



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

Ivis Fernandes Bravo Duarte

**Análise de vibrações e avaliação de conforto humano sobre
passarelas de pedestres mistas (aço-concreto) com base no
emprego de modelos biodinâmicos**

Rio de Janeiro
2016

Ivis Fernandes Bravo Duarte

Análise de vibrações e avaliação de conforto humano sobre passarelas de pedestres mistas (aço-concreto) com base no emprego de modelos biodinâmicos



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

Orientadores: Prof. José Guilherme Santos da Silva, DSc
Prof. Rodrigo Bird Burgos, DSc.

Rio de Janeiro

2016

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

D812 Duarte, Ivis Fernandes Bravo

Análise de vibrações e avaliação de conforto humano sobre passarelas de pedestres mistas (aço-concreto) com base no emprego de modelos biodinâmicos / Ivis Fernandes Bravo Duarte. – 2016.

121f.

Orientadores: José Guilherme dos Santos da Silva, Rodrigo Bird Burgos.

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

1. Engenharia civil. 2. Passarela para pedestres - Dissertações. 3. Conforto humano - Dissertações. 4. Método dos elementos finitos – Dissertações. 5. Vibrações – Dissertações. 6. Estruturas mistas de aço e concreto - Dissertações. I. Silva, José Guilherme Santos da. II. Burgos, Rodrigo Bird. III. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. IV. Título.

CDU 624.016

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

Assinatura

Data

Ivis Fernandes Bravo Duarte

Análise de vibrações e avaliação de conforto humano sobre passarelas de pedestres mistas (aço-concreto) com base no emprego de modelos biodinâmicos

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.

Aprovado em: 29 de Abril de 2016.

Banca Examinadora:

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

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

Prof. Dr. Paulo Batista Gonçalves, DSc.
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC-Rio

Prof. Dr. Francisco José da Cunha Pires Soeiro, PhD.
Faculdade de Engenharia – UERJ

Prof. Dr. André Tenchini da Silva, DSc.
Faculdade de Engenharia - UERJ

Rio de Janeiro

2016

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à comunidade acadêmica, com o desejo de que este possa ser uma referência para trabalhos futuros que tenham relação com o tema, e possa servir como auxílio em estudos mais avançados nesta área de conhecimento.

AGRADECIMENTOS

A DEUS, por ter me dado a oportunidade de ter a experiência que esse trabalho me forneceu, tanto academicamente quanto pessoalmente.

À minha família, por me dar o apoio e o incentivo para estudar e me desenvolver profissionalmente.

Aos colegas de mestrado e companheiros de estudo que estiveram ao meu lado nos momentos difíceis, na colaboração mútua de conhecimento e ajuda psicológica.

Ao meu orientador, Prof. José Guilherme, pelo companheirismo e incentivo à disciplina.

Aos amigos que fiz nestes dois anos, pelo convívio e pelas conversas que me ajudaram a compreender um pouco mais da vida e seus altos e baixos.

Aos professores, pela dedicação e transmissão incondicional do conhecimento.

À UERJ, por ser uma universidade cheia de oportunidades e diversidade, e pelo acolhimento que recebi nesses oito anos que estive presente na instituição, com o desejo de permanecer ainda por mais tempo.

À CAPES pelo suporte financeiro que torna possível a realização do trabalho de tantos estudantes e professores que dependem dessa contribuição para o desenvolvimento de suas pesquisas.

A todos muito obrigado.

Você nunca sabe que resultados virão da sua ação.
Mas se você não fizer nada, não existirão resultados.

Mahatma Gandhi

RESUMO

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. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

No Brasil, até recentemente, não era comum nos escritórios de cálculo a verificação de passarelas de pedestres quanto ao atendimento dos estados limite de utilização associados ao conforto humano, no que diz respeito ao caráter dinâmico do caminhar das pessoas sobre a estrutura. Entretanto, como o objetivo principal das passarelas é o de transporte de pedestres, estes modelos estruturais devem apresentar um comportamento dinâmico apropriado, sem riscos de vibrações excessivas ou mesmo de desconforto humano. Deste modo, este trabalho de pesquisa tem como objetivo o estudo da resposta dinâmica e análise de conforto humano de passarelas mistas (aço-concreto), quando submetidas ao caminhar humano, com base no emprego de modelos biodinâmicos representativos dos pedestres. O modelo estrutural investigado corresponde a uma passarela de pedestres real, construída sobre a Avenida Ayrton Senna, na cidade do Rio de Janeiro/RJ, Brasil, possuindo um vão central com 68,6m de comprimento. Assim sendo, este trabalho de pesquisa tem por objetivo o desenvolvimento de uma metodologia para a análise do comportamento estrutural dinâmico de passarelas de pedestres, com base na modelagem numérica, análise estrutural, consideração do efeito da interação dinâmica pedestre-estrutura e, finalmente, avaliação do conforto humano, com base no emprego de modelos biodinâmicos. Os resultados alcançados ao longo do estudo indicam um alto grau de desconforto humano quando os pedestres utilizam a estrutura em análise.

Palavras-chave: Passarelas de pedestres; Análise dinâmica; Modelos biodinâmicos; Modelagem em elementos finitos; Conforto humano; Vibrações excessivas.

ABSTRACT

DUARTE, I. F. B.. *Vibration analysis and human comfort evaluation on steel-concrete composite pedestrian footbridges based on the use of biodynamic models*. 2016. 121f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

In Brazil, until recently, it was not common in design the pedestrian footbridges serviceability limit states verification when the human comfort is considered, with regard to the dynamic character of the people walking on the structure. However, as the main objective of the footbridges is the crossing of pedestrians, these structural models should present a proper dynamic behaviour, without risks of excessive vibrations or human discomfort. Thus, this research aims to study the dynamic response and proceed human comfort analysis of steel-concrete composite footbridges, when subjected to the human walking, based on the use of biodynamic models in order to simulate the pedestrians. The investigated structural model corresponds to a real pedestrian footbridge, built on Ayrton Senna Av., in the city of Rio de Janeiro/RJ, Brazil, presenting a central span with 68,6 m long. This way, this research work aims to develop a analysis methodology for the investigation of the dynamic structural behaviour of pedestrian footbridges, based on the numerical modelling, structural analysis, consideration of the effect of the pedestrian-structure dynamic interaction and, finally, an evaluation human comfort, based on the use of biodynamic models. The results obtained during the study have indicated a high degree of human discomfort when the pedestrians crossing the analysed structure.

Keywords: Pedestrian footbridges; Dynamic analysis; Biodynamic models; Finite element modelling; Human comfort; Excessive vibrations.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Passarela com elementos pré-moldados [1]	20
Figura 2 - Passarela em estrutura pré-fabricada treliçada em aço estrutural [2].....	20
Figura 3 - Exemplo de carregamento produzido por uma pessoa.....	22
Figura 4 – Desabamento de passarela na Carolina do Norte - EUA [11]	22
Figura 5 – Passarela do Milênio de Londres [13]	23
Figura 6 – Modelo numérico da estrutura [6].....	27
Figura 7 – Fotografia da passarela de Podgorica [8].....	27
Figura 8 - Seção transversal típica de uma passarela mista [21].....	28
Figura 9 - Geometria simplificada de uma passada [23] apud [22]	29
Figura 10 - Passarela de pedestres de Esteio [25].....	30
Figura 11 – Esquema da plataforma e diagrama de equilíbrio [27]	30
Figura 12 – Modelo em elementos finitos [28].....	31
Figura 13 - Movimento do sistema durante um intervalo de tempo Δt , com base na variação linear da aceleração ([34], [35]).	36
Figura 14 – Força dinâmica relativa à caminhada lenta, com $f_p = 1,70$ Hz.....	38
Figura 15 – Força dinâmica relativa à caminhada normal, com $f_p = 2,00$ Hz	39
Figura 16 – Força dinâmica relativa à caminhada rápida, com $f_p = 2,30$ Hz	39
Figura 17 – Aplicação do carregamento na estrutura [21].....	40
Figura 18 - Modelos biodinâmicos representativos dos pedestres [37].....	42
Figura 19 – Força dinâmica relativa ao caminhar lento, com $f_p = 1,70$ Hz	44
Figura 20 – Força dinâmica relativa ao caminhar normal, com $f_p = 2,00$ Hz	44
Figura 21 – Força dinâmica relativa ao caminhar rápido, com para $f_p = 2,30$ Hz	45
Figura 22 – Vista frontal da estrutura	46
Figura 23 – Vista lateral da estrutura	46
Figura 24 - Vista em perspectiva próxima a região dos apoios do vão central	47
Figura 25 – Detalhe lateral da estrutura (Cotas em metros)	47
Figura 26 – Vista inferior da passarela (Cotas em metros)	48
Figura 27 – Detalhe inferior da passarela (Cotas em metros).....	48
Figura 28 – Corte da seção da passarela (cotas em metros).....	48
Figura 29 – Corte da seção da passarela (Cotas em metros).....	49
Figura 30 – Vista inferior dos elementos de laje pré-moldadas.....	49

Figura 31 – Variação longitudinal das espessuras dos perfis.....	50
Figura 32 – Contraventamento do reforço da estrutura.....	51
Figura 33 – Elemento BEAM44 [14].....	52
Figura 34 – Elemento SHELL63 [14].....	53
Figura 35 – Elemento LINK8 [14].....	53
Figura 36 – Elemento COMBIN14 [14].....	54
Figura 37 – Elemento MASS21 [14].....	54
Figura 38 – Vista em perspectiva do modelo	55
Figura 39 – Elemento SHELL63 [14] aplicados à estrutura.....	56
Figura 40 – Elemento BEAM44 [14] aplicados à estrutura.....	56
Figura 41 – Vista lateral do modelo [14].....	56
Figura 42 – Primeiro modo de vibração $f_{01} = 1,94\text{Hz}$	60
Figura 43 – Segundo modo de vibração $f_{02} = 2,27\text{ Hz}$	60
Figura 44 – Terceiro modo de vibração $f_{03} = 3,07\text{ Hz}$	61
Figura 45 – Quarto modo de vibração $f_{04} = 4,67\text{ Hz}$	61
Figura 46 – Quinto modo de vibração $f_{05} = 5,62\text{ Hz}$	62
Figura 47 – Sexto modo de vibração $f_{06} = 6,69\text{ Hz}$	62
Figura 48 – Sétimo modo de vibração $f_{07} = 8,48\text{ Hz}$	63
Figura 49 – Oitavo modo de vibração $f_{08} = 9,24\text{ Hz}$	63
Figura 50 – Nono modo de vibração $f_{09} = 10,61\text{ Hz}$	64
Figura 51 – Décimo modo de vibração $f_{10} = 11,12\text{ Hz}$	64
Figura 52 – Variação de f_{01} (Modo 1) com o acréscimo de pedestres.....	67
Figura 53 – Variação de f_{04} (Modo 4) com o acréscimo de pedestres.....	67
Figura 54 – Variação de f_{07} (Modo 7) com o acréscimo de pedestres.....	68
Figura 55 – Primeiro modo de vibração $f_{01} = 1,73\text{ Hz}$	70
Figura 56 – Segundo modo de vibração $f_{02} = 2,26\text{ Hz}$	70
Figura 57 – Terceiro modo de vibração $f_{03} = 3,10\text{ Hz}$	71
Figura 58 – Quarto modo de vibração $f_{04} = 4,77\text{ Hz}$	71
Figura 59 – Quinto modo de vibração $f_{05} = 5,60\text{ Hz}$	72
Figura 60 – Sexto modo de vibração $f_{06} = 6,78\text{ Hz}$	72
Figura 61 – Sétimo modo de vibração $f_{07} = 8,52\text{ Hz}$	73
Figura 62 – Oitavo modo de vibração $f_{08} = 9,18\text{ Hz}$	73
Figura 63 – Nono modo de vibração $f_{09} = 10,61\text{Hz}$	74
Figura 64 – Décimo modo de vibração $f_{10} = 11,12\text{ Hz}$	74

Figura 65 – Flecha no centro do vão da estrutura.....	77
Figura 66 – Flecha no centro do vão da estrutura.....	77
Figura 67 – Fator de amplificação dinâmica (FAD) em função do parâmetro de frequência, β , para a estrutura sem os modelos biodinâmicos.....	78
Figura 68 – Fator de amplificação dinâmica (FAD) em função do parâmetro de frequência, β , para a estrutura com os modelos biodinâmicos	78
Figura 69 – Uma fileira de pedestres espaçados em L metros	80
Figura 70 - Duas fileiras de pedestres espaçados em L metros.....	81
Figura 71 - Aceleração vertical associada ao caminhar de 46 pedestres espaçados em 1,47m	81
Figura 73 - Aceleração vertical associada ao caminhar de 70 pedestres espaçados em 1,00m	82
Figura 74 - Aceleração vertical associada ao caminhar de 92 pedestres espaçados em 1,47m	83
Figura 75 - Aceleração vertical associada ao caminhar de 112 pedestres espaçados em 1,25m	83
Figura 76 - Aceleração vertical associada ao caminhar de 140 pedestres espaçados em 1,00m	84
Figura 77 - Acelerações de pico em função do número de pedestres	86
Figura 78 - Aceleração vertical associada ao caminhar de 46 pedestres espaçados em 1,47m	87
Figura 79 - Aceleração vertical associada ao caminhar de 56 pedestres espaçados em 1,25 m	88
Figura 80 - Aceleração vertical associada ao caminhar de 70 pedestres espaçados em 1,00 m	88
Figura 81 - Aceleração vertical associada ao caminhar de 92 pedestres espaçados em 1,47 m	89
Figure 82 - Aceleração vertical associada ao caminhar de 112 pedestres espaçados em 1,25 m	89
Figura 83 - Aceleração vertical associada ao caminhar de 140 pedestres espaçados em 1,00m	90
Figura 84 - Acelerações de pico em função do número de pedestres	92
Figura 85 - Aceleração vertical associada ao caminhar de 46 pedestres espaçados em 1,47 m	93

Figura 86 - Aceleração vertical associada ao caminhar de 56 pedestres espaçados em 1,25 m	93
Figura 87 - Aceleração vertical associada ao caminhar de 70 pedestres espaçados em 1,00 m	94
Figura 88 - Aceleração vertical associada ao caminhar de 92 pedestres espaçados em 1,47 m	94
Figura 89 - Aceleração vertical associada ao caminhar de 112 pedestres espaçados em 1,25 m	95
Figura 90 - Aceleração vertical associada ao caminhar de 140 pedestres espaçados em 1,00 m	95
Figura 91 - Acelerações de pico em função do número de pedestres	97
Figura 92 - Gráfico de comparação de aceleração de pico para o caso de modelagem com 46 pedestres	99
Figura 93 - Gráfico de comparação de aceleração de pico para o caso de modelagem com 56 pedestres	99
Figura 94 - Gráfico de comparação de aceleração de pico para o caso de modelagem com 70 pedestres	100
Figura 95 - Variação das acelerações de pico em função do número de pedestres	101
Figura 96 – Pico máximo de aceleração recomendado [15]	115

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros característicos de caminhar humano [18]	37
Tabela 2 – Tempo de aplicação do carregamento nos nós.....	40
Tabela 3 - Coeficientes propostos por Bachmann [18].....	41
Tabela 4 - Características dinâmicas utilizadas para os sistemas biodinâmicos [36]	43
Tabela 5 – Descrição dos perfis estruturais da estrutura principal	50
Tabela 6 – Descrição dos perfis estruturais do reforço	50
Tabela 7 – Espessuras dos perfis componentes da estrutura.....	51
Tabela 8 – Frequências de vibração da estrutura	59
Tabela 9 – Caracterização dos modos de vibração da estrutura	65
Tabela 10 – Posição dos modelos biodinâmicos.....	66
Tabela 11 – Frequências de vibração para as situações de carregamento	66
Tabela 12 – Variação da massa modal (kg) com o acréscimo de pedestres	68
Tabela 13 – Variação do amortecimento modal (N.s/m)	69
Tabela 14 – Variação da rigidez modal (N/m)	69
Tabela 15 – Descrição dos modos de vibração da estrutura	75
Tabela 16 – Recomendações dos guias internacionais de projeto	76
Tabela 17 - Definição do critério de conforto pelo guia de projeto AISC [15].....	85
Tabela 18 - Definição do critério de conforto pelo guia de projeto SÉTRA [16].....	85
Tabela 19 - Definição do critério de conforto pelo guia de projeto HIVOSS [17].....	86
Tabela 20 - Definição do critério de conforto pelo guia de projeto AISC [15].....	91
Tabela 21 - Definição do critério de conforto pelo guia de projeto SÉTRA [16].....	91
Tabela 22 - Definição do critério de conforto pelo guia de projeto HIVOSS [17].....	92
Tabela 23 - Definição do critério de conforto pelo guia de projeto AISC [15].....	96
Tabela 24 - Definição do critério de conforto pelo guia de projeto SÉTRA [16].....	96
Tabela 25 - Definição do critério de conforto pelo guia de projeto HIVOSS [17].....	97
Tabela 26 - Relação entre frequências de vibração da estrutura e frequências de passo adotadas próximas a ressonância.	98
Tabela 27 - Definição do critério de conforto pelo guia de projeto AISC [15].....	100
Tabela 28 - Definição do critério de conforto pelo guia de projeto SÉTRA [16].....	100
Tabela 29 - Definição do critério de conforto pelo guia de projeto HIVOSS [17].....	101

Tabela 30 - Avaliação das acelerações de pico calculadas com base no emprego dos guias internacionais de projeto SETRA [16], HIVOSS [17].....	102
Tabela 31 – Valores habituais de frequência de passo (f_p) [15]	113
Tabela 32 –Valores recomendados para os parâmetros [15].....	114
Tabela 33 – Classificação das passarelas segundo SÉTRA [16].....	116
Tabela 34 – Classificação quanto ao conforto para vibrações verticais [16]	116
Tabela 35 – Classificação quanto ao conforto para vibrações horizontais [16].....	117
Tabela 36 – Risco de ressonância – vibrações verticais e Longitudinais [16].....	117
Tabela 37 – Força dinâmica para as classes II e III [16]	118
Tabela 38 – Força dinâmica para a classe I [16].....	118
Tabela 39 – Classe de conforto segundo o guia HIVOSS [17].....	119
Tabela 40 – Classe de tráfego pela metodologia HIVOSS I [17].....	119
Tabela 41 – Amortecimento recomendado pela guia HIVOSS I [17].....	120
Tabela 42 – Parâmetros recomendados pelo guia HIVOSS I [17]	121

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADS	Sistemas de atenuadores dinâmicos sintonizados
AISC	American Institute of Steel Construction
CEB	Comité Euro-International du Béton
CS	Coluna soldada
CVS	Coluna viga soldada
EUA	Estados Unidos da América
FAD	Fator de amplificação dinâmica
HIVOSS	Human Induced Vibration of Steel Structures
LABEME	Laboratório de ensaios de materiais e estruturas
NBR	Norma Brasileira
S1GL	Sistema com um grau de liberdade
SNGL	Sistema com “N” graus de liberdade
SÉTRA	Service d’Etudes Techniques dès Routes et Autoroutes
UERJ	Universidade do Estado do Rio de Janeiro
UFPB	Universidade Federal da Paraíba
VS	Viga soldada

LISTA DE SÍMBOLOS

a_p	-	Aceleração de pico da estrutura (m/s ²)
a_p/g	-	Taxa de aceleração de pico
α_i	-	Coefficiente dinâmico
α	-	Ângulo de fase
β	-	Parâmetro de frequência
[C]	-	Matriz de amortecimento
c_p	-	Amortecimento do pedestre (N.s/m)
c_i	-	Amortecimento modal
Δt	-	Variação de tempo incremental
ξ	-	Taxa de amortecimento estrutural
ξ_i	-	Taxa de amortecimento modal
f_{01}	-	Frequência fundamental da estrutura (Hz)
f_p	-	Frequência de passo do pedestre (Hz)
g	-	Aceleração da gravidade (m/s ²)
ϕ_i	-	Ângulo de fase i harmônico (rad);
i	-	Número do harmônico
[K]	-	Matriz de rigidez
k_p	-	Rigidez do pedestre (N/m)
kg	-	Kilograma (Unidade de massa do sistema internacional de medidas)
L_p	-	Comprimento de passo do pedestre (m)
[M]	-	Matriz de massa
m_p	-	Massa do pedestre (kg)
n	-	Número total de harmônicos considerados
N	-	Newton (Unidade de peso do sistema internacional de medidas)
P	-	Peso de um indivíduo (N)
ψ	-	Fator redutor da resposta dinâmica
s	-	Segundos (unidade de tempo do sistema internacional de medidas)
σ_y	-	Tensão limite de escoamento do aço

t	- Tempo (s)
u	- Deslocamento vertical máximo (m)
v_e	- Deslocamento vertical estático (m)
v_p	- Velocidade de passo do pedestre (m/s)
ω	- Frequência angular da estrutura (rad/s)
ω_i	- Frequência angular relacionada ao modo i (rad/s)
ω_0	- Primeira frequência angular da estrutura (rad/s)
W	- Peso efetivo da estrutura

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	19
Motivação	23
Objetivos	24
Escopo do trabalho	24
1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	26
2. MÉTODOS GERAIS DE SOLUÇÃO	33
2.1. Introdução	33
2.2. Análise de Autovalores e Autovetores (Vibração Livre)	33
2.3. Análise de Vibração Forçada	35
3. MODELOS DE CARREGAMENTO	37
3.1. Introdução	37
3.2. Modelo de Bachmann e Ammann [18]	37
3.3. Modelos Biodinâmicos (Interação dinâmica pedestre-estrutura)	41
4. MODELO ESTRUTURAL	46
5. MODELO NUMÉRICO COMPUTACIONAL	52
5.1. Introdução	52
5.2. Descrição dos elementos finitos utilizados	52
5.3. Modelo em elementos finitos	55
6. ANÁLISES ESTÁTICA, MODAL E HARMÔNICA	58
6.1. Introdução	58
6.2. Análise modal	58
6.2.1. Passarela sem os modelos biodinâmicos	59
6.2.2. Passarela com a atuação dos modelos biodinâmicos	65
6.3. Análise Harmônica	76
7. ANÁLISES DE VIBRAÇÃO FORÇADA	79
7.1. Introdução	79
7.2. Caminhada lenta, normal e rápida	79
7.3. Situações de carregamento	80
7.4. Caminhada lenta	81
7.5. Caminhada normal	87
7.6. Caminhada rápida	93
7.7. Comparação das acelerações de pico na ressonância	98

7.8. Emprego dos guias de projeto para avaliação das acelerações de pico	102
8. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	103
8.1. Introdução.....	103
8.2. Conclusões.....	103
8.3. Sugestões para trabalho futuros.....	106
REFERÊNCIAS.....	107
ANEXO A– NORMAS E GUIAS DE PROJETO	112

INTRODUÇÃO

Com o crescente desenvolvimento das grandes cidades e o conseqüente aumento da população, têm surgido a demanda por estruturas cada vez mais esbeltas e econômicas, com menores prazos de execução, que atendam às necessidades do tráfego de veículos e sejam sustentáveis financeiramente e ambientalmente.

A ausência de uma passarela em uma região populosa e movimentada ou a recusa em seu uso por parte dos pedestres por motivo de desconforto, faz com que estes arrisquem suas vidas em uma travessia perigosa por estradas com grande movimento de veículos, o que costuma causar graves acidentes e um alto índice de mortalidade nas estradas.

O constante avanço tecnológico na área computacional e de materiais também vem propiciando o desenvolvimento de projetos com formas mais ousadas, com grandes vãos e curvas, e peças de menor tamanho ou espessura.

Em estruturas de passarelas, é extremamente importante que se faça uma investigação dinâmica que leve em consideração a interação do pedestre com a estrutura, de modo que se possa obter um resultado confiável da resposta da estrutura quando submetida à grandes carregamentos de pedestres. Essa análise é justificada principalmente em estruturas com grandes vãos ou formas críticas, que possam vir a sofrer danos no decorrer do seu uso, incorrendo assim em prejuízos para a vida humana e para os cofres públicos.

Os elementos estruturais tanto metálicos quanto pré-moldados possuem a vantagem do controle tecnológico mais preciso disponível das fábricas e canteiros de fabricação de peças, compondo, desta maneira, estruturas mais seguras e de acordo com o projeto de engenharia.

No Brasil, nas principais vias urbanas costumam ser empregadas estruturas de passarelas do tipo pré-moldadas de concreto, sistemas mistos de aço e concreto armado, concreto protendido e estruturas treliçadas de aço estrutural, conforme Figuras 1 e 2. Em estruturas com grandes vãos livres, acaba sendo mais viável o sistema estrutural em concreto protendido ou em treliças de aço, tendo estes sistemas como grande vantagem o baixo tempo de execução da obra, pois grande parte da estrutura é transportada já montada para o canteiro de obras.



Figura 1 - Passarela com elementos pré-moldados [1]



Figura 2 - Passarela em estrutura pré-fabricada treliçada em aço estrutural [2]

Até recentemente, não era prática comum nos escritórios de projetos a verificação do conforto humano das estruturas de passarelas de pedestres, fato esse que teve como consequência a implantação de diversas estruturas com alto índice de desconforto, ao longo de avenidas importantes e movimentadas. Entretanto, existe uma preocupação de alguns órgãos públicos quanto ao conforto humano na utilização de passarelas, como por exemplo, pode-se citar o departamento de

estradas e rodagens da secretaria de transportes de São Paulo, que elaborou uma instrução de projeto [3] na qual exige no memorial de cálculo do projeto de uma passarela, a verificação no estado limite de serviço, de acordo com os preceitos da NBR 6118 [4] quanto às condições de vibração excessiva.

Outra referência pode ser obtida no manual de construção de passarelas, elaborado pelo I.T. Transport Ltd. no Reino Unido [5], no qual os autores citam a importância da análise considerando um carregamento dinâmico. Apesar de servir como material de apoio principalmente para passarelas de madeira, o guia traz importantes diretrizes para outras metodologias construtivas, como passarelas em aço, concreto armado e sistema estaiado, para a escolha do tipo de passarela e características a serem observadas durante a implantação da estrutura, definição de sua geometria, e dimensionamento de seus elementos constituintes.

É comum se encontrar metodologias de análise dinâmica que considerem a influência de apenas um pedestre, como proposto pelo estudo de Blanco [6] em 2005, que estudou o comportamento dinâmico de uma passarela utilizando o modelo de carregamento estático proposto por Petersen [7], para um pedestre em passarelas apoiadas sobre rolamentos e com comportamento de uma viga simples. Entretanto, para passarelas com grandes vãos, segundo Zivanovic [8] é pressuposto que a estrutura será carregada por um número maior de pessoas, de modo que essas metodologias não sejam as mais apropriadas para esse tipo de estrutura, por não representar o efeito dos pequenos grupos e das multidões.

O caminhar humano sobre estruturas de passarelas, produz além do carregamento proveniente do peso do próprio pedestre, esforços dinâmicos de grande impacto sobre a estrutura, que podem causar vibrações e um alto grau de desconforto no uso da estrutura, assim como induzir sua deterioração ao longo da vida útil.

Segundo Stoyanoff e Hunter [9] para passarelas com vãos curtos, menores que 30 m, a frequência natural da estrutura costuma ser suficientemente alta, de tal forma que o nível de vibração não é perceptível para o usuário da estrutura. Entretanto, com o aumento do comprimento da estrutura, vãos maiores que 200m, a frequência natural da estrutura é baixa o suficiente para gerar preocupações quanto ao nível de conforto humano.

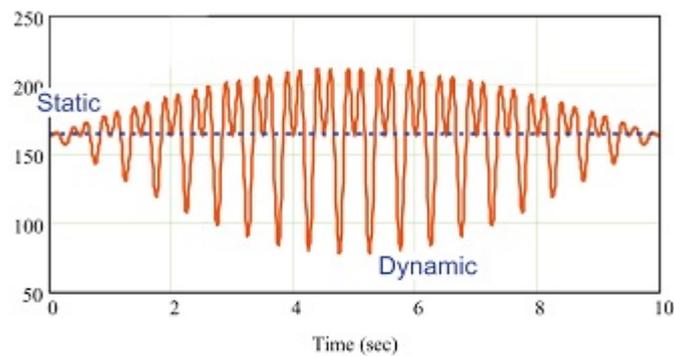


Figura 3 - Exemplo de carregamento produzido por uma pessoa caminhando sobre uma passarela [10]

Existe um vasto histórico de casos de passarelas que apresentaram um histórico de vibrações excessivas, alguns casos gerando colapsos estruturais e outros gerando prejuízos, em alguns casos, fatais.

