excitação é dado pela Equação (35). O deslocamento do sistema (S1GL) é dado pela Equação (36).

$$\frac{u(t)}{u(st)} = (1 - e^{-2\pi h f_p \xi l_p / v_p}) \quad (35)$$

$$u(t) = \frac{1}{2\xi} e^{-\xi 2\pi f_p t} - 1 \quad (36)$$

Onde:

$u(t)$: deslocamento (m);

$u(st)$: resposta máxima no estado permanente (m);

ξ : coeficiente de amortecimento modal (%);

t: tempo (s);

f_p : frequência da carga de excitação (Hz);

v_p : velocidade do passo (m/s);

l_p : comprimento do vão (m);

h: harmônico do caminhar (h=1, 2, 3, 4 ...).

10.4.1. Solução analítica

A solução analítica da Equação (33) proposta por Zivanovic [33] resulta na resposta dinâmica, em termo de aceleração. A solução analítica da Equação (33)

pode ser transformada por meio das propriedades trigonométricas das funções seno e cosseno, conforme a Equação (37).

$$a(t) + 2\xi\omega v(t) + \omega_0^2 u(t) = \frac{A}{m} \left[\cos\left(\omega - \frac{\pi V_p}{L}\right)t - \cos\left(\omega + \frac{\pi V_p}{L}\right)t \right] \quad (37)$$

$$a(t) = a_1(t) + a_2(t) \quad (38)$$

$$\begin{aligned} a_1(t) = & x^2 \omega_n^2 e^{-\xi\omega_n t} \left[-\frac{f_0 \beta}{\beta^2 + \gamma^2} \cos(\omega_d t) - \frac{\xi \omega_n f_0 \beta}{\omega_d (\beta^2 + \gamma^2)} \text{sen}(\omega_d t) \right. \\ & \left. - \frac{\gamma \alpha f_0}{\omega_d (\beta^2 + \gamma^2)} \text{sen}(\omega_d t) \right] \\ -2 \xi^2 \omega_n^2 e^{-\xi\omega_n t} & \left[-\frac{f_0 \omega_d \beta}{\beta^2 + \gamma^2} \text{sen}(\omega_d t) - \frac{\xi \omega_n f_0 \beta}{\beta^2 + \gamma^2} \cos(\omega_d t) - \frac{\gamma \alpha f_0}{\beta^2 + \gamma^2} \cos(\omega_d t) \right] \\ + e^{-\xi\omega_n t} & \left[-\frac{f_0 \omega_d^2 \beta}{\beta^2 + \gamma^2} \cos(\omega_d t) - \frac{\xi \omega_n \omega_d}{\beta^2 + \gamma^2} \text{sen}(\omega_d t) - \frac{\gamma \alpha \omega_d f_0}{\beta^2 + \gamma^2} \text{sen}(\omega_d t) \right] \\ & - \frac{f_0}{\beta^2 + \gamma^2} [\beta \alpha^2 \cos(\alpha t) + \gamma \alpha^2 \text{sen}(\alpha t)] \end{aligned} \quad (39)$$

$$f_0 = \frac{A}{2m} \quad (40)$$

$$A = \alpha P \quad (41)$$

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \xi^2} \quad (42)$$

$$\alpha = \omega - \frac{\pi V_p}{L} \quad (43)$$

$$\beta = \omega_n^2 - \alpha^2 \quad (44)$$

$$\gamma = 2 \xi \omega_n \alpha \quad (45)$$

Onde:

$a(t)$: aceleração da passarela de pedestres (m/s^2);

$v(t)$: velocidade (m/s);

$u(t)$: deslocamento (m);

ξ : coeficiente de amortecimento modal;

t : tempo (s);

m : massa modal (kg);

ω : frequência angular da carga de excitação (rad/s);

ω_n : frequência natural angular da estrutura (rad/s);

P : peso do pedestre (N);

α : coeficiente dinâmico da carga de excitação;

v_p : velocidade do passo (m/s);

L : comprimento da passarela (m).

A solução para $a_2(t)$ apresenta a mesma formulação matemática para $a_1(t)$ dada na Equação (39), sendo que neste caso os valores de f_0 e α são dados pelas Equações (46) e (47).

$$f_0 = \frac{-A}{2m} \quad (46)$$

$$\alpha = \omega + \frac{\pi v_p}{L} \quad (47)$$

Onde:

f_0 : frequência de excitação;

A : variável obtida conforme Equação (39);

m : massa modal (kg);

α : coeficiente dinâmico da carga de excitação;

v_p : velocidade do passo (m/s);

L : comprimento da passarela (m).

11. SELEÇÃO DOS PARÂMETROS PARA AS ANÁLISES DINÂMICAS

11.1. Considerações iniciais

Neste capítulo são apresentados os parâmetros probabilísticos, da frequência de passo, comprimento do passo, peso, e, também da intravariabilidade do passo. Esses parâmetros foram empregados na equação proposta por Zivanovic, Pavic e Reynolds [33], a qual foi adotada para analisar a resposta dinâmica das passarelas investigadas nesse estudo de pesquisas submetidas ao caminhar de um único pedestre.

11.2. Parâmetros estatísticos do caminhar humano

O método probabilístico para avaliação da resposta dinâmica de passarelas submetidas ao carregamento de um único pedestre, desenvolvido nesse estudo, adota a Equação (31), descrita no Capítulo 10, considerando-se, portanto, que passarelas simplesmente apoiadas podem ser reduzidas a um sistema com um único grau de liberdade. A Figura 86 demonstra o caminhar de um único pedestre durante a travessia da passarela e a região investigada (meio do vão) para quais os valores da resposta dinâmica da estrutura são obtidos.

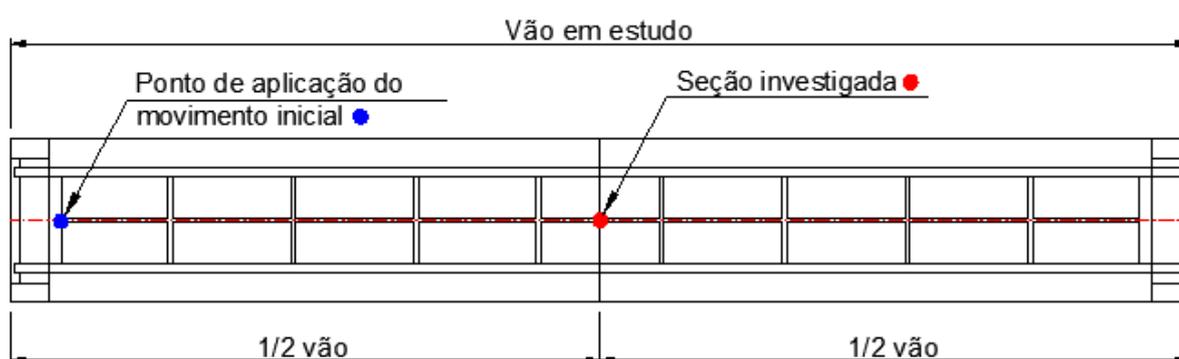


Figura 86 - Caminhar de um único pedestre sobre a passarela

O método probabilístico para avaliação da resposta dinâmica da estrutura assume que as variáveis aleatórias e independentes associadas à frequência de passo (f_p), comprimento do passo (l_p), peso (P) e a intravariabilidade do passo seguem uma distribuição normal.

Hausdorff et al [71] demonstraram que durante a caminhada não há uma constância na frequência do passo. Cada pedestre caminha livremente com uma frequência de passo preferencial, porém a cada passo a frequência varia. Essa variação passo a passo ao longo do tempo da travessia é denominada como intravariabilidade e a variação de passo entre pedestres é denominada como intervariabilidade.

Nesse estudo, para o método probabilístico proposto, foram consideradas tanto a intravariabilidade quanto a intervariabilidade do passo dos pedestres. Sendo portanto a intervariabilidade do passo empregada a partir do movimento inicial do caminhar de cada pedestre.

A Tabela 22 demonstra os valores médios e respectivos desvios padrões das variáveis aleatórias do caminhar humano. Esses valores foram utilizados na simulação Monte Carlo para avaliar o comportamento dinâmico de passarelas simplesmente apoiadas.

Tabela 22 – Parâmetros estatísticos para o caminhar dos pedestres

Variável	Unidade	Média (μ)	Desvio Padrão (σ)	Referências
Peso	N	727	145	Ingólfsson [72]
f_p	Hz	2,00	0,2	Bachmann [59]
l_p	m	0,71	0,071	Zivanovic [33]
Intra	Hz	-	3,0% de μ	Brownjohn [29]

As Figuras 87 a 90 ilustram as funções de densidade de probabilidade (fdp) das variáveis aleatórias, sendo essas respectivamente, o peso, a frequência do passo, o comprimento do passo e a intravariabilidade do passo. As funções de densidade de probabilidade (fdp) foram desenvolvidas empregando-se os parâmetros estatísticos descritos na Tabela 22.

Nota-se na Figura 87 que a frequência do passo apresenta uma variação de 1,4 a 2,6 Hz correspondente ao primeiro harmônico do caminhar. Logo, os múltiplos da frequência de passo representativas do segundo, terceiro e quarto harmônico são, respectivamente, 2,8 a 5,2 Hz; 4,2 a 7,8 Hz e 5,6 a 10,4 Hz.

Observa-se na Figura 88 a função de densidade de probabilidade do comprimento de passo do pedestre apresentando uma variação de 0,50 a 0,90 m.

Essa variação assume 99,7% ($\mu \pm 3\sigma$) de probabilidade de ocorrência do comprimento de passo de um pedestre,

De forma ilustrativa, a Figura 89, mostra a função de densidade de probabilidade da intravariabilidade de passo considerando um pedestre com frequência de passo preferencial de 1,4 Hz. A variação do passo desse pedestre varia de 1,27 a 1,53 Hz.

Sendo assim, para cada pedestre foi gerado, aleatoriamente, uma frequência de passo preferencial. Em cada período do passo a frequência do passo variou 3% em torno da frequência preferencial do pedestre para levar em conta a variabilidade do passo intra-sujeito.

A Figura 90 apresenta a função de probabilidade do peso do pedestre caracterizando uma variação entre 290 a 1160 N que corresponde o pedestre ter uma massa de 29,56 a 118,2 kg. Essa variação assume 99,7% ($\mu \pm 3\sigma$) de probabilidade de ocorrência de o pedestre ter tal peso.

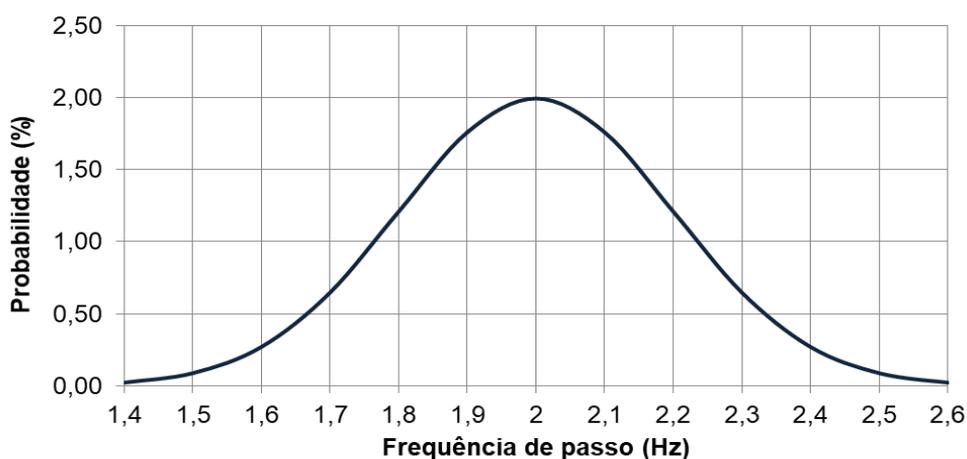


Figura 87 - Função densidade de probabilidade da frequência do passo

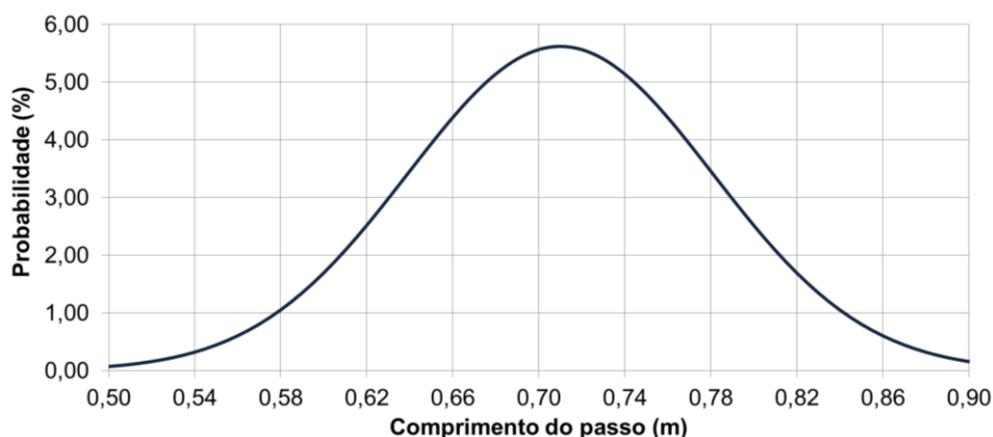


Figura 88 - Função densidade de probabilidade do comprimento do passo

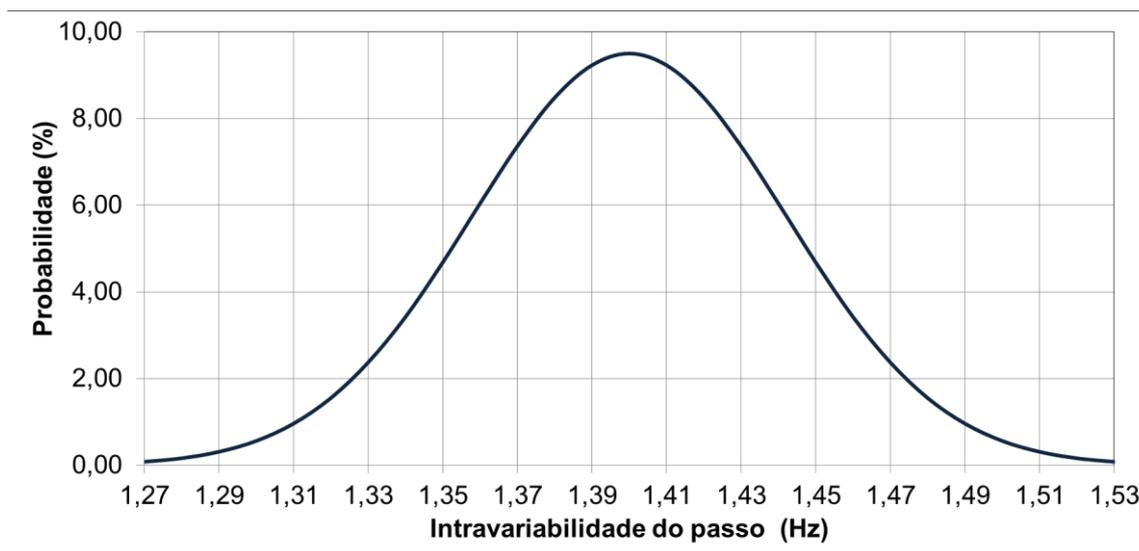


Figura 89 - Função densidade de probabilidade da intravariabilidade do passo

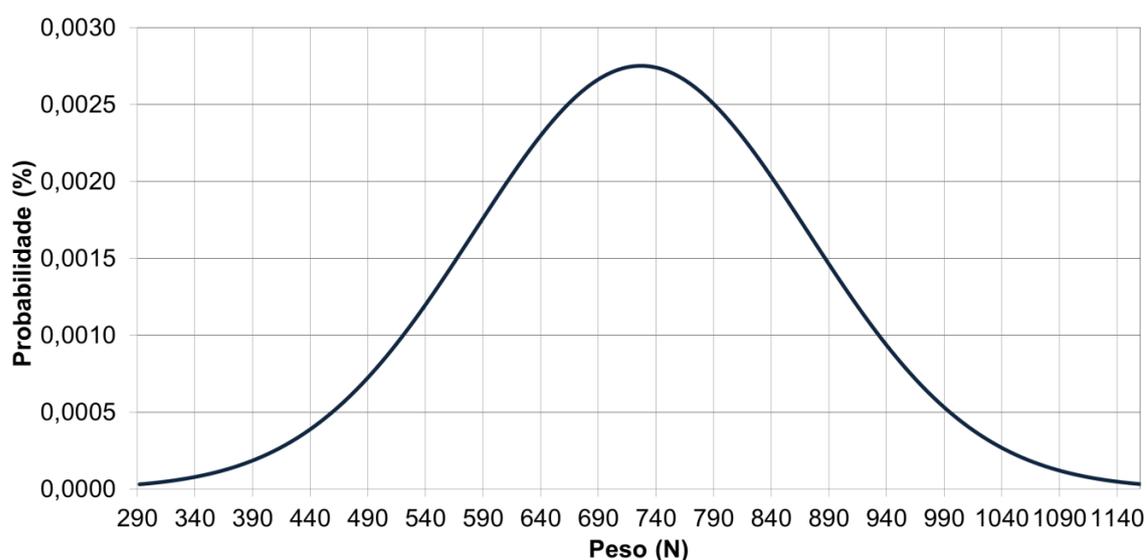


Figura 90 - Função densidade de probabilidade do peso

11.3. Coeficientes dinâmicos (α)

Rainer et al [73] definem os coeficientes dinâmicos como a razão entre a amplitude da força de cada harmônico e o peso do pedestre. Os coeficientes dinâmicos da força devido ao caminhar humano são função da frequência do passo do pedestre. A Tabela 23 apresenta as formulações matemáticas propostas por Rainer et al [73] e Young apud Hauksson [74] para obter as respostas dos coeficientes dinâmicos para os quatro harmônicos do caminhar humano.

Tabela 23 – Coeficientes dinâmicos

Autor	Coeficiente Dinâmico	Direção
Rainer, Pernica e Allen apud Varella [73]	$\alpha_1 = -0,22169f_p^3 + 1,11946f_p^2 - 1,44748f_p + 0,5967$ $\alpha_2 = -0,012037(2f_p)^3 + 0,1494(2f_p)^2 - 0,53146(2f_p) + 0,6285$ $\alpha_3 = 0,00009068(3f_p)^5 - 0,0021066(3f_p)^4 + 0,018364(3f_p)^3 - 0,077278(3f_p)^2 + 0,17593(3f_p) - 0,1477$ $\alpha_4 = 0,00051715(4f_p)^4 - 0,014388(4f_p)^3 + 0,14562(4f_p)^2 - 0,6018469$	vertical
Young apud Hauksson [74]	$\alpha_1 = 0,37 (f_p - 0,92)$ $\alpha_2 = 0,054 + 0,0044f_p$ $\alpha_3 = 0,026 + 0,0050f_p$ $\alpha_4 = 0,010 + 0,0051f_p$	vertical

As Figuras 91 e 92 apresentam, respectivamente, os coeficientes dinâmicos segundo as formulações matemáticas propostas por Rainer et al [73] e Young apud Hauksson [74]. Já as Figuras 93 a 96 apresentam os comparativos dos valores dos coeficientes dinâmicos para o primeiro, segundo, terceiro e quarto harmônico do caminhar.