Uma das ocorrências mais comentadas nos estudos nacionais e internacionais se refere a uma Passarela na cidade de Concord no estado da Carolina do Norte/EUA durante a saída de uma multidão em um evento esportivo deixando mais de 100 pessoas feridas. Uma parte da passarela entrou em ruína quando uma multidão de 70 pessoas passava ao mesmo tempo sobre a estrutura, conforme Figura 4 [11]. Segundo outra fonte [12], a passarela tinha 97,5m de comprimento, e o vão que entrou em colapso tinha cerca de 24 m.



a) Momento do desabamento



b) Prestação de socorros

Figura 4 – Desabamento de passarela na Carolina do Norte - EUA [11]

Outro caso importante foi o problema ocorrido com a passarela Millennium Footbridge, conforme Figura 5, estudada por Newland [13], uma passarela pênsil suportada por cabos de aço que faz a passagem sobre o rio Tâmesa, em Londres. Com 300 m de comprimento total e 144m de vão central, a estrutura foi inaugurada na data de 10 de Junho do ano 2000, imediatamente pôde-se perceber que a estrutura apresentava oscilações laterais com altas amplitudes, o que levou os pedestres a pararem de andar e segurarem o corrimão da estrutura. As amplitudes foram da ordem de 75 mm com frequências na faixa de 0,8 a 1,0 Hz, obrigando as autoridades a fecharem a passarela três dias após sua inauguração para que fossem adotadas as devidas medidas de correção, conforme citado por Newland [13].



Figura 5 – Passarela do Milênio de Londres [13]

Motivação

Tendo em mente que as demandas atuais do mercado impõem projetos arquitetônicos modernos e arrojados, compostos por modelos estruturais com grandes vãos, mais leves e econômicos, claramente, os engenheiros civis que militam mais especificamente na área de projeto de estruturas, em especial com ênfase em passarelas de pedestres, passaram a sentir uma grande necessidade, no sentido de serem realizadas investigações mais consistentes e qualificadas, no que

diz respeito à avaliação do conforto humano dos pedestres, objetivando evitar problemas estruturais associados à ocorrência de vibrações excessivas em passarelas de pedestres; e, bem como, reduzir ou mesmo eliminar a hipótese de desconforto humano.

Objetivos

Considerando-se a principal motivação para o desenvolvimento deste trabalho de pesquisa, descrita no item anterior, pretende-se desenvolver ao longo desta investigação uma metodologia para a análise do comportamento estrutural dinâmico de passarelas de pedestres, com base na modelagem numérica, análise estrutural, consideração do efeito da interação dinâmica pedestre-estrutura e, finalmente, avaliação do conforto humano. Para tal serão considerados modelos biodinâmicos para a simulação numérica do caminhar dos pedestres sobre a passarela mista (aço-concreto) analisada no âmbito desta dissertação, correspondente a um sistema estrutural real, construído sobre a Avenida Ayrton Senna, na cidade do Rio de Janeiro/RJ, Brasil, possuindo um vão central com 68,6 m de comprimento. Cabe ressaltar, que os modelos biodinâmicos incluem na análise as características dinâmicas dos pedestres referentes à massa, rigidez e amortecimento (interação dinâmica pedestre-estrutura), e contribuem para uma avaliação mais realista e qualificada, em termos qualitativos e quantitativos, no que tange ao conforto humano e dos níveis de vibrações excessivas sobre o modelo estrutural. Assim sendo, as análises de conforto humano serão realizadas a partir dos valores das acelerações máximas (acelerações de pico) encontradas ao longo do estudo e estes valores serão comparados com guias e normas internacionais de projeto.

Escopo do trabalho

Visando atingir os objetivos propostos de forma clara e organizada, este trabalho divide-se em seis capítulos, uma introdução e um apêndice ao final deste volume.

No Primeiro capítulo, busca-se fazer uma abordagem prévia quanto ao assunto estudado nessa dissertação. Inicialmente, exemplificando tipos estruturais de passarelas mais utilizados no Brasil e em seguida, mostrando casos diversos

onde se fizeram necessários estudos mais aprofundados em relação aos carregamentos dinâmicos de multidão e quanto ao conforto humano.

No segundo capítulo são descritos os aspectos teóricos básicos associados às análises desenvolvidas neste estudo: análise de autovalores (frequências naturais) e autovetores (modos de vibração), análise harmônica e análise de vibração forçada.

No terceiro capítulo mostra-se a metodologia utilizada para aplicação dos modelos do carregamento com a consideração do efeito biodinâmico e sem essa consideração, na estrutura e o embasamento teórico da metodologia.

No quarto capítulo, é descrito o modelo estrutural da passarela utilizada nesse estudo, de forma bem caracterizada, com as propriedades geométricas e físicas adotadas na formulação da modelagem computacional analisada neste trabalho.

No quinto capítulo, é detalhado o modelo numérico computacional da estrutura utilizada em elementos finitos com base no software ANSYS [14].

No sexto capítulo, são feitas as análises estática, modais e harmônicas do modelo estrutural, para comparação posterior entre os resultados obtidos e também com da análise de vibração forçada estudada no quinto capítulo. A análise modal, ou de autovalores e autovetores, visa determinar a frequências de vibração da estrutura e os seus respectivos modos de vibração. A análise harmônica tem como objetivo principal a verificação do fator de amplificação dinâmica na ocorrência do fenômeno da ressonância.

No sétimo capítulo, serão feitas as análises dinâmicas de vibração forçada que simulam o comportamento do caminhar do pedestre, considerando o efeito biodinâmico do carregamento e também sem considerar esse efeito.

No oitavo capítulo são feitas as conclusões relativas às análises realizadas, assim como são dadas sugestões para a realização de trabalhos futuros, seguindo a linha de pesquisa apresentada nesta dissertação.

Ao final deste trabalho, encontra-se um apêndice onde se faz uma breve revisão sobre os principais guias de projeto utilizados nesse estudo, AISC [15], SÉTRA [16], e HIVOSS [17], para avaliação da classificação de estruturas quanto ao conforto humano.

1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

São muitos os autores que tem se dedicado à pesquisa sobre o tema de análise do conforto humano em passarelas, fato devido à importância do tema entre a comunidade de estruturas e construção. No presente capítulo serão apresentados alguns dos principais trabalhos relacionados com o tema de análise dinâmica de estruturas de passarelas, submetidas ao caminhar humano.

Bachmann [18] em 1987 publicou o livro “Vibration problem in structures: Practical guidelines” utilizado até hoje como referência por muitos pesquisadores no estudo da dinâmica das estruturas. A obra, que foi elaborada por um grupo de trabalho do “Comité Euro-International du Béton (CEB)”, foi concebida como guia para engenheiros civis que não são especialistas em dinâmica das estruturas mas que entretanto atuam no mercado de construção civil e necessitam de um guia prático para tratamento de problemas com vibrações excessivas. As ações consideradas pelo autor são as originadas pela movimentação humana, funcionamento de máquinas, atuação do vento e do tráfego de veículos.

Pimentel et al. [19], em 2001, avaliaram o desempenho das normas utilizadas na prática de manutenção das vibrações em passarelas submetidas às cargas induzidas pelo homem devido ao caminhar. Os pesquisadores observaram pontos onde podem ser implementadas algumas melhorias, sendo suas observações sustentadas por evidências experimentais obtidas a partir de testes realizados em estruturas reais de passarelas que apresentavam vibrações excessivas. Os autores verificaram que os códigos são conservativos, dependendo da faixa de frequência excitada pela movimentação de pedestres.

Murray et al. [15], em 2003, elaboraram para o American Institute of Steel Construction (AISC) um guia de projeto “Floor Vibrations due to Human Activity, Steel Design Guide Series”, que trouxe uma importante contribuição acadêmica e prática para os pesquisadores e projetistas estruturais da área de dinâmica das estruturas. O guia propõe uma metodologia prática para obtenção da frequência natural de estruturas de passarelas e pisos mistos (Aço-concreto) e avaliação do nível de vibrações por meio do cálculo da aceleração de pico vertical.

Blanco et al [6] em 2005 publicou um artigo relacionado a um estudo sobre o comportamento dinâmico da passarela sobre o Rio Ijzer, na cidade Kortrijk, Bélgica. A passarela, cujo vão possui 202m de comprimento, e é sustentada por estais, foi

modelada no software SAMCEF [20] possui formato em S, conforme ilustrado na Figura 6.

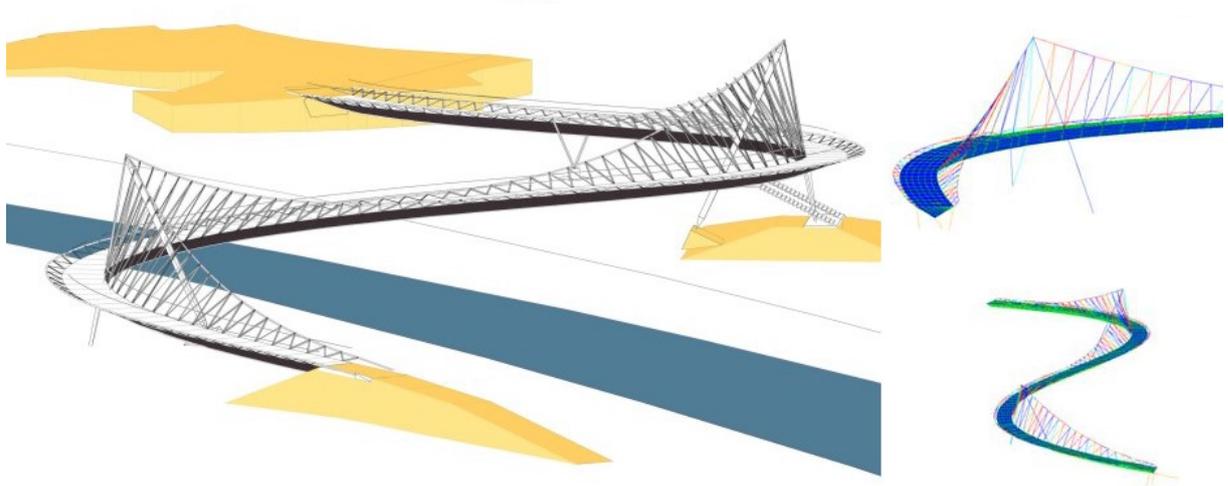


Figura 6 – Modelo numérico da estrutura [6]

Zivanovic et al [8] em 2005 estudou o comportamento dinâmico de uma passarela sob carregamento dinâmico, já conhecida por seus problemas com vibrações excessivas. A estrutura se localiza em Podgorica, Montenegro, e possui 78 m de vão principal com um balanço de 13m de cada lado, conforme pode ser visualizado na Figura 7.



Figura 7 – Fotografia da passarela de Podgorica [8]

Figueiredo [21] em 2005 estudou o comportamento de uma passarela submetida a dez diferentes modelos de carregamento dinâmico, comparando em seguida os resultados obtidos, para passarelas com diferentes vãos. A modelagem foi realizada com a utilização do software de análise computacional em elementos finitos ANSYS [14]. O autor estudou passarelas com vãos que variaram de 10 a 35m para a seção transversal indicada na Figura 8.

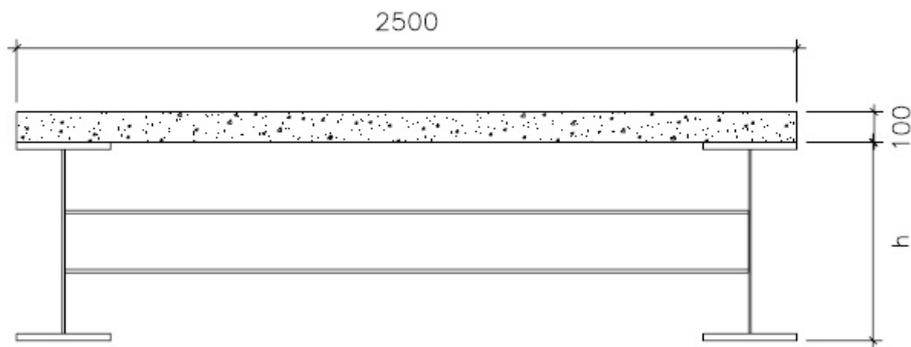


Figura 8 - Seção transversal típica de uma passarela mista [21]

Com a utilização de um software desenvolvido pelo próprio autor, foram modeladas as tabelas de carga utilizadas para a simulação do caminhar humano, utilizando-se parâmetros fornecidos por diversas normas e guias internacionais.

O guia de projeto SETRA [16], publicado em 2006, é hoje uma das principais referencias internacionais para a verificação das frequências (f_{01}) e acelerações em de pico (a_p) de passarelas de pedestre. O guia propõe uma metodologia para o cálculo das acelerações de pico e dispõe de uma classificação quanto a aceitabilidade dos valores encontrados.

Lima [22], em 2007, realizou um estudo sobre a influência da modelagem do carregamento dinâmico proveniente dos pedestres, incluindo o impacto do calcanhar humano e o amortecimento estrutural, na contribuição à resposta dinâmica de passarelas mistas (aço-concreto). O autor considera em sua modelagem o movimento de pernas que causa a subida e descida da massa efetiva do corpo em cada passo, assim como o movimento deste carregamento ao longo da estrutura, conforme ilustrado na Figura 9.

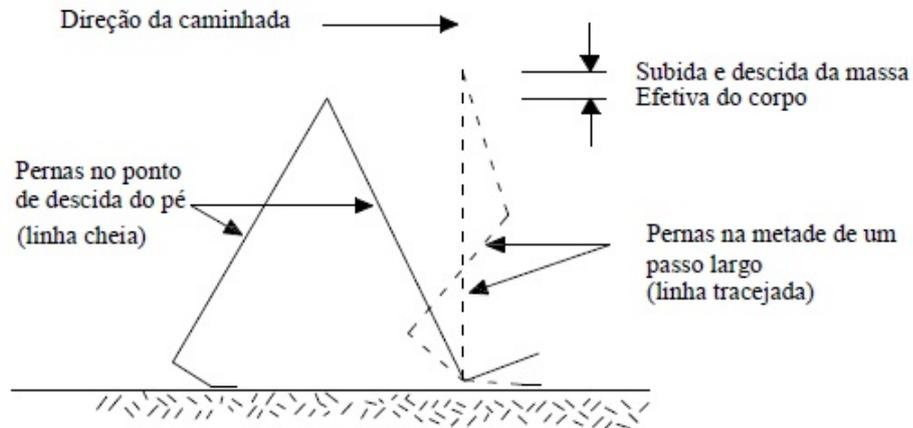


Figura 9 - Geometria simplificada de uma passada [23] apud [22]

De forma a simular o caminhar dos pedestres sobre as passarelas o estudo emprega o modelo de carregamento onde o efeito transiente do impacto do calcanhar humano é considerado. O posicionamento do carregamento dinâmico é alterado de acordo com a posição dos pedestres na estrutura e sua evolução ao longo do tempo.

Silva et al. [24], em 2007, desenvolveram o estudo de um modelo estrutural em elementos finitos de uma passarela existente e localizada na cidade do Rio de Janeiro, Brasil, submetida carregamentos dinâmicos de origem humana. A análise linear elástica objetivou obter a resposta dinâmica da estrutura em termos de acelerações. Foram utilizados quatro modelos de carregamentos para incorporar no modelo estrutural os efeitos dinâmicos induzidos pelo caminhar humano. Os resultados obtidos indicaram a possibilidade da ocorrência de altos níveis de vibração na estrutura, gerando assim desconforto para os usuários.

No ano de 2008 foi publicado o guia de projeto português HIVOSS [17] que estabelece recomendações de dimensionamento ou verificação para os valores de acelerações e frequências de estruturas de passarela. No guia são sugeridas classes de carregamento para situações muito e pouco carregadas com o intuito de se determinar se a estrutura apresenta conforto em seu uso, no que diz respeito ao nível de vibrações excessivas, para vibrações verticais, laterais e longitudinais.

Barros [25], em 2009, estudou o comportamento dinâmico de uma passarela sobre a rodovia BR116 no município de Esteio, Rio Grande do Sul, Figura 10, com o auxílio do software SAP2000 [26], com a utilização de carregamentos dinâmicos

produzidos pela movimentação de pedestres caminhando, correndo e pulando, tendo como resultado um desempenho insatisfatório da estrutura.

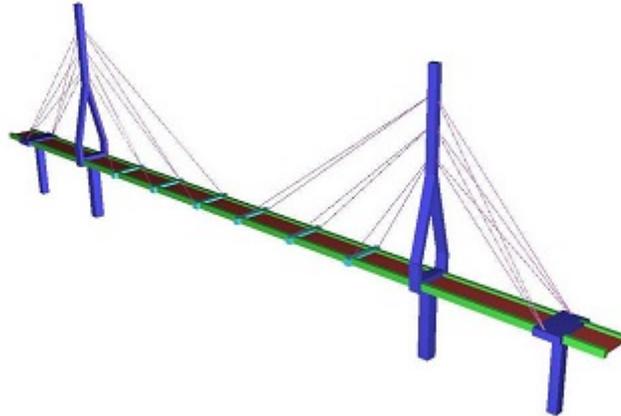


Figura 10 - Passarela de pedestres de Esteio [25]

Em 2010, Igólfsson et al [27] estudaram as forças laterais provenientes do caminhar humano sobre uma estrutura, através de análises experimentais obtidas pelo caminhar de indivíduos sobre uma plataforma fixa. Foram investigados os movimentos de 71 pedestres caminhando sobre a esteira com movimentos senoidais e em diferentes frequências de passo, conforme Figura 11.

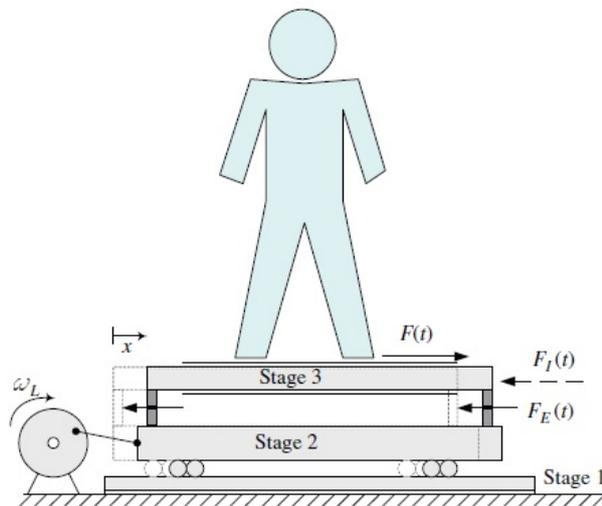


Figura 11 – Esquema da plataforma e diagrama de equilíbrio [27]

Zivanovic et al [28], em 2011, publicaram um trabalho cujo objetivo era comparar alguns dos muitos tipos de carregamentos dinâmicos induzidos em estruturas de passarelas por pedestres. O modelo utilizado pelos autores se tratou

da passarela Zagoric, Figura 12, localizada na cidade de Podgorica, em Montenegro, possui 44m de vão principal, foi modelado em elementos finitos com a utilização do software ANSYS [14].

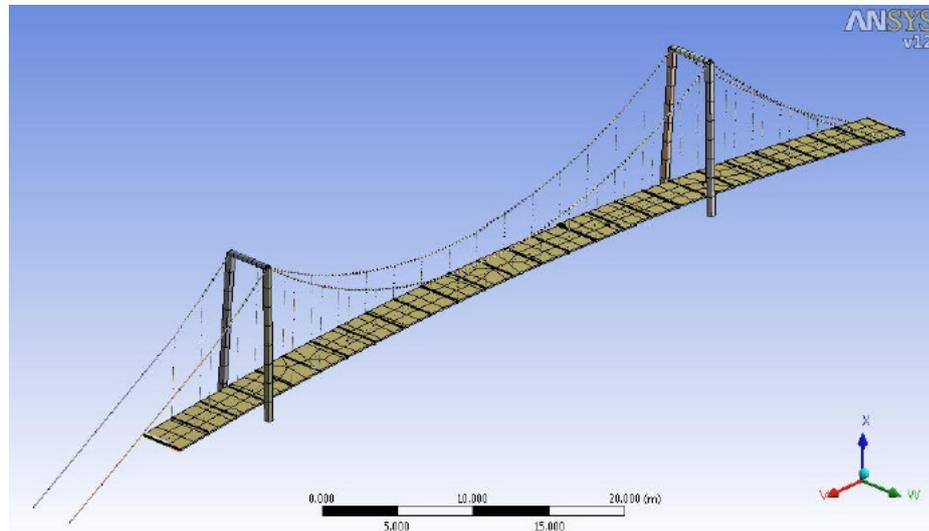


Figura 12 – Modelo em elementos finitos [28]

Os autores adotaram como sobrecarga provável a situação em que a passarela é atravessada por uma multidão e para a situação de grupo de pedestres. O estudo concluiu que, para os diferentes e numerosos guias e normas utilizados no cálculo do carregamento, os resultados diferiram bastante uns dos outros, dificultando a escolha de apenas um modelo.

Debona [29] em 2011 realizou um estudo sobre análise dinâmica, utilizando o modelo estrutural de uma passarela localizada em área de grande circulação sobre a Avenida Osvaldo Aranha, entre os bairros Maracanã e São Cristóvão na cidade do Rio de Janeiro/RJ, cuja extensão atinge os 82,5m divididos em três vãos. Além de avaliar o impacto do calcanhar humano e a variação espacial e temporal do carregamento, o autor também compara as acelerações máximas de pico da estrutura com os padrões estabelecidos por normas, realiza uma análise da interação solo-estrutura e faz uma monitoração dinâmica “in loco” da passarela, com a utilização de acelerômetros e um sistema de aquisição de dados. Para modelagem do carregamento, foram considerados os efeitos da variação da posição da carga dinâmica em relação à estrutura e a função de tempo gerada, a subida e descida da massa efetiva do corpo em cada passo, e o efeito do impacto do calcanhar humano. O autor também utilizou o software ANSYS [14] para modelagem numérica da

estrutura por elementos finitos, utilizando os elementos BEAM44 [14] e PIPE16 [14] para colunas e transversinas e SHELL63 [14] na modelagem da laje de concreto.

Igólfsson et al [30] também publicaram em 2012, mais um trabalho sobre a influencia do caminhar humano juntamente com uma proposição de uma função própria para a obtenção das forças laterais geradas na estrutura pelo caminhar humano, com base em outros trabalhos publicados na última década. O autor destacou a importância de se considerar as características variáveis do movimento humano e sua influência no comportamento das vibrações laterais da estrutura, principalmente para estruturas flexíveis, mais susceptíveis ao fenômeno da ressonância.

Em 2013, Bocian et al [31] publicaram um trabalho cujo objetivo foi estudar a interação pedestre-estrutura, levando em consideração que um pedestre contribui como fonte geradora de vibração e com amortecimento e massa. Os autores observaram que, para diferentes valores de frequência de passo, amortecimento pode sofrer influência positiva ou negativa, impactando de diferentes maneiras na estrutura.

Mendes [32] em 2014 estudou o comportamento dinâmico de três modelos estruturais de passarelas, aplicando o carregamento referente ao caminhar humano, com o auxílio do software ANSYS [14] de elementos finitos. O Autor obteve os valores das acelerações de pico e comparou com os limites de referência propostas por normas e manuais de projetos de todo o mundo, e fez uma investigação com base em alternativas de controle estrutural objetivando atenuar vibrações excessivas, a partir do emprego de sistemas de atenuadores dinâmicos sintonizados (ADS).

Zhang et al [33] em 2016, publicaram um estudo cujo objetivo consistiu em se determinar as forças com caráter biodinâmico que representassem os pedestres durante uma caminhada sobre pisos. Foram realizadas medições em laboratório, que puderam ser capturadas através de um sistema de mapeamento em três dimensões. Os autores propõem um modelo estatístico do caminhar humano representado por uma série de fourier de terceira ordem.

2. MÉTODOS GERAIS DE SOLUÇÃO

2.1. Introdução

De forma a respaldar os objetivos principais deste trabalho de pesquisa, este capítulo apresenta, de forma resumida, os aspectos teóricos básicos associados às análises desenvolvidas neste estudo: análise de autovalores (frequências naturais) e autovetores (modos de vibração), análise harmônica e análise de vibração forçada.

2.2. Análise de Autovalores e Autovetores (Vibração Livre)

Considerando-se um sistema estrutural qualquer cujo movimento é definido por vários graus de liberdade “N” (SNGL), e que por equilíbrio dinâmico entre as forças externas e internas do modelo, obtém-se um sistema com “N” equações, sendo “N” representa o número de graus de liberdade do sistema. A equação de equilíbrio dinâmico para um sistema estrutural com “N” graus de liberdade, em vibração livre, não amortecido, é expressa matricialmente pela Equação (1).

$$[M]a + [K]u = 0 \quad (1)$$

Onde:

[M] - Matriz de massa do sistema estrutural

[K] - Matriz de rigidez do modelo

a - Vetor das acelerações

u - Vetor dos deslocamentos

Assim sendo, por analogia com sistemas com apenas um grau de liberdade (S1GL), nos quais o movimento é harmônico e de mesma frequência, os deslocamentos (u) e as acelerações (a) são expressos pela Equação (2).

$$\begin{aligned} u &= \phi_i \cos(\omega_{0_i} t - \alpha) \\ a &= -\phi_i \omega_{0_i}^2 \cos(\omega_{0_i} t - \alpha) \end{aligned} \quad (2)$$

Onde:

ϕ_i - Amplitude característica da função harmônica

ω_{0i} - Frequência natural circular

α - ângulo de fase

Substituindo-se a Equação (2) na Equação (1), chega-se ao problema clássico de autovalores (frequências naturais) e autovetores (modos de vibração), representado pela Equação (3).

$$([M]^{-1}[K] - \omega_{0_i}^2[I])\phi_i = 0 \quad (3)$$

Deste modo, para a solução não trivial do sistema de equações, no qual ϕ_i é diferente de zero, o determinante do termo entre colchetes na Equação (3) deve ser nulo, de acordo com a Equação (4), e o resultado é apresentado, em seguida, na Equação (5).

A Equação (4), comumente denominada de equação característica permite obter os valores das frequências naturais da estrutura (autovalores) e a solução para o problema de autovetores (modos de vibração). Na Equação (4) a matriz [I] representa a matriz identidade.

$$|[M]^{-1}[K] - \omega_{0_i}^2[I]| = 0 \quad (4)$$

$$\omega_{0_i}^2[I] = [M]^{-1}[K] \quad (5)$$

Desta maneira, pode-se concluir que o modo de vibração i diz respeito a uma configuração ϕ_i segundo a qual o sistema estrutural pode permanecer em vibração livre, com uma frequência ω_{0i} .

Cabe ressaltar que com base no emprego da equação característica [Equação (5)], são obtidos os autovalores e autovetores da matriz $[M]^{-1}[K]$. Extraíndo-se a raiz quadrada das raízes da equação são obtidas as N frequências naturais ω_{0i} em ordem crescente e os N modos de vibração ϕ_i .

2.3. Análise de Vibração Forçada

O problema associado às vibrações forçadas em sistemas estruturais com vários graus de liberdade (SVGL) diz respeito à solução do problema dado pela Equação (5):

$$[M]a + [C]v + [K]u = F(t) \quad (6)$$

Onde:

$F(t)$ - Vetor representativo da força de excitação dinâmica que pode ser harmônica senoidal (análise harmônica), ou, por exemplo, representativa do caminhar dos pedestres, ou ainda em um caso mais geral, com definição puramente aleatória.

Existem diversos métodos numéricos disponíveis na literatura técnica para a integração numérica e solução das equações de movimento de um sistema estrutural com “N” graus de liberdade ([34], [35]). Os mais utilizados na prática são aqueles que consideram a variação linear da aceleração da massa do sistema ao longo do intervalo de integração Δt , conforme apresentado na Figura 13.

Assim sendo, neste trabalho de pesquisa, para a resolução numérica das equações de equilíbrio dinâmico do sistema emprega-se o algoritmo de Newmark ([34], [35]). A estratégia desenvolvida por Newmark considera que durante um intervalo de tempo Δt , o movimento do sistema é definido a partir da variação linear da aceleração da massa ([34], [35]), conforme ilustrado pela Figura 13.

De acordo com este contexto, a Equação (7) representa a equação de equilíbrio dinâmico do sistema, na forma incremental, de forma a ser resolvida, via emprego do método de Newmark ([34], [35]). Reescrevendo-se os termos da Equação (7), de forma mais compacta, chega-se ao sistema de equações representado pela Equação (8), cuja solução é obtida via utilização das Equações (9) e (10).

$$m \left[\frac{6}{\Delta t^2} \Delta u - \frac{6}{\Delta t} v_1 - 3a_1 \right] + c \left[\frac{3}{\Delta t} \Delta u - 3v_1 - \frac{\Delta t}{2} a_1 \right] + k \Delta u = \Delta F \quad (7)$$

$$\bar{k}\Delta u = \Delta\bar{F} \quad (8)$$

$$\bar{k} = \frac{6}{\Delta t^2}m + \frac{3}{\Delta t}c + k \quad (9)$$

$$\Delta\bar{F} = \Delta F + m\left(\frac{6}{\Delta t}v_1 + 3a_1\right) + c\left(3v_1 + \frac{\Delta t}{2}a_1\right) \quad (10)$$

Finalmente, faz-se importante ressaltar que dentro de cada intervalo Δt , a aceleração da massa é linear e, além disso, o amortecimento e a rigidez do sistema estrutural permanecem constantes. Os erros cometidos são proporcionais ao tamanho do intervalo de integração Δt , e quanto menor for o intervalo de integração escolhido para a análise, mais precisão é obtida na resolução numérica.

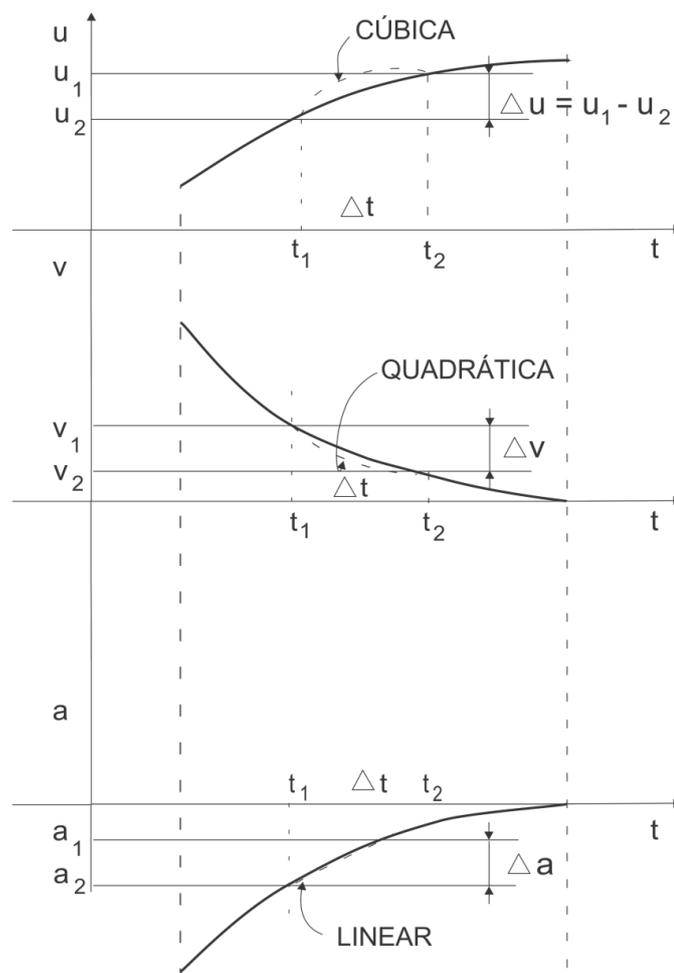


Figura 13 - Movimento do sistema durante um intervalo de tempo Δt , com base na variação linear da aceleração ([34], [35]).

3. MODELOS DE CARREGAMENTO

3.1. Introdução

Uma das formas de se representar a carga gerada pelo caminhar humano sobre estruturas como passarelas, é através de funções matemáticas de caráter cíclico, em função do tempo, que tenham características semelhantes a do caminhar humano, que podem ser medidas através de ensaios experimentais. O presente capítulo tem como objetivo apresentar os dois modelos utilizados neste estudo para a simulação do caminhar humano sobre a estrutura de uma passarela.

3.2. Modelo de Bachmann e Ammann [18]

A ação dinâmica devido ao caminhar humano é o resultado do movimento de subir e descer das pernas e da massa corporal do indivíduo, gerando assim um esforço variável no espaço e no tempo. Essa variação espaço-temporal depende dos fatores relativos ao caminhar humano, tais como: a frequência de passo (f_p), comprimento (L_p) e velocidade do passo (v_p) e para os casos em que se deseja estudar o efeito do carregamento de multidão na estrutura, a distância entre os pedestres, conforme Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros característicos de caminhar humano [18]

	f_p (Hz)	v_p (m/s)	L_p (m)
Caminhada lenta	1,7	1,1	0,60
Caminhada normal	2,0	1,5	0,75
Caminhada rápida	2,3	2,2	1,00
Corrida lenta	2,5	3,3	1,30
Corrida rápida	3,2	5,5	1,75

Bachmann e Ammann [18], descreveram uma função que simulasse o carregamento gerado pelo caminhar humano como uma série de Fourier, Equação (11), composta por uma parcela estática que corresponde ao peso de uma pessoa, adicionada de uma parcela correspondente à carga dinâmica associada à natureza da atividade, conforme representado pelas Figuras 14, 15 e 16.

$$F(t) = P \left[1 + \sum_{i=1}^n \alpha_i \cos(2\pi i f_p t + \phi_i) \right] \quad (11)$$

Onde:

$F(t)$ - Função de carregamento dinâmico (N);

P - Corresponde ao peso do pedestre (N);

α_i - Corresponde ao fator dinâmico para a força harmônica;

f_p - Corresponde a frequência do passo (Hz);

t - Corresponde ao tempo do carregamento (s);

ϕ_i - Corresponde ao ângulo de fase i harmônico (rad);

i - Corresponde ao número de ordem do harmônico;

n - Corresponde ao número total de harmônicos contribuintes.

O espectro de carregamento gerado pela Equação (11) está representado nas ilustrações das Figuras 14, 15 e 16.

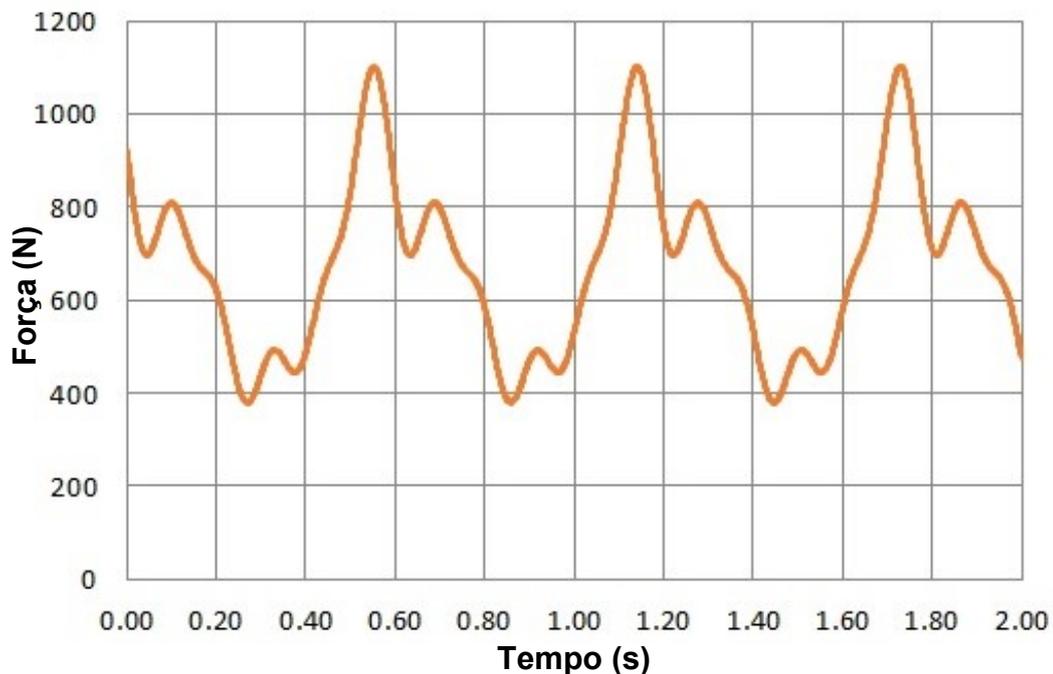


Figura 14 – Força dinâmica relativa à caminhada lenta, com $f_p = 1,70$ Hz

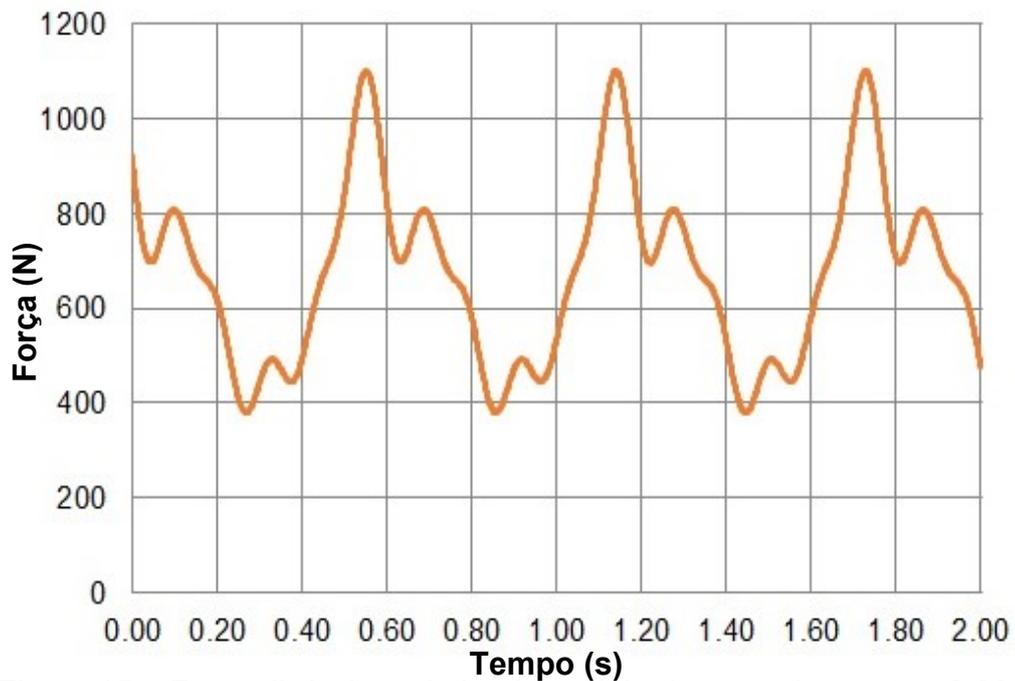


Figura 15 – Força dinâmica relativa à caminhada normal, com $f_p = 2,00$ Hz

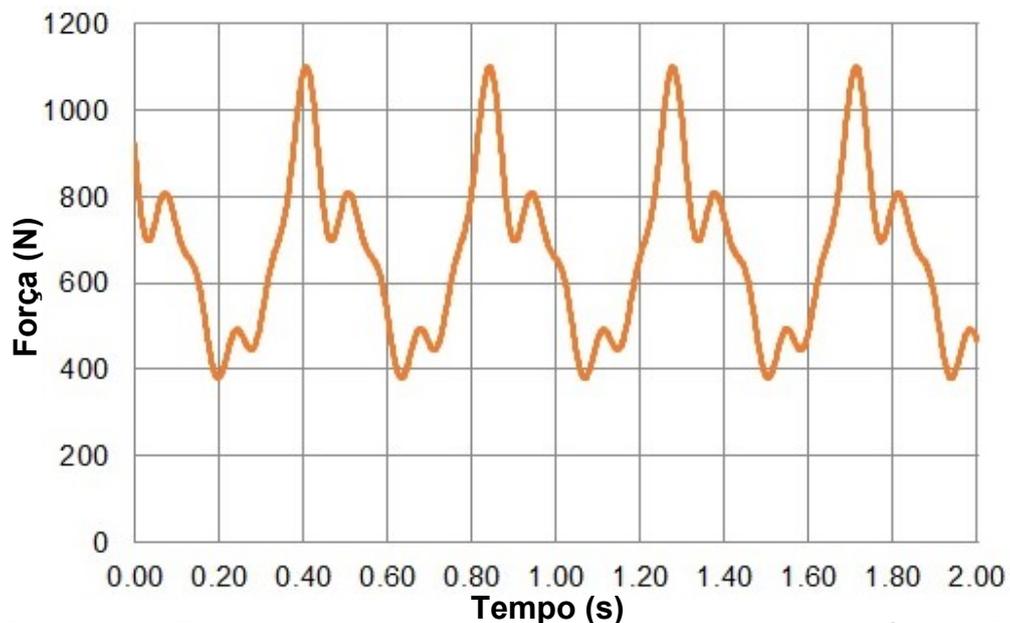


Figura 16 – Força dinâmica relativa à caminhada rápida, com $f_p = 2,30$ Hz

Para o cálculo da resposta dinâmica, e para a correta aplicação da força dinâmica gerada pela Equação (11) no modelo estrutural em elementos finitos, a malha de elementos deve, ser, adequadamente discretizada, de forma mais simétrica possível, para alocação e aplicação da força diretamente sobre os nós do modelo estrutural, de acordo com a posição do pedestre na estrutura ao longo do tempo de travessia. Para atender a essa necessidade de aplicação, o modelo

estrutural foi discretizado em uma malha de 0,245m comprimento, desta maneira a distribuição do carregamento proveniente de cada passada foi distribuída em quatro pontos, conforme apontado por Figueiredo [21] na Figura 17.

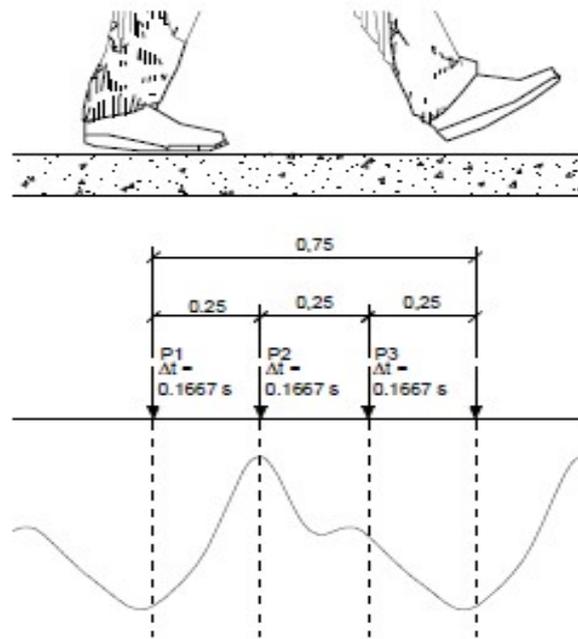


Figura 17 – Aplicação do carregamento na estrutura [21]

Para estudar o efeito da frequência de passo (f_p) sobre a resposta dinâmica da estrutura, esta frequência foi variada entre valores de 1,7 a 2,3 Hz, para cada valor de frequência de passo correspondendo uma diferente variação de tempo na aplicação do carregamento em cada nó. Essa correspondência se encontra na Tabela 2.

Tabela 2 – Tempo de aplicação do carregamento nos nós

Frequência de passo f_p (Hz)	Distância de passo (m)	Distância entre os nós (m)	Varição do tempo Δt (s)
1,7	0,60	0,245	0,245
1,8	0,65	0,245	0,199
1,9	0,70	0,245	0,179
2,0	0,75	0,245	0,167
2,3	1,00	0,245	0,107

Para a formulação da função de carregamento dinâmico representativa do caminhar dos pedestres, pela Equação (11), os coeficientes dinâmicos utilizados

neste trabalho de pesquisa são os propostos por Bachmann [18], conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 - Coeficientes propostos por Bachmann [18]

Harmônico	Coeficiente Dinâmico (α_i)	Ângulo de Fase (ϕ_i)
1	0,37	0
2	0,10	$\pi/2$
3	0,12	$\pi/2$
4	0,04	$\pi/2$
5	0,08	$\pi/2$

Esse modelo de carregamento é diversas vezes denominado nessa dissertação como “força dura”, seguindo a denominação usada por Debona [29], por não levar em consideração fatores inerentes do caminhar humano como amortecimento e rigidez.

3.3. Modelos Biodinâmicos (Interação dinâmica pedestre-estrutura)

Objetivando investigar os movimentos e as forças dissipativas ocorridas durante a locomoção dos pedestres sobre a passarela, faz-se necessária a adoção de modelos biodinâmicos, compostos por massa (m_p), amortecimento (c_p) e rigidez (k_p). Estes modelos biodinâmicos, representativos dos pedestres, têm sido empregados como sendo mais realistas para a modelagem da ação dinâmica dos pedestres, em relação aos modelos tradicionais de “força dura”, usualmente utilizados para a análise dinâmica de passarelas [36], [37].

No âmbito deste trabalho de pesquisa foi adotada uma metodologia de análise centrada no emprego dos modelos biodinâmicos, simulados como sistemas do tipo “massa-mola-amortecedor”, com um grau de liberdade (S1GL), conforme ilustrado na Figura 18. Estes sistemas biodinâmicos foram inseridos no modelo numérico de elementos finitos, em conjunto com a força dinâmica que se move, ao longo do tempo, com velocidade constante $v(t)$, exercendo uma força $F_p(t)$ sobre a passarela. A Figura 18 ilustra a metodologia de análise desenvolvida nesta

dissertação e, bem como, a função matemática representativa do caminhar humano é modelada através de uma série de Fourier, de acordo com a Equação (12).

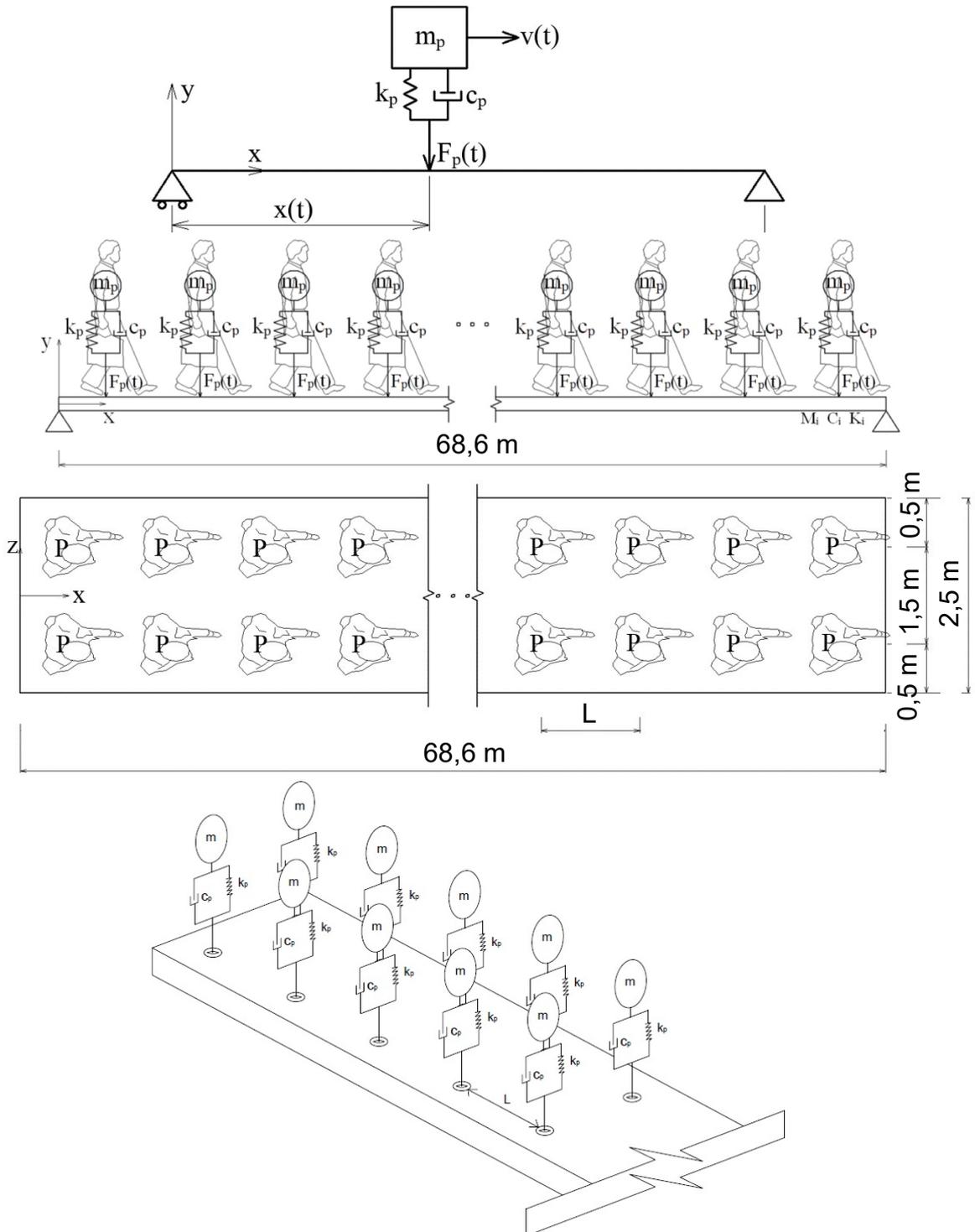


Figura 18 - Modelos biodinâmicos representativos dos pedestres [37]

$$F(t) = P \left[\sum_{i=1}^n \alpha_i \cos(2 \pi i f_p t + \phi_i) \right] \quad (12)$$

Onde:

F (t) - Função de carregamento dinâmico (N);

P - Peso de uma pessoa (N);

α_i - Coeficiente dinâmico para a força harmônica (fator de carga dinâmica);

i - Número do harmônico (1, 2, 3, etc.);

f_p - Frequência do passo humano (Hz);

t - Tempo (s);

ϕ_i - Ângulo de fase para o harmônico i (radianos).

n - Corresponde ao número total de harmônicos contribuintes.

Os dados relativos ao pedestre como massa (m_p), amortecimento (c_p) e rigidez (k_p) foram utilizados de acordo com o estudo de Silva [36], indicados na Tabela 4. Foram utilizadas as médias obtidas com valores de diversas medições experimentais, realizadas em laboratório.

Tabela 4 - Características dinâmicas utilizadas para os sistemas biodinâmicos [36]

		c_p (Ns/m)	k_p (N/m)	m_p (kg)	f_p (Hz)
LABEME/UFPB [36]	Média	841,56	15085,56	68,58	1,88
	Desvio Padrão	176,21	4985,03	12,42	0,13

O espectro de carregamento gerado pela Equação (12) está representado nas ilustrações das Figuras 19 a 21. Estes carregamentos são aplicados conforme o modelo de “Força dura”, variável no tempo e longitudinalmente na estrutura da passarela, de acordo com o ilustrado na Figura 17 (item 3.2).

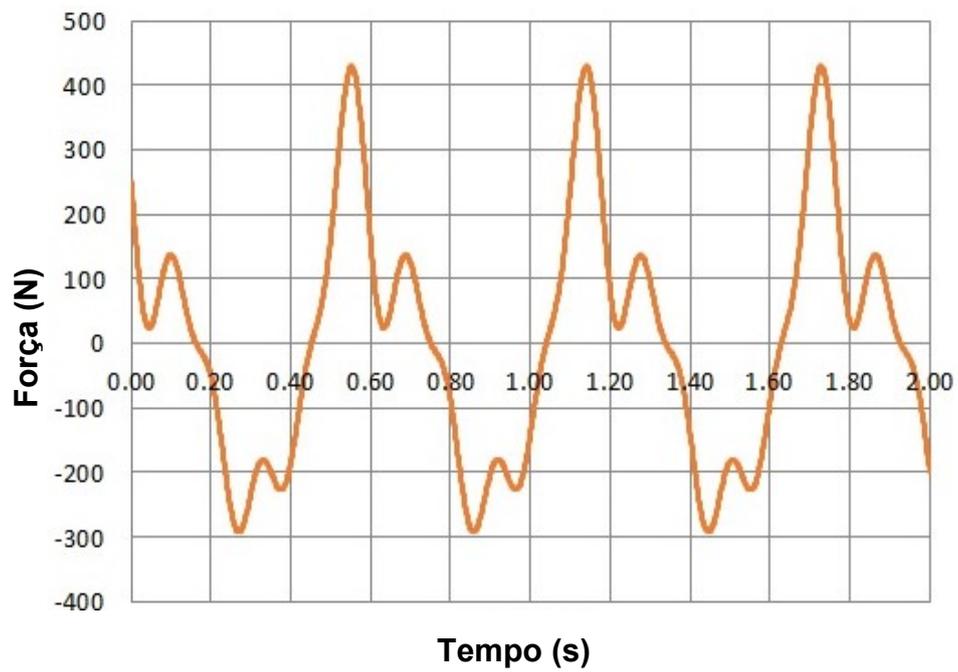


Figura 19 – Força dinâmica relativa ao caminhar lento, com $f_p = 1,70$ Hz

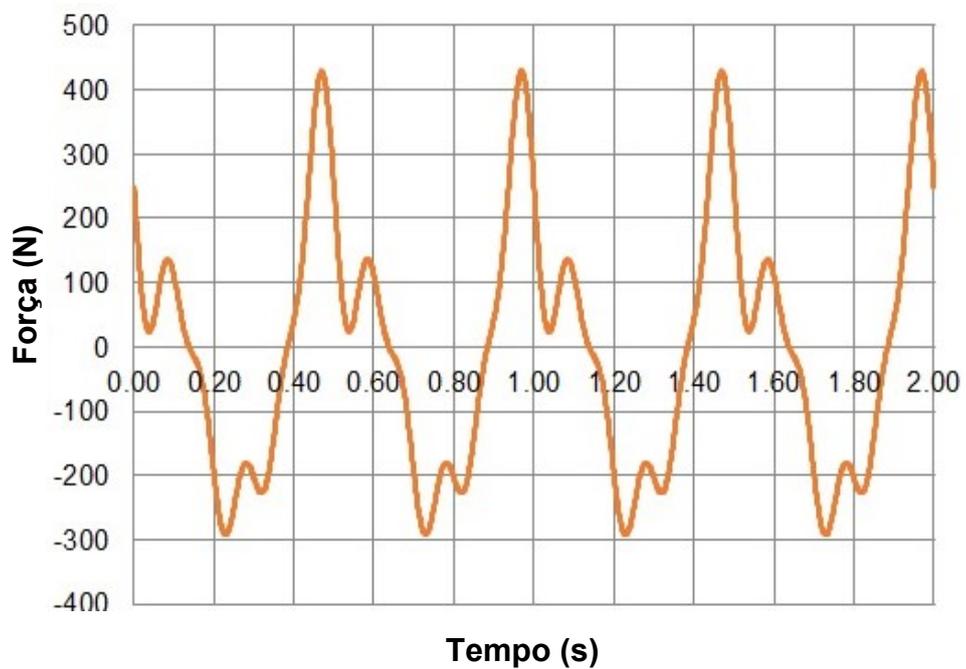


Figura 20 – Força dinâmica relativa ao caminhar normal, com $f_p = 2,00$ Hz

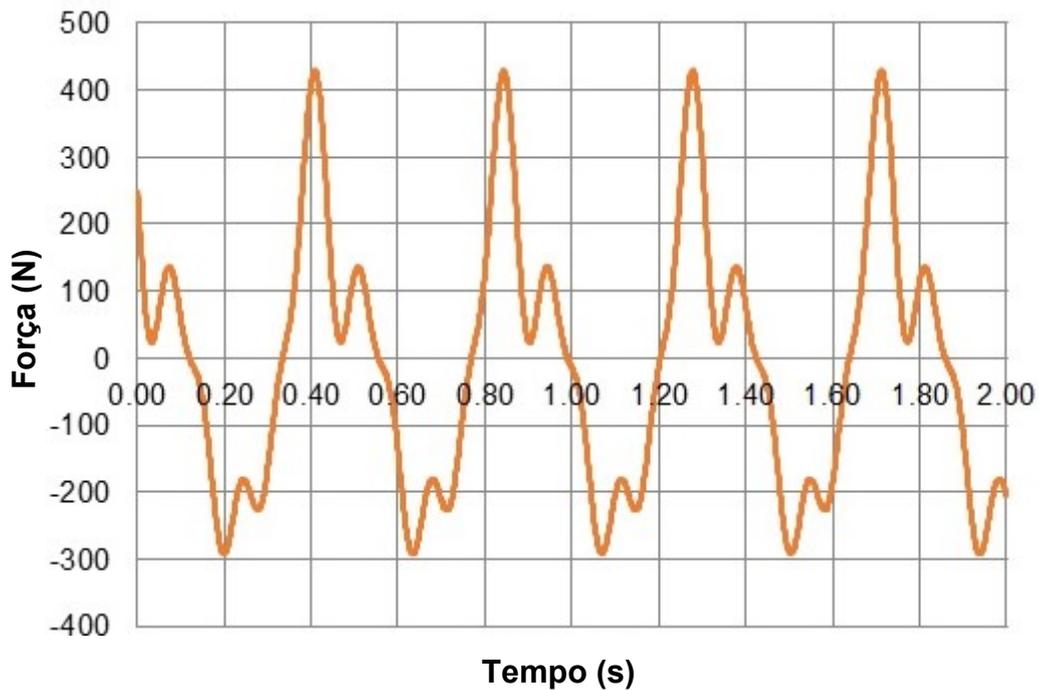


Figura 21 – Força dinâmica relativa ao caminhar rápido, com para $f_p = 2,30$ Hz

Entretanto a aplicação dos sistemas biodinâmicos com um grau de liberdade no modelo numérico computacional tem suas limitações. Os pontos escolhidos para atuação do sistema massa-mola-amortecedor são igualmente espaçados ao longo da estrutura e estão posicionados de forma fixa, não podendo se mover ao longo tempo. Este fato torna essa metodologia pouco representativa para casos de carregamento com poucos pedestres, sendo mais recomendado para situações com um número elevado de pedestres sobre a estrutura.