Ao analisar a Figura 93 nota-se que para o primeiro harmônico da excitação dinâmica referente ao caminhar, o coeficiente dinâmico proposto por Young apud Hauksson [74] apresenta magnitude similar aquela proposta por Rainer et al [73] até a frequência de passo de 2,2 Hz. Destaca-se que o primeiro harmônico da excitação do caminhar, para as duas formulações matemáticas, apresenta a mesma magnitude para frequência do igual a 2 Hz, com valor na ordem de 0,40 ($\alpha = 0,40$).

Avaliando-se a Figura 94 é possível observar que para o segundo harmônico do caminhar os coeficientes dinâmicos segundo as formulações matemáticas propostas por Rainer et al [73] e Young apud Hauksson [74] apresentaram magnitudes distintas.

Contudo, ao analisar as Figuras 95 e 96 observa-se que os coeficientes dinâmicos do terceiro e quarto harmônico propostos por Rainer et al [73] e Young apud Hauksson [74], apresentaram magnitudes próximas.

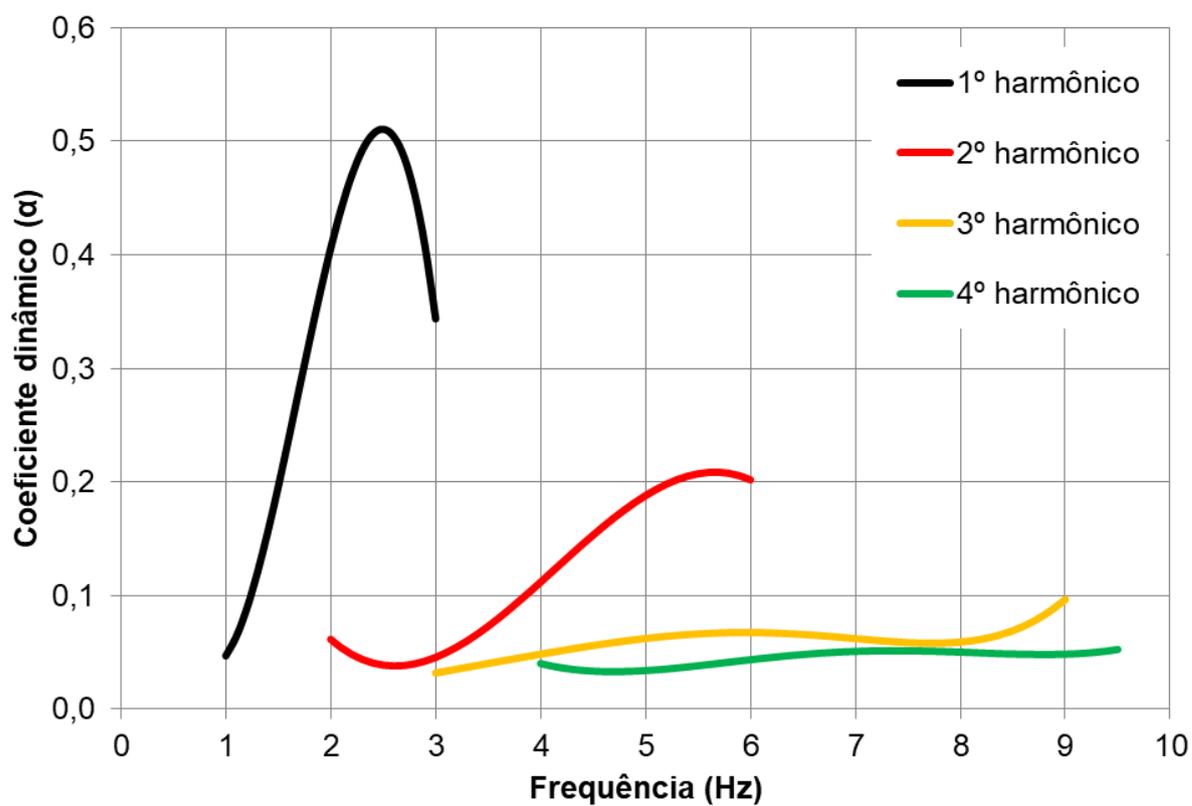


Figura 91 - Coeficientes dinâmicos Rainer et al. [73].

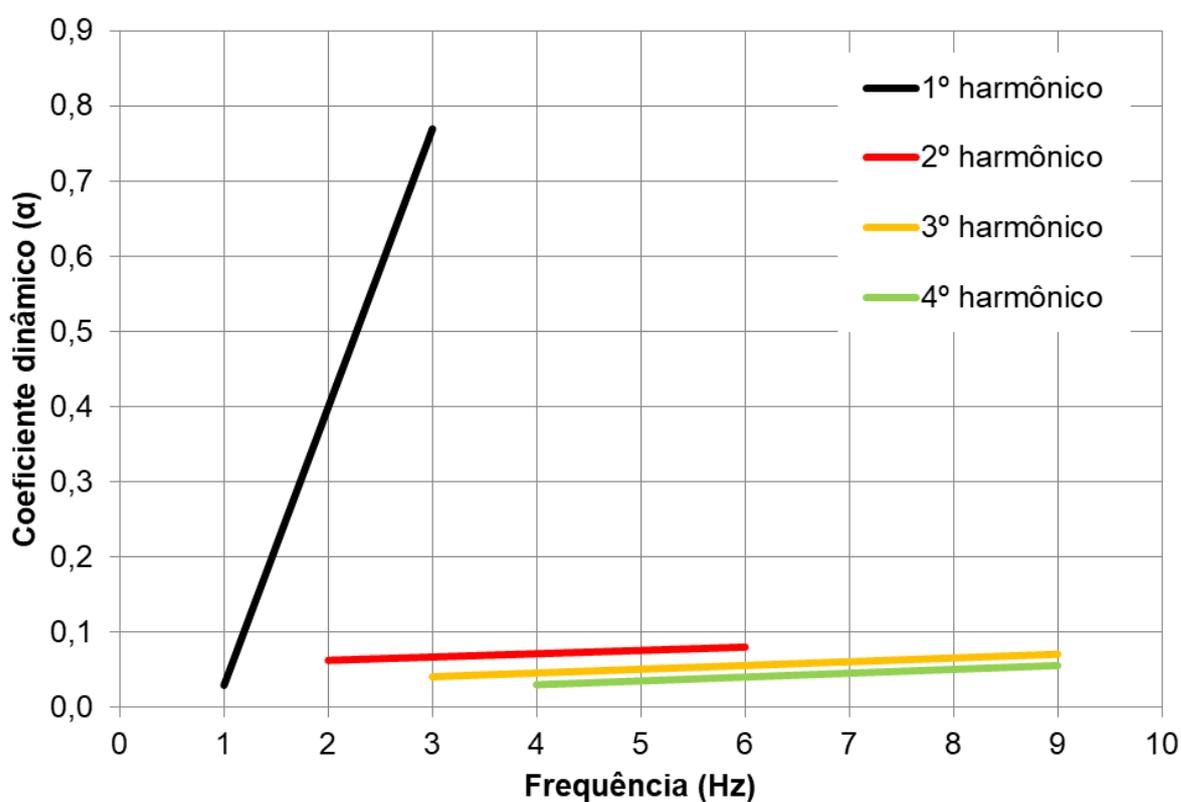


Figura 92 - Coeficientes dinâmicos Young apud Hauksson [74].

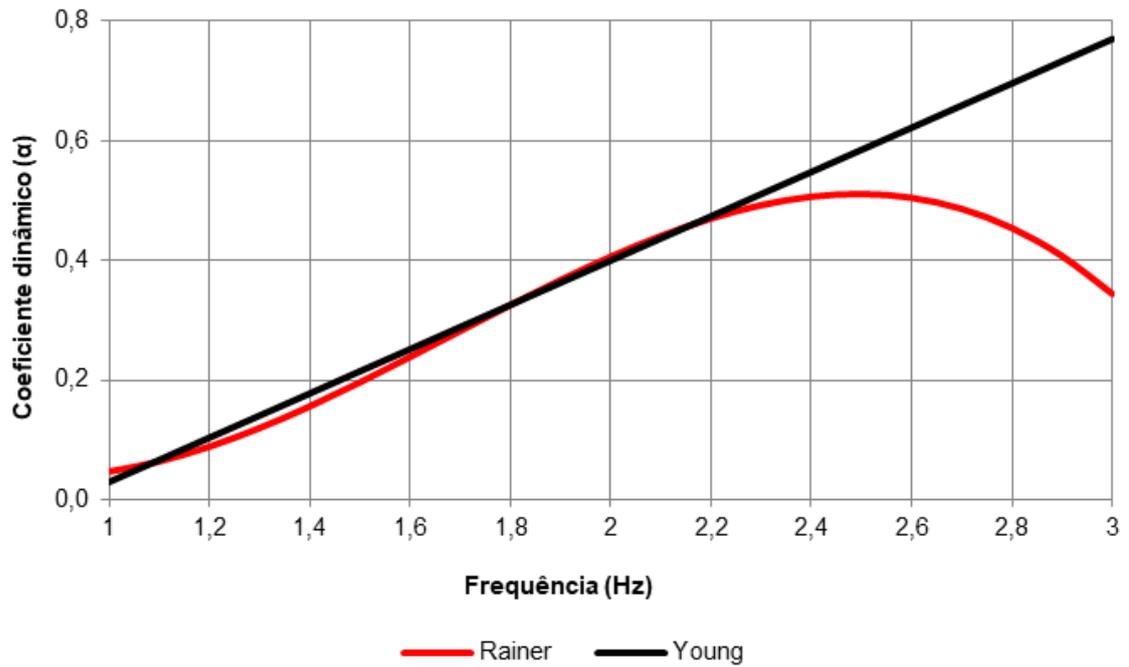


Figura 93 - Comparação coeficientes dinâmicos 1º harmônico

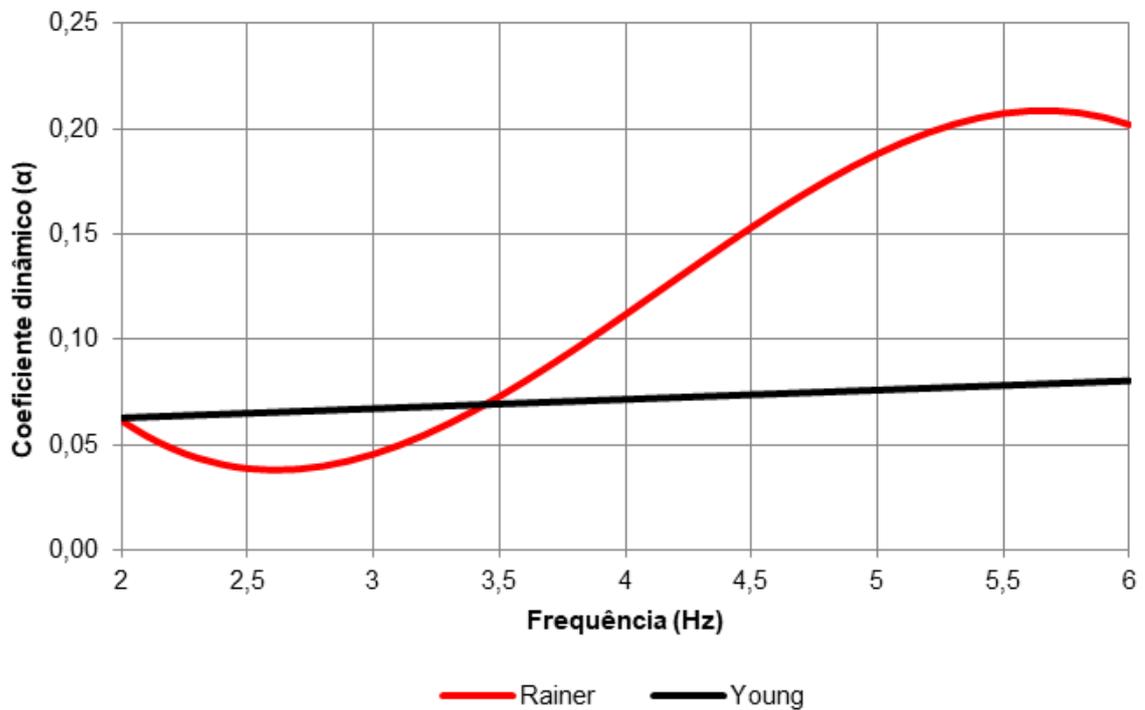


Figura 94 - Comparação coeficientes dinâmicos 2º harmônico

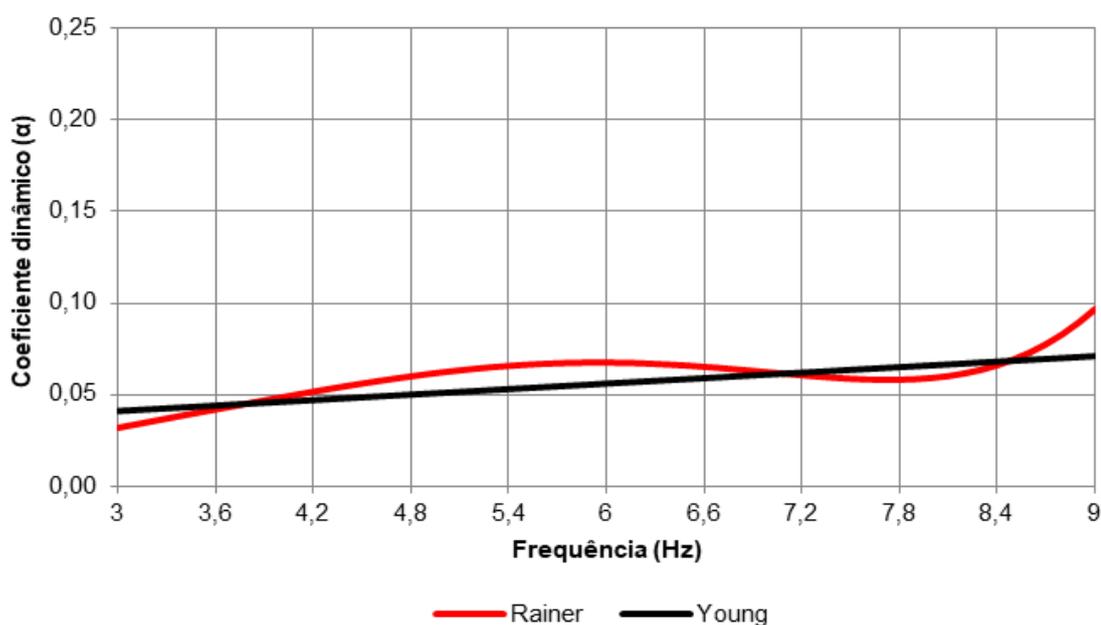


Figura 95 - Comparação coeficientes dinâmicos 3º harmônico

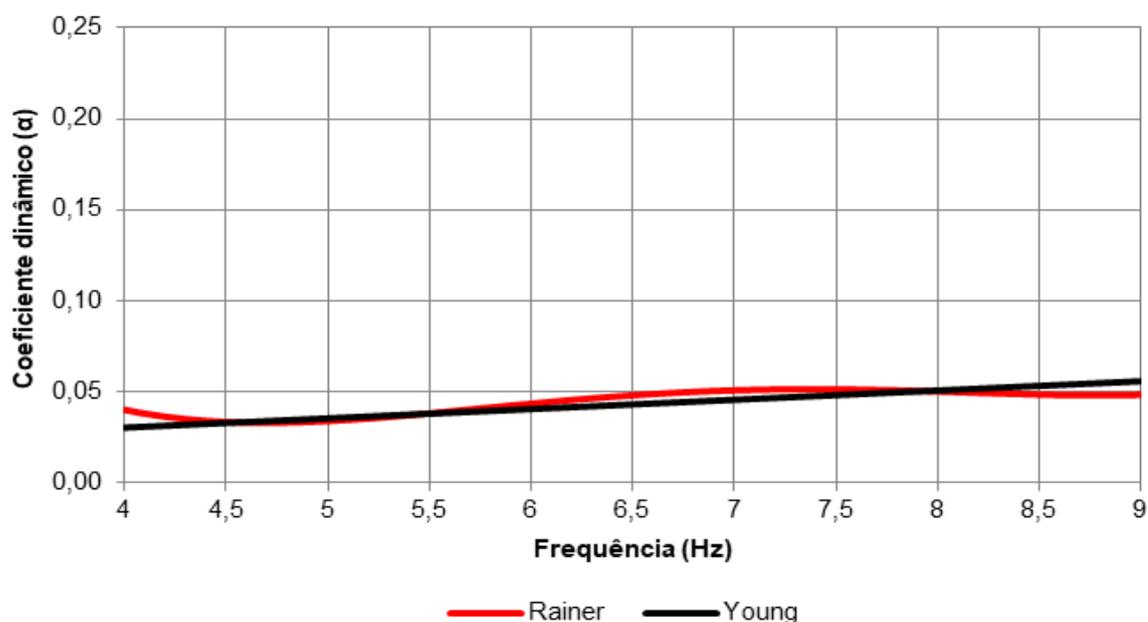


Figura 96 - Comparação coeficientes dinâmicos 4º harmônico

No Capítulo 11 em questão foram apresentadas as variáveis do caminhar humano, tais são: peso, frequência, comprimento e intravariabilidade do passo, segundo parâmetros estatísticos avaliados, respectivamente por Ingólfsson [72], Bachmann [59], Zivanovic [33] e Brownjohn [29]. Além disso foram apresentadas as formulações matemáticas dos coeficientes dinâmicos propostos por Rainer et al [73] e Young apud Hauksson [74]. Tais variáveis e formulações foram selecionadas e serão utilizadas no Capítulo 12 para a proposta de metodologia de análise dinâmica probabilística.

12. METODOLOGIA PARA ANÁLISE DINÂMICA PROBABILÍSTICA

12.1. Considerações iniciais

No presente capítulo será apresentado o comparativo entre o resultado experimental da passarela I (ME-I) e o método probabilístico proposto por Zivanovic et al [33] empregando-se os parâmetros do pedestre referente ao ensaio experimental de análise forçada descrito no Capítulo 9. O comparativo será realizado considerando os coeficientes dinâmicos propostos por Rainer et al [73] e Young apud Hauksson [74] descritos no Capítulo 11. Ainda serão apresentadas as metodologias de análise utilizadas para determinação da aceleração de pico e geração dos espectros de respostas de projetos correspondentes ao percentil 95% das passarelas investigadas ME-I, ME-II [63] e ME-III [64]. Será, também, apresentado o comparativo dos resultados experimentais das passarelas investigadas com os resultados da aceleração 95% ($a_{95\%}$) bem como a comparação dos resultados considerando a variação do coeficiente de amortecimento (ξ), e, também a análise do critério de conforto recomendado por norma de projeto para passarelas internas e externas.

12.2. Comparação solução analítica e experimental: Passarela I (ME-I)

Foi feita uma análise comparativa entre os resultados da aceleração máxima, empregando-se a Equação (31) proposta por Zivanovic (33), com o valor do resultado obtido experimentalmente. Ressalta-se que ambos os resultados levam em consideração o caminhar de um único pedestre.

Para obter os resultados da aceleração máxima da equação proposta por Zivanovic (33) foram utilizadas as formulações matemáticas dos coeficientes dinâmicos propostas por Rainer et al [73] e Young apud Hauksson [74]. A análise consiste em avaliar para qual das formulações do coeficiente dinâmico os resultados apresentam-se adequados ao resultado experimental.

A Figura 97 representa a simulação da resposta dinâmica da Passarela I com frequência natural igual a 4,85Hz ($f_n = 4,85$ Hz), taxa de amortecimento igual a 1,7% ($\xi = 1,7\%$) e comprimento igual a 24,4 m. Para tal, foram considerados os

parâmetros de um único pedestre do ensaio experimental I descrito no Capítulo 9, sendo, portanto considerados como dados de entrada o peso igual a 941 N ($M = 95,9$ kg), a variação da frequência do passo de 2,25 a 2,6 Hz ($f_p = 2,25$ a 2,60 Hz) e a variação espaço-temporal.