4. MODELO ESTRUTURAL

O modelo estrutural da passarela estudada [31][32], ilustrado na Figura 22, se refere a uma estrutura real e já construída, situada na cidade do Rio de Janeiro, no bairro Gardênia Azul, em um trecho da Avenida Ayrton Senna, próxima a uma das casas de shows mais frequentadas da cidade e importantes instituições de ensino, sendo desta maneira, uma estrutura frequentemente utilizada por estudantes, ciclistas, visitantes e moradores da região para travessia de uma das mais importantes Avenidas da cidade do Rio de Janeiro.

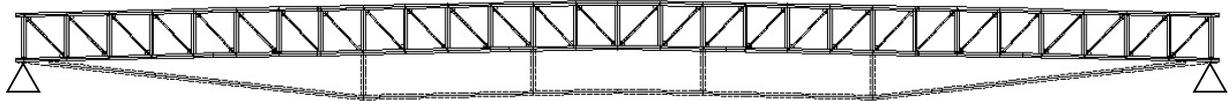


Figura 22 – Vista frontal da estrutura

A Estrutura possui um grande vão central, feito para vencer a distância imposta pelo rio Arroio Fundo, que apesar de largo, não é devidamente utilizado devido ao elevado índice de poluição da área, que recebe efluentes e ligações de esgoto clandestinas de comunidades próximas à região. O mesmo encontra-se em processo de despoluição desde 2010, quando foi instalada uma central de tratamento de esgoto [41]. As Figuras 23 e 24 mostram duas perspectivas da estrutura objeto deste estudo.



Figura 23 – Vista lateral da estrutura



Figura 24 - Vista em perspectiva próxima a região dos apoios do vão central

A estrutura da passarela de aço-concreto é composta por três vãos biapoiados, o vão central que é o objeto deste estudo possui 68,6m de comprimento, divididos em 28 módulos simétricos de 2,45m cada, altura de 2,60m e Largura de 2,55m, como pode ser visto nas Figuras 25 a 28. 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 “USI-SAC 300” [40], soldadas em suas extremidades, com espessura variável ao longo do comprimento da passarela.

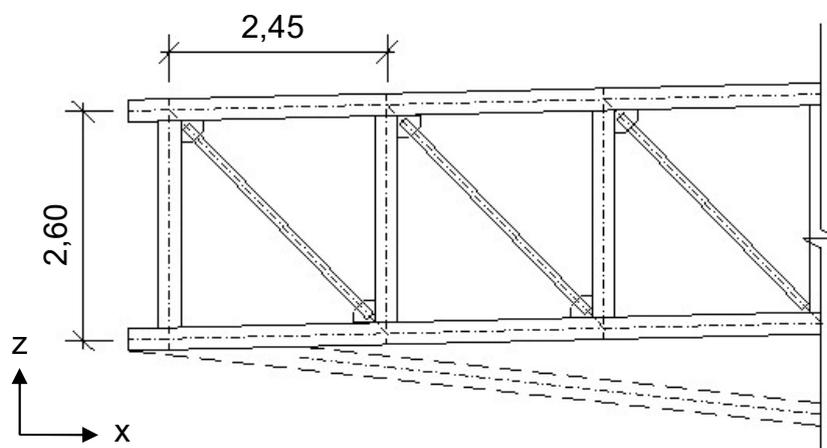


Figura 25 – Detalhe lateral da estrutura (Cotas em metros)

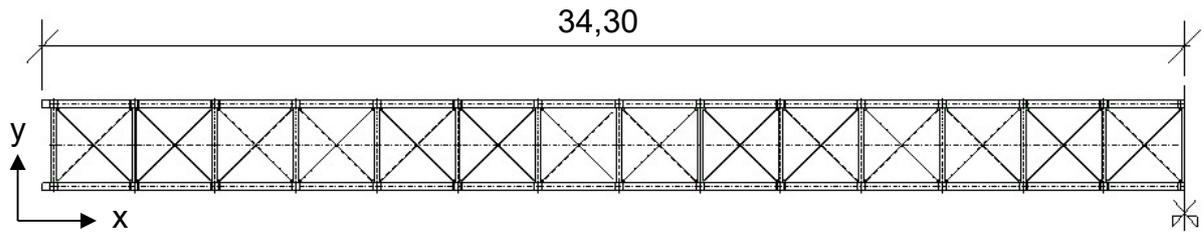


Figura 26 – Vista inferior da passarela (Cotas em metros)

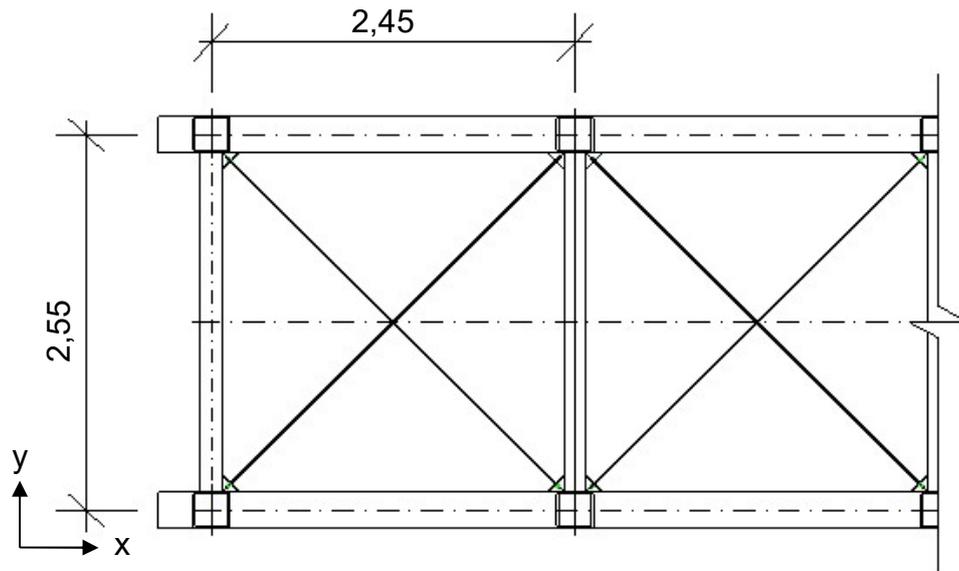


Figura 27 – Detalhe inferior da passarela (Cotas em metros)

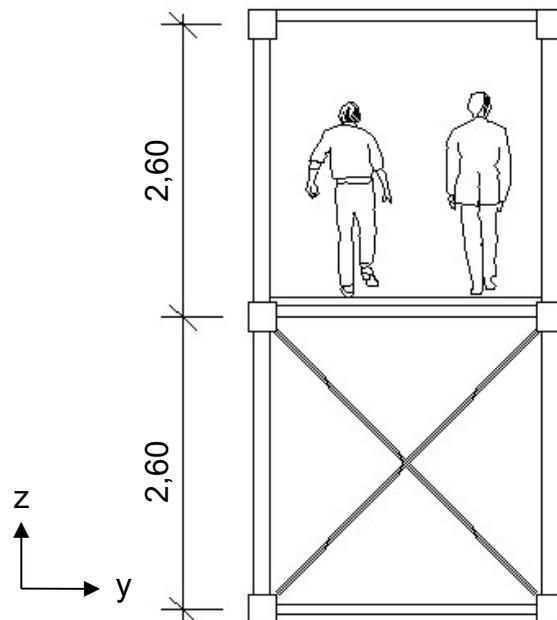


Figura 28 – Corte da seção da passarela (cotas em metros)

As peças da laje de concreto armado pré-moldadas possuem resistência característica de compressão $f_{ck} = 20 \text{ Mpa}$, cobrimento igual a 2,5 cm, módulo de elasticidade longitudinal $E_c = 21,3 \text{ GPa}$, coeficiente de Poisson $\nu = 0,2$ e massa específica estipulada como $\rho = 2500 \text{ kg/m}^3$. A placa pode ser visualizada nas Figuras 29 e 30.

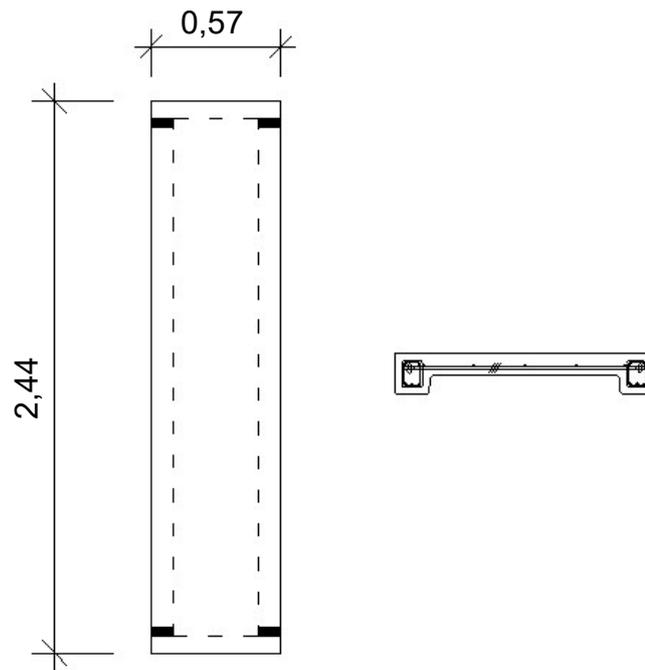


Figura 29 – Corte da seção da passarela (Cotas em metros)



Figura 30 – Vista inferior dos elementos de laje pré-moldadas

As chapas de aço utilizadas na confecção dos perfis são do tipo “USI-SAC 300 multigrade” [40], com o limite de escoamento $\sigma_y = 300$ MPa, fornecido pelo fabricante [40], e módulo de elasticidade $E = 205,0$ GPa, coeficiente de Poisson $\nu = 0,3$ e massa específica $\rho = 7850$ kg/m³. As Tabelas 5 e 6 resumem as propriedades geométricas dos elementos estruturais da passarela.

Tabela 5 – Descrição dos perfis estruturais da estrutura principal

Perfil	Dimensões (mm)	Espessura (mm)
Longitudinal	250 x 250	Variável (Tabela 7)
Montante	150 x 150	4,75
Travamento	100 x 100	4,75
Diagonal	100 x 100	4,75

Tabela 6 – Descrição dos perfis estruturais do reforço

Perfil	Dimensões (mm)	Espessura (mm)
Longitudinal	250 x 250	Variável (Tabela 7)
Montante	150 x 150	4,75
Travamento	100 x 100	3,00

Os perfis longitudinais, conforme detalhados na Figura 31, possuem espessura de chapa que varia ao longo da estrutura, de acordo com o especificado na Tabela 7. A variação da espessura dos perfis longitudinais obedece ao eixo de simetria da estrutura.

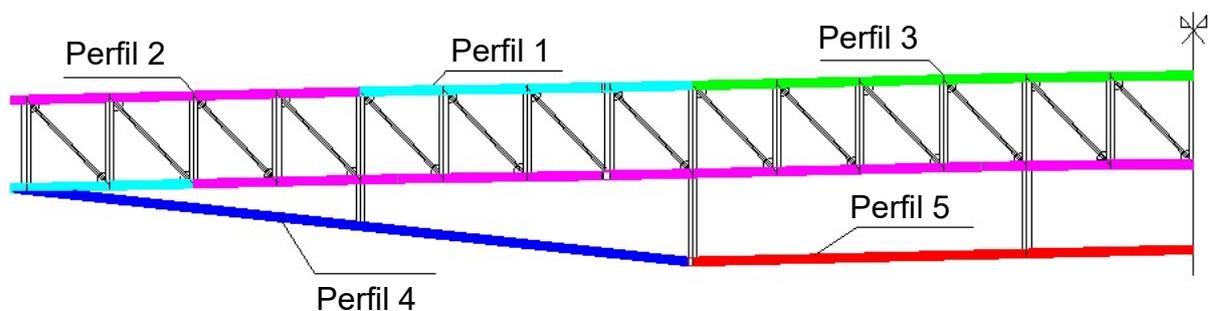


Figura 31 – Variação longitudinal das espessuras dos perfis

Tabela 7 – Espessuras dos perfis componentes da estrutura

Perfil	Espessura da chapa (mm)
1	9,50
2	6,35
3	12,50
4	9,00
5	9,50

O vão em estudo está situado entre os pórticos P1 e P2, sendo cada pórtico formado por dois perfis CVS 350 x 105, contraventados por um perfil CS 450 x 154 no meio e um VE 250 x 19 no topo. A fundação da passarela é do tipo profunda, constituída por estacas raízes de 25 cm de diâmetro.

A estrutura também possui barras de contraventamento em “x” no plano superior e inferior dos módulos e também entre os elementos de reforço com diâmetro de 3/4", conforme Figura 32.



a) Contraventamento superior



b) Contraventamento inferior

Figura 32 – Contraventamento do reforço da estrutura

5. MODELO NUMÉRICO COMPUTACIONAL

5.1. Introdução

Neste capítulo será descrito o modelo numérico-computacional utilizado como base para as análises dinâmicas de vibração forçada deste estudo. Na modelagem da estrutura foram empregadas técnicas usuais de discretização via método dos elementos finitos, realizada no software de análise de elementos finitos ANSYS [14], para análise e cálculo estrutural.

5.2. Descrição dos elementos finitos utilizados

O software ANSYS [14] possui uma vasta biblioteca de elementos finitos, disposta em diferentes níveis de complexidade, graus de liberdade, amplas possibilidades geométricas se seção transversal e outras propriedades para inclusão de esforços pré-existentes, para que haja a escolha do tipo de elemento mais adequado ao problema.

Para modelagem nas vigas, montantes, diagonais e travamentos, foi utilizado o elemento BEAM44 [14], que permite a consideração de efeitos de flexão e torção. Este elemento possui como vantagens o fato de apresentar seis graus de liberdade por nó, nas três direções x , y e z , tanto para as translações como, para as rotações, e também apresenta como vantagem o fato de poder ser adaptado para qualquer geometria de seção transversal, inclusive com inércia variável conforme Figura 33.

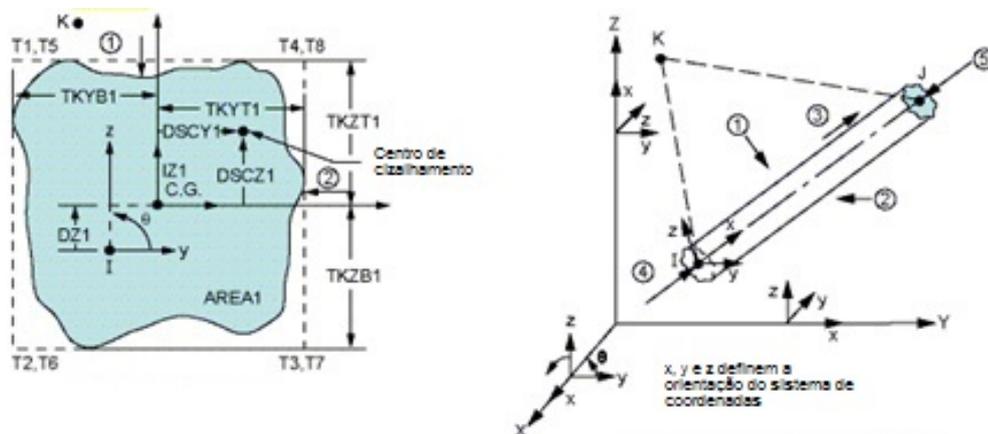


Figura 33 – Elemento BEAM44 [14]

A Laje de concreto da passarela foi modelada com o uso do elemento SHELL63 [14]. O elemento SHELL63 [14] apresenta seis graus de liberdade em cada nó nas três direções x , y e z , tanto para as translações, como para as rotações, como pode ser visto na Figura 34. Este elemento possui a vantagem de possibilitar a utilização de materiais com propriedades ortotrópicas.

Considerou-se que o concreto trabalha no regime linear-elástico e que as seções permanecem planas no estado deformado.

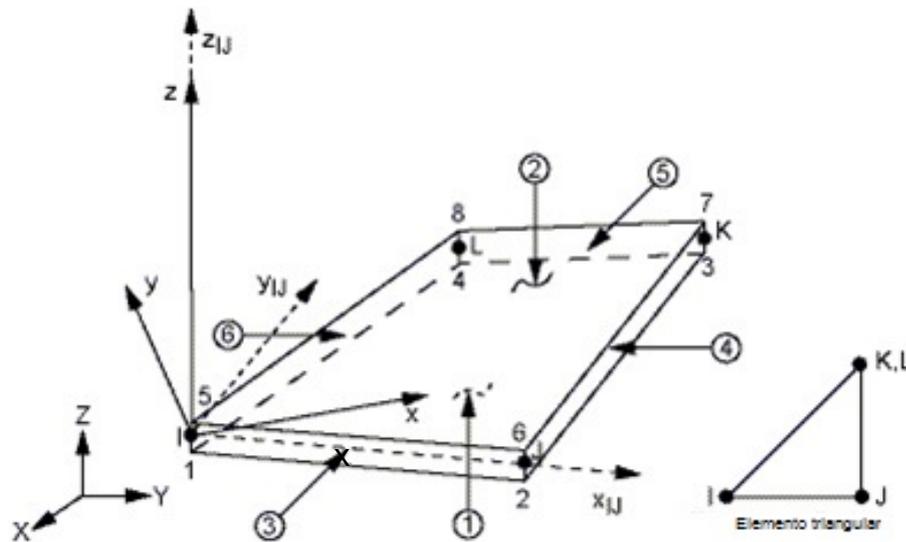


Figura 34 – Elemento SHELL63 [14]

Para modelagem das barras de contraventamento superiores e inferiores, foi utilizado o elemento LINK8 [14], que é definido como um elemento de deformação uniaxial com dois nós e três graus de liberdade por cada nó, translação nas direções x e y , conforme Figura 35.

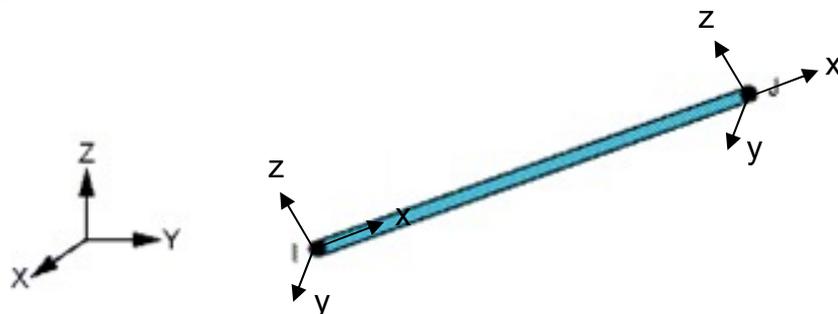


Figura 35 – Elemento LINK8 [14]

O sistema massa-mola-amortecedor foi representado com a utilização de dois elementos, o MASS21 [14] e o COMBIN14 [14]. O elemento COMBIN14 [14],

representado na Figura 36, é definido por dois nós, um coeficiente de mola e um coeficiente de amortecimento e pode ser utilizado tanto para esforços longitudinais de tração e compressão, quanto para esforços de torção em torno de seu eixo. Possui seis graus de liberdade em cada nó, três para translação e três para rotação e não possui massa. Com o intuito de adicionar massa ao sistema com um grau de liberdade, faz-se o uso do elemento MASS21 [14], ilustrado na Figura 37.

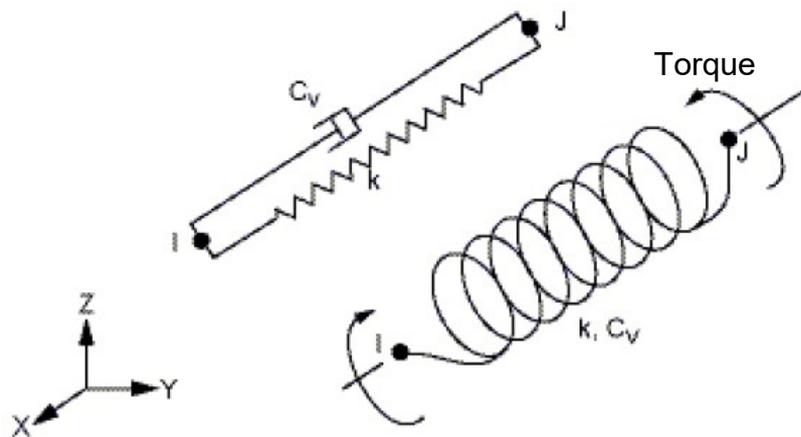


Figura 36 – Elemento COMBIN14 [14]

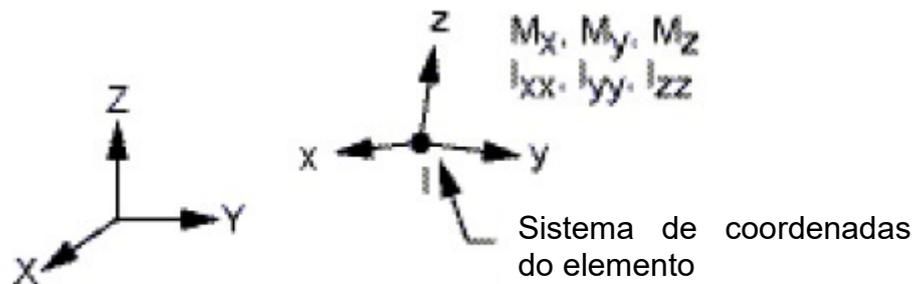


Figura 37 – Elemento MASS21 [14]

O elemento MASS21 [14] possui seis graus de liberdade, três de translação na direção x , y e z , e três de rotação em torno dos eixos x , y e z . Entretanto, para a realização do modelo de um sistema com um grau de liberdade, ou outros graus de translação e rotação foram restringidos, sendo permitido desta maneira, que a massa oscilasse em apenas uma direção.

São utilizadas, também, conexões rígidas do tipo “offset”, de forma a se garantir a compatibilidade de deformações entre os nós dos elementos de casca utilizados para modelagem das lajes e os nós dos elementos de viga tridimensionais.

5.3. Modelo em elementos finitos

Os elementos estruturais componentes do modelo numérico-computacional da passarela de pedestres, com vão central de 68,6m (vigas principais, diagonais, montantes e travamentos), foram discretizados em 10 elementos finitos, respectivamente. As extremidades do modelo não foram restringidas quanto aos graus de liberdade referentes à rotação, fazendo assim com que a estrutura funcionasse de maneira simplesmente apoiada nas extremidades.

Em sequência, a Figura 38 ilustra a perspectiva do sistema estrutural e a descrição do número total de elementos utilizados para a formação do modelo numérico computacional desenvolvido. As Figuras 38 a 40 mostram os detalhes dos elementos principais do modelo numérico computacional, SHELL63 [14] e BEAM44 [14] respectivamente.

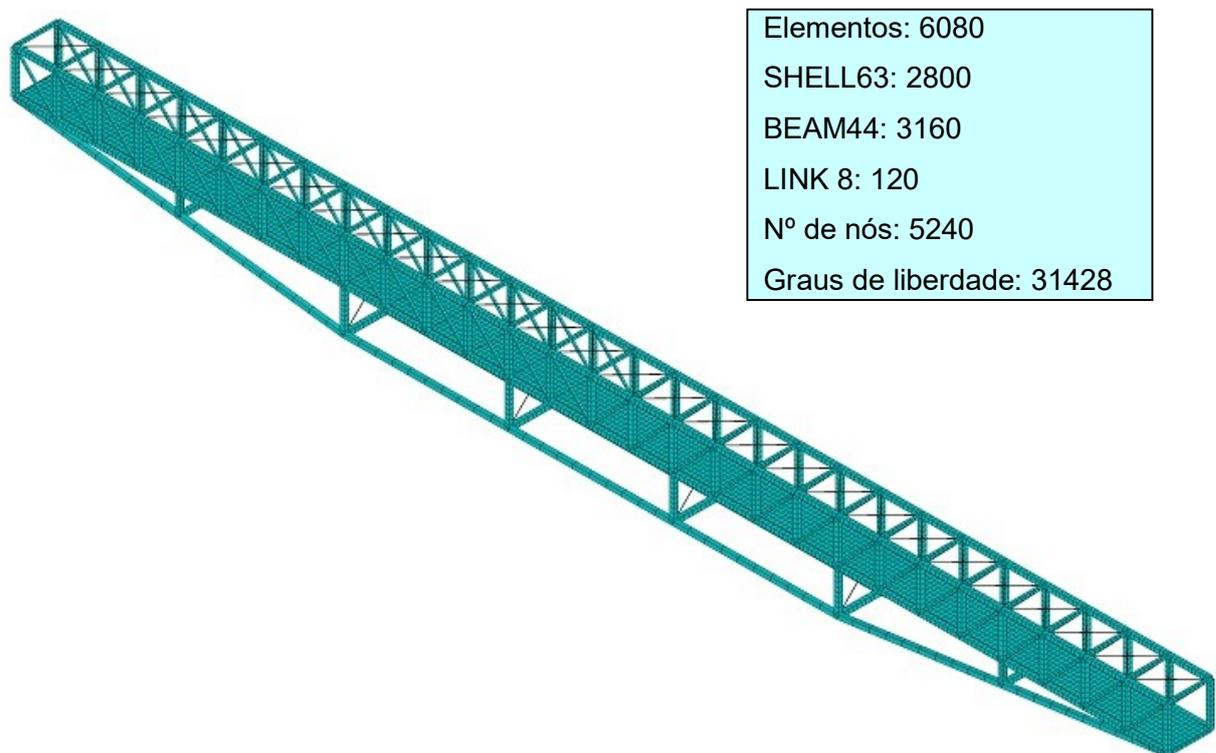


Figura 38 – Vista em perspectiva do modelo

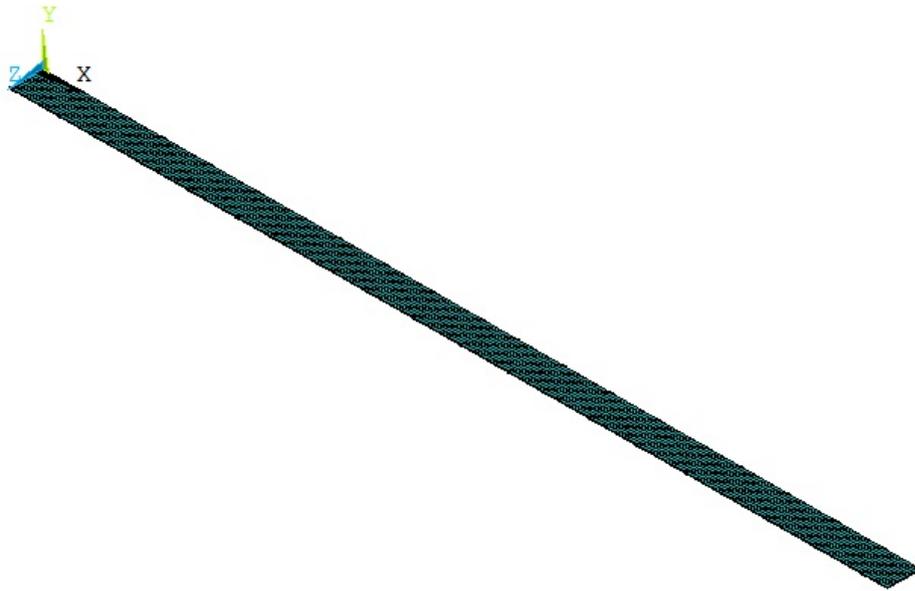


Figura 39 – Elemento SHELL63 [14] aplicados à estrutura

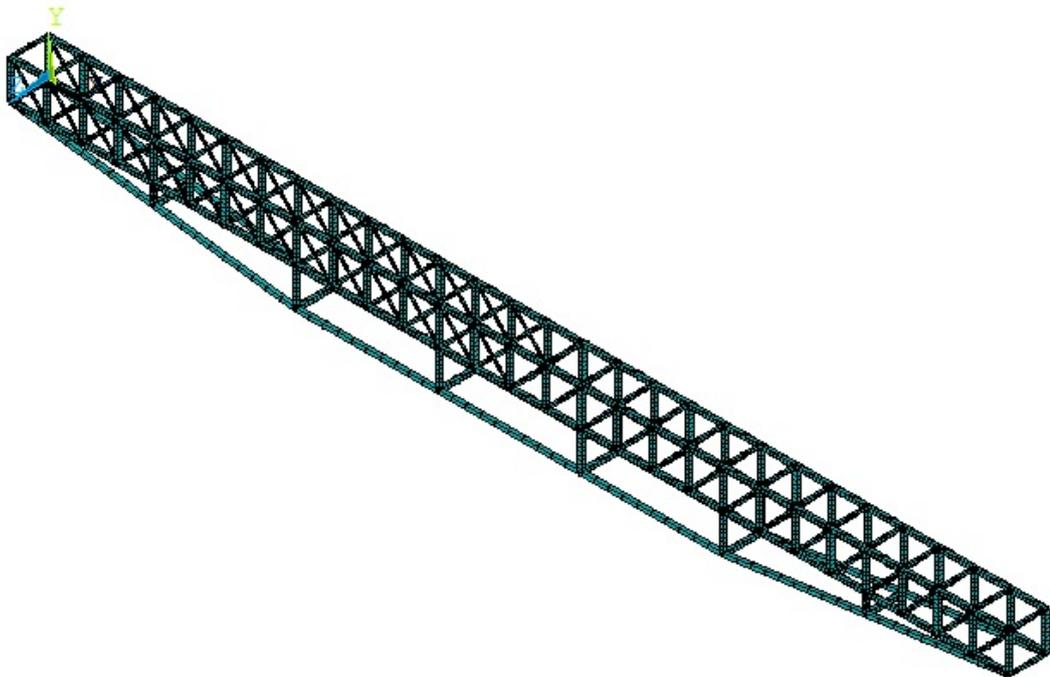


Figura 40 – Elemento BEAM44 [14] aplicados à estrutura

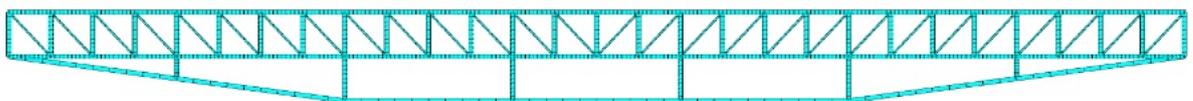


Figura 41 – Vista lateral do modelo [14]

Cabe ressaltar, que na concepção do sistema pedestre-passarela (ou sistema pedestre-estrutura: item 3.3), via método dos elementos finitos, foi adotada uma metodologia de análise centrada no emprego dos modelos biodinâmicos, simulados nesta dissertação como sendo sistemas do tipo “massa-mola-amortecedor”, com um grau de liberdade (S1GL), conforme ilustrado na Figura 18 (Item 3.3).