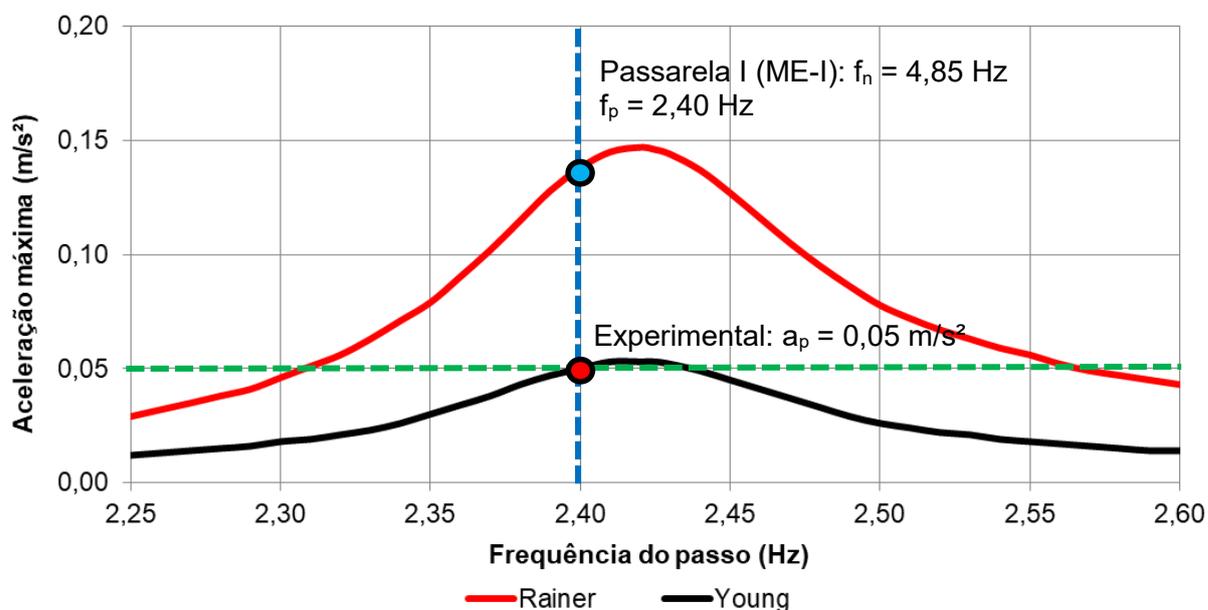


Figura 97 - Comparação aceleração de pico experimental e analítica

Variando-se a frequência de passo do pedestre observa-se que o resultado da análise experimental ($a_{exp} = 0,05$ m/s²) para o pedestre em ressonância ($f_p = 2,40$ Hz) com a estrutura é correspondente ao valor da aceleração de pico máxima ($a_{máx} = 0,05$ m/s²) quando a formulação matemática do coeficiente dinâmico proposta por Young apud Hauksson [74] é considerada.

Por outro lado quando a formulação matemática do coeficiente dinâmico proposta por Rainer et al [73] é considerada, o resultado de aceleração de pico máxima é superior ($a_{máx} = 0,14$ m/s²) ao valor da aceleração experimental ($a_{exp} = 0,05$ m/s²).

Desta maneira, especificamente, para o segundo harmônico do caminhar humano, o qual está em ressonância com a estrutura analisada (Passarela I: ME-I), a formulação matemática do coeficiente dinâmico proposta por Rainer et al [73] superestimou a resposta dinâmica. Contudo, quando a formulação matemática do coeficiente dinâmico proposta por Young apud Hauksson [74] foi considerada apresentou resultado consistente e próximo ao resultado da aceleração experimental.

12.3. Metodologia de análise probabilística

Os resultados das acelerações via método probabilístico foram obtidos a partir 2000 simulações variando-se as frequências naturais no intervalo de 0,5 a 10 Hz e considerando os coeficientes de amortecimento experimentais reais das passarelas investigadas. A Tabela 24 apresenta as características das passarelas reais investigadas nesse estudo de pesquisa.

Tabela 24 – Características das passarelas referenciais

Passarela	Tipo de construção	f_n (Hz)	C (m)	m (kg)	ξ (%)	Referência
1	Concreto	4,85	24,4	30869,93	1,70	-
2	Mista	3,83	53,5	10674,24	1,50	Silva [63]
3	Mista	1,85	68,6	39490,00	0,23	Rezende <i>et al</i> [64]

Além dos coeficientes de amortecimentos experimentais reais das passarelas investigadas, descritos na Tabela 24, também foi realizada a variação dos coeficientes de amortecimento de 0,5%, 1,0% e 2,0% ($\xi = 0,5\%$, 1,0% e 2,0%) considerando as características das passarelas investigadas nesse estudo de pesquisa.

Os valores das acelerações de pico foram obtidos empregando-se à formulação matemática proposta por Zivanovic [33], descrita no Capítulo 11 e os coeficientes dinâmicos foram determinados pelas formulações matemáticas propostas por Rainer et al [73] e Young apud Hauksson [74].

A partir dos valores de aceleração de pico obtidos de forma probabilística, foram calculados os valores relativos ao percentil de 95% ($a_{95\%}$). O percentil 95% corresponde ao valor com 95% de probabilidade de ocorrência, ou seja, ao medir a resposta dinâmica da estrutura 2000 vezes é esperado que em 1900 medições os valores de aceleração de pico sejam iguais ou inferiores ao valor representativo do percentil de 95% ($a_{95\%}$).

Os valores das acelerações 95% ($a_{95\%}$) foram obtidos levando-se em consideração somente o harmônico ressonante com a estrutura. Desta maneira, quando se trata das Passarelas I e II (ME-I e ME-II) o segundo harmônico do caminhar está em ressonância com a estrutura (f_p : 2,8 a 5,2 Hz). Enquanto que, para

Passarela III (ME-III) o primeiro harmônico do caminhar está em ressonância com a estrutura (f_p : 1,4 a 2,6 Hz).

Em virtude dessas variações que leva em consideração a intravariabilidade e a intervariabilidade, os resultados das acelerações 95% ($a_{95\%}$) são em função da interação de 2000 pedestres caminhando em ressonância ou não com a estrutura.

Por exemplo, para a Passarela I (ME-I) com frequência natural de 4,85 Hz e taxa de amortecimento de 1,7%, sendo, portanto o segundo harmônico da frequência de passo (f_p : 2,8 a 5,2 Hz) em ressonância com a estrutura, é esperado que parte dos pedestres caminhem com uma frequência de passo ressonante.

Com os valores referentes ao percentil 95% foram construídos os espectros de respostas probabilísticos. Cada espectro foi gerado com base em um total de 190.000 análises dinâmicas. O resultado total da geração de cada espectro foi obtido conforme a Equação (48).

$$\frac{f_f - f_i}{V} N \quad (48)$$

Onde:

f_f : frequência natural final (10 Hz);

f_i : frequência natural inicial (0,5 Hz);

V: variação da frequência natural (0,1 Hz);

N: número de interações de análise;

Desta maneira, considerando as características da Passarela I (ME-I) e a variação-das taxas de amortecimentos ($\xi = 0,5\%$, $1,0\%$, $1,5\%$, $1,7\%$ e $2,0\%$) foram gerados cinco espectros de respostas probabilísticos resultando um total de 950.000 (190.000×5) análises dinâmicas. Por outro lado, ao considerar as características da Passarela II (ME-II [63]) e a variação das taxas de amortecimentos ($\xi = 0,5\%$, $1,0\%$, $1,5\%$ e $2,0\%$) foram gerados quatro espectros de respostas probabilísticos resultando um total de 760.000 (190.000×4) análises dinâmicas. Por fim, ao considerar as características da Passarela III (ME-III [64]) e a variação-das taxas de amortecimentos ($\xi = 0,23\%$, $0,5\%$, $1,0\%$, $1,5\%$ e $2,0\%$) foi realizado um total de 950.000 (190.000×5) análises dinâmicas.

Convém ressaltar que a Figura 98 apresenta o fluxograma global referente às duas metodologias de análises desenvolvidas para determinação das respostas

dinâmicas das passarelas submetidas ao caminhar de pedestre. Com base no desenvolvimento destas metodologias de análise, os espectros de respostas probabilísticos das passarelas investigadas ME-I, ME-II [63] e ME-III [64] foram gerados.

A geração dos espectros de resposta de projeto tem com o objetivo obter as respostas dinâmicas das passarelas considerando 95% de probabilidade de ocorrência. Os espectros de respostas probabilísticos foram gerados conforme as seguintes etapas:

- a) Etapa 1: Foi realizada a análise modal das passarelas via modelagem em elementos finitos. Posteriormente, foram atribuídos os resultados da análise modal, o comprimento da passarela e os parâmetros estatísticos do caminhar humano (peso, frequência, comprimento e intravariabilidade do passo) como dados de entrada na planilha do Excel.
- b) Etapa 2: Foram calculados aleatoriamente por meio do emprego da Simulação Monte Carlo os parâmetros do caminhar de cada pedestre (peso, frequência, comprimento e a intravariabilidade do passo);
- c) Etapa 3: Foram calculados os coeficientes dinâmicos conforme formulação matemática de Rainer et al [73] e Young apud Hauksson [74] para as duas metodologias de análise que foram nomeadas com as seguintes siglas: M I (RN), M-I (YG), M-II (RN) e M-II (YG). Nessa etapa foi considerada, a intravariabilidade do passo na formulação dos coeficientes dinâmicos para as duas metodologias (M-I e M-II);
- d) Etapa 4: Foi calculada a aceleração máxima de pico ($a_{m\acute{a}x}$) empregando-se o método numérico da integração de Newmark. Nessa etapa foi considerada a intravariabilidade do passo na função senoidal ($\text{sen } 2\pi f_p t$) da Equação (31). Essa consideração foi empregada somente na metodologia II (M-II), sendo, portanto a condição diferencial entre as metodologias.
- e) Etapa 5: Após o cálculo das acelerações de máximo de pico considerando 2000 interações, foi calculada a aceleração 95% ($a_{95\%}$) para as frequências naturais variando de 0,5 a 10 Hz.
- f) Etapa 6: Foram gerados os espectros de respostas probabilísticos, sendo, portanto, as abcissas com os valores das frequências naturais e as ordenadas com os valores das acelerações 95% ($a_{95\%}$).

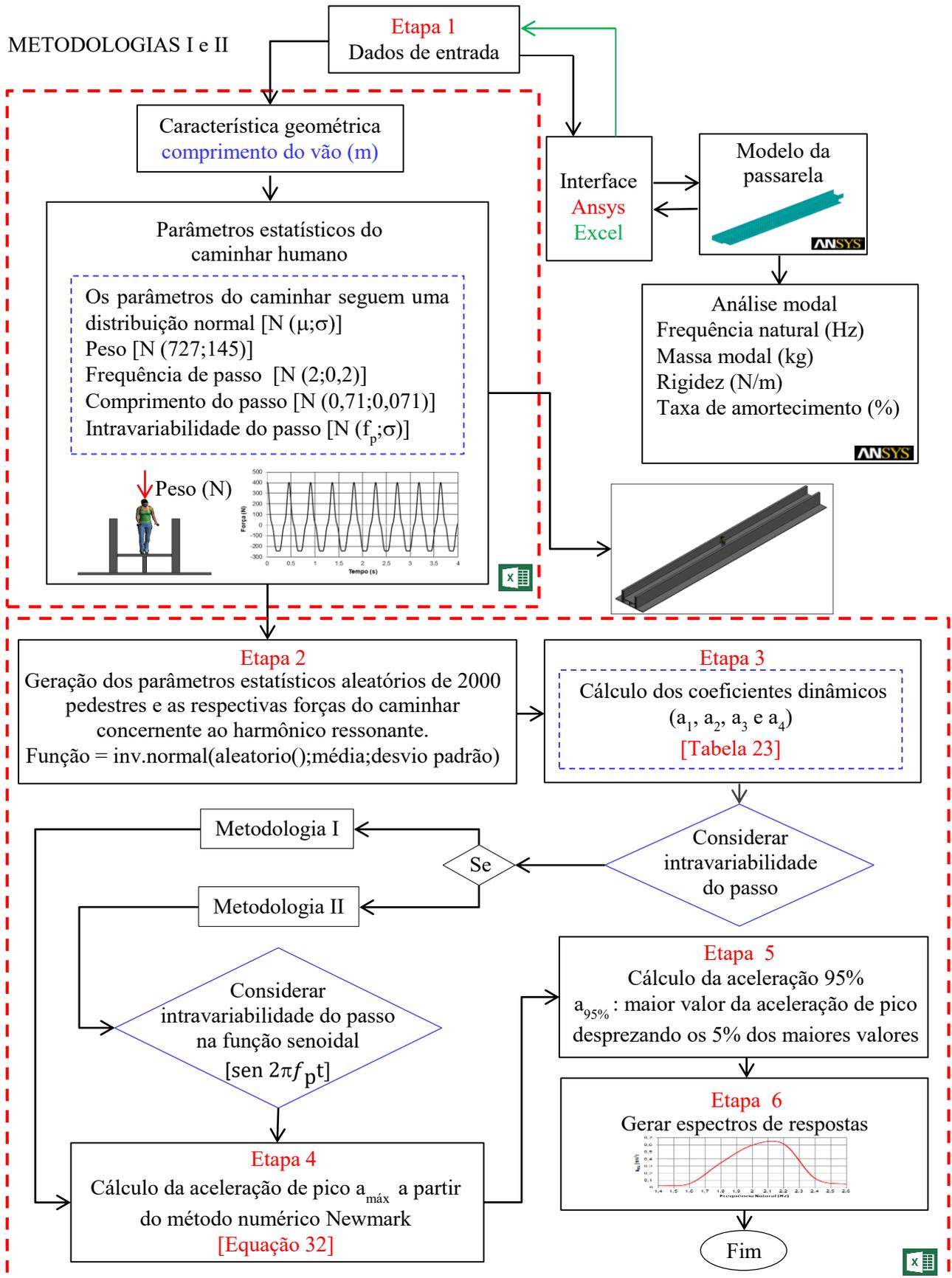


Figura 98 - Metodologias de análises propostas para geração dos espectros de respostas

Na sequência do texto, as Tabelas 25 e 26 apresentam os resultados da aceleração correspondente ao percentil 95% das passarelas investigadas com base na utilização das metodologias I e II (M-I e M-II) e utilizando as formulações matemáticas dos coeficientes dinâmicos, propostos por Rainer et al [73] e Young apud Hauksson [74].

Tabela 25 – Comparação entre as acelerações experimentais e $a_{95\%}$ (M-I)

Passarelas	Frequência (Hz)	ξ (%)	Aceleração (m/s ²)		
			Experimental	$a_{95\%}$ (m/s ²)	
				Metodologia I	
				Rainer	Young
1	4,85	1,70	0,05	0,05	0,03
2	3,83	1,50	0,24	0,20	0,13
3	1,85	0,23	0,65	0,38	0,38

Tabela 26– Comparação entre as acelerações experimentais e $a_{95\%}$ (M-II)

Passarelas	Frequência (Hz)	ξ (%)	Aceleração (m/s ²)		
			Experimental	$a_{95\%}$ (m/s ²)	
				Metodologia II	
				Rainer	Young
1	4,85	1,70	0,05	0,06	0,03
2	3,83	1,50	0,24	0,20	0,13
3	1,85	0,23	0,65	0,50	0,50

As Figuras 99 a 101 apresentam os espectros de respostas das passarelas investigadas I, II e III (ME-I, ME-II [63] e ME-III [64]) com seus respectivos coeficientes de amortecimento experimentais reais de 1,7%, 1,5% e 0,23%. Os espectros apresentam o comparativo dos resultados de aceleração 95% ($a_{95\%}$) correspondentes as duas metodologias de análise (M-I e M-II) segundo as formulações dos coeficientes dinâmicos proposto por Rainer et al [73] e Young apud Hauksson [74]. Os resultados experimentais correspondentes às passarelas investigadas são apresentados e delimitados por linhas tracejadas.

Com base nos resultados apresentados na Figura 99 e nas Tabelas 25 e 26, é possível perceber que os valores do percentil 95% determinados considerando a M-I e M-II foram imediatamente iguais e maiores ($a_{95\%}$: 0,05 m/s²; $a_{95\%}$: 0,06 m/s²), respectivamente, para formulação matemática do coeficiente dinâmico de Rainer et al [67] comparados com os valores da aceleração de pico experimental ($a_{exp} = 0,05$ m/s²). Este fato pode ser explicado, sendo, portanto, especificamente, para o segundo harmônico do caminhar humano, o qual está em ressonância com a estrutura analisada (Passarela I(ME-I): $f_n = 4,85$ Hz), que os resultados são

superestimados quando considera a formulação matemática do coeficiente dinâmico de Rainer et al [73]. Enquanto que ao avaliar os resultados do percentil 95%, empregando-se a formulação matemática do coeficiente dinâmico de Young apud Hauksson [74], os valores são inferiores comparados com o valor da aceleração de pico experimental ($a_{exp} = 0,05 \text{ m/s}^2$).

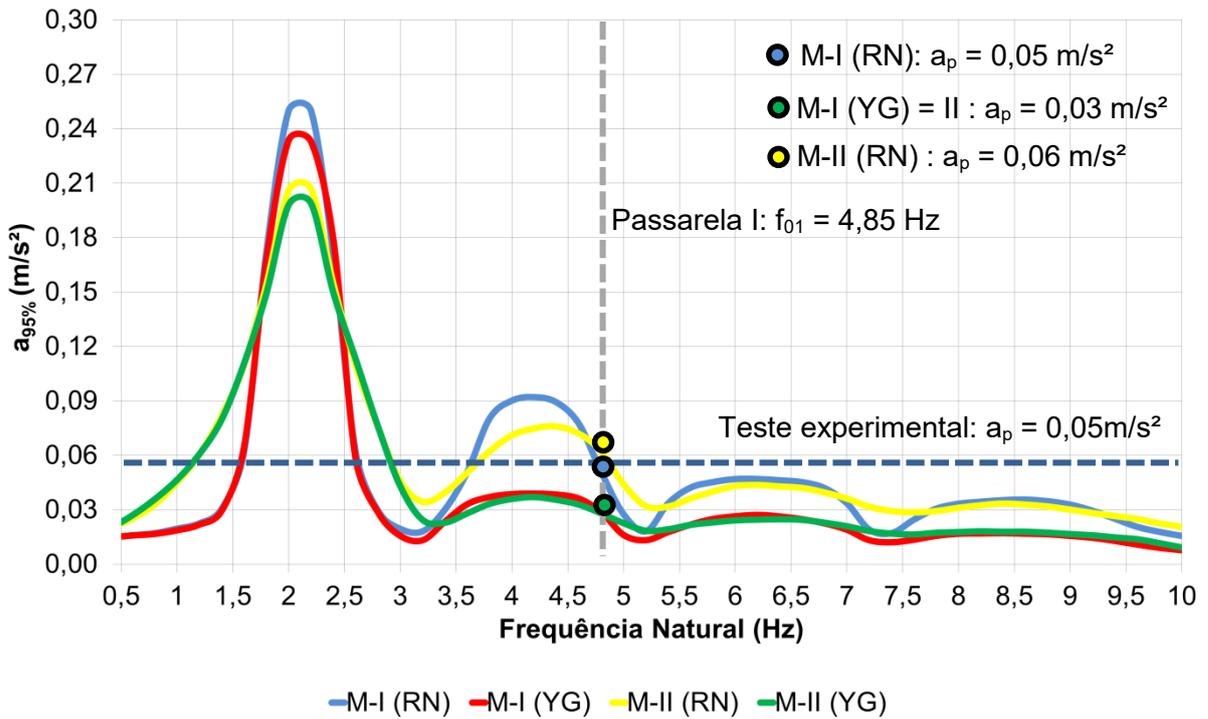


Figura 99 - Espectro de resposta para aceleração de pico: Passarela I ($\xi = 1,7\%$)

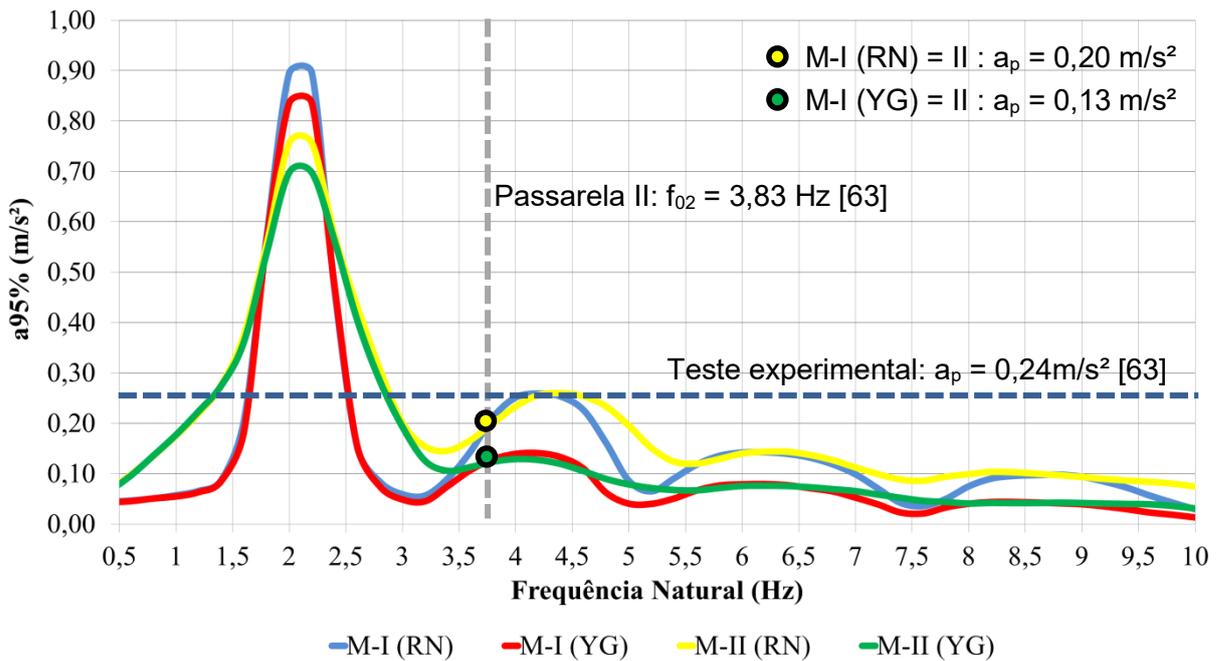


Figura 100 - Espectro de resposta para aceleração de pico: Passarela II ($\xi = 1,5\%$)

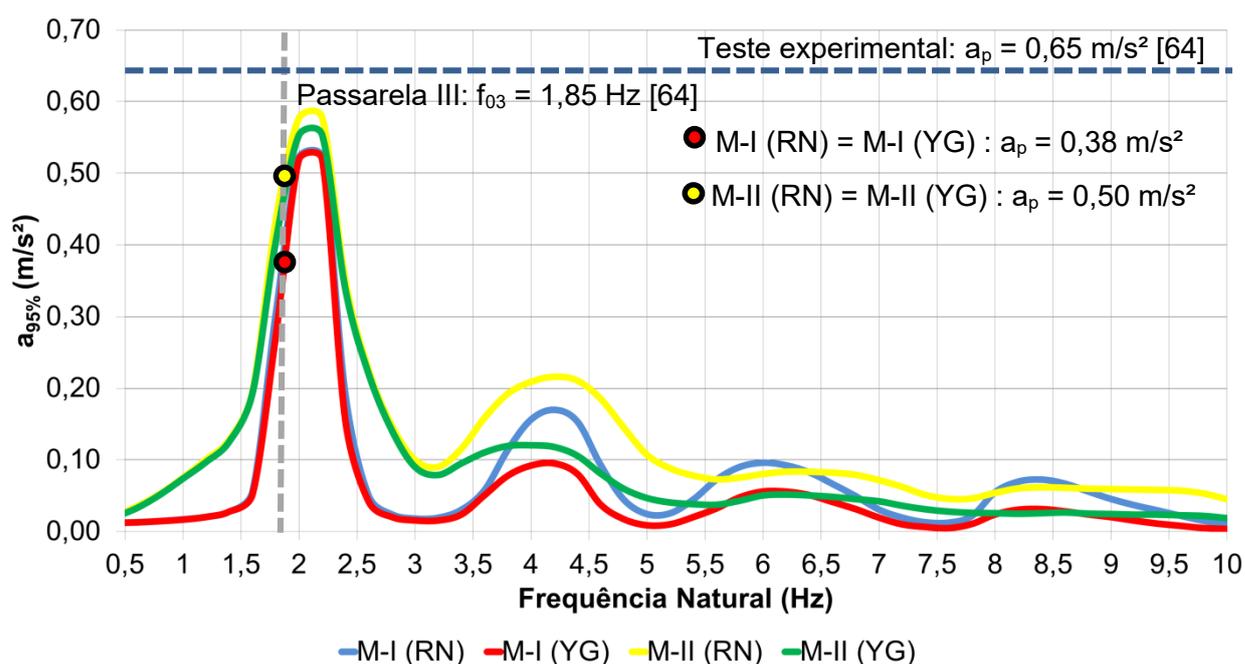


Figura 101 - Espectro de resposta para aceleração de pico: Passarela III ($\xi = 0,23\%$)

Ao analisar os resultados das Figuras 100 e 101 nota-se que os valores do percentil 95%, determinados utilizando os espectros de resposta de projeto propostos (M-I e M-II), são menores quando comparados com a aceleração de pico experimental. Esta comparação é consistente e pode ser explicada pelo fato dos ensaios experimentais terem induzido um caminhar ressonante de pedestres com as passarelas investigadas, mantendo a frequência de passo constante tanto quanto possível e considerando apenas uma travessia de pedestres. Por outro lado, a análise probabilística (M-I e M-II) considerou 2000 pedestres com diferentes frequências de passos levando em consideração a aleatoriedade das variáveis envolvidas no estudo probabilístico.

Nota-se que quando a Passarela II [63] (ME-II: harmônico ressonante = 2° , Figura 100) é analisada, os valores de $a_{95\%}$ determinados com base no uso dos espectros de respostas foram iguais para as duas metodologias de análise (M-I e M-II), contudo apresentou valores diferentes quando as formulações matemáticas dos coeficientes dinâmicos [73 e 74] foram modificadas.

Analisando-se a Passarela III [64] (ME-III: harmônico ressonante = 1° , Figura 101) os valores de 95% considerando a M-II foram maiores que os obtidos com base no uso da M-I para formulação de ambos coeficientes dinâmicos [73 e 74].

12.4. Estudo paramétrico

Neste item serão apresentados os espectros de repostas de projeto das duas metodologias de análise probabilísticas empregadas nesse estudo de pesquisa. Os espectros de repostas de projeto probabilístico foram gerados a partir das metodologias I e II (M-I e M-II) considerando as formulações matemáticas dos coeficientes dinâmicos propostos por Rainer et al. [73] e Young apud Hauksson [74]. Além disso, os espectros de repostas de projetos desenvolvidos nesse item levam em consideração a variação das taxas de amortecimento, tais são: 0,23%, 0,5%, 1,0%, 1,5%, 1,7% e 2,0%. Com base no desenvolvimento desses espectros de resposta serão apresentados os valores das repostas dinâmicas das passarelas investigadas considerando diferentes coeficientes de amortecimento.

12.4.1. Espectros de repostas: M-I (RN)

As Figuras 102 a 104 apresentam os espectros de repostas referente à utilização da metodologia de análise I (M-I) segundo as formulações dos coeficientes dinâmicos proposto por Rainer et al. [73] variando-se os coeficientes de amortecimento das passarelas investigadas (ME-I, ME-II e ME-III). O resultado experimental bem como o limite de aceleração de pico na direção transversal vertical estabelecido para passarelas de pedestres interna e externa encontram-se delineados ($a_{lim} = 0,15 \text{ m/s}^2$; $a_{lim} = 0,49 \text{ m/s}^2$ [54]).

Tendo em vista a variação do amortecimento estrutural relacionado às passarelas investigadas, quando a Passarela I (harmônico ressonante: 2º, Figura 102) é analisada é possível observar que o valor de $a_{95\%}$ é superior à aceleração experimental ($a_{exp} = 0,05 \text{ m/s}^2$) quando é considerada a taxa de amortecimento de 0,5% ($\xi = 0,5\%$) com valor na ordem de $0,08 \text{ m/s}^2$, e, iguais para as taxas de amortecimento de 1,5% e 1,7% com valor igual a $0,05 \text{ m/s}^2$. Por outro lado quando é considerada a taxa de amortecimento de 2,0% o valor de $a_{95\%}$ é levemente inferior à aceleração experimental ($a_{exp} = 0,05 \text{ m/s}^2$) com valor igual a $0,04 \text{ m/s}^2$. Contudo, os valores de $a_{95\%}$ são inferiores à aceleração limite padrão de projeto (Passarelas internas: $a_{lim} = 0,15 \text{ m/s}^2$ [54]) para todas as taxas de amortecimento 0,5% a 2,0% ($\xi = 0,5\%$ a 2,0%), conforme ilustrado na Figura 102.

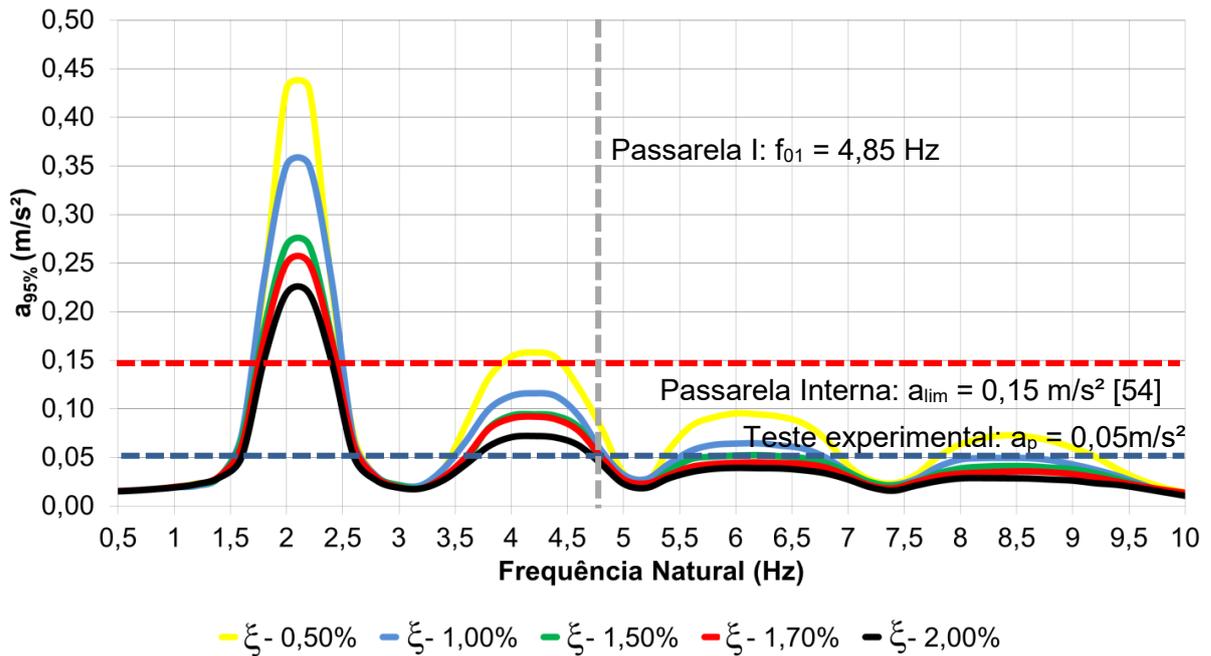


Figura 102 - Espectro de resposta para aceleração de pico M-I (RN): L=24,4 m (ME-I)

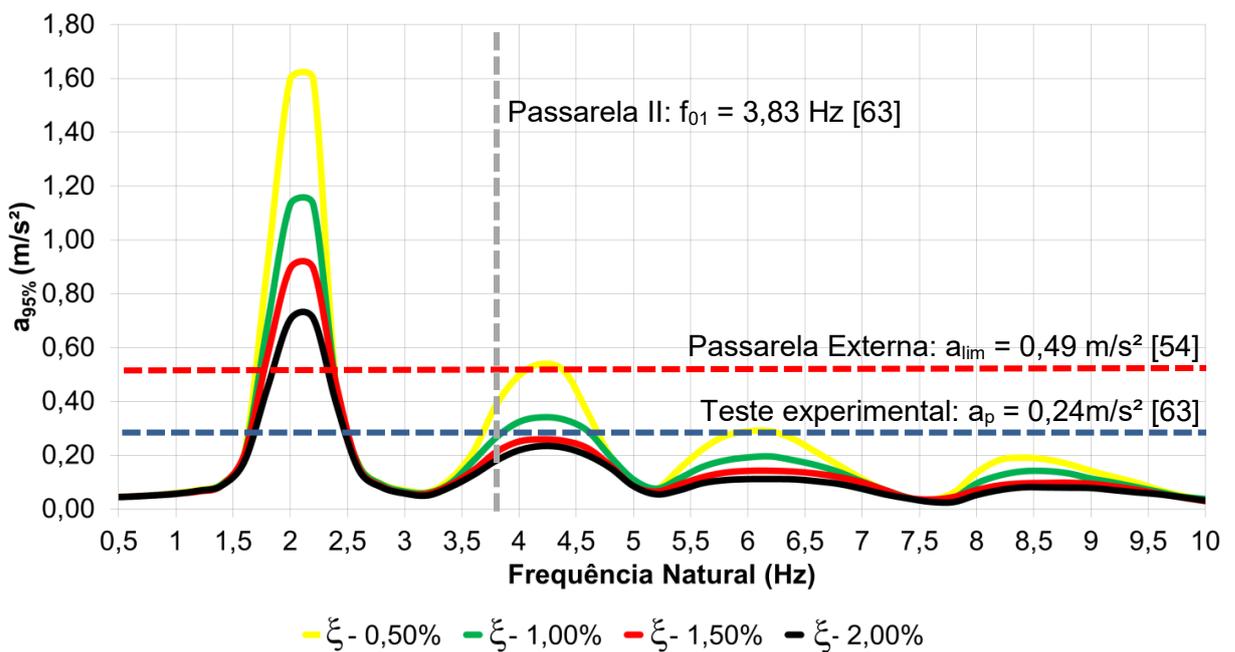


Figura 103 - Espectro de resposta para aceleração de pico M-I (RN): L=53,5 m (ME-II)

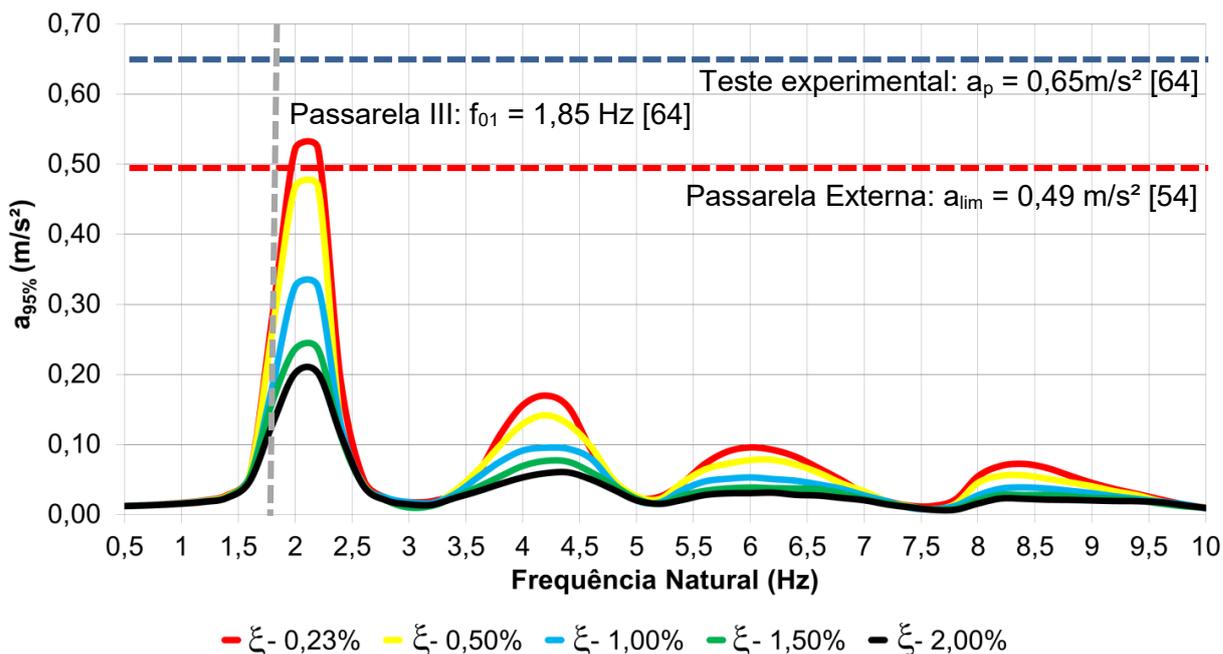


Figura 104 - Espectro de resposta para aceleração de pico M-I (RN): L=68,6 m (ME-III)

Considerando o espectro de resposta de projeto referente a Passarela II [63] (harmônico ressonante: 2º, Figura 103), nota-se que os valores de $a_{95\%}$ são superiores a aceleração experimental ($a_{exp} = 0,24 \text{ m/s}^2$) quando é considerada a taxa de amortecimento 0,5% ($\xi = 0,5\%$) com valor na ordem de $0,38 \text{ m/s}^2$ e imediatamente igual quando a taxa de 1,0% é considerada. Por outro lado, quando considera a taxa de amortecimento de 2,0 ($\xi = 2,0\%$) os valores de $a_{95\%}$ é levemente inferior a experimental ($a_{exp} = 0,24 \text{ m/s}^2$) com valor na ordem de $0,19 \text{ m/s}^2$. Porém, todos os valores são inferiores a aceleração limite de projeto (Passarelas externas: $a_{lim} = 0,49 \text{ m/s}^2$ [54]) para todas as taxas de amortecimento ($\xi = 0,5\%$ a $2,0\%$).

Analisando a Passarela III [64] (harmônico ressonante: 1º, Figura 104), verificou-se que os valores de $a_{95\%}$ são inferiores a aceleração experimental para todas as taxas de amortecimento investigadas ($\xi = 0,5\%$ a $2,0\%$). Ao considerar as taxas de amortecimentos 0,5%, 1,0%, 1,5% e 2,0% os valores da $a_{95\%}$, respectivamente, foram na ordem de $0,26 \text{ m/s}^2$, $0,18 \text{ m/s}^2$, $0,16 \text{ m/s}^2$ e $0,12 \text{ m/s}^2$. Contudo, todos os valores de $a_{95\%}$ são inferiores a aceleração limite padrão de projeto (Passarelas externas: $a_{lim} = 0,49 \text{ m/s}^2$ [54]) para todas as taxas de amortecimento ($\xi = 0,23\%$ a $2,0\%$).