Os modelos biodinâmicos foram acoplados aos nós do modelo em elementos finitos da passarela mista, formando assim um conjunto denominado comumente de sistema pedestre-passarela (ou pedestre-estrutura), no qual a interação dinâmica existente entre as características dinâmicas dos pedestres (massa, amortecimento e rigidez) e da passarela mista (aço-concreto) é levada em consideração ao longo da análise dinâmica.

6. ANÁLISES ESTÁTICA, MODAL E HARMÔNICA

6.1. Introdução

Neste capítulo serão feitas as análises objeto deste estudo, com o uso do modelo estrutural da estrutura de passarela apresentada no capítulo anterior, com o objetivo de estudar e comparar os efeitos produzidos na estrutura por tipos de carregamento de natureza estática e dinâmica.

Na análise estática, serão feitas as análises de deformação da passarela com o uso do carregamento estabelecido pela norma NBR 7188 [39], com a finalidade de posterior comparação com os resultados das análises dinâmicas de vibração forçada.

Na análise modal, serão obtidas as frequências naturais da estrutura (Autovalores) e seus respectivos modos de vibração (Autovetores), para os modelos obtidos através das duas metodologias de modelagem proposta nesse estudo, através de uma análise de vibração livre feita por modelagem numérico-computacional em elementos finitos com a utilização do software ANSYS [14].

A análise harmônica será realizada com a finalidade de se descobrir os modos de vibração com maior contribuição para a realização da análise dinâmica de vibração forçada.

6.2. Análise modal

A análise modal tem como finalidade a compreensão do comportamento da estrutura na condição de vibração livre. Uma estrutura é considerada em estado de vibração livre quando for perturbada a partir da sua posição de equilíbrio estático e, em seguida, deixada a vibrar, sem qualquer excitação dinâmica externa. Da análise modal é obtida uma resposta importante quanto ao conforto humano na utilização de uma estrutura, no que diz respeito aos valores das frequências naturais do sistema.

No caso específico de uma passarela, a frequência fundamental da estrutura pode ser obtida através da análise em elementos finitos ou por cálculos expeditos fornecidos por manuais e guias técnicos de projetos de estruturas (SETRA [16], HIVOSS [17]). Objetiva-se que o valor da frequência fundamental do modelo seja tão distante quanto possível da frequência do caminhar humano, aproximadamente 2,0

Hz na caminhada normal, para que não ocorra o fenômeno físico da ressonância, ou seja, a amplificação da resposta dinâmica da estrutura devido à sincronia com o carregamento aplicado sobre a estrutura.

6.2.1. Passarela sem os modelos biodinâmicos

Inicialmente foram feitas análises modais da estrutura com o objetivo de compreender a maneira natural de vibrar da mesma, sem a influência da interação pedestre-estrutura.

Através da análise modal em elementos finitos no software ANSYS [14] foram obtidas as dez primeiras frequências da estrutura, conforme pode ser observado na Tabela 8, e seus respectivos modos de vibração.

Tabela 8 – Frequências de vibração da estrutura

Modo	Frequência (Hz)
1	1,94
2	2,27
3	3,07
4	4,67
5	5,62
6	6,69
7	8,48
8	9,24
9	10,61
10	11,12

Como pode ser observado pela Tabela 8, a primeira frequência do conjunto é extremamente baixa e perigosamente próxima da frequência de passo de um pedestre caminhando em condições normais, o que aumenta o risco da ocorrência de desconforto na utilização da estrutura e até mesmo da ocorrência da ressonância com o caminhar dos pedestres sobre a mesma. Nas Figuras 42 a 51, serão apresentados os modos de vibração relacionados com as frequências de vibração da estrutura.

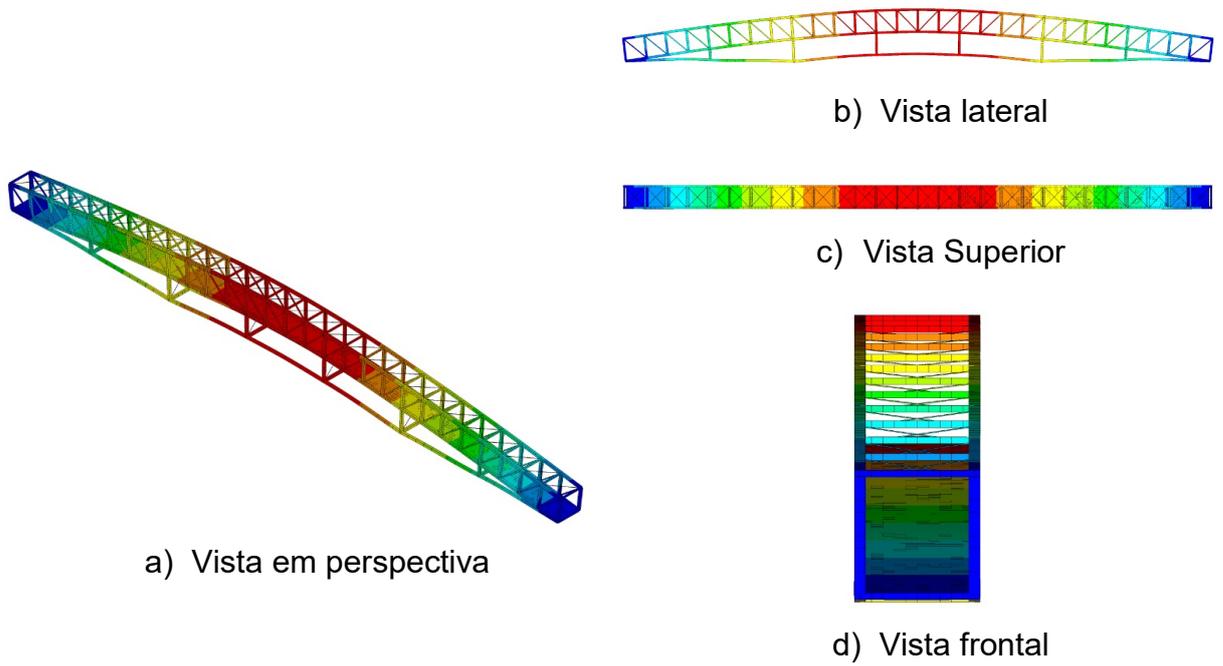


Figura 42 – Primeiro modo de vibração $f_{01} = 1,94\text{Hz}$

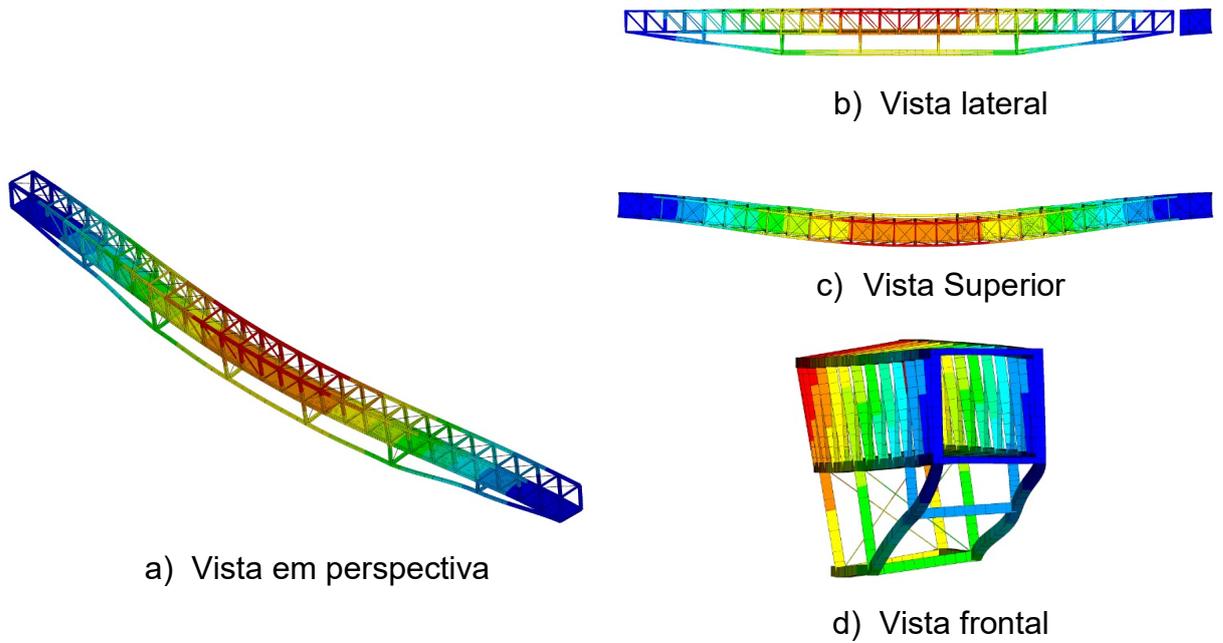


Figura 43 – Segundo modo de vibração $f_{02} = 2,27\text{ Hz}$

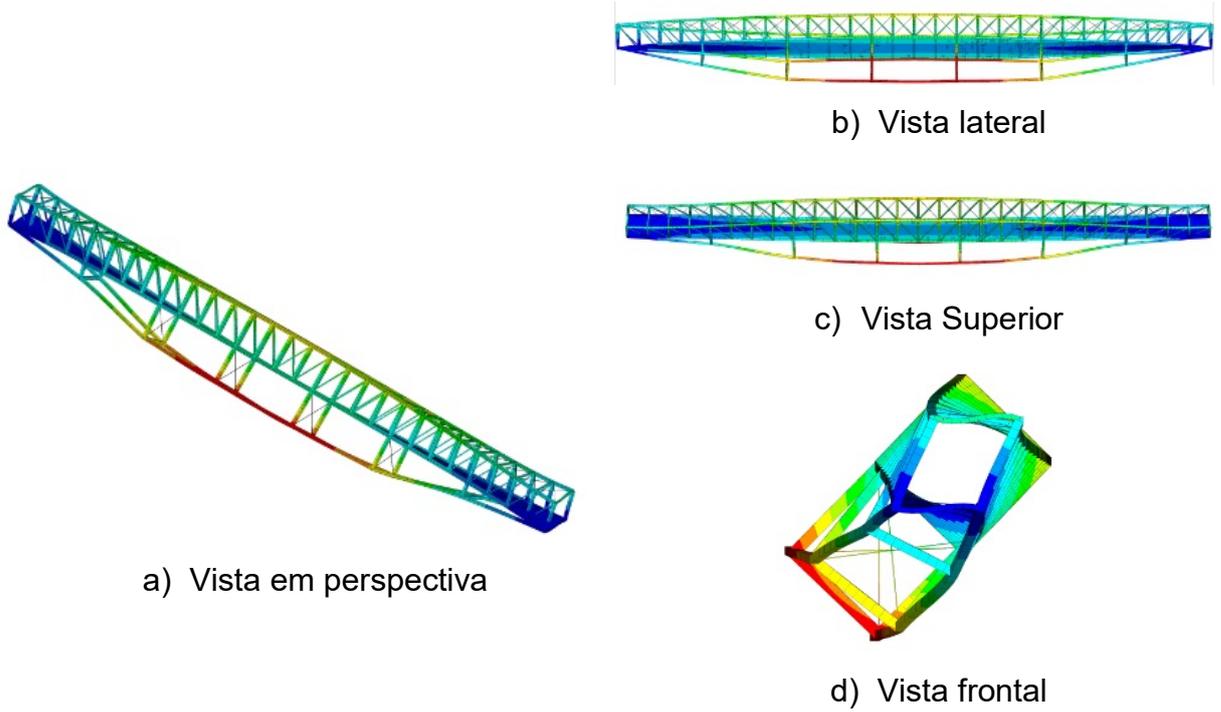


Figura 44 – Terceiro modo de vibração $f_{03} = 3,07$ Hz

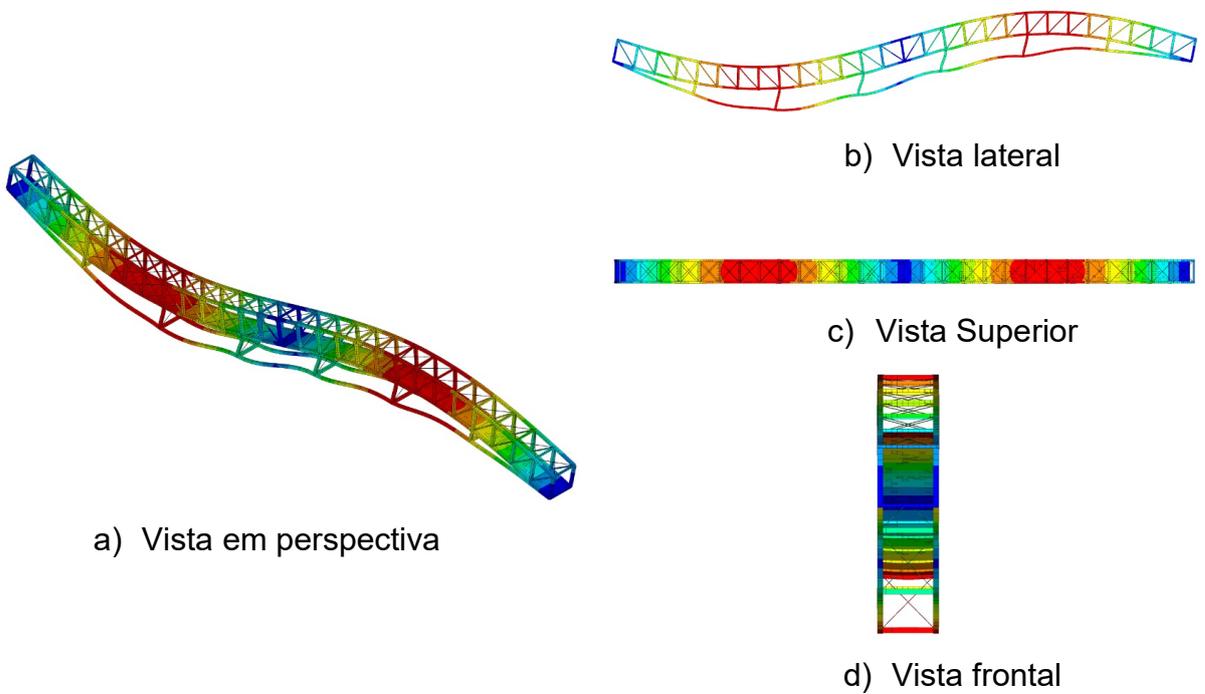


Figura 45 – Quarto modo de vibração $f_{04} = 4,67$ Hz

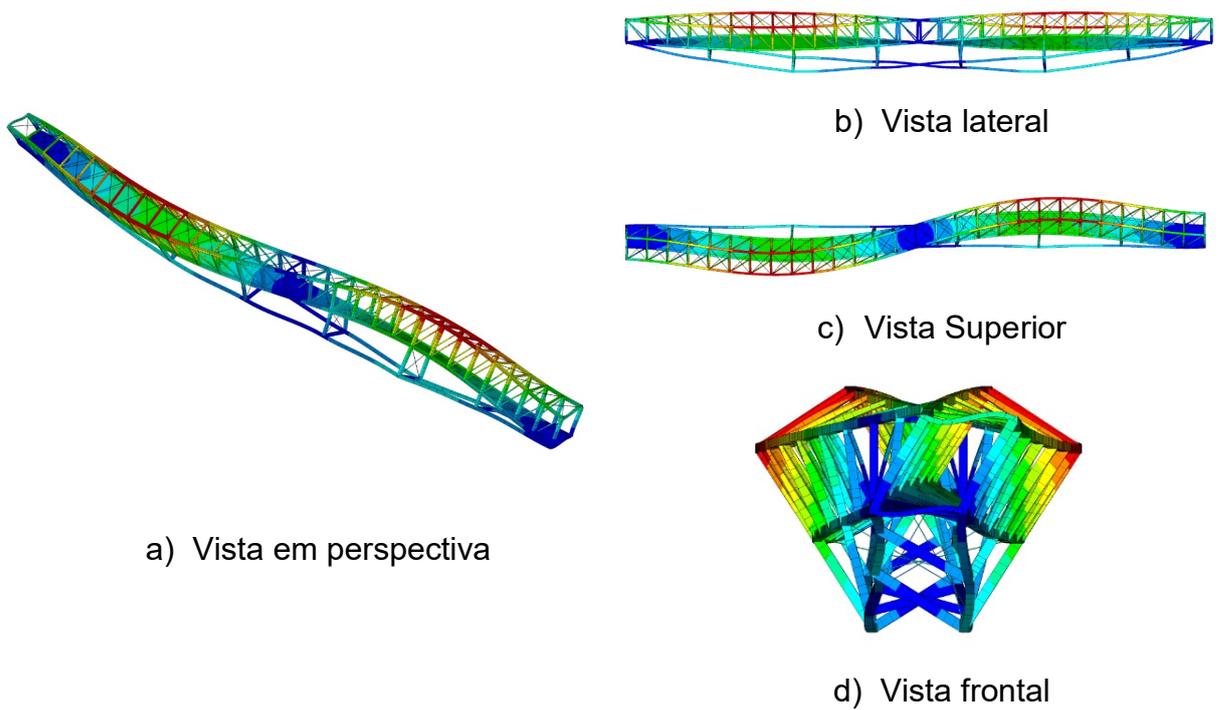


Figura 46 – Quinto modo de vibração $f_{05} = 5,62$ Hz

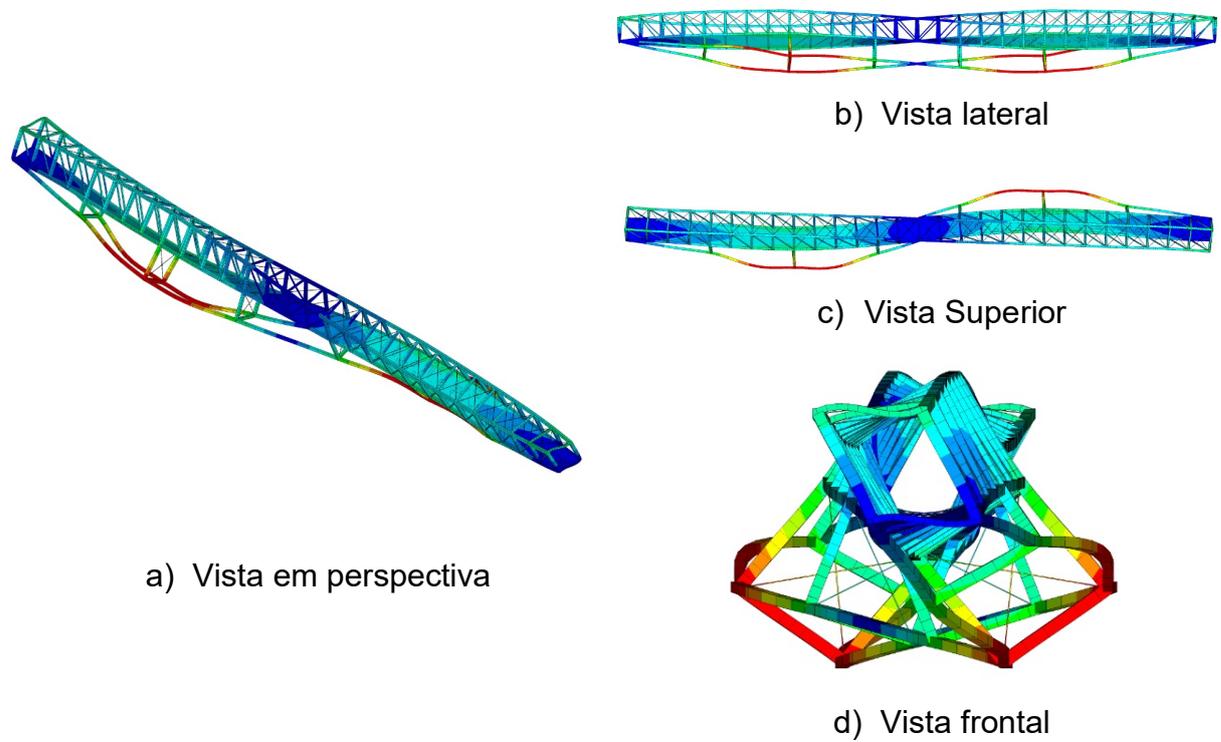


Figura 47 – Sexto modo de vibração $f_{06} = 6,69$ Hz

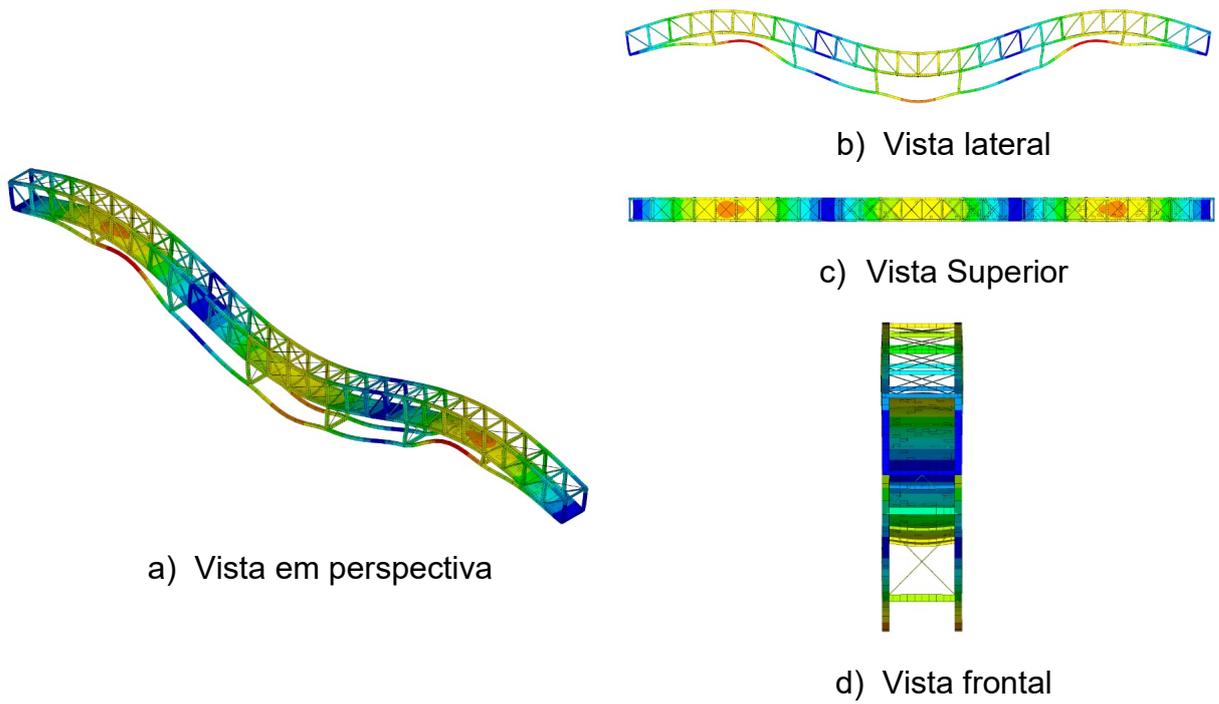


Figura 48 – Sétimo modo de vibração $f_{07} = 8,48 \text{ Hz}$

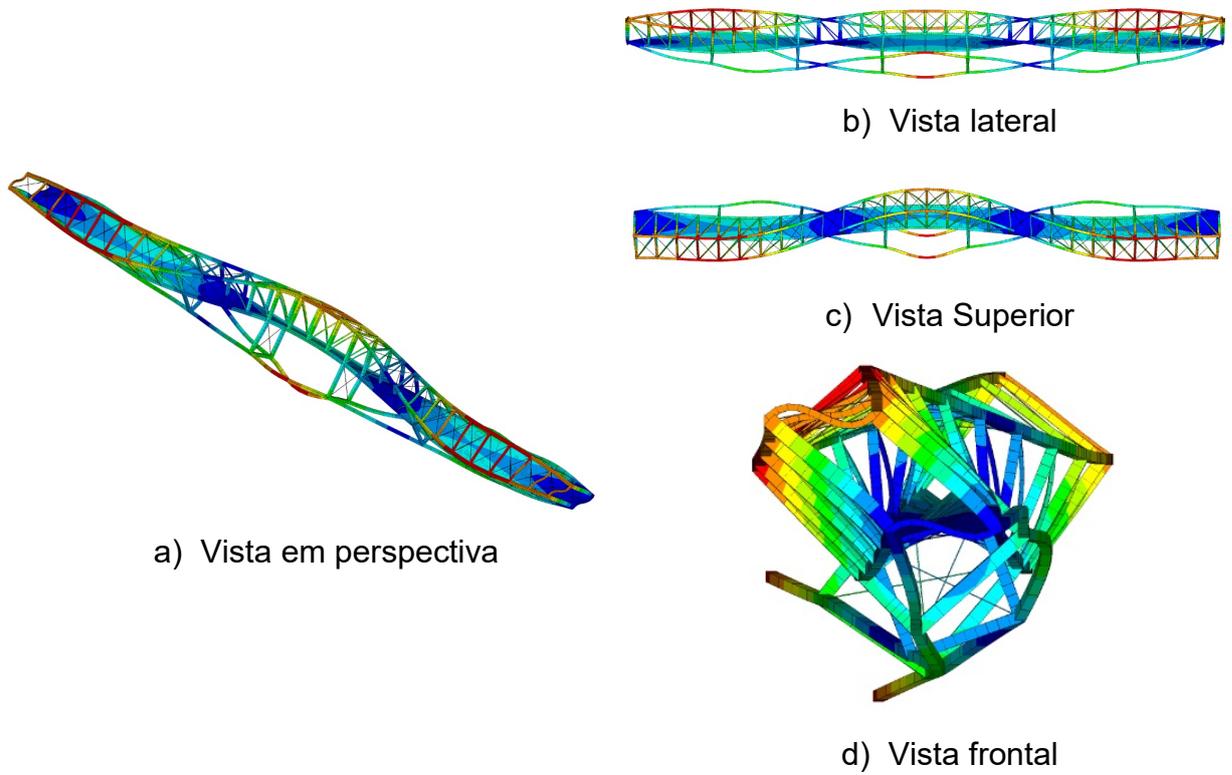


Figura 49 – Oitavo modo de vibração $f_{08} = 9,24 \text{ Hz}$

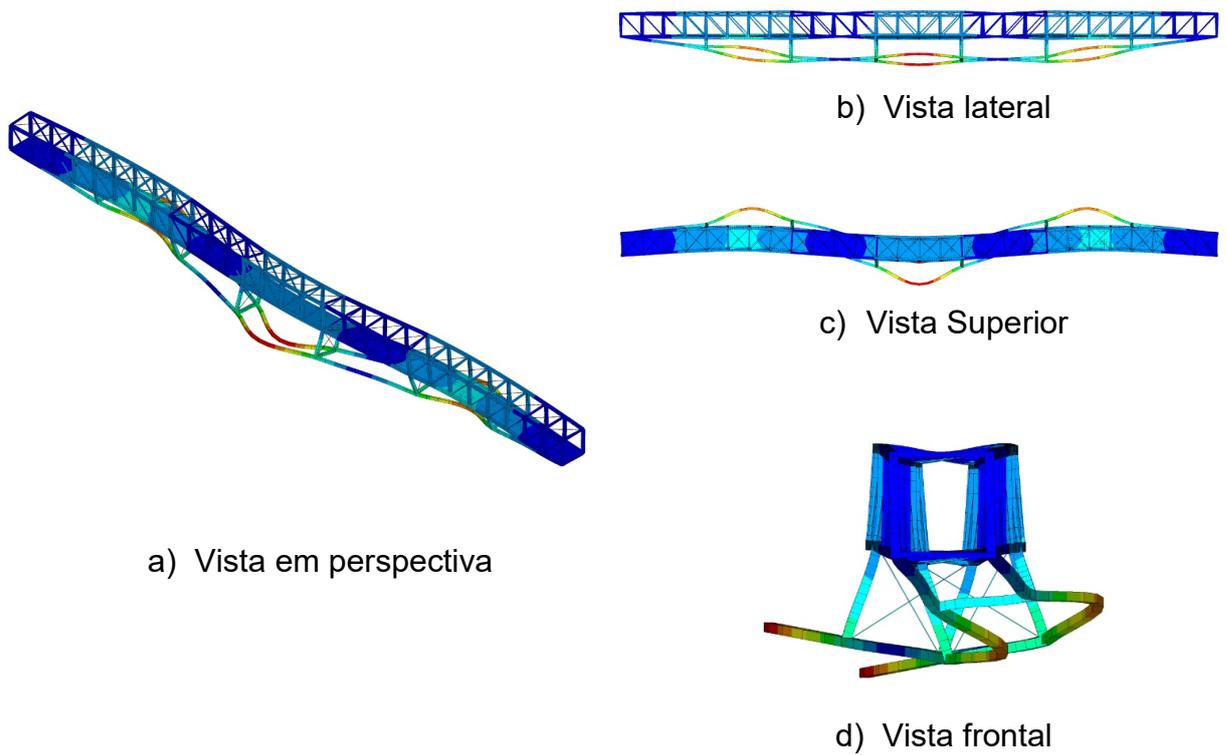


Figura 50 – Nono modo de vibração $f_{09} = 10,61$ Hz

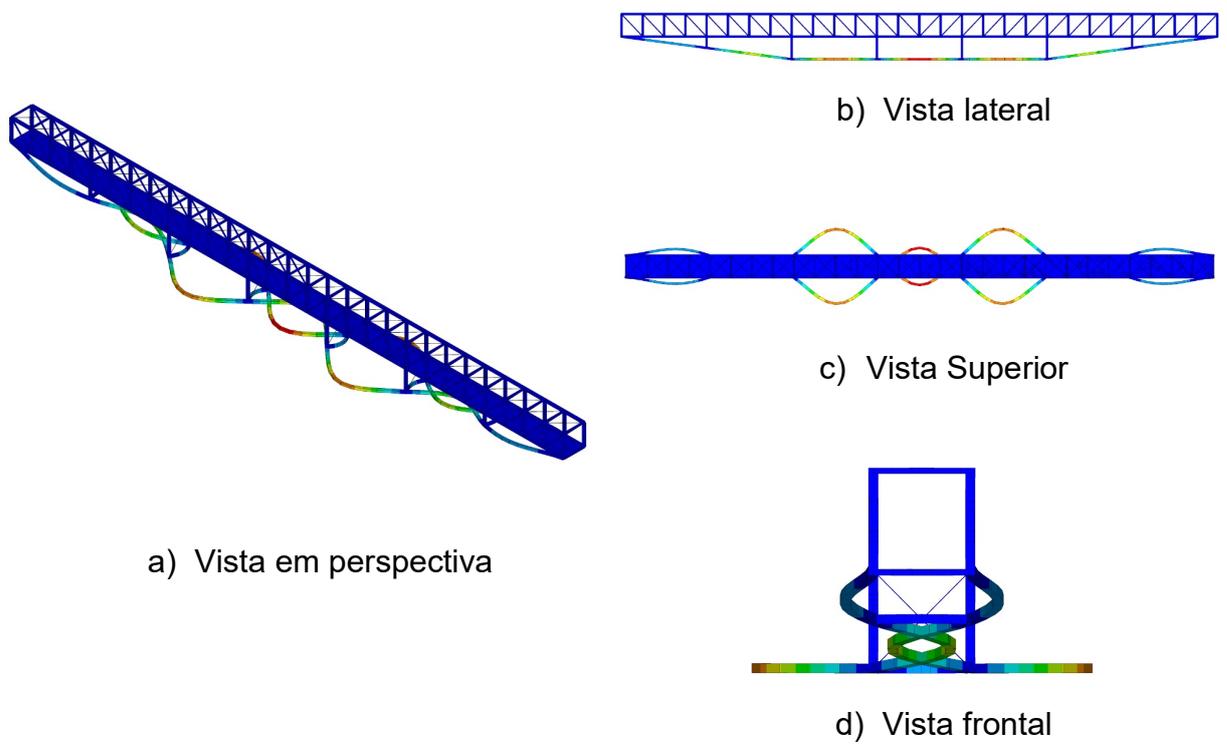


Figura 51 – Décimo modo de vibração $f_{10} = 11,12$ Hz

Na Tabela 9, estão relacionadas as respectivas descrições dos modos de vibração da estrutura.

Tabela 9 – Caracterização dos modos de vibração da estrutura

Figura	Modos	Descrição do tipo do esforço predominante
Figura 42	1	Predominância do efeito de flexão na vertical.
Figura 43	2	Predominância do efeito de flexão na Horizontal
Figura 44	3	Predominância do efeito de flexão na vertical.
Figura 45	4	Predominância do efeito de flexão na Vertical
Figura 46	5	Combinação dos efeitos de flexão na horizontal e torção
Figura 47	6	Predominância dos efeitos de torção
Figura 48	7	Predominância de flexão na vertical
Figura 49	8	Predominância dos efeitos de torção
Figura 50	9	Predominância dos efeitos de flexão na horizontal
Figura 51	10	Predominância dos efeitos de flexão na horizontal nas barras de reforço

Pode-se observar claramente que para o primeiro modo de vibração, predominam os efeitos de flexão no sentido vertical, sendo essa a frequência crítica para a análise de vibração e aceleração de pico vertical. Já no segundo modo de vibração surge o efeito da flexão na horizontal. No terceiro modo de vibração a estrutura sofre torção em torno do eixo longitudinal. No quarto modo de vibração a estrutura volta a sofrer flexão na vertical.

6.2.2. Passarela com a atuação dos modelos biodinâmicos

O sistema massa-mola-amortecedor que simula o corpo humano no modelo em elementos finitos, contribui significativamente o comportamento estrutural de uma estrutura de passarela. Para consideração deste efeito, foram acoplados em pontos específicos da modelagem em elementos finitos elementos com massa, rigidez de mola e amortecimento, para simulação de um sistema com um grau de liberdade, e propriedades de acordo com o estudo de Silva [36], resumidos na

Os dados da Tabela 11 demonstram que a primeira frequência da estrutura diminui com o acréscimo gradual de pedestres à estrutura, conforme pode ser visto na Figura 52, enquanto as outras duas frequências dos modos onde ocorre predominância de esforços na vertical, os modos 4 e 7, aumentam com o acréscimo gradual de pedestres, conforme Figuras 53 a 54.

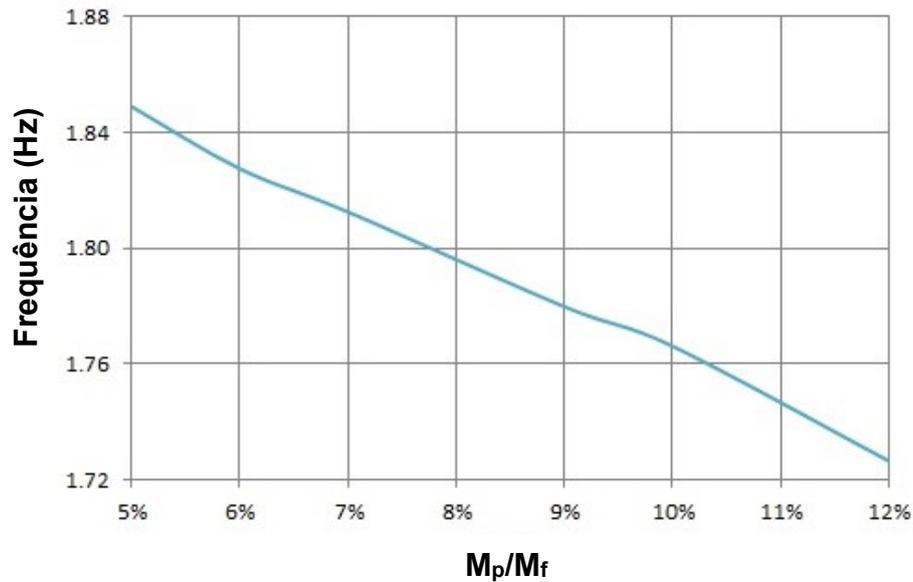


Figura 52 – Variação de f_{01} (Modo 1) com o acréscimo de pedestres

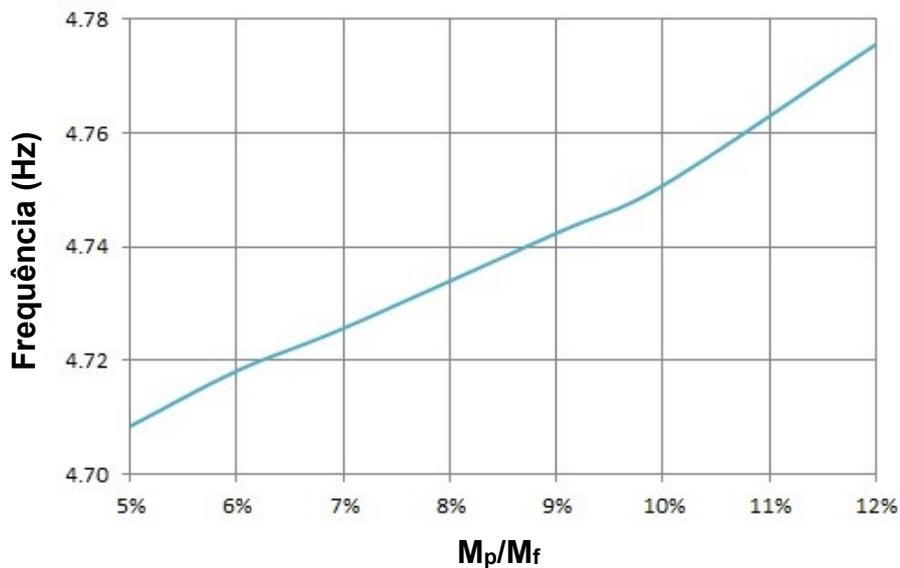


Figura 53 – Variação de f_{04} (Modo 4) com o acréscimo de pedestres

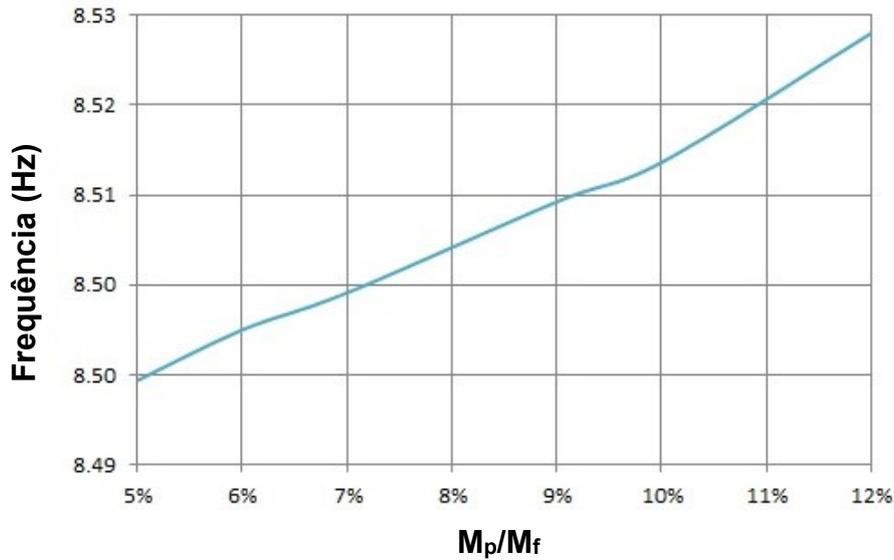


Figura 54 – Variação de f_{07} (Modo 7) com o acréscimo de pedestres

A redução da frequência fundamental da estrutura é explicada em parte pelo aumento significativo da massa modal da estrutura com o aumento do número de pedestres, como mostrado na Tabela 12. Pode-se observar que a variação da frequência estrutural é mais significativa para o primeiro modo, enquanto para os outros modos associados a flexão na vertical a variação da frequência é menos significativa.

Tabela 12 – Variação da massa modal (kg) com o acréscimo de pedestres

Número de pedestres	MODO 1	MODO 4	MODO 7
46	6.977,09	34.978,26	21.861,01
56	7.593,83	34.988,23	21.847,43
70	8.438,03	35.002,74	21.826,99
92	9.865,54	35.041,60	21.809,83
112	10.987,23	35.060,16	21.786,30
140	12.516,35	35.085,51	21.750,36

A Equação (13) [42] mostra a correlação entre as grandezas de massa e amortecimento modal, obtidos das análises em elementos finitos e dispostos nas Tabelas 13 e 14.

$$\omega_i = \frac{c_i}{2\xi_i m_i} \quad (13)$$

Onde:

c_i – amortecimento modal (N.s/m)

ω_i - frequência modal (rad/s)

ξ_i – fator de amortecimento modal (adimensional)

m_i – massa modal (kg)

Tabela 13 – Variação do amortecimento modal (N.s/m)

Número de pedestres	MODO 1	MODO 4	MODO 7
46	1620,97	20698,40	23340,49
56	1749,17	20735,08	23333,40
70	1921,36	20788,54	23325,28
92	2207,98	20881,19	23323,39
112	2425,88	20949,53	23316,57
140	2716,31	21052,86	23300,80

Tabela 14 – Variação da rigidez modal (N/m)

Número de pedestres	MODO 1	MODO 4	MODO 7
46	941.577,62	30.622.262,30	62.299.766,20
56	1.007.222,02	30.720.497,50	62.310.032,40
70	1.094.214,39	30.866.798,50	62.319.923,40
92	1.235.384,55	31.108.073,50	62.361.408,70
112	1.339.083,77	31.298.975,50	62.386.014,80
140	1.473.340,95	31.581.813,80	62.411.270,00

As Figuras 54 a 63 ilustram os modos de vibração obtidos da análise do modelo mais solicitado dentre as situações da Tabela 10, ou seja, para 140

pedestres. Na Tabela 15 estão descritos os esforços predominantes observados associados a cada um dos dez primeiros modos de vibração da estrutura.