A Tabela 27 apresenta os resultados das acelerações 95% ($a_{95\%}$) em comparação com os valores das acelerações obtidas mediante testes experimentais

considerando o caminhar ressonante de um único pedestre. Já na Tabela 28 são apresentados os resultados das acelerações 95% ($a_{95\%}$) comparados com o valor da aceleração limite de projeto proposto por Murray et al [54].

Tabela 27 - Comparação entre as acelerações 95% e experimentais: M-I (RN)

Passarelas	Frequência natural (Hz)	Aceleração experimental (m/s^2)	Taxa de amortecimento (ξ)	$a_{95\%}$ (m/s^2)	Diferença (%) $a_{95\%}/a_{exp}$
ME-I	4,85	0,05	1,70%	0,05	0,0
ME-II	3,83	0,24	1,50%	0,20	16,6
ME-III	1,85	0,65	0,23%	0,38	41,5

Tabela 28 - Análise do critério de conforto humano: M-I (RN)

Passarelas	Frequência natural (Hz)	Taxa de amortecimento (ξ)	$a_{95\%}$ (m/s^2)	Critério de conforto humano*
ME-I	4,85	0,50%	0,08	Atende
		1,00%	0,05	Atende
		1,50%	0,05	Atende
		1,70%	0,05	Atende
		2,00%	0,04	Atende
ME-II	3,83	0,50%	0,38	Atende
		1,00%	0,24	Atende
		1,50%	0,20	Atende
		2,00%	0,19	Atende
ME-III	1,85	0,23%	0,38	Atende
		0,50%	0,26	Atende
		1,00%	0,18	Atende
		1,50%	0,16	Atende
		2,00%	0,12	Atende

*Passarelas: interna: $a_{lim} = 0,15m/s^2$; externa: $a_{lim} = 0,49m/s^2$ (Murray et al [54])

12.4.2. Espectros de respostas: M-II (RN)

As Figuras 105 a 107 apresentam os espectros de respostas referente à utilização das metodologias de análise II (M-II (RN)) segundo as formulações dos coeficientes dinâmicos proposto por Rainer et al. [73] variando-se os coeficientes de amortecimento das passarelas investigadas (ME-I, ME-II e ME-III). O resultado experimental bem como o limite de aceleração de pico na direção transversal vertical estabelecido para passarelas de pedestres interna e externa encontram-se delineados ($a_{lim} = 0,15 m/s^2$; $a_{lim} = 0,49 m/s^2$ [54]).

Considerando a variação do amortecimento estrutural relacionado às passarelas investigadas, ao analisar a Passarela I (harmônico ressonante: 2º, Figura 105) é possível observar que os valores de $a_{95\%}$ são superiores a aceleração experimental ($a_{exp} = 0,05 \text{ m/s}^2$) para todas as taxas de amortecimento investigada ($\xi = 0,5\%$ a $2,0\%$). Ao considerar as taxas de amortecimentos $0,5\%$, $1,0\%$, $1,5\%$ e $2,0\%$ os valores da $a_{95\%}$, respectivamente, foram na ordem de $0,12 \text{ m/s}^2$, $0,09 \text{ m/s}^2$, $0,07 \text{ m/s}^2$ e $0,06 \text{ m/s}^2$. Por outro lado, verificou-se que todos os valores de $a_{95\%}$ são inferiores à aceleração limite padrão de projeto (Passarelas internas: $a_{lim} = 15\text{m/s}^2$ [54]) para todas as taxas de amortecimento investigadas ($\xi = 0,5\%$ a $2,0\%$), conforme ilustrado na Figura 105.

Analisando-se o espectro de resposta de projeto referente a Passarela II [63] (harmônico ressonante: 2º, Figura 106), é possível verificar que o valor de $a_{95\%}$ é superior a aceleração experimental ($a_{exp} = 0,24 \text{ m/s}^2$) quando é considerada a taxa de amortecimento $0,5\%$ ($\xi = 0,5\%$) resultando valor na ordem de $0,38 \text{ m/s}^2$. Contudo, o valor de $a_{95\%}$ é levemente inferior para a taxa de $1,0\%$ ($\xi = 1,0\%$) com valor na ordem de $0,22 \text{ m/s}^2$. Por outro lado quando a taxa de amortecimento de $2,0\%$ ($\xi = 2,0\%$) é considerada o valor de $a_{95\%}$ é inferior a aceleração experimental ($a_{exp} = 0,24 \text{ m/s}^2$), resultando um valor na ordem de $0,16 \text{ m/s}^2$. Contudo, todos os valores são inferiores a aceleração limite de projeto (Passarelas externas: $a_{lim} = 0,49\text{m/s}^2$ [54]) para todas as taxas de amortecimento ($\xi = 0,5\%$ a $2,0\%$).

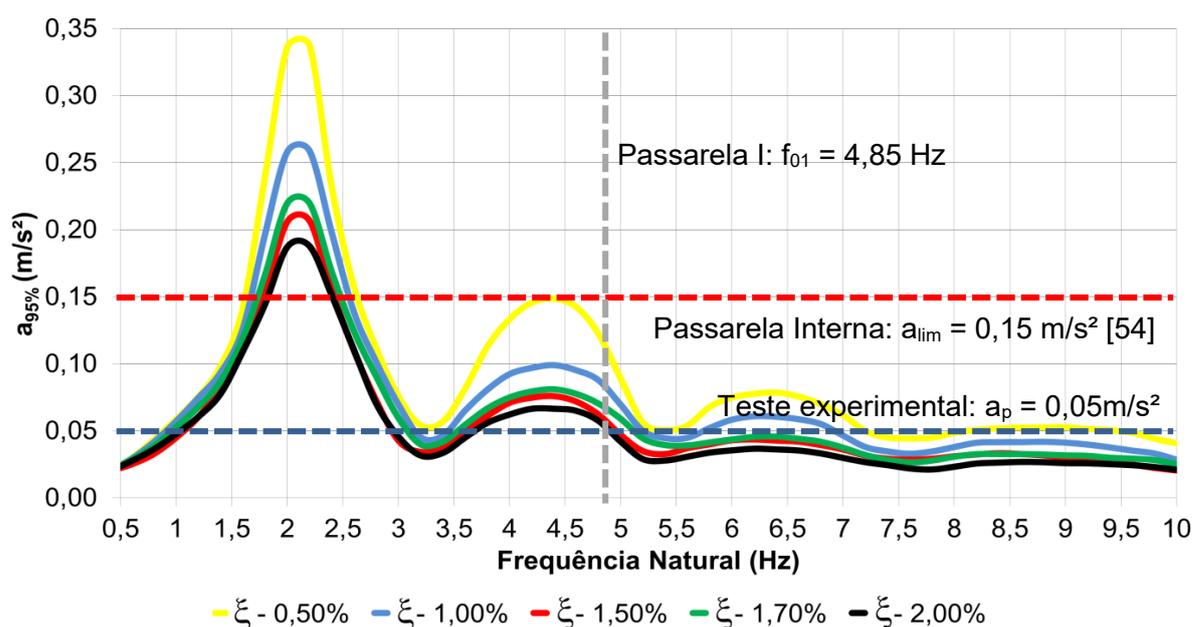


Figura 105 - Espectro de resposta para aceleração de pico M-II (RN): L=24,4 m (ME-I)

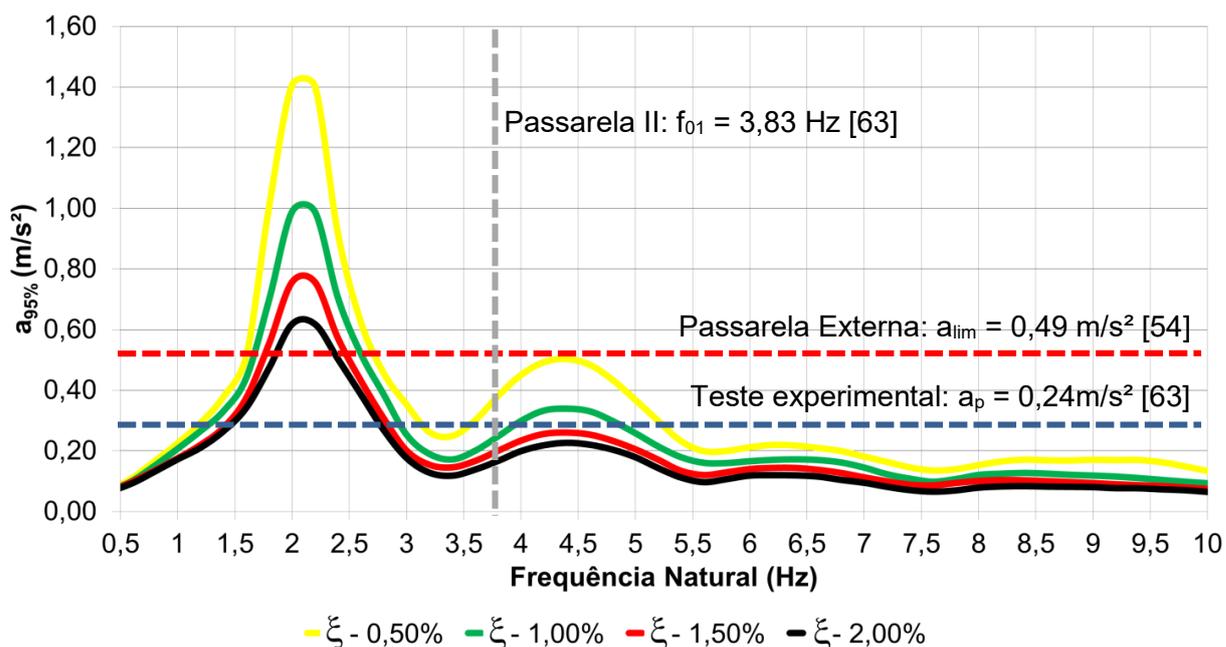


Figura 106 - Espectro de resposta para aceleração de pico M-II (RN): $L=53,5 \text{ m}$ (ME-II)

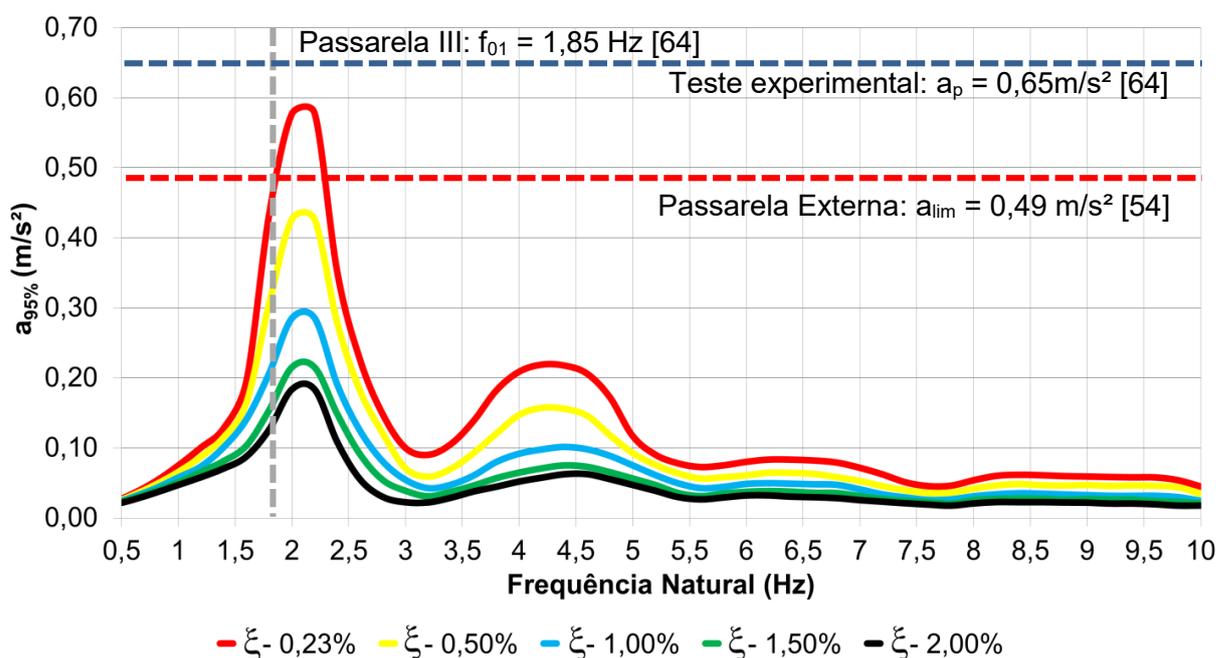


Figura 107 - Espectro de resposta para aceleração de pico M-II (RN): $L=68,6 \text{ m}$ (ME-III)

Ao analisar os resultados referentes à Passarela III [64] (harmônico ressonante: 1º, Figura 107), nota-se que os valores de $a_{95\%}$ são inferiores a aceleração experimental para todas as taxas de amortecimento investigadas ($\xi = 0,5\%$ a $2,0\%$). Ao considerar as taxas de amortecimentos $0,5\%$, $1,0\%$, $1,5\%$ e $2,0\%$ os valores da $a_{95\%}$, respectivamente, foram na ordem de $0,30 \text{ m/s}^2$, $0,20 \text{ m/s}^2$,

0,15 m/s² e 0,13 m/s². Todavia, pode-se verificar que o valor de $a_{95\%}$ é levemente maior que a aceleração limite padrão de projeto (Passarelas externas: $a_{lim} = 0,49\text{m/s}^2$ [54]) para taxa de amortecimento 0,23% e inferiores para as taxas de amortecimento de 0,5% a 2,0% ($\xi = 0,5\%$ a 2,0%).

A Tabela 29 apresenta os resultados das acelerações 95% ($a_{95\%}$) em comparação com os valores das acelerações obtidas mediante testes experimentais considerando o caminhar ressonante de um único pedestre. Já na Tabela 30 são apresentados os resultados das acelerações 95% ($a_{95\%}$) comparados com o valor da aceleração limite de projeto proposto por Murray et al [54].

Tabela 29 - Comparação entre as acelerações 95% e experimentais: M-II (RN)

Passarelas	Frequência natural (Hz)	Aceleração experimental (m/s ²)	Taxa de amortecimento (ξ)	$a_{95\%}$ (m/s ²)	Diferença (%) $a_{95\%}/a_{exp}$
ME-I	4,85	0,05	1,70%	0,06	20,0
ME-II	3,83	0,24	1,50%	0,20	16,6
ME-III	1,85	0,65	0,23%	0,50	23,0

Tabela 30 - Análise do critério de conforto humano: M-II (RN)

Passarelas	Frequência natural (Hz)	Taxa de amortecimento (ξ)	$a_{95\%}$ (m/s ²)	Critério de conforto humano*
ME-I	4,85	0,50%	0,12	Atende
		1,00%	0,09	Atende
		1,50%	0,07	Atende
		1,70%	0,06	Atende
		2,00%	0,06	Atende
ME-II	3,83	0,50%	0,38	Atende
		1,00%	0,22	Atende
		1,50%	0,20	Atende
		2,00%	0,16	Atende
ME-III	1,85	0,23%	0,50	Não atende
		0,50%	0,30	Atende
		1,00%	0,20	Atende
		1,50%	0,15	Atende
		2,00%	0,13	Atende

*Passarelas: interna: $a_{lim} = 0,15\text{m/s}^2$; externa: $a_{lim} = 0,49\text{m/s}^2$ (Murray et al [54])

12.4.3. Espectros de respostas: M-I (YG)

As Figuras 108 a 110 apresentam os espectros de respostas referentes à utilização das metodologias de análise I (M-I (YG)) segundo as formulações dos

coeficientes dinâmicos proposta por Young apud Hauksson [74] variando-se os coeficientes de amortecimento das passarelas investigadas (ME-I, ME-II e ME-III). O resultado experimental bem como o limite de aceleração de pico na direção transversal vertical estabelecido para passarelas de pedestres interna e externa encontram-se delineados ($a_{lim} = 0,15 \text{ m/s}^2$; $a_{lim} = 0,49 \text{ m/s}^2$ [54]).

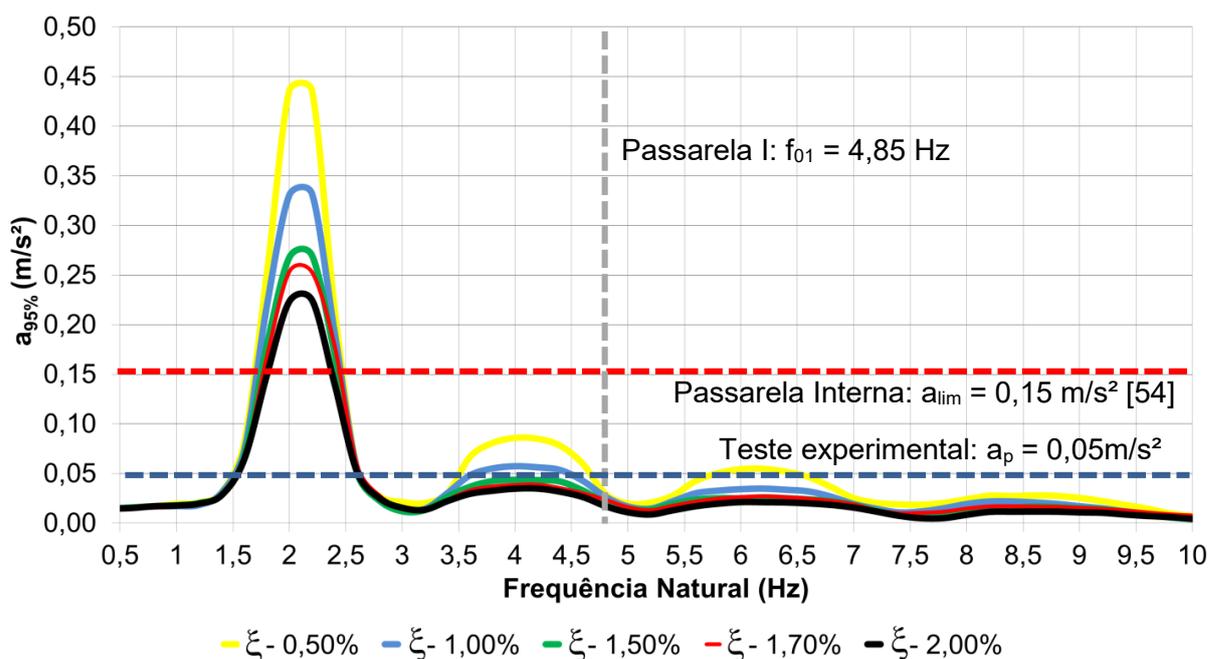


Figura 108 - Espectro de resposta para aceleração de pico M-I (YG): L=24,4 m (ME-I)