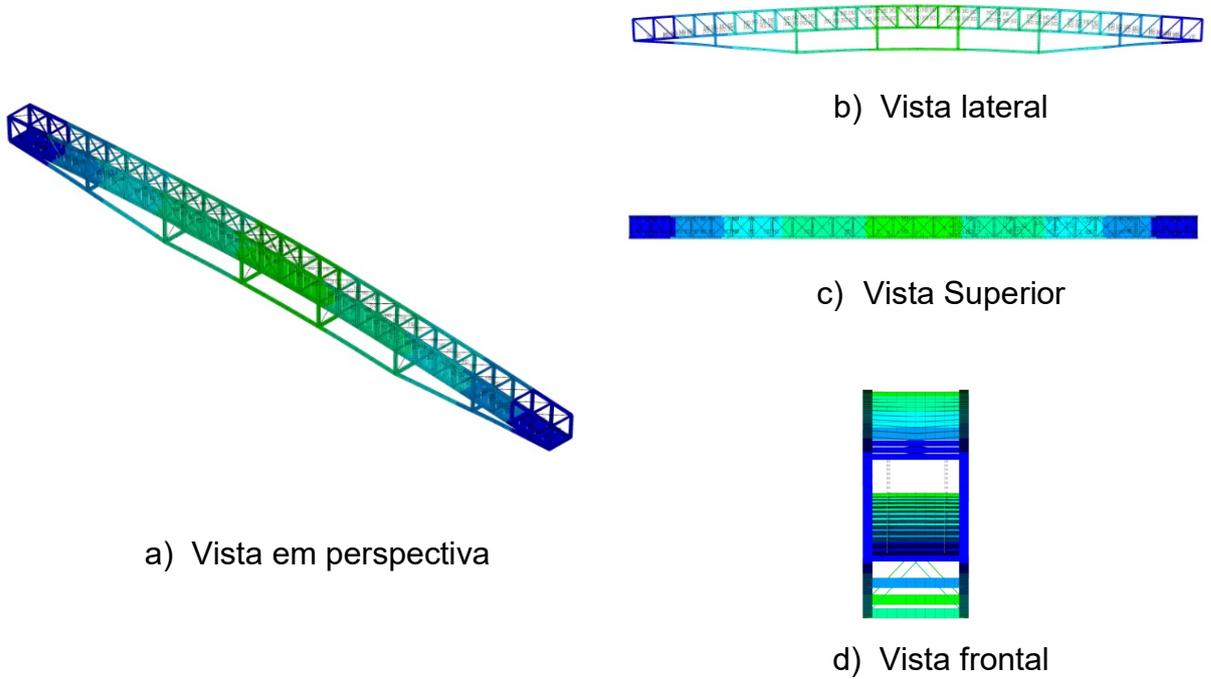


Figura 55 – Primeiro modo de vibração $f_{01} = 1,73$ Hz

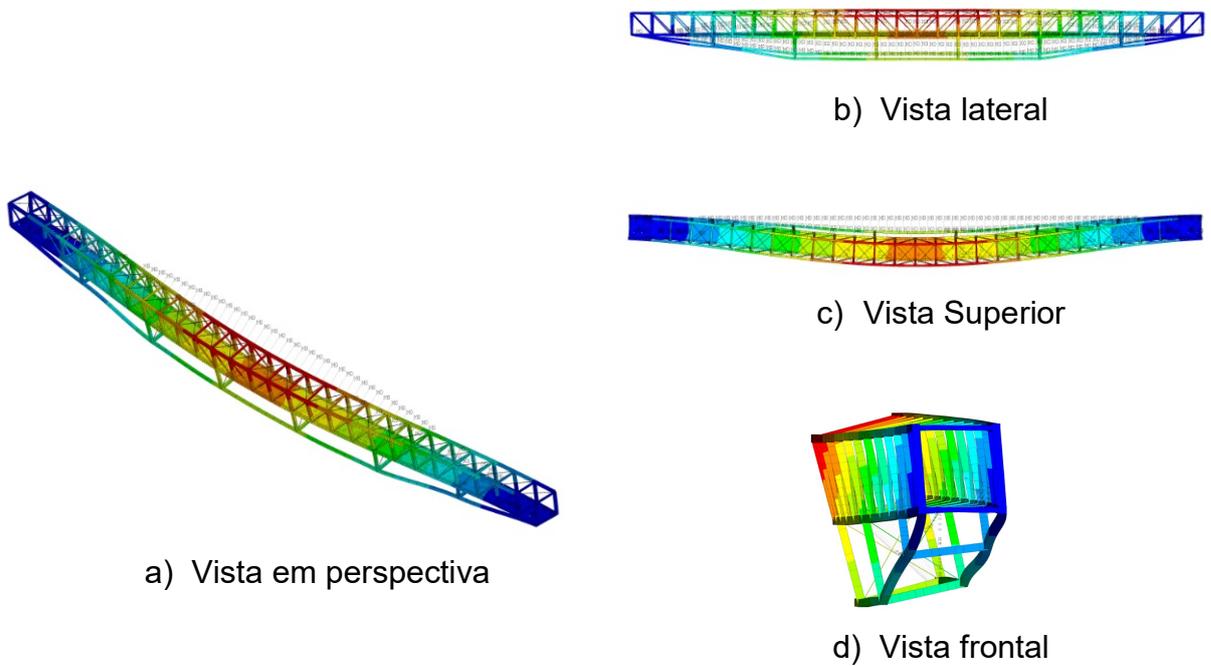


Figura 56 – Segundo modo de vibração $f_{02} = 2,26$ Hz

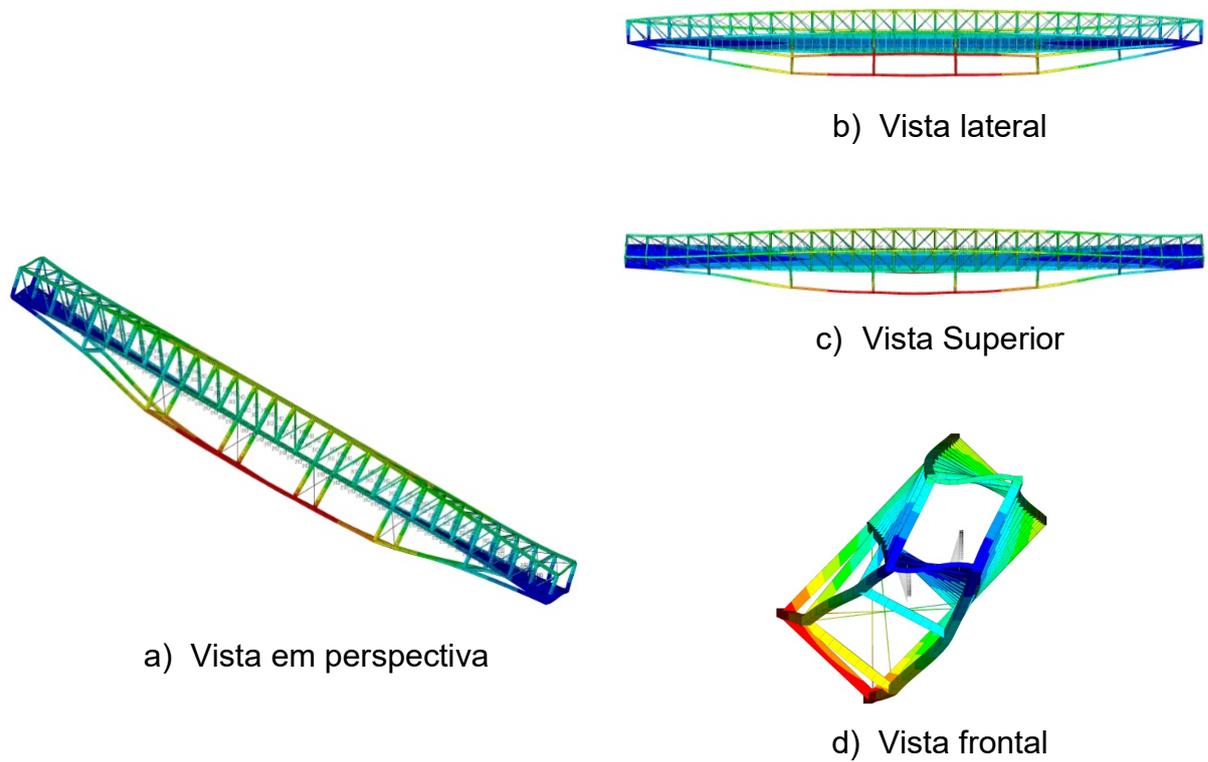


Figura 57 – Terceiro modo de vibração $f_{03} = 3,10$ Hz

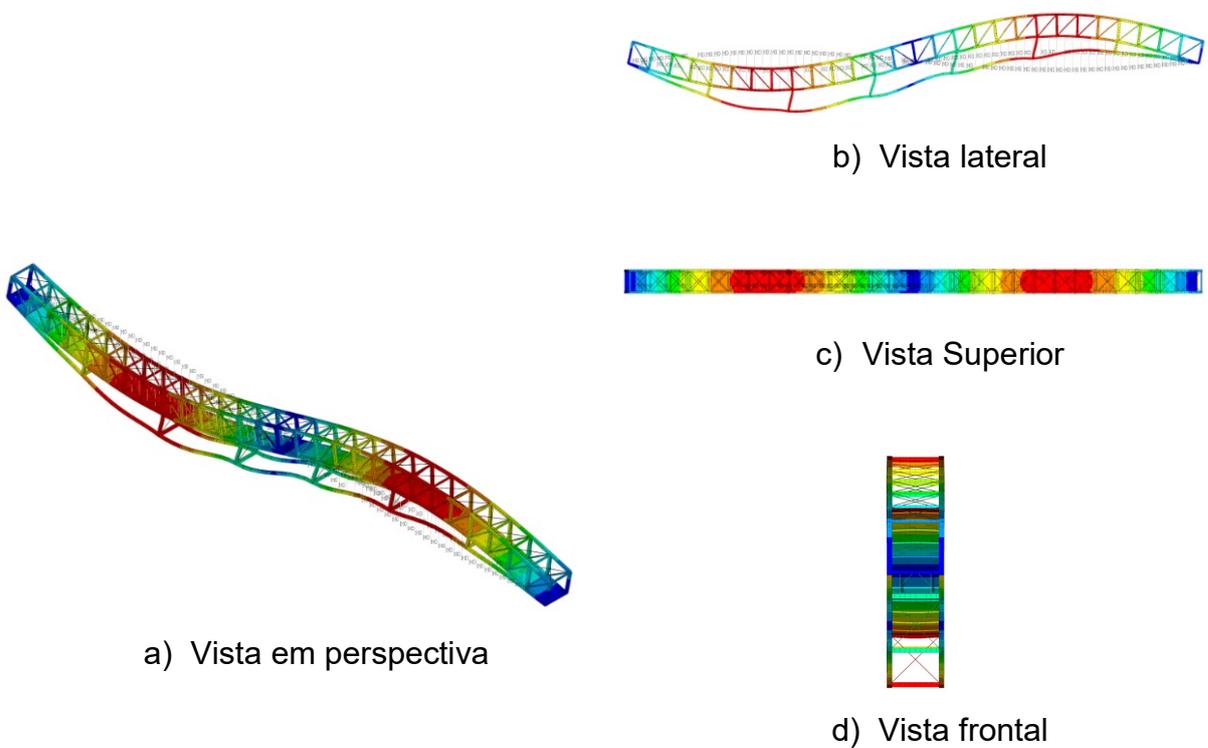


Figura 58 – Quarto modo de vibração $f_{04} = 4,77$ Hz

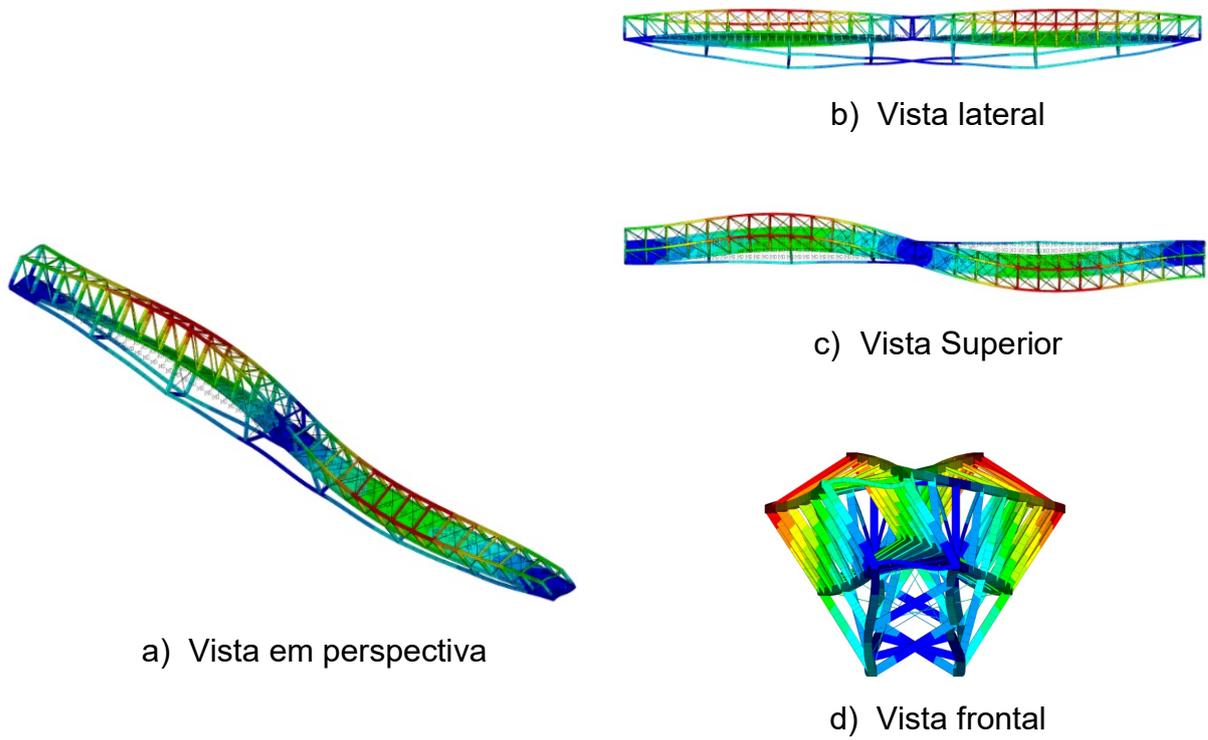


Figura 59 – Quinto modo de vibração $f_{05} = 5,60$ Hz

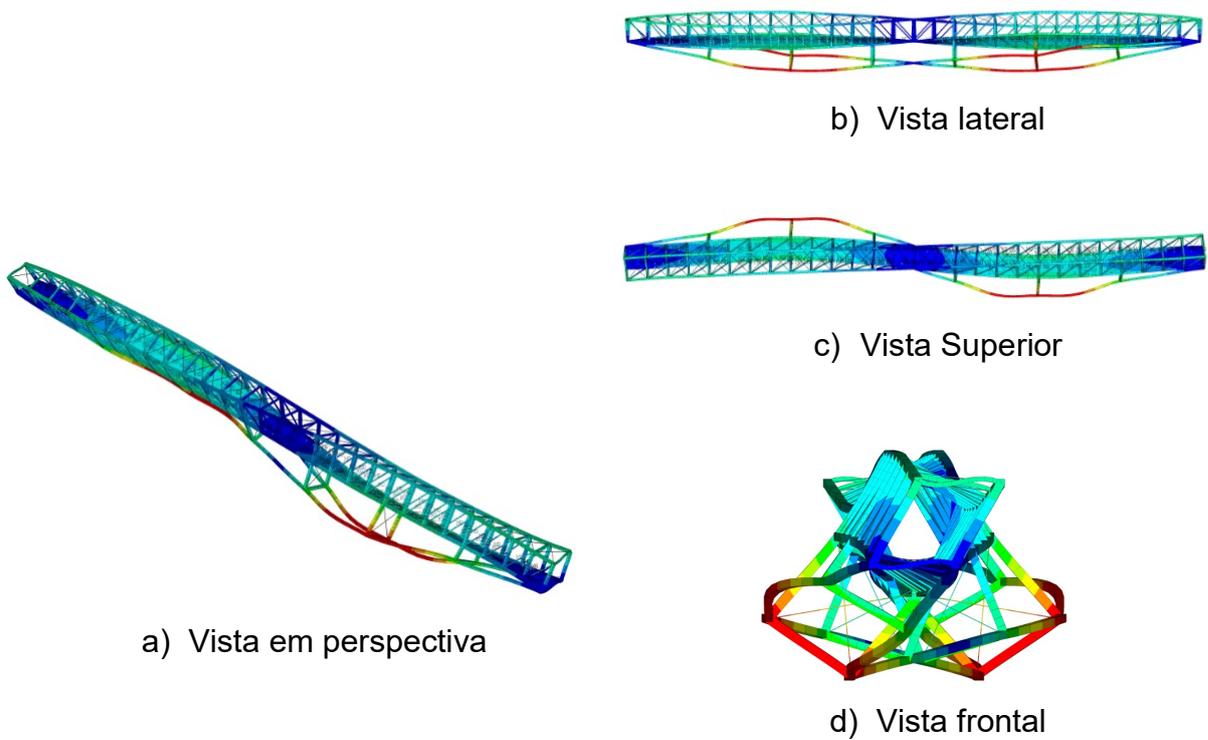


Figura 60 – Sexto modo de vibração $f_{06} = 6,78$ Hz

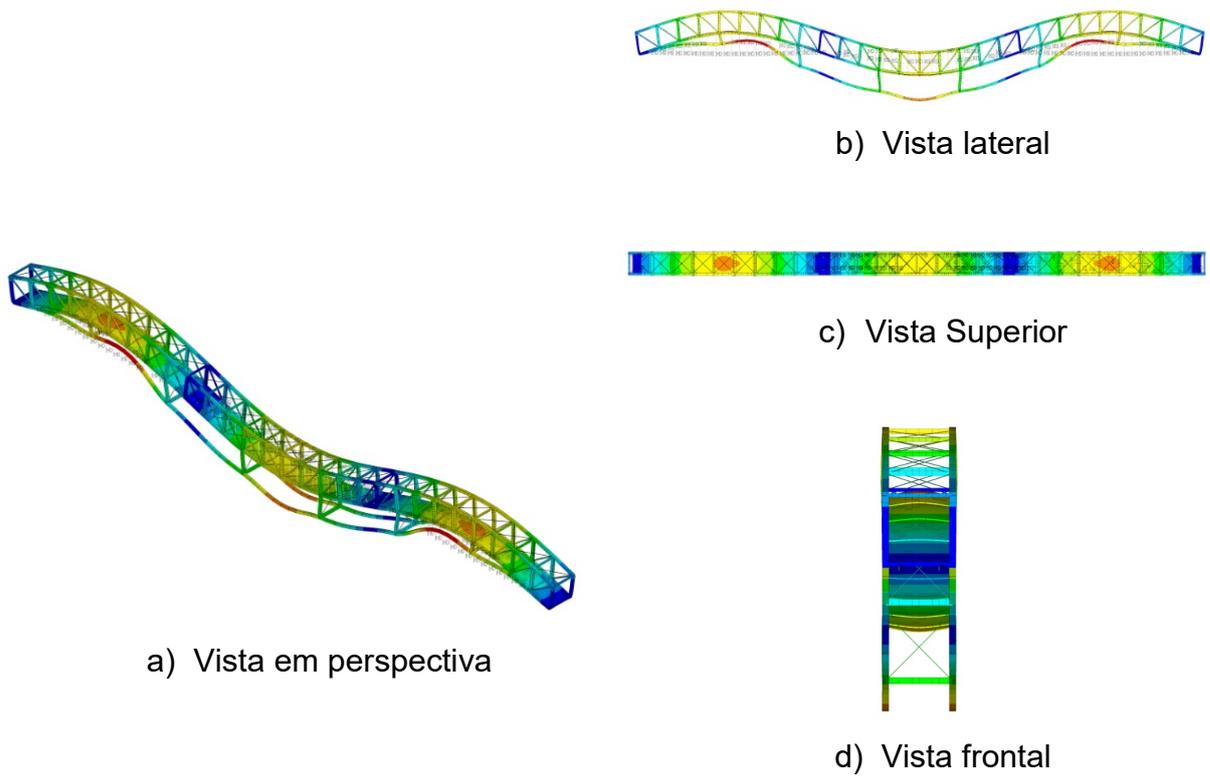


Figura 61 – Sétimo modo de vibração $f_{07} = 8,52$ Hz

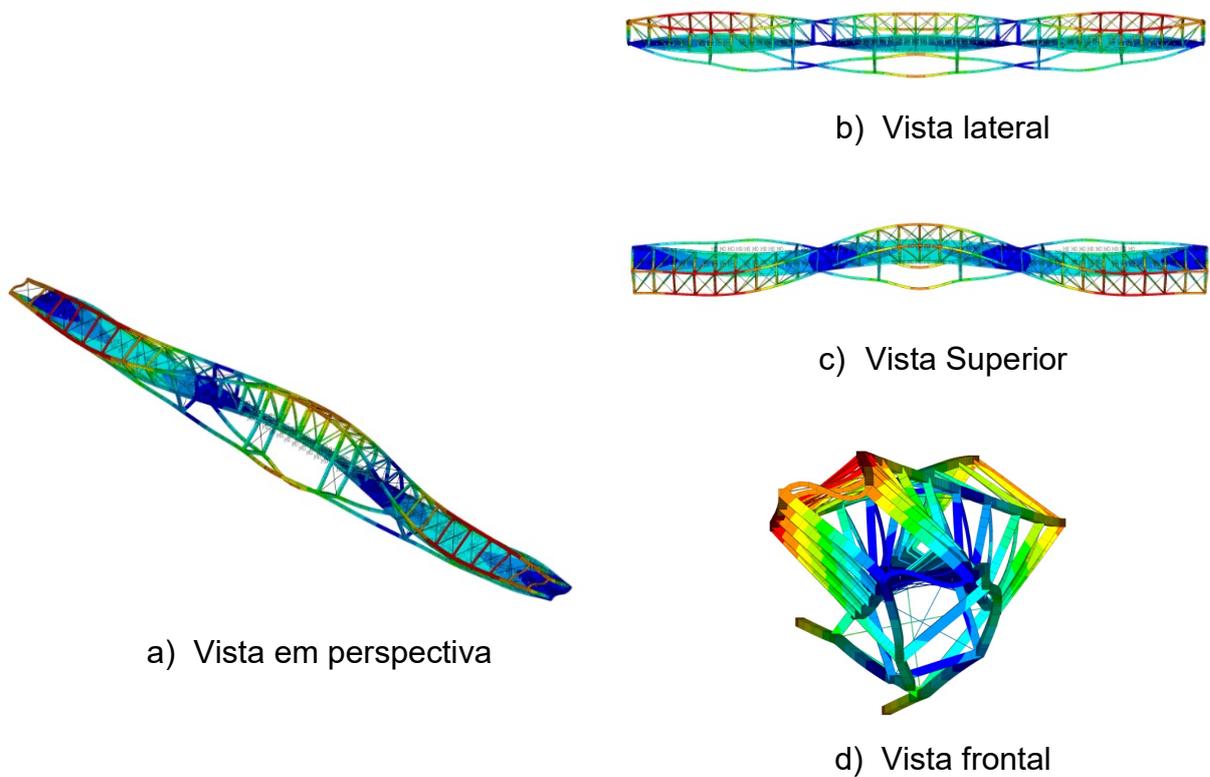


Figura 62 – Oitavo modo de vibração $f_{08} = 9,18$ Hz

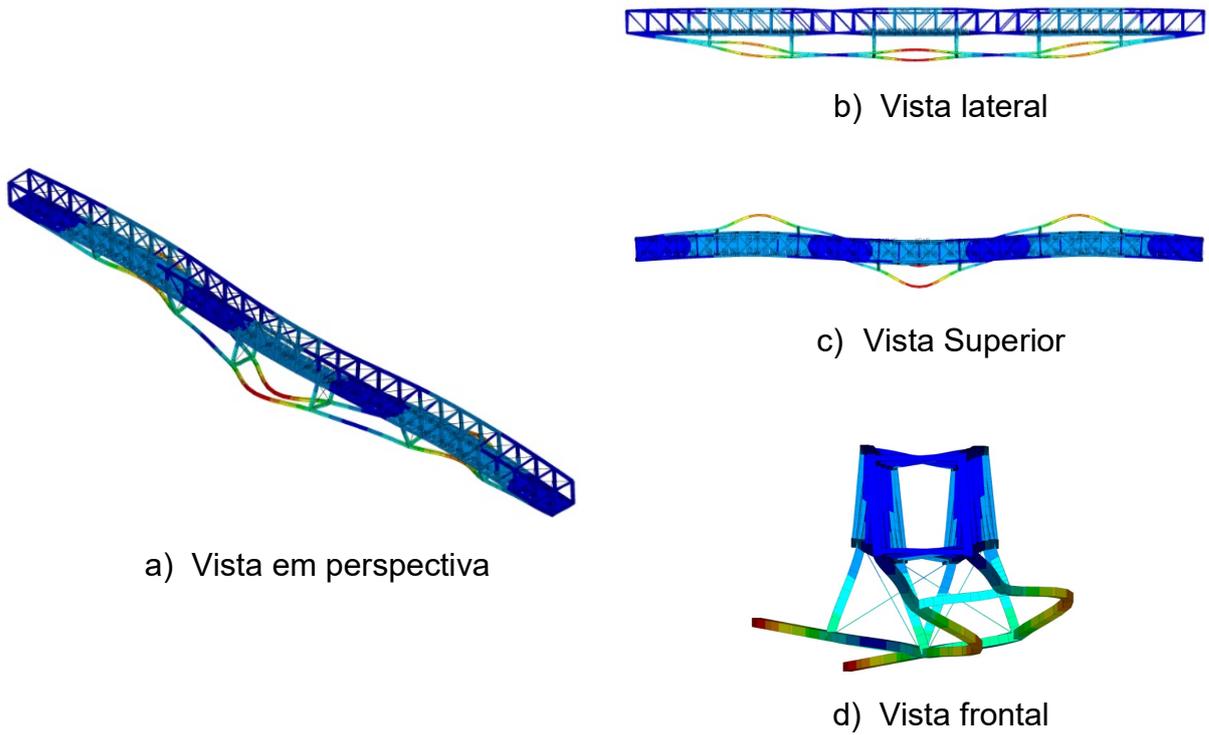


Figura 63 – Nono modo de vibração $f_{09} = 10,61\text{Hz}$

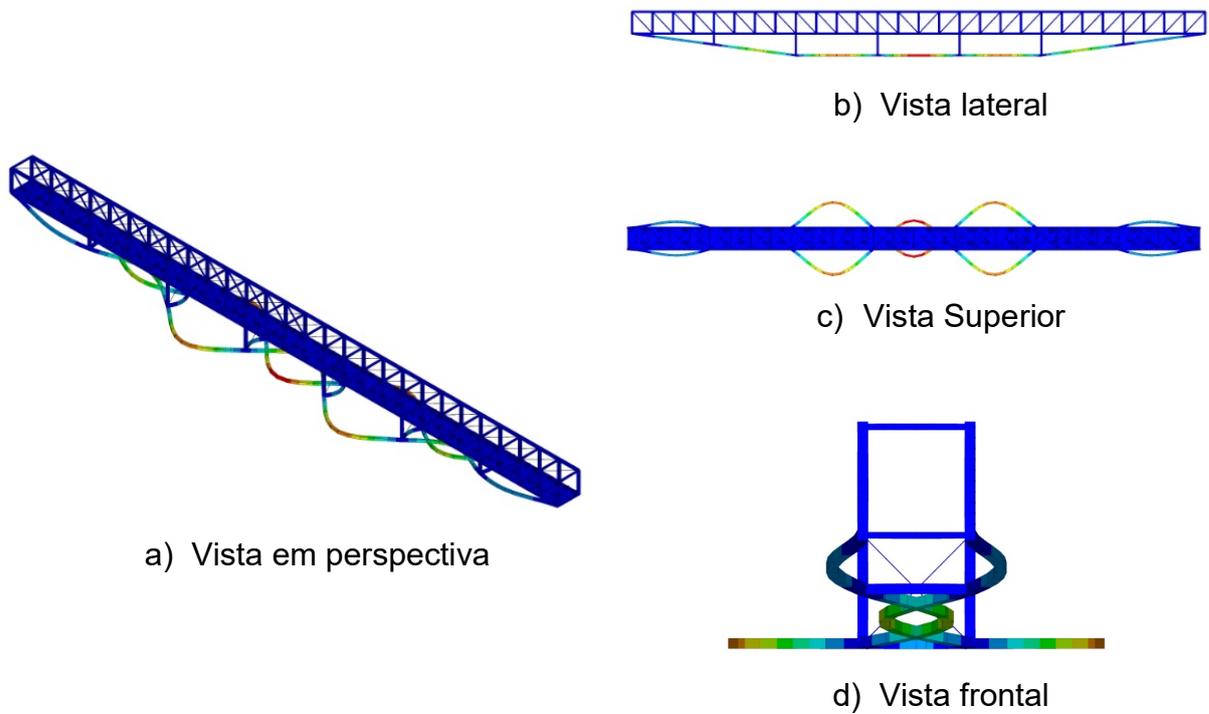


Figura 64 – Décimo modo de vibração $f_{10} = 11,12\text{ Hz}$

Tabela 15 – Descrição dos modos de vibração da estrutura

Figura	Modos	Descrição do tipo do esforço predominante
Figura 42	1	Predominância do efeito de flexão na vertical.
Figura 43	2	Predominância do efeito de flexão na Horizontal
Figura 44	3	Predominância do efeito de torção
Figura 45	4	Predominância do efeito de flexão na Vertical
Figura 46	5	Combinação dos efeitos de flexão na horizontal e torção
Figura 47	6	Predominância dos efeitos de torção
Figura 48	7	Predominância de flexão na vertical
Figura 49	8	Predominância dos efeitos de torção
Figura 50	9	Predominância dos efeitos de flexão na horizontal nas barras de reforço
Figura 51	10	Predominância dos efeitos de flexão na horizontal nas barras de reforço

As análises modais com a consideração do efeito que o pedestre exerce sobre o comportamento dinâmico da estrutura é fundamental para a compreensão do funcionamento da interação biodinâmica entre os dois elementos. Analisando os gráficos das Figuras 55 a64, percebe-se que para o primeiro harmônico a frequência de vibração da estrutura diminui com o aumento do número de pedestres, enquanto para os modos 4 e 7, correspondentes ao segundo e terceiro harmônico, as frequências aumentam juntamente com o número de pessoas. Essa mudança é em parte explicada pela grande variação da massa modal da estrutura com o aumento do número de pedestres.

Pode-se observar a partir das ilustrações apresentadas que para os modos onde há predominância do efeito de flexão na vertical, ou seja, os modos 1, 4 e 7, com um, dois e três harmônicos respectivamente, para o primeiro modo as molas estão atuando no sentido de intensificar o deslocamento da estrutura, assim desfavorecendo o sistema estrutural e reduzindo sua frequência fundamental. Nos modos seguintes, as molas atuaram no sentido de restringir o movimento da estrutura e contribuindo assim com o amortecimento e o aumento da rigidez da passarela.

A Tabela 17 mostra a comparação entre os valores das frequências de vibração recomendadas pelos principais guias internacionais de projeto utilizados neste trabalho, SETRA [16] e HIVOSS[17], assim como o recomendado pela norma nacional NBR 6118[4], para estruturas de passarela de pedestres.

Tabela 16 – Recomendações dos guias internacionais de projeto

Método	f_{01} (Hz)
AISC	> 2,40 ou < 1,66
SETRA	> 2,10 ou <1,70
HIVOSS	> 2,3 ou <1,25
NBR 6118	> 2,40 ou < 1,66

Os resultados expostos na Tabela 16 mostram que os valores encontrados para a frequência natural da passarela, $f_{01} = 1,73$ Hz para o modelo com interação pedestre-estrutura, para 140 pedestres, e $f_{01} = 1,94$ Hz sem a acoplagem dos sistemas S1GL, se encontram fora dos limites recomendados pelos guias de projeto.

6.3. Análise Harmônica

Inicialmente, foi realizada uma análise estática para efeito de comparação futura com a o resultado da análise harmônica. Segundo a NBR 7188 [39] sobre cargas móveis para pontes e passarelas, existe uma classe única para as passarelas, na qual a carga móvel é uma carga uniformemente distribuída de intensidade $p = 5\text{kN/m}^2$ (500kgf/m^2), não majorada pelo coeficiente de impacto. A análise com a aplicação deste carregamento tem como objetivo simular o efeito do caráter dinâmico do caminhar humano através de uma análise estática.

Na análise a estática utilizou-se a sobrecarga citada anteriormente, com o acréscimo de 1kN/m^2 para levar e consideração os revestimentos e a cobertura da passarela e como resultado, obteve-se uma flecha no centro do vão de aproximadamente 20,2cm, conforme ilustrado nas Figuras 65 e 66.

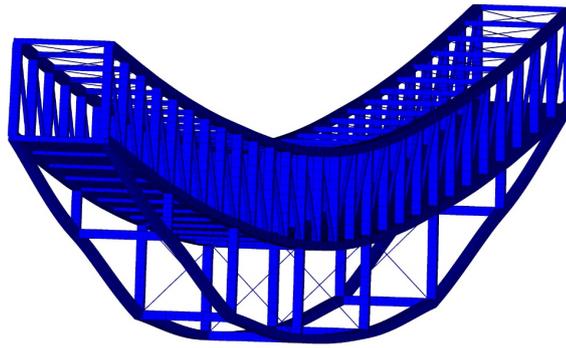


Figura 65 – Flecha no centro do vão da estrutura

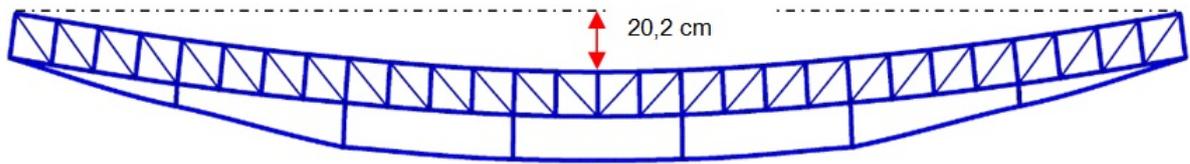


Figura 66 – Flecha no centro do vão da estrutura

Considerando-se a contraflecha de 30 cm, a estrutura cumpre, com folga, o critério de verificação por deformação vertical estabelecido pela norma NBR 8800 [38].

Na análise harmônica será aplicada uma carga de 800N equivalente o peso e um pedestre, em um ponto crítico da estrutura, obtido através da análise modal, para em seguida ser analisado o comportamento desse carregamento atuando de maneira harmônica na estrutura e comparados os resultados com a análise estática feita anteriormente. Para tanto, fez-se variar a frequência de carregamento em um intervalo de 0 a 12 Hz, com um incremento de 0,05 Hz.

Uma vez obtido o espectro de frequência dos deslocamentos nodais, juntamente com o valor do deslocamento vertical devido ao carregamento estático, é obtido o Fator de Amplificação Dinâmica (FAD), através do quociente entre o deslocamento dinâmico e o deslocamento estático. Conforme pode ser visto na Figura 67, que mostra o gráfico de FAD em função do parâmetro de frequência, β , representativo do quociente entre a frequência de excitação, ω , e a frequência fundamental, ω_0 , da estrutura analisada, para a situação natural, ou seja, sem acoplagem dos modelos biodinâmicos.

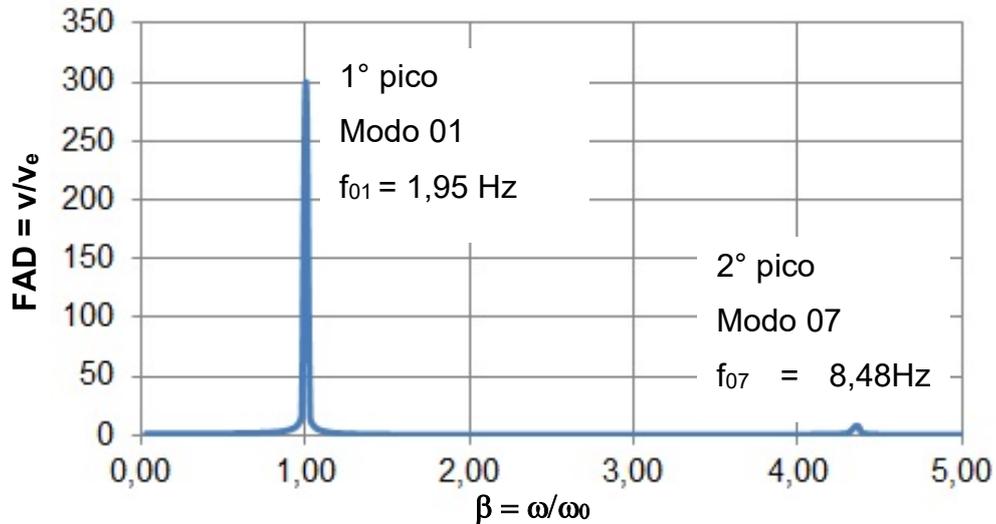


Figura 67 – Fator de amplificação dinâmica (FAD) em função do parâmetro de frequência, β , para a estrutura sem os modelos biodinâmicos.

Da mesma maneira, a análise foi feita para o modelo com acoplamento dos modelos biodinâmicos, na situação mais carregada a ser estudada, para 140 pedestres, conforme pode ser visualizado na Figura 68.

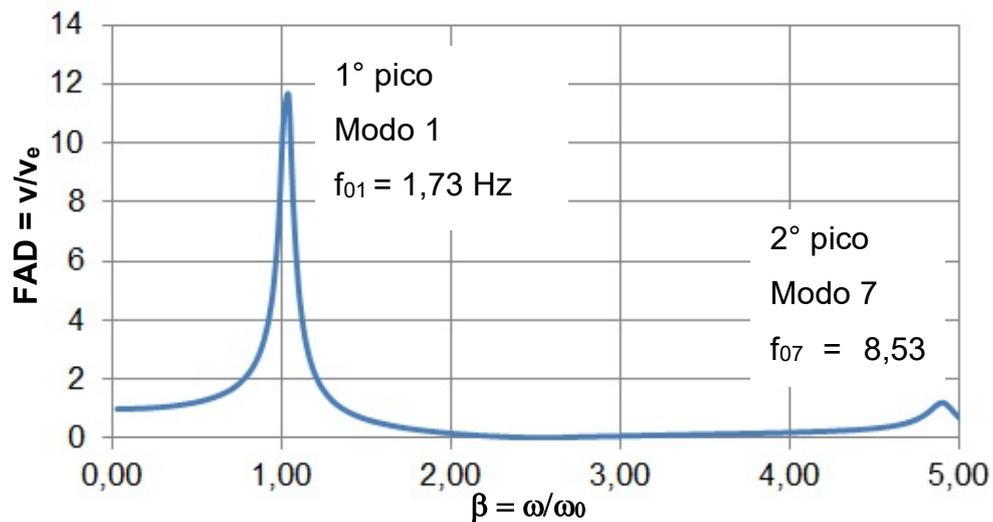


Figura 68 – Fator de amplificação dinâmica (FAD) em função do parâmetro de frequência, β , para a estrutura com os modelos biodinâmicos

Das análises harmônicas ilustradas nas Figuras 67 e 68, conclui-se que os modos que mais contribuem para a ocorrência do fenômeno da ressonância são os modos 1 e 7, com frequências de 1,95 e 8,48 Hz respectivamente e 1,73 e 8,53 Hz para os modelos com biodinâmico, na situação de análise com 140 pedestres.

7. ANÁLISES DE VIBRAÇÃO FORÇADA

7.1. Introdução

Este capítulo apresenta os resultados obtidos das análises dinâmicas de vibração forçada, que simulam o efeito do caminhar humano sobre a estrutura. Para tal, foram utilizadas duas estratégias de análise: modelagem com base no emprego dos modelos biodinâmicos (efeito da interação pedestre-estrutura) e modelagem tradicional mediante a utilização dos modelos de “força dura” proposto por Bachmann e Ammann [18].