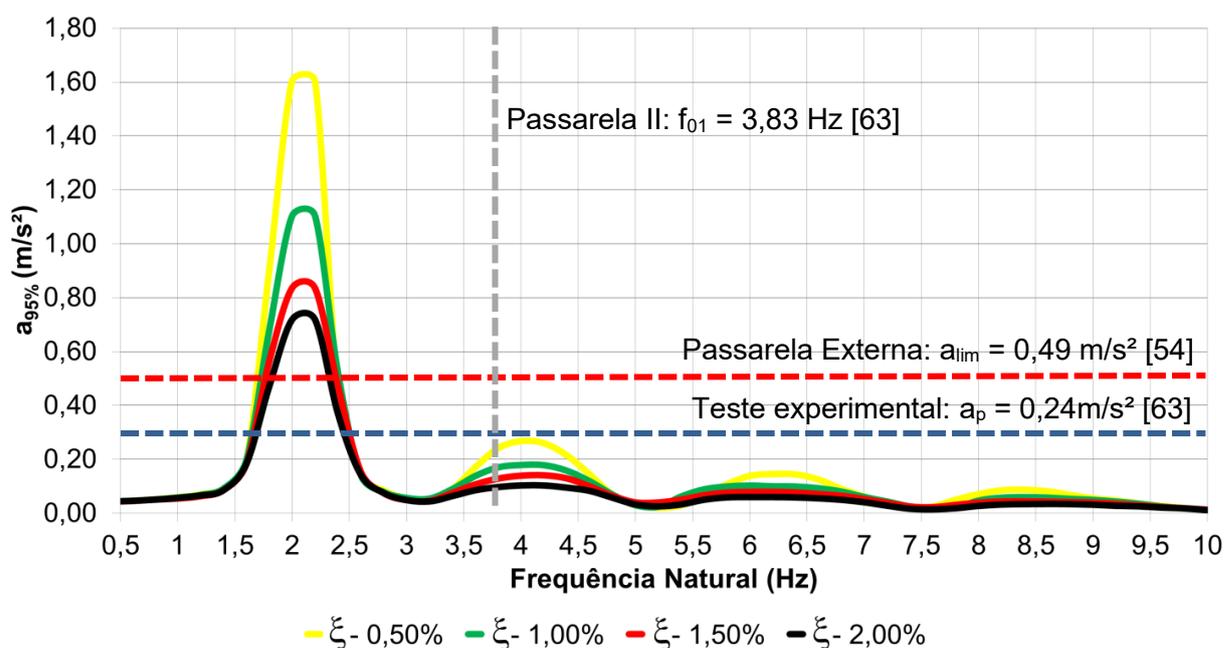


Figura 109 - Espectro de resposta para aceleração de pico M-I (YG): L=53,5 m (ME-II)

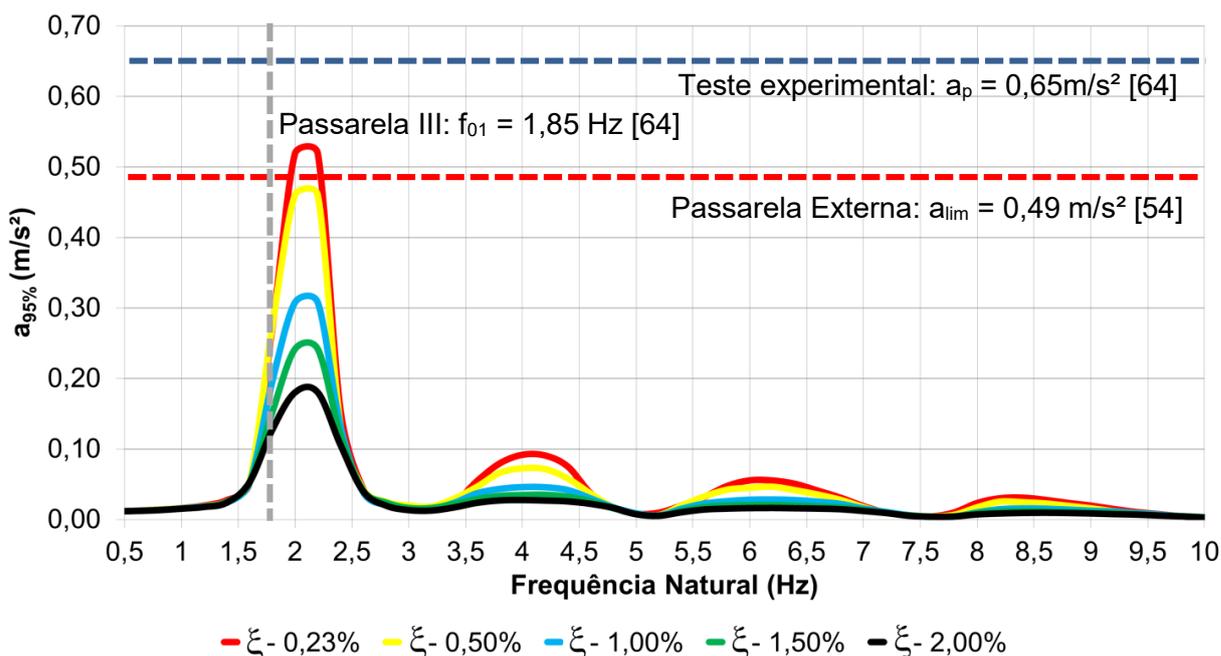


Figura 110 - Espectro de resposta para aceleração de pico M-I (YG): L=68,6 m (ME-III)

Ao analisar as passarelas investigadas considerando a variação do amortecimento estrutural, é possível observar a partir da análise dos resultados da Passarela I (harmônico ressonante: 2º, Figura 108) que os valores de $a_{95\%}$ são inferiores a aceleração experimental ($a_{exp} = 0,05 \text{ m/s}^2$) para as taxas de amortecimento investigadas 0,5% a 2,0% ($\xi = 0,5\%$ a 2,0%). Ao considerar as taxas de amortecimentos 0,5%, 1,0%, 1,5% e 2,0% os valores da $a_{95\%}$, respectivamente, foram na ordem de $0,03 \text{ m/s}^2$, $0,03 \text{ m/s}^2$, $0,02 \text{ m/s}^2$ e $0,02 \text{ m/s}^2$. Todavia, pode-se verificar que os valores de $a_{95\%}$ são inferiores à aceleração limite padrão de projeto (Passarelas internas: $a_{lim} = 0,15 \text{ m/s}^2$ [54]) para todas as taxas de amortecimento investigadas ($\xi = 0,5\%$ a 2,0%), conforme ilustrado na Figura 108.

Com base nos resultados do espectro de resposta de projeto da Passarela II [63] (harmônico ressonante: 2º, Figura 109), é possível observar que os valores de $a_{95\%}$ são inferiores a aceleração experimental ($a_{exp} = 0,24 \text{ m/s}^2$) para todas as taxas de amortecimento de 0,5 a 2,0 % ($\xi = 0,5\%$ a 2,0%). Ao considerar as taxas de amortecimentos 0,5%, 1,0%, 1,5% e 2,0% os valores da $a_{95\%}$, respectivamente, foram na ordem de $0,22 \text{ m/s}^2$, $0,17 \text{ m/s}^2$, $0,13 \text{ m/s}^2$ e $0,10 \text{ m/s}^2$. Contudo, todos os valores são inferiores a aceleração limite de projeto (Passarelas externas: $a_{lim} = 0,49 \text{ m/s}^2$ [54]) para todas as taxas de amortecimento ($\xi = 0,5\%$ a 2,0%).

Ao analisar os resultados referentes à Passarela III [64] (harmônico ressonante: 1º, Figura 110), nota-se que os valores de $a_{95\%}$ são inferiores a aceleração experimental para todas as taxas de amortecimento investigadas ($\xi = 0,5\%$ a $2,0\%$). Ao considerar as taxas de amortecimentos $0,5\%$, $1,0\%$, $1,5\%$ e $2,0\%$ os valores da $a_{95\%}$, respectivamente, foram na ordem de $0,27 \text{ m/s}^2$, $0,19 \text{ m/s}^2$, $0,15 \text{ m/s}^2$ e $0,13 \text{ m/s}^2$. Entretanto, todos os valores são inferiores a aceleração limite de projeto (Passarelas externas: $a_{lim} = 0,49 \text{ m/s}^2$ [54]) para todas as taxas de amortecimento ($\xi = 0,5\%$ a $2,0\%$).

A Tabela 31 apresenta os resultados das acelerações 95% ($a_{95\%}$) em comparação com os valores das acelerações obtidas mediante testes experimentais considerando o caminhar ressonante de um único pedestre. Já na Tabela 32 são apresentados os resultados das acelerações 95% ($a_{95\%}$) comparados com o valor da aceleração limite de projeto proposto por Murray et al [54].

Tabela 31 - Comparação entre as acelerações 95% e experimentais: M-I (YG)

Passarelas	Frequência natural (Hz)	Aceleração experimental (m/s^2)	Taxa de amortecimento (ξ)	$a_{95\%}$ (m/s^2)	Diferença (%) $a_{95\%}/a_{exp}$
ME-I	4,85	0,05	1,70%	0,02	60,0
ME-II	3,83	0,24	1,50%	0,13	45,8
ME-III	1,85 Hz	0,65	0,23%	0,38	41,5

Tabela 32 - Análise do critério de conforto humano: M-I (YG)

Passarelas	Frequência natural	Taxa de amortecimento (ξ)	$a_{95\%}$ (m/s^2)	Critério de conforto humano*
ME-I	4,85 Hz	0,50%	0,03	Atende
		1,00%	0,03	Atende
		1,50%	0,02	Atende
		1,70%	0,02	Atende
		2,00%	0,02	Atende
ME-II	3,83 Hz	0,50%	0,22	Atende
		1,00%	0,17	Atende
		1,50%	0,13	Atende
		2,00%	0,10	Atende
ME-III	1,85 Hz	0,23%	0,38	Atende
		0,50%	0,27	Atende
		1,00%	0,19	Atende
		1,50%	0,15	Atende
		2,00%	0,13	Atende

*Passarelas: interna: $a_{lim} = 0,15 \text{ m/s}^2$; externa: $a_{lim} = 0,49 \text{ m/s}^2$ (Murray et al [54])

12.4.4. Espectros de respostas: M-II (YG)

As Figuras 111 a 113 apresentam os espectros de respostas referentes à utilização das metodologias de análise I (M-I (YG)) segundo as formulações dos coeficientes dinâmicos propostos por Young apud Hauksson [74] variando-se os coeficientes de amortecimento das passarelas investigadas (ME-I, ME-II e ME-III). O resultado experimental bem como o limite de aceleração de pico na direção transversal vertical estabelecido para passarelas de pedestres interna e externa encontram-se delineados ($a_{lim} = 0,15 \text{ m/s}^2$; $a_{lim} = 0,49 \text{ m/s}^2$ [54]).

Ao analisar as passarelas investigadas considerando a variação do amortecimento estrutural, é possível observar a partir da análise dos resultados da Passarela I (harmônico ressonante: 2º, Figura 111) que os valores de $a_{95\%}$ são inferiores a aceleração experimental ($a_{exp} = 0,05 \text{ m/s}^2$) para todas as taxas de amortecimento de 0,5%, 1,0 %, 1,5% e 2,0%, respectivamente, com valores $a_{95\%}$ na ordem de $0,04 \text{ m/s}^2$, $0,03 \text{ m/s}^2$, $0,02 \text{ m/s}^2$ e $0,02 \text{ m/s}^2$. Porém, os valores $a_{95\%}$ são inferiores à aceleração limite padrão de projeto (Passarelas internas: $a_{lim} = 0,15 \text{ m/s}^2$ [54]), conforme ilustrado na Figura 111.

Com base nos resultados do espectro de resposta de projeto da Passarela II [63] (harmônico ressonante: 2º, Figura 112), é possível observar que os valores de $a_{95\%}$ são inferiores a aceleração experimental ($a_{exp} = 0,24 \text{ m/s}^2$) para as taxas de amortecimento de 1,0 a 2,0% ($\xi = 1,0\%$ a $2,0\%$) e imediatamente igual para taxa de amortecimento de 0,5% ($\xi = 0,5\%$). Ao considerar as taxas de amortecimentos 1,0% e 2,0% ($\xi = 1,0\%$ e $2,0\%$) os valores da $a_{95\%}$, respectivamente , foram na ordem de $0,17 \text{ m/s}^2$ e $0,10 \text{ m/s}^2$. Contudo, todos os valores são inferiores a aceleração limite de projeto (Passarelas externas: $a_{lim} = 0,49 \text{ m/s}^2$ [54]) para todas as taxas de amortecimento ($\xi = 0,5\%$ a $2,0\%$).

Ao analisar os resultados referentes à Passarela III [64] (harmônico ressonante: 1º, Figura 113), nota-se que os valores de $a_{95\%}$ são inferiores a aceleração experimental para todas as taxas de amortecimento investigadas ($\xi = 0,5\%$ a $2,0\%$). Ao considerar as taxas de amortecimentos 0,5%, 1,0%, 1,5% e 2,0% os valores da $a_{95\%}$, respectivamente, foram na ordem de $0,35 \text{ m/s}^2$, $0,25 \text{ m/s}^2$, $0,18 \text{ m/s}^2$ e $0,15 \text{ m/s}^2$. Todavia, pode-se verificar que o valor de $a_{95\%}$ é levemente maior que a aceleração limite padrão de projeto (Passarelas externas:

$a_{lim} = 0,49\text{m/s}^2$ [48]) para taxa de amortecimento 0,23% e inferiores para as taxas 0,5% a 2,0% ($\xi = 0,5\%$ a 2,0%).

A Tabela 33 apresenta os resultados das acelerações 95% ($a_{95\%}$) em comparação com os valores das acelerações obtidas mediante testes experimentais considerando o caminhar ressonante de um único pedestre. Já na Tabela 34 são apresentados os resultados das acelerações 95% ($a_{95\%}$) comparados com o valor da aceleração limite de projeto proposto por Murray et al [54].

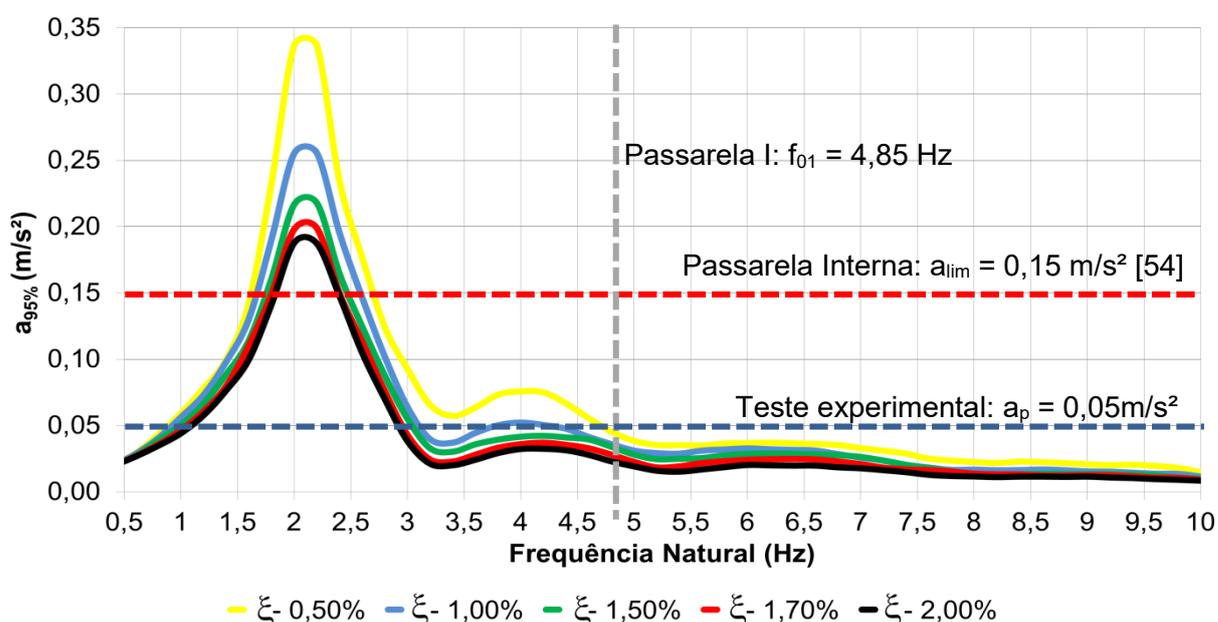


Figura 111 - Espectro de resposta para aceleração de pico M-II (YG): L=24,4 m (ME-I)

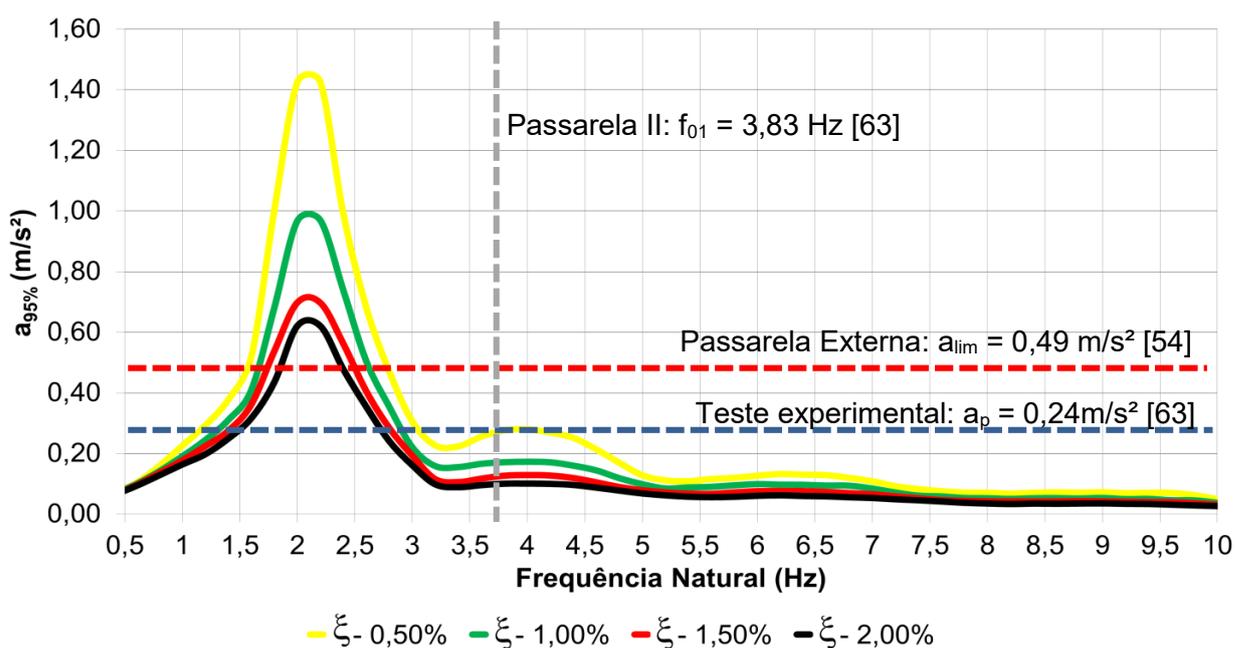


Figura 112 - Espectro de resposta para aceleração de pico M-II (YG): L=53,5 m (ME-II)

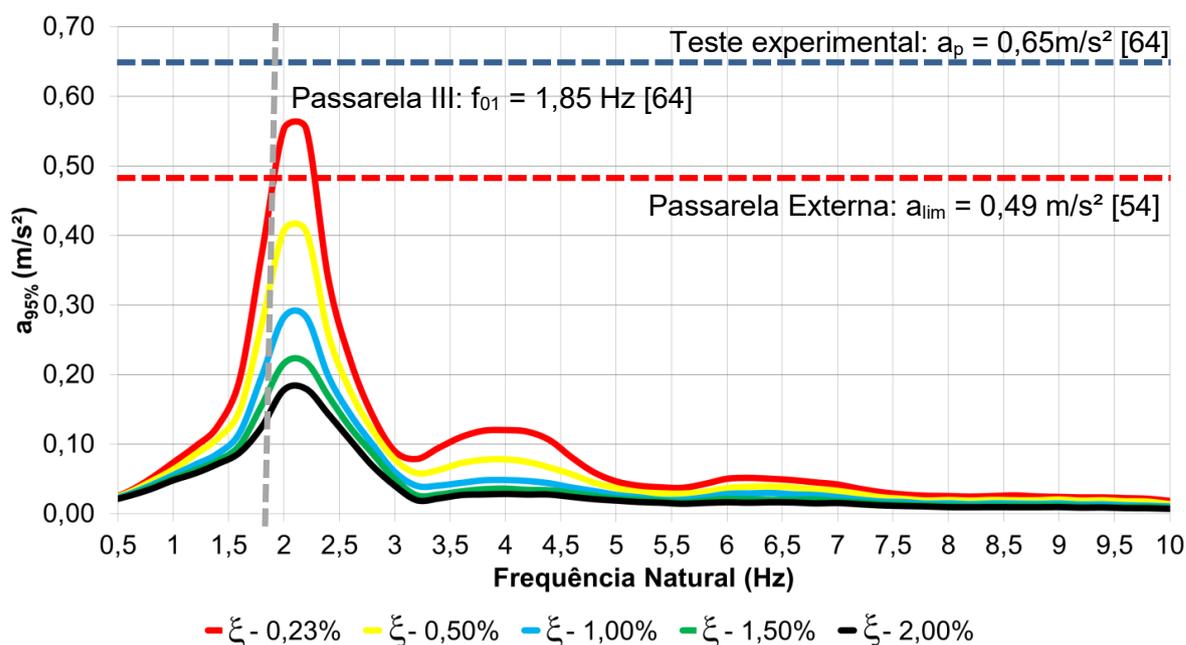


Figura 113 - Espectro de resposta para aceleração de pico M-II (YG): L=68,6 m (ME-III)

Tabela 33 - Comparação entre as acelerações 95% e experimentais: M-II (YG)

Passarelas	Frequência natural (Hz)	Aceleração experimental (m/s ²)	Taxa de amortecimento (ξ)	$a_{95\%}$ (m/s ²)	Diferença (%) $a_{95\%}/a_{exp}$
ME-I	4,85	0,05	1,70%	0,02	60,0
ME-II	3,83	0,24	1,50%	0,13	45,8
ME-III	1,85 Hz	0,65	0,23%	0,50	23,1

Tabela 34 – Análise do critério de conforto humano: M-II (YG)

Passarelas	Frequência natural	Taxa de amortecimento (ξ)	$a_{95\%}$ (m/s ²)	Critério de conforto humano*
ME-I	4,85 Hz	0,50%	0,04	Atende
		1,00%	0,03	Atende
		1,50%	0,03	Atende
		1,70%	0,02	Atende
		2,00%	0,02	Atende
ME-II	3,83 Hz	0,50%	0,24	Atende
		1,00%	0,17	Atende
		1,50%	0,13	Atende
		2,00%	0,10	Atende
ME-III	1,85 Hz	0,23%	0,50	Não atende
		0,50%	0,35	Atende
		1,00%	0,25	Atende
		1,50%	0,18	Atende
		2,00%	0,15	Atende

* Passarelas: interna: $a_{lim} = 0,15\text{m/s}^2$; externa: $a_{lim} = 0,49\text{m/s}^2$ (Murray et al [54])

12.5. Determinação gráfica da resposta dinâmica

Wan et. al [75], desenvolveu um processo de aplicação dos espectros de projeto, que é possível determinar, graficamente, para qualquer passarela com massa modal diferente das passarelas referenciais a aceleração de pico correspondente ao percentil 95% ($a_{95\%}$). A aceleração máxima 95% ($a_{m\acute{a}x, 95\%}$) é obtida conforme os seguintes passos:

Passo 1: Determinar o comprimento do vão e as propriedades modais da passarela investigada, frequência natural e coeficiente de amortecimento.

Passo 2: Buscar o gráfico da passarela referencial mais próximo do comprimento do vão da passarela investigada.

Passo 3: No gráfico da passarela referencial buscar o valor da aceleração para a curva correspondente ao amortecimento estrutural da passarela investigada.

Passo 4: Calcula o fator de correção de massa k .

Passo 5: Multiplicar o valor da aceleração $a_{95\%}$, obtido no passo 3, pelo fator de correção de massa k .

O fator de correção de massa k e a aceleração máxima 95% ($a_{m\acute{a}x,95\%}$) são obtidos, respectivamente, conforme as Equações (49) e (50).

$$a_{m\acute{a}x,p} = k_m a_{espectro,p} \quad (49)$$

$$k_m = \frac{m_t}{m} \quad (50)$$

Onde:

$a_{m\acute{a}x,p}$: aceleração máxima para um dado percentil (m/s^2);

$a_{espectro,p}$: aceleração do espectro de resposta da passarela referencial (m/s^2);

k_m : fator de correção de massa;

m_t : massa modal da passarela referencial (kg);

m : massa modal da passarela investigada (kg);

Por exemplo, para determinar a aceleração máxima $a_{\max,95\%}$ de uma passarela com massa total igual a 40000 kg, com coeficiente de amortecimento igual a 0,5%, frequência fundamental na direção vertical igual a 2,0 Hz e comprimento de vão igual a 24 m, busca-se no gráfico da passarela referencial que mais se aproxima do comprimento real da passarela investigada, o valor correspondente da aceleração $a_{95\%}$ e aplica sobre esse valor o fator de correção de massa k .

O valor da aceleração de pico da passarela investigada foi obtido utilizando o gráfico da Passarela referencial I (ME-I) com 24,4m de comprimento segundo a metodologia II e formulação matemática dos coeficientes dinâmicos proposta por Rainer et al [73].

Sendo o fator de correção de massa k igual a 0,77 (30869,93/40000) e o valor da $a_{95\%}$ da passarela referencial obtido graficamente igual a $0,33\text{m/s}^2$, conforme Figura 114, sendo assim para passarela com massa de 40000 kg o valor da aceleração $a_{95\%}$ é igual a $0,25\text{ m/s}^2$ ($a_{95\%} = 0,33 \times 0,77$)

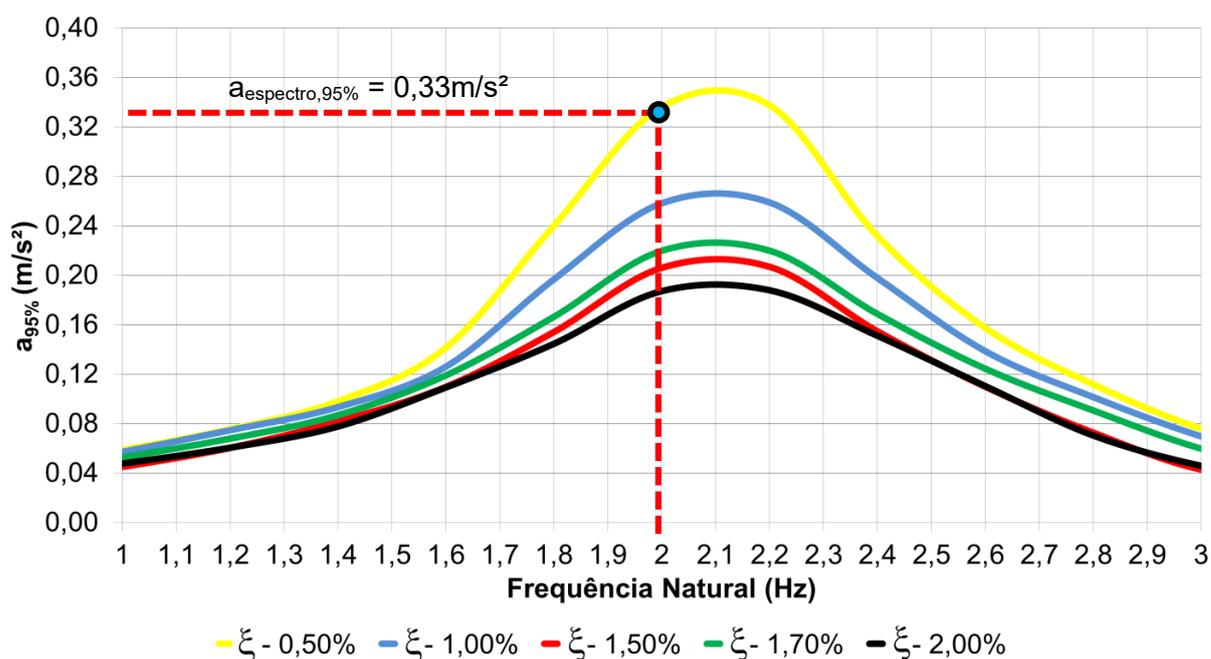


Figura 114 - Resposta da aceleração: 1º harmônico L=24,4 m (MII-RN)

Dentro desse contexto, os espectros de respostas de projeto permite obter a resposta dinâmica para qualquer passarela que possua massa modal e frequência natural diferente das passarelas referenciais, porém com mesmo comprimento.

13. CONSIDERAÇÕES FINAIS

13.1. Introdução

Esse trabalho de pesquisa objetiva-se desenvolver uma metodologia de análise probabilística para avaliar o conforto humano de passarelas de pedestres, submetidas ao caminhar de pessoas, considerando-se para tal a natureza estocástica do caminhar humano, com base no desenvolvimento de espectros de resposta de projeto com essência probabilística. Assim sendo, ao longo do estudo foram considerados os projetos de três passarelas reais, existentes, situadas na cidade do Rio de Janeiro/RJ, de concreto armado, mista (aço-concreto) e aço, com vãos de 24,4 m, 53,5 m e 68,6 m, respectivamente. Ao longo da pesquisa foram desenvolvidos testes experimentais (vibração livre e vibração forçada) referentes à passarela de concreto, com vão de 24,4 m, localizada na Faculdade de Engenharia (FEN) da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ). Em seguida, a resposta dinâmica das passarelas investigadas foi analisada com base na utilização dos espectros de respostas desenvolvidos via método analítico probabilístico. Por fim foi realizado um estudo comparativo entre os valores das acelerações obtidas experimentalmente com aqueles os obtidos via emprego do método analítico probabilístico, tendo em mente a posterior avaliação do conforto humano. Assim sendo, neste capítulo são apresentadas as principais conclusões obtidas com base no desenvolvimento desse estudo de pesquisa.

13.2. Conclusões

Neste item da dissertação são apresentadas as principais conclusões obtidas a partir do desenvolvimento desse estudo de pesquisa, com base na realização de uma investigação experimental e analítica probabilística, considerando-se análises do tipo vibração forçada e espectros de respostas de projeto das passarelas de pedestres investigadas, além da avaliação do conforto humano das estruturas.

13.2.1. Análise modal: modelo numérico versus testes experimentais

Os resultados da análise modal numérica e experimental apresentaram boa convergência considerando-se o valor da primeira frequência natural da passarela investigada (Passarela I: ME-I), igual a 4,85 Hz (modelo numérico), apresentou

diferença percentual de 1,85%, com referência ao valor da frequência determinada experimentalmente, igual a 4,76 Hz. Seguindo este contexto, analisando-se os valores da segunda frequência natural da estrutura, estes foram 15,77 Hz (modelo numérico) e 17,58 Hz (teste experimental), respectivamente, com diferença percentual da ordem de 11,47%. Considerando-se os valores da terceira frequência natural, iguais a 31,84 Hz e 36,23 Hz, respectivamente, modelo numérico e experimental com diferença percentual de 13,88%. Avaliando-se os resultados obtidos pode-se considerar que o modelo em elementos finitos foi simulado de forma satisfatória, tendo em vista que a frequência fundamental da estrutura (teste experimental: $f_{01} = 4,76$ Hz; modo de vibração de flexão) foi bem representada.

13.2.2. Análises de vibração forçada

Com o objetivo de realizar o comparativo entre o caminhar do pedestre com frequência de excitação em ressonância com a estrutura e o modelo probabilístico que considera o fenômeno estocástico do caminhar humano, foram realizados ensaios experimentais sobre a estrutura, considerando grupos de pessoas divididos em 1, 7 e 12 pedestres excitando a estrutura. Desta maneira, para uma, sete e doze pessoas foram adotadas uma frequência de excitação de 2,40 Hz (ressonância). Contudo, ressalta-se que a análise comparativa foi realizada considerando o ensaio experimental do caminhar de um único pedestre.

Assim sendo, tendo em mente, inicialmente a análise quantitativa dos valores de acelerações máximas (acelerações de pico), determinada via testes experimentais, considerando uma pessoa em ressonância ($f_p = 2,40$ Hz), a aceleração máxima de pico obtida foi de $0,05$ m/s². Considerando-se sete pessoas excitando a passarela com uma frequência de excitação em ressonância ($f_p = 2,40$ Hz), a aceleração máxima de pico obtida foi de $0,15$ m/s². Contudo, quando doze pessoas, em situação de ressonância ($f_p = 2,40$ Hz) foram utilizadas nos ensaios experimentais o valor de aceleração máxima de pico foi na ordem de $0,20$ m/s².

13.2.3. Avaliação dos coeficientes dinâmicos

Os coeficientes dinâmicos são variáveis dependentes da frequência do passo do pedestre. Neste estudo de pesquisa foram apresentadas as formulações matemáticas propostas por Rainer et al [73] e Young apud Haucksson [74] para determinação destes coeficientes. Ao longo do desenvolvimento da pesquisa, avaliando-se o primeiro harmônico da excitação dinâmica referente ao caminhar humano foi verificado que a formulação matemática proposta por Young apud Haucksson [74] apresenta magnitude similar aquela fornecida pelo modelo de Rainer et al [73] até a frequência de passo de 2,2 Hz. Destaca-se que o primeiro harmônico da excitação apresenta a mesma magnitude para frequência do passo igual a 2 Hz (caminhar normal: $\alpha = 0,40$) nas duas formulações matemáticas. Avaliando-se o segundo harmônico do caminhar pode-se perceber que a magnitude dos coeficientes dinâmicos é bastante distinta, induzindo diferenças no cálculo das acelerações de pico. Todavia, para o terceiro e quarto harmônico os valores dos coeficientes dinâmicos apresentam magnitudes próximas nas duas formulações matemáticas. Desta forma, pode-se concluir que os valores da aceleração de pico obtidos analiticamente variam em função da formulação matemática adotada para determinação dos coeficientes dinâmicos representativos do caminhar humano.

13.2.4. Solução analítica versus resultado experimental: Passarela I (ME-I)

Neste trabalho de pesquisa foi feita uma análise comparativa entre os resultados da aceleração máxima empregando-se a Equação (31) proposta por Zivanovic (33) com o valor do resultado obtido experimentalmente. Os valores das acelerações máximas determinados via utilização da equação proposta por Zivanovic (33) foram obtidos empregando as formulações matemáticas dos coeficientes dinâmicos propostas por Rainer et al [73] e Young apud Hauksson [74]. Assim sendo, variando-se a frequência de passo do pedestre foi possível observar que o resultado da análise experimental ($a_{exp} = 0,05 \text{ m/s}^2$) para o pedestre em ressonância ($f_p = 2,40 \text{ Hz}$) com a estrutura foi igual ao valor da aceleração de pico máxima ($a_{m\acute{a}x} = 0,05 \text{ m/s}^2$) quando foi considerada a formulação matemática para cálculo do coeficiente dinâmico proposta por Young apud Hauksson [74]. Por outro lado, quando a formulação matemática para cálculo do coeficiente dinâmico

proposta por Rainer et al [73] é considerada, o resultado de aceleração de pico máxima é superior ($a_{\text{máx}} = 0,14 \text{ m/s}^2$) ao valor da aceleração experimental ($a_{\text{exp}} = 0,05 \text{ m/s}^2$).

Desta maneira conclui-se que, especificamente, para o segundo harmônico do caminhar humano, o qual está em ressonância com a estrutura analisada (Passarela I: ME-I), a formulação matemática do coeficiente dinâmico proposta por Rainer et al [73] superestimou a resposta dinâmica. Contudo, quando a formulação matemática do coeficiente dinâmico proposta por Young apud Hauksson [74] foi considerada apresentou resultado mais consistente e próximo ao resultado da aceleração experimental.

13.2.5. Análise probabilística via emprego dos espectros de resposta de projeto

Com base na metodologia de análise desenvolvida, foram construídos espectros de respostas de projeto para obter a resposta dinâmica a partir dos valores referentes ao percentil 95% das acelerações de pico ($a_{95\%}$). Os espectros de resposta foram desenvolvidos variando-se as frequências naturais no intervalo de 0,5 Hz a 10 Hz ($f_n = 0,5 \text{ Hz a } 10 \text{ Hz}$), e os coeficientes de amortecimento estrutural de 0,5% a 2,0% ($\xi = 0,5\% \text{ a } 2,0\%$), além de considerar os coeficientes de amortecimentos experimentais de cada passarela investigada.

Com base no desenvolvimento dos espectros de resposta foram obtidos os valores das acelerações 95% ($a_{95\%}$) das passarelas investigadas I, II e III (ME-I, ME-II [63] e ME-III [64]), os quais foram comparados com os valores das acelerações experimentais bem como com o valor da aceleração limite de projeto proposta por Murray et al. [48] para passarelas de pedestres internas ($a_{\text{lim}} = 0,15 \text{ m/s}^2$) e externas ($a_{\text{lim}} = 0,49 \text{ m/s}^2$).

Assim sendo, tendo em mente os coeficientes de amortecimentos experimentais de cada passarela investigada, a análise quantitativa e qualitativa dos valores das acelerações 95% ($a_{95\%}$), considerando a metodologia I (M-I) segundo a formulação matemática proposta por Rainer et al [73], destaca-se que para a Passarela I (ME-I) a aceleração 95% ($a_{95\%}$) obtida foi de $0,05 \text{ m/s}^2$ para taxa de amortecimento de 1,7% ($\xi = 1,7\%$) sendo portanto inferior a aceleração limite de projeto (Passarelas internas: $a_{\text{lim}} = 0,15 \text{ m/s}^2$ [54]). Por outro lado, para Passarela II (ME-II [63]) a aceleração 95% ($a_{95\%}$) obtida foi de $0,20 \text{ m/s}^2$ para taxa de

amortecimento de 1,5% ($\xi = 1,5\%$), sendo, portanto inferior à aceleração limite de projeto (Passarelas externas: $a_{lim} = 0,49 \text{ m/s}^2$ [54]). Contudo, para Passarela III (ME-III [64]) a aceleração 95% ($a_{95\%}$) obtida foi de $0,38 \text{ m/s}^2$ para taxa de amortecimento de 0,23% ($\xi = 1,23\%$) sendo, portanto inferior a aceleração limite de projeto (Passarelas externas: $a_{lim} = 0,49 \text{ m/s}^2$ [54]). Desta maneira, considerando-se este cenário, as passarelas analisadas atenderam aos limites de conforto humano.

Novamente, considerando-se os coeficientes de amortecimentos experimentais de cada passarela investigada, a análise quantitativa e qualitativa dos valores das acelerações 95% ($a_{95\%}$), levando-se em conta, agora, a metodologia II (M-II) segundo a formulação de Rainer et al [73], para a Passarela I (ME-I) a aceleração 95% ($a_{95\%}$) obtida foi de $0,06 \text{ m/s}^2$ para taxa de amortecimento de 1,7% ($\xi = 1,7\%$) sendo portanto inferior a aceleração limite de projeto (Passarelas interna: $a_{lim} = 0,15 \text{ m/s}^2$ [54]). De outra forma, para Passarela II (ME-II [63]) a aceleração 95% ($a_{95\%}$) obtida foi de $0,20 \text{ m/s}^2$ para taxa de amortecimento de 1,5% ($\xi = 1,5\%$), sendo, portanto inferior à aceleração limite de projeto (Passarelas externas: $a_{lim} = 0,49 \text{ m/s}^2$ [54]). Contudo, para Passarela III (ME-III [64]) a aceleração 95% ($a_{95\%}$) obtida foi de $0,50 \text{ m/s}^2$ para taxa de amortecimento de 0,23% ($\xi = 1,5\%$) sendo, portanto levemente superior à aceleração limite de projeto (Passarelas externas: $a_{lim} = 0,49 \text{ m/s}^2$ [54]). Desta maneira, para essa condição, somente as Passarelas I e II (ME-I e ME-II [63]) atenderam ao conforto humano.

Considerando-se os coeficientes de amortecimentos experimentais de cada passarela investigada, a análise quantitativa e qualitativa dos valores das acelerações 95% ($a_{95\%}$), empregando-se, agora, a metodologia I (M-I) segundo a formulação proposta por Young apud Hauksson [74], para a Passarela I (ME-I) a aceleração 95% ($a_{95\%}$) obtida foi de $0,03 \text{ m/s}^2$ para taxa de amortecimento de 1,7% ($\xi = 1,7\%$) sendo, portanto inferior à aceleração limite de projeto (Passarelas internas: $a_{lim} = 0,15 \text{ m/s}^2$ [54]). Por outro lado para Passarela II (ME-II [63]) a aceleração 95% ($a_{95\%}$) obtida foi de $0,13 \text{ m/s}^2$ para taxa de amortecimento de 1,5% ($\xi = 1,5\%$), sendo, portanto inferior a aceleração limite de projeto (Passarelas externas: $a_{lim} = 0,49 \text{ m/s}^2$ [54]). Contudo, para Passarela III (ME-III [64]) a aceleração 95% ($a_{95\%}$) obtida foi de $0,38 \text{ m/s}^2$ para taxa de amortecimento de 0,23% ($\xi = 0,23\%$) sendo, portanto inferior à aceleração limite de projeto (Passarelas externas:

$a_{lim} = 0,49 \text{ m/s}^2$ [54]). Desta maneira, para essa condição, todas as passarelas atenderam ao conforto humano.

Tendo em mente os coeficientes de amortecimentos experimentais de cada passarela investigada, a análise quantitativa e qualitativa dos valores das acelerações 95% ($a_{95\%}$), considerando-se a análise da metodologia II (M-II) segundo a formulação proposta por Young apud Hauksson [74], para a Passarela I (ME-I) a aceleração 95% ($a_{95\%}$) obtida foi de $0,03 \text{ m/s}^2$ para taxa de amortecimento de 1,7% ($\xi = 1,7\%$) sendo, portanto inferior a aceleração limite de projeto (Passarelas interna: $a_{lim} = 0,15 \text{ m/s}^2$ [54]). Por outro lado para Passarela II (ME-II [63]) a aceleração 95% ($a_{95\%}$) obtida foi de $0,13 \text{ m/s}^2$ para taxa de amortecimento de 1,5% ($\xi = 1,5\%$), sendo portanto inferior a aceleração limite de projeto (Passarelas externas: $a_{lim} = 0,49 \text{ m/s}^2$ [54]). Contudo, para Passarela III (ME-III [64]) a aceleração 95% ($a_{95\%}$) obtida foi de $0,50 \text{ m/s}^2$ para taxa de amortecimento de 0,23% ($\xi = 0,23\%$) sendo, portanto levemente superior à aceleração limite de projeto (Passarelas externas: $a_{lim} = 0,49 \text{ m/s}^2$ [54]). Desta maneira, para essa condição, somente as Passarelas I e II (ME-I e ME-II [63]) atenderam ao conforto humano.

13.3. Sugestão de trabalhos futuros

A seguir são relacionadas sugestões para o desenvolvimento de trabalhos futuros associados a esta linha de pesquisa que engloba o comportamento estrutural dinâmico de passarelas de pedestres considerando-se o fenômeno estocástico do caminhar humano.

- a) Analisar experimentalmente as variáveis do caminhar de pedestres ao longo da travessia das passarelas.
- b) Analisar experimentalmente a resposta dinâmica de passarelas quando submetida ao fluxo de pedestres.
- c) Analisar probabilisticamente a resposta estrutural dinâmica de passarelas quando submetidas ao fluxo de pedestres.
- d) Acrescentar, no método analítico probabilístico desenvolvido as análises da resposta estrutural dinâmica de passarelas de pedestres referentes às direções horizontais e longitudinais.

REFERÊNCIAS

- [1] 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: 23 de abril de 2024.
- [2] NEWLAND, D.E. Vibration of the London Millennium Footbridge: Cause and Cure. In: International Journal of Acoustics and Vibration, 8-1, p. 9-14, 2003.
- [3] THE URBAN EARTH. Passarela Simone de Beauvoir, Disponível em: <https://theurbaneearth.wordpress.com/2008/06/28/passarela-simone-de-beauvoir-simone-de-beauvoir-footbridge/>, Acesso em: 04 de junho de 2024.
- [4] KUMAR, Prakash; KUMAR, Anil. Human induced vibration in structures. Int. J. Mech. Eng. Robot. Res, v. 1, n. 1, p. 44-54, 2014
- [5] NAKAMURA, S. I.; FUJINO, Y. Transversal horizontal vibration on a pedestrian cable stayed bridge. Structural Engineering International, v. 12, n. 4, p. 295-300, 2002.
- [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. doi:10.1016/0141-0296(94)90054-X
- [7] ŽIVANOVIĆ, S., PAVIĆ, A., REYNOLDS, P. Modal Testing and FE Model Tuning of a Lively Footbridge Structure. Engineering Structures, v. 28 (6), p.857-868, 2006. doi:10.1016/j.engstruct.2005.10.012
- [8] ŽIVANOVIĆ, S., PAVIĆ, A., REYNOLDS, P. Probability-based estimation of vibration for pedestrian structures due to walking. PhD Thesis. Department of Civil and Structural Engineering. University of Sheffield. England, UK, 2006.

- [9] ŽIVANOVIĆ, S., PAVIĆ, A., REYNOLDS, P. Probability-based prediction of multi-mode vibration response to walking excitation. *Engineering Structures*, v. 29 (6), p.942-954, 2007.doi:10.1016/j.engstruct.2006.07.004
- [10] PICCARDO, G., TUBINO, F. Simplified Procedures for Vibration Serviceability Analysis of Footbridges Subjected to Realistic Walking Loads. *Computers and Structures*, 87, p.890-903, 2009.doi:10.1016/j.compstruc.2009.04.006
- [11] DOS SANTOS, Clarice Maciel. Avaliação do comportamento dinâmico de uma passarela submetida a carregamentos induzidos por pedestres. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro/RJ, Brasil. p.137, 2011
- [12] ZUO, D., HUA, J., LANDUYT, D.V. A Model of Pedestrian-Induced Bridge Vibration Based on Full-Scale Measurement. *Engineering Structures*, 45, p. 117-126, 2012. doi:10.1016/j.engstruct.2012.06.015.
- [13] DE SOUZA, Jorge Maurício dos Santos. Análise da resposta dinâmica de passarelas de pedestres considerando-se uma modelagem probabilística do caminhar humano. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro/RJ, Brasil. p.176, 2012.
- [14] QUEIRÓZ, M., SANTOS, C. H. S., LIMA, S. S. Análise Dinâmica de uma Passarela. *Engenharia Estudo e Pesquisa. ABPE*, v.13 (2), p.33-37, 2013
- [15] SÉTRA Footbridge – Assessment of Vibrational Behaviour of Footbridge Under Pedestrian Loading, Technical guide. Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes, Paris, 2006
- [16] HIVOSS Human Induced Vibration of Steel Structures, Design of Footbridges Guideline. Reserch Fund for Coal and Steel, 2008.

- [17] MENDES, Joesley Pereira. Análise dinâmica e controle de vibrações de passarelas de pedestres submetidas ao caminhar humano. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro/RJ, Brasil. p.214, 2014.
- [18] DEBONA, Gilvan Lunz. Monitoração experimental e modelagem numérica sobre resposta estrutural dinâmica de passarelas de pedestres. Tese de Doutorado. Universidade Estadual do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro/RJ, Brasil. p.349, 2016.
- [19] DA SILVA, JG Santos; SIEIRA, ACC Fontenla; DEBONA, G. L. Analysis of the dynamic behaviour of steel-concrete composite footbridges considering the soil structure interaction. Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering, p.1-22, 2016
- [20] MARTINS, C. L., PINTO, A. F. J, PORTO, B. T. Análise numérica de vibrações em uma passarela mista de aço e concreto. Revista Eletrônica de Engenharia Civil, v.13 (2), p.131-144, 2017.
- [21] SHAHABPOOR, E., PAVIC, A., RACIC, V., ŽIVANOVIĆ, S. Effect of group walking traffic on dynamic properties of pedestrian structures. Mechanical Systems and Signal Processing, v. 387, p.207-225, 2017.
- [22] TUBINO F. Human-structure interaction in pedestrian bridges: a probabilistic approach. Procedia Engineering , 199, p.2883-2888, 2017.
- [23] VEGA, D., et al. Comportamento dinâmico de passarelas sob cargas induzidas por pedestres andando. Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering, p.1-22, 2016.

- [24] VIERO, Paula Farencena et al. Analysis of the dynamic behavior of a footbridge subjected to human loads. *Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures*, p.552-559, 2017.
- [25] SHAHABPOOR, E., PAVIC, A., RACIC, V. Identification of walking human model using agent-based modelling. *Mechanical Systems and Signal Processing*, v.103, p.352-367, 2018. doi:10.1016/j.ymssp.2017.10.028
- [26] VAN Nimmen, K., et al. Pedestrian-induced vibrations of footbridges an extended spectral approach. *Journal of Bridge Engineering*, v.25 (8), 2020. doi:10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001582
- [27] PICOZZI, V., AVOSSA, A. M., RICCIARDELLI, F. Avaliação probabilística da resposta da passarela para caminhantes solteiros. 92 , 1913–1927, 2022. doi:10.1007/s00419-022-02156-8
- [28] ZIVANOVIC, S., RACIC, V., EL-BAHNASY, I., PAVIC. Statistical characterisation of parameters defining human walking as observed on an indoor passerelle. EVACES '07 – Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures, 24-26 October, Porto, Portugal, 2007.
- [29] BROWNJOHN JMW, PAVIC A, OMENZETTER P. A spectral density approach for modelling continuous vertical forces on pedestrian structures due to walking. *Canadian Journal of Civil Engineering* 2004; 31 (1): 65-77.
- [30] WAN, K., ZIVANOVIC, S., AND PAVIC, A. Design spectra for single person loading scenario on footbridges. IMAC XXVII, Orlando, Florida, USA, 9-12 February, 2009.
- [31] ZIVANOVIC S, PAVIC A AND INGOLSSON E. Modelling spatially unrestricted pedestrian traffic on footbridges. *ASCE Journal of Structural Engineering*, 136 (10), pp 1296-1308. ISSN 0733-9445, 2010.

[32] EUROPEAN COMITTE FOR STANDARDIZATION. EUROCODE 5: Design of timber structures, Part 2, Bridges, London, 2004.

[33] ŽIVANOVIĆ, S., PAVIC, A. & REYNOLDS, P. Probability Based Estimation of Footbridge Vibration due to Walking, 25th International Modal Analysis Conference (IMAC XXV), Orlando, Florida, USA, 19-22 February, 2007.

[34] BRITISH STANDARDS INSTITUTION. BS 5400-2 – Steel, concrete and composite bridge – Part 2: Specification for loads, Annex B normative) Vibration serviceability requirements for foot and cycle track bridges. UK British Standards Association, London, 2006.

[35] ZIVANOVIC, S., Vibration serviceability of a footbridge under vertical pedestrian load. 11th Symposium on Structural Dynamics and Vibration Measurement, Dubendorf, Switzerland, 2008.

[36] ZIVANOVIC, S. and PAVIC, A. Quantification of dynamic excitation potential of pedestrian population crossing footbridges, Shock and Vibration, Vol. 18, No 4, pp. 563-577, doi:10.3233/SAV-2010-0562, 2011.

[37] PEDERSEN, L.; FRIER, C. Predicting Statistical Distributions of Footbridge Vibrations Proceedings of the Twenty Second Nordic Seminar on Computational Mechanics p. 249-252 Aalborg University. Department of Civil Engineering 2009.

[38] BACHMANN, H. Case studies of structures with man-induced vibrations. Journal of Structural Engineering, v. 118, n. 3, p. 631-647, 1992.

[39] PIMENTEL, R.L.; PAVIC, A.; WALDRON, P. Evaluation of design requirements for footbridges excited by vertical forces from walking. Canadian Journal of Civil Engineering, V. 28, n. 5, p. 769-776, 2001.

[40] HAUSSON, F. Dynamic behaviour of footbridges subjected to pedestrian induced vibrations. Master's thesis, Lund University, Sweden.

- [41] MASHALY, EL-SAYED et al. Evaluating the vertical vibration response of footbridges using a response spectrum approach. *Alexandria Engineering Journal*, v. 52, n. 3, p. 419-424, 2013.
- [42] ŽIVANOVIĆ, S. et al. Statistical characterisation of parameters defining human walking as observed on an indoor passerelle. *Experimental vibration analysis for civil engineering structures*, p. 219-225, 2007.
- [43] PICOZZI, V.; AVOSSA, A. M.; RICCIARDELLI, F. Probabilistic assessment of footbridge response to single walkers. *Archive of Applied Mechanics*, v. 92, n. 6, p. 1913-1927, 2022.
- [44] CAPRANI, C.C., KEOGH, J., ARCHBOLD, P., FANNING, P. Enhancement Factors for the Vertical Response of Footbridges Subjected to Stochastic Crowd Loading. *Computers and Structures*, 102-103, p. 87-96, 2012.
- [45] TUBINO, Federica. Probabilistic assessment of the dynamic interaction between multiple pedestrians and vertical vibrations of footbridges. *Vibration*, v. 417, p. 80-96, 2018. *Journal of Sound and*
- [46] REZENDE, Filipe Almeida et al. Vibration-based sensitivity analysis of a flexible steel footbridge using probabilistic walking models. *Engineering Structures*, v. 302, p. 117343, 2024.
- [47] BRUNET JR, OTAVIO et al. Probabilistic vibration performance assessment of a long-span steel footbridge. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, v. 36, n. 1, p. 04021115, 2022.
- [48] YANG N., JIA, Y. T. Human-Induced Response and Reliability Analysis of Stochastic Dynamic System. In: *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2022. p. 012040.

[49] BAYAT, Elyas; TUBINO, Federica. Human-induced vibrations of floors: A probabilistic approach. *Engineering Structures*, v. 300, p. 117198, 2024.

[50] PANCALDI, FABRIZIO ET AL. A statistical approach for modeling individual vertical walking forces. *Applied Sciences*, v. 11, n. 21, p. 10207, 2021.

[51] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto e Execução de Estruturas de Concreto. Rio de Janeiro, 2014.

[52] ONTARIO HIGHWAY BRIDGE DESIGN CODE Code by Ontario. OHBDC: Ministry of transportation and communication. Highway engineering division, 3rd ed., Ontario, Canada, 1991.

[53] BRO 2004. Publikation 2004:56. Vägverkets allmänna tekniska beskrivning för nybyggande och förbättring av broar, Svensk Byggtjänst, Stockholm, Sverige, 2004.

[54] MURRAY, T.M., ALLEN, D.E., UNGAR, E.E. Floor vibrations due to human activity, Steel Design Guide Series, American Institute of Steel Construction, AISC, Chicago, USA, 2003.

[55] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 2631/2: Evaluation of human exposure to whole-body vibration – Part 2: Continuous and shock-induced vibration in buildings (1 to 80 Hz), Switzerland, 1989.

[56] FERREIRA, Paulo Maia. Estatística e Probabilidade; Coordenação Cassandra Ribeiro Joye 208p, 2012.

[57] BARBETTA, P. Estatística aplicada às ciências sociais. 4 ed. Florianópolis: Ed. da UFSC. 2001.

[58] PORTELLA, C. F., NASCIMENTO, I. R., ALVES, A. F., SCHEIDT, G. N. Estatística aplicada às ciências sociais. 4 ed. Florianópolis: Ed. da UFSC 168p, 2001.

[59] 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.

[60] YORIYAZ, Hélio. Fundamentos do Método de Monte Carlo para transporte de radiação. São Paulo: IPEN-CNEN, 2010.

[61] RODRIGUES, Erivelton Meneses; NUNES, Rosângela Venâncio; DE ALMEIDA Adriano, Nayana. A simulação de Monte Carlo como instrumento para a análise econômico-financeira em investimentos de risco-O caso de uma decisão de investimento na abertura de uma filial para revenda de equipamentos pesados no Estado do Ceará. In: Anais do Congresso Brasileiro de Custos-ABC. 2010.

[62] CARVALHO, Admilson Rodrigues de et al. Método Monte Carlo e suas aplicações. 2017.

[63] SILVA, Irwing Aguiar Ribeiro Da. Análise experimental e modelagem numérica para avaliação do efeito da interação pedestre-estrutura sobre o comportamento dinâmico de passarelas. Tese de Doutorado. Universidade Estadual do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro/RJ, Brasil. p.208, 2020.

[64] F.A. Rezende, W.D. Varela, E.M.L. CARVALHO AND A.M.B. PEREIRA, Vibration performance assessment of a long-span steel footbridge. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings, Vol. 175(6), pp. 500-512, (2022).

[65] ANSYS. Swanson Analysis Systems, Inc., P.O. Box 65, Johnson Road, Houston, PA, 15342-0065, Version 10.0, Basic analysis procedures, Second edition, 2009.

[66] DUARTE, I. F. B. Análise de vibrações e avaliação de conforto humano sobre passarelas de pedestres mistas (aço-concreto) com base no emprego de modelos biodinâmicos. 2016. 121f.

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

[68] CHOPRA, A. K. Dynamics of Structures – Theory and Applications to Earthquake Engineering. 3rd ed., Pearson Education, Inc., New Jersey, 2007.

[69] CRAIG JR., R. R. Structural Dynamics. John Wiley & Sons, 527 p, 1981.

[70] WYATT, T. A. Design Guide on the Vibration of Floors. ISBM I 870004 34 5, the Steel Construction Institute, Berkshire, England, 1989.

[71] HAUSDORFF JM, ZEMANY L, PENG C, GOLDBERGER AL. J Appl Physiol. Maturation of gait dynamics: stride-to-stride variability and its temporal organization in children. 1999 Mar;86(3):1040-7.

[72] E.T. INGÓLFSSON, Pedestrian-induced lateral vibrations of footbridges: experimental studies and probabilistic modelling. Technical University of Denmark, (2011).

[73] RAINER, J.H.; PERNICA, G.; ALLEN, D.E. Dynamic loading and response of footbridges. Canadian. Journal of Civil Engineering, 15(1): 66-71, 1988.

[74] HAUKSSON, F. Dynamic behaviour of footbridges subjected to pedestrian induced vibrations. Master's thesis, Lund University, Sweden p.118, 2005

[75] WAN, K., ZIVANOVIC, S., AND PAVIC, A. Design spectra for single person loading scenario on footbridges. IMAC XXVII, Orlando, Florida, USA, 9-12 February, 2009.