Para as análises de vibração forçada, a frequência de passo dos pedestres (primeiro harmônico da excitação dinâmica), foi colocada em ressonância com a frequência fundamental da passarela. O coeficiente de amortecimento estrutural foi considerado como sendo igual a 1% ($\xi=0,01$) [29].

Busca-se avaliar o comportamento da estrutura quando submetida a um carregamento dinâmico de multidão, e o efeito da interação pedestre-estrutura no amortecimento do sistema estrutural e sua influência sobre o valor da aceleração de pico (a_p) da passarela, parâmetro este utilizado na avaliação do grau de conforto humano. Os valores das acelerações de pico são comparados com os valores limites de normas de projeto SÉTRA [16] e HIVOSS [17].

As análises foram realizadas com o uso do programa computacional ANSYS [14], e os resultados destas são obtidos em termos de deslocamentos verticais e acelerações máximas e mínimas no meio do vão, provenientes do carregamento variável.

7.2. Caminhada lenta, normal e rápida

Devido à proximidade da frequência de passo do pedestre com a frequência natural da estrutura investigada, e a gradual redução desta frequência natural com o emprego do modelo biodinâmico, faz-se necessária uma investigação na qual sejam variadas as características de velocidade e frequência de passo do pedestre, para uma avaliação mais realística da resposta da estrutura. Esses dados serão variados conforme proposto por Bachmann [18], para caminhadas lenta, normal e rápida,

conforme mostrado na Tabela 1 (item 3.2). Desta maneira, foram realizadas análises de vibração forçada, considerando as duas estratégias de modelagem propostas.

7.3. Situações de carregamento

Inicialmente foram realizadas análises com base no emprego de 46 pedestres espaçados em 1,47m, 56 pedestres espaçados em 1,25m e 70 pedestres espaçados em 1,00 m respectivamente, em uma fileira apenas, caminhando no centro da passarela, na mesma direção e com velocidade constante, conforme ilustrado na Figura 69.

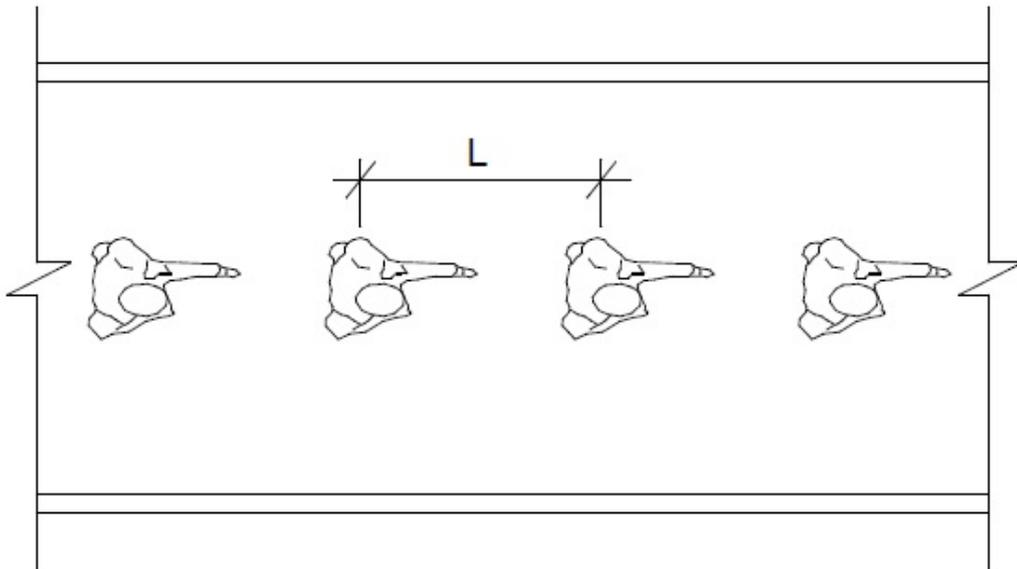


Figura 69 – Uma fileira de pedestres espaçados em L metros

Em seguida foram analisadas situações de carregamento considerando-se duas fileiras de pedestres caminhando sobre o tabuleiro da passarela, com igual espaçamento, resultando em uma quantidade de pedestres igual a 92, 112 e 140, respectivamente, com velocidade de passo constante e se movendo na mesma direção, com igual comprimento de passo, conforme apresentado na Figura 70 e de acordo com o apresentado na Tabela 10 (item 6.2.1).

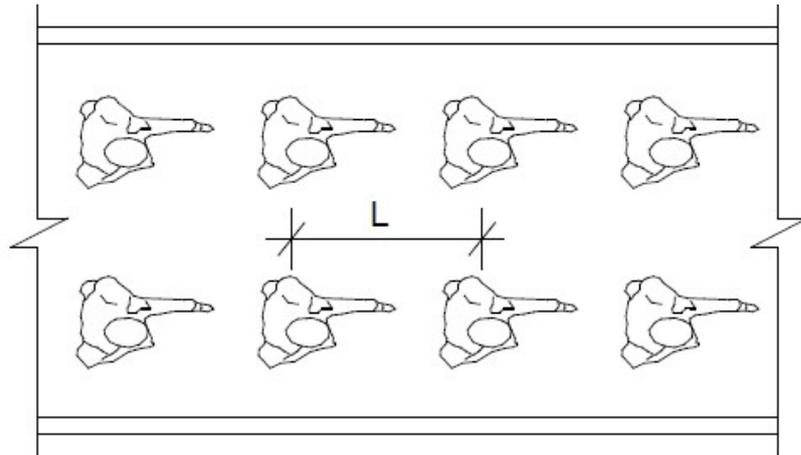


Figura 70 - Duas fileiras de pedestres espaçados em L metros

7.4. Caminhada lenta

A caminhada lenta consiste no transito de pedestres com frequência de passo f_p igual a 1,7 Hz, conforme apresentado na Tabela 1 (item 3.2) A comparação dos resultados de aceleração de pico no ponto central da estrutura pode ser visualizada nas figuras 71 a 76.

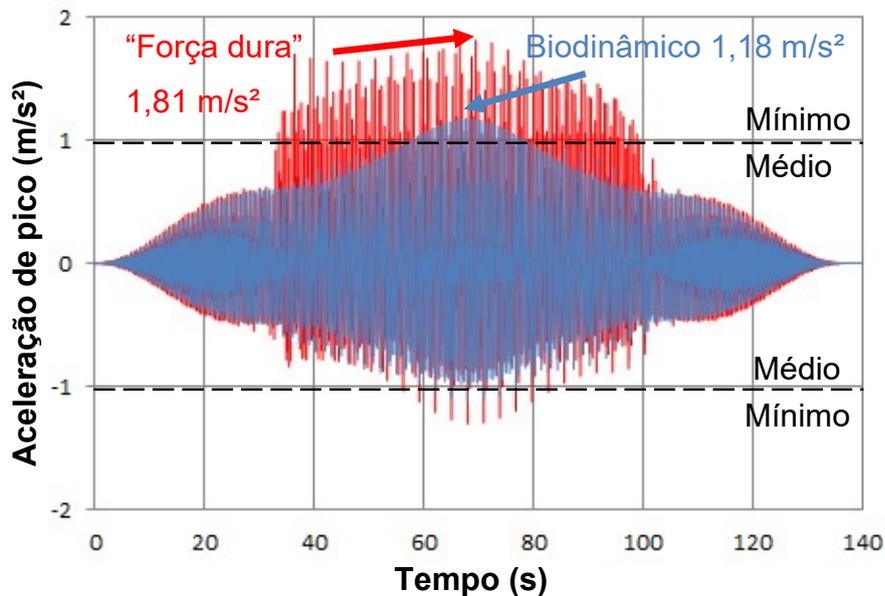


Figura 71 - Aceleração vertical associada ao caminhar de 46 pedestres espaçados em 1,47m

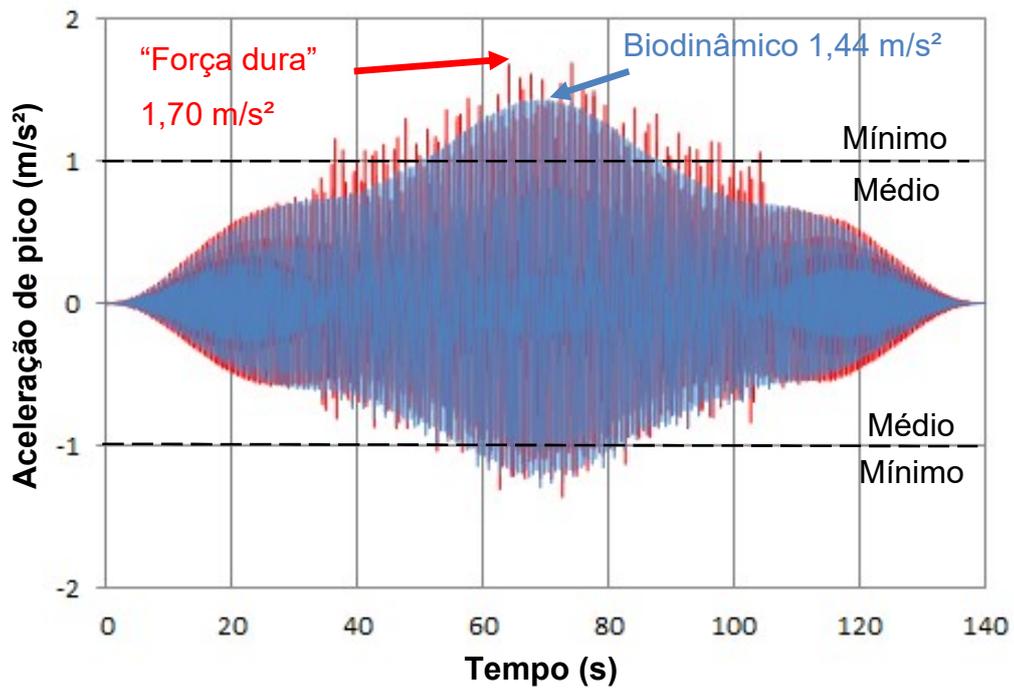


Figura - Aceleração vertical associada ao caminhar de 56 pedestres espaçados em 1,25m

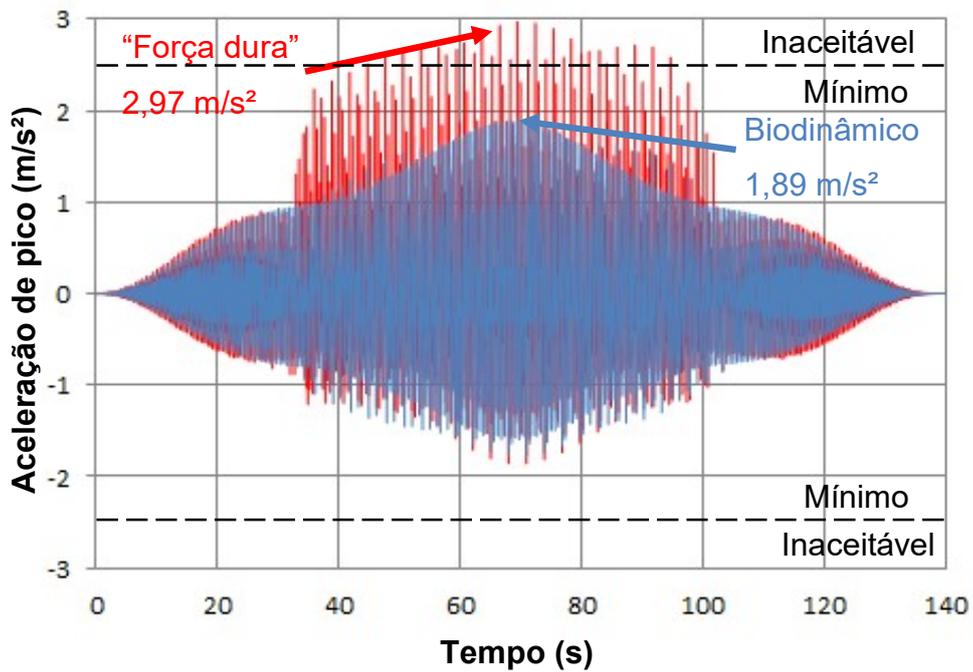


Figura 72 - Aceleração vertical associada ao caminhar de 70 pedestres espaçados em 1,00m

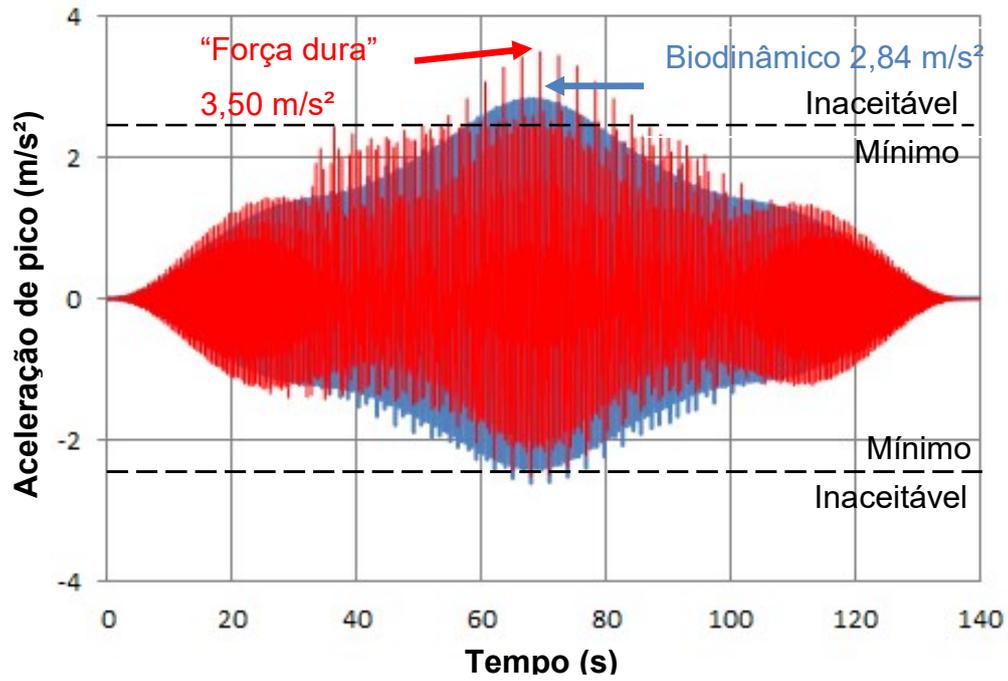


Figura 73 - Aceleração vertical associada ao caminhar de 92 pedestres espaçados em 1,47m

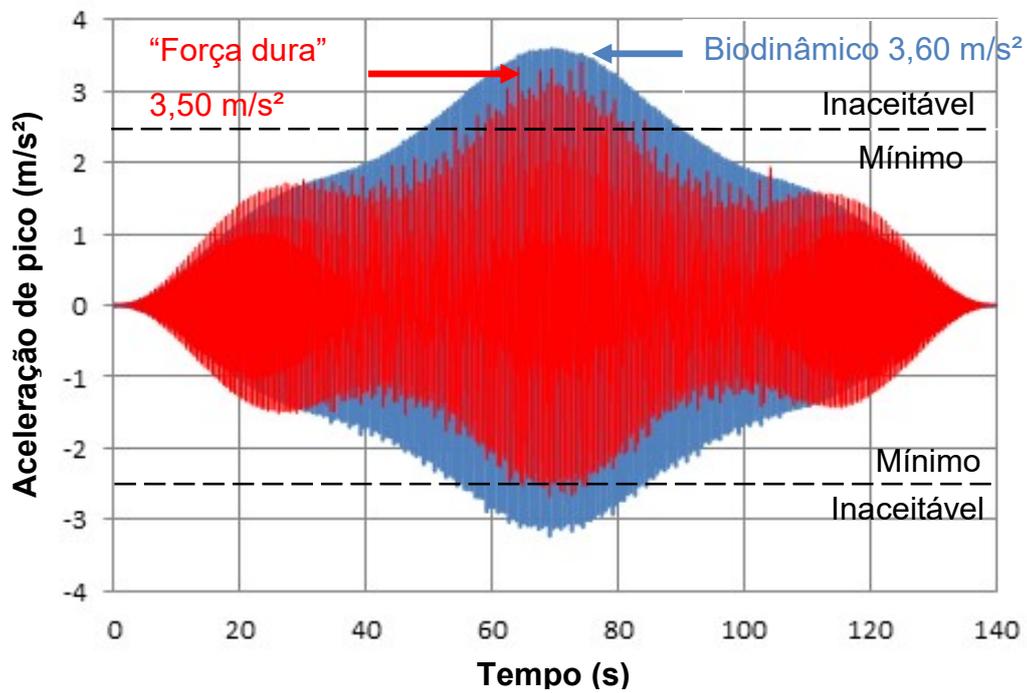


Figura 74 - Aceleração vertical associada ao caminhar de 112 pedestres espaçados em 1,25m

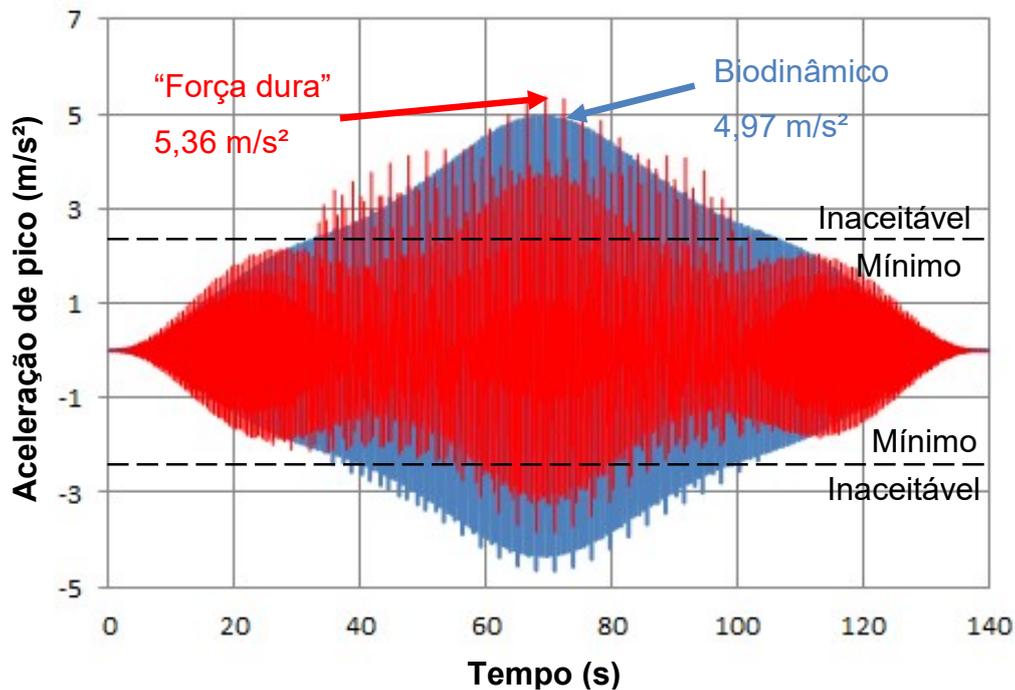


Figura 75 - Aceleração vertical associada ao caminhar de 140 pedestres espaçados em 1,00m

Com base nas análises numéricas ilustradas pelas Figuras 71 a 76, pode-se verificar que para os casos de carregamento 1 (46 pedestres, Tabela 10) a 4 (92 pedestres, Tabela 10), os valores mais elevados de aceleração máximas (acelerações de pico), correspondem a metodologia de análise na qual emprega-se o carregamento dinâmico oriundo do caminhar dos pedestres como sendo do tipo "força dura".

Por outro lado, cabe ressaltar que quando o caso 5 (112 pedestres, Tabela 10) foi considerado na investigação, os valores de aceleração de pico encontrados com base no uso da metodologia de análise que considera os sistemas biodinâmicos com um grau de liberdade são da mesma ordem de grandeza daqueles obtidos por meio do emprego dos modelos de "força dura", de acordo com os resultados apresentados nas Tabelas 17 a 19.

Tal fato relevante pode ser explicado, em função do acréscimo da massa dos modelos biodinâmicos acoplados ao modelo estrutural analisado, ocasionando conseqüentemente uma modificação do valor da frequência fundamental da passarela, neste caso, uma diminuição numérica do valor da referida frequência. Assim sendo, quando a modelagem biodinâmica é adotada para a simulação do

caminhar dos pedestres, a frequência fundamental da passarela aproxima-se da condição de ressonância.

Na sequência do estudo, procede-se a avaliação quantitativa do nível de conforto humano da passarela mista (aço-concreto) analisada, no que tange aos seis casos de carregamento dinâmicos investigados, de acordo com três dos principais guias internacionais de projeto (AISC [15], SÉTRA [16] e HIVOSS [17]) que tratam deste tema, conforme apresentado nas Tabelas 17 a 19.

Tabela 17 - Definição do critério de conforto pelo guia de projeto AISC [15]

Número de Pedestres	Aceleração de Pico (m/s ²)		Conforto Humano		
	Força Dura	Modelo Biodinâmico	Valor limite (m/s ²)	Força Dura	Modelo Biodinâmico
46	1,81	1,18	0,5	Inaceitável	Inaceitável
56	1,70	1,44	0,5	Inaceitável	Inaceitável
70	2,97	1,89	0,5	Inaceitável	Inaceitável
92	3,50	2,84	0,5	Inaceitável	Inaceitável
112	3,40	3,60	0,5	Inaceitável	Inaceitável
140	5,36	4,97	0,5	Inaceitável	Inaceitável

Tabela 18 - Definição do critério de conforto pelo guia de projeto SÉTRA [16]

Número de Pedestres	Aceleração de Pico (m/s ²)		Conforto Humano		
	Força Dura	Modelo Biodinâmico	Valor limite (m/s ²)	Força Dura	Modelo Biodinâmico
46	1,81	1,18	2,50	Mínimo	Mínimo
56	1,70	1,44	2,50	Mínimo	Mínimo
70	2,97	1,89	2,50	Inaceitável	Mínimo
92	3,50	2,84	2,50	Inaceitável	Inaceitável
112	3,40	3,60	2,50	Inaceitável	Inaceitável
140	5,36	4,97	2,50	Inaceitável	Inaceitável

Tabela 19 - Definição do critério de conforto pelo guia de projeto HIVOSS [17]

Número de Pedestres	Aceleração de Pico (m/s ²)		Conforto Humano		
	Força Dura	Modelo Biodinâmico	Valor limite (m/s ²)	Força Dura	Modelo Biodinâmico
46	1,81	1,18	2,50	Mínimo	Mínimo
56	1,70	1,44	2,50	Mínimo	Mínimo
70	2,97	1,89	2,50	Inaceitável	Mínimo
92	3,50	2,84	2,50	Inaceitável	Inaceitável
112	3,50	3,60	2,50	Inaceitável	Inaceitável
140	5,36	4,97	2,50	Inaceitável	Inaceitável

Considerando-se os resultados apresentados nas Tabelas 17 a 19, e de acordo com as metodologias de análise desenvolvidas, cabe ressaltar que os valores máximos de aceleração encontrados ao longo do estudo são elevados e da ordem de 1,1 m/s² a 5,3 m/s² [$a_p = 1,1 \text{ m/s}^2$ a $a_p = 5,3 \text{ m/s}^2$]. Deste modo, ressalta-se que em nenhuma das situações investigadas foi obtido um nível satisfatório de conforto humano para os pedestres. Na sequência, a Figura 76 ilustra de forma geral o comportamento dos valores das acelerações e pico obtidos na seção central da passarela.

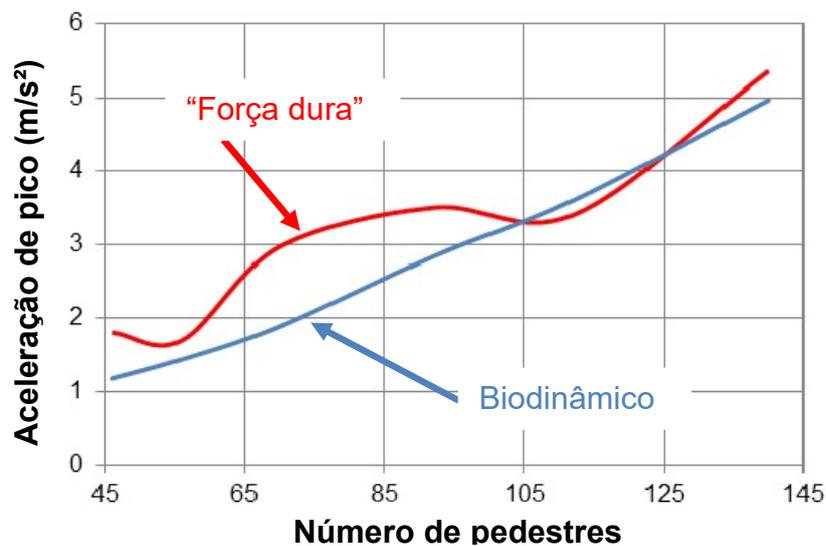


Figura 76 - Acelerações de pico em função do número de pedestres

Cabe ressaltar que, na medida em que vão sendo acrescentados pedestres ao modelo estrutural, representados pelos modelos biodinâmicos, a frequência fundamental (f_{01}) da estrutura sofre uma redução até se aproximar da frequência de passo ($f_p = 1,7$ Hz) para caminhada normal. Essa aproximação provocou um aumento na inclinação da curva para modelos biodinâmicos, ilustrada na Figura 76, fazendo com que essa interceptasse a curva de “força dura” em dois pontos.

De maneira geral, a metodologia de análise que considera os modelos biodinâmicos (efeito da interação dinâmica pedestre-estrutura) para simular o caminhar dos pedestres sobre a passarela, nos casos de carregamento dinâmico associados ao caminhar lento dos pedestres ($f_p = 1,70$ Hz), evidencia o caráter atenuador que os sistemas massa-mola-amortecedor conferem à estrutura, conforme ilustrado na Figura 76.

7.5. Caminhada normal

Para a caminhada tida como normal, segundo Bachmann [18] é considerando o caminhar do pedestre com frequência de passo igual a 2,0 Hz, conforme Tabela 1 (item 3.2). O resultado das análises pode ser visualizado nas Figuras 78 a 83.

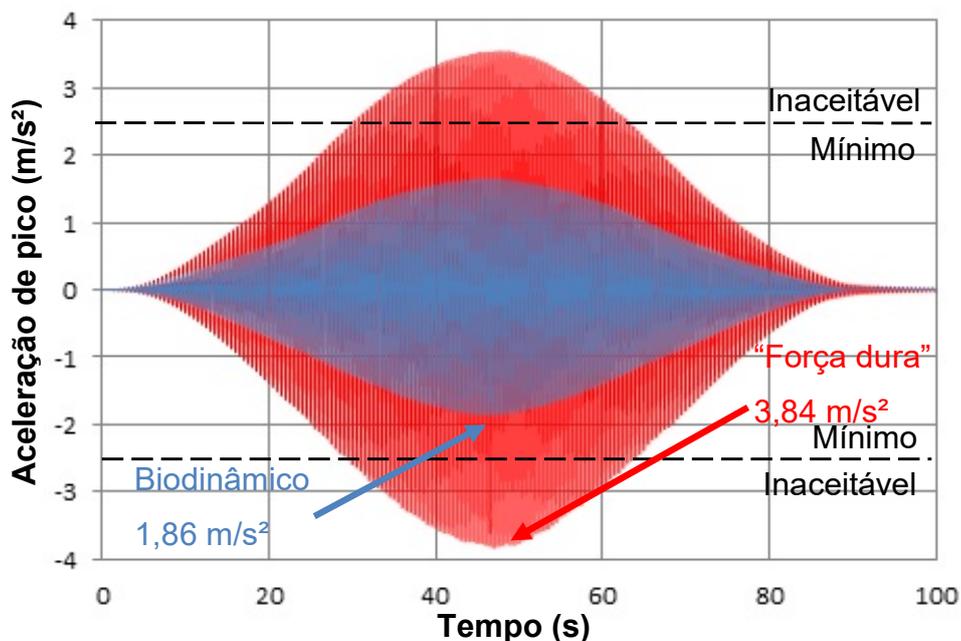


Figura 77 - Aceleração vertical associada ao caminhar de 46 pedestres espaçados em 1,47m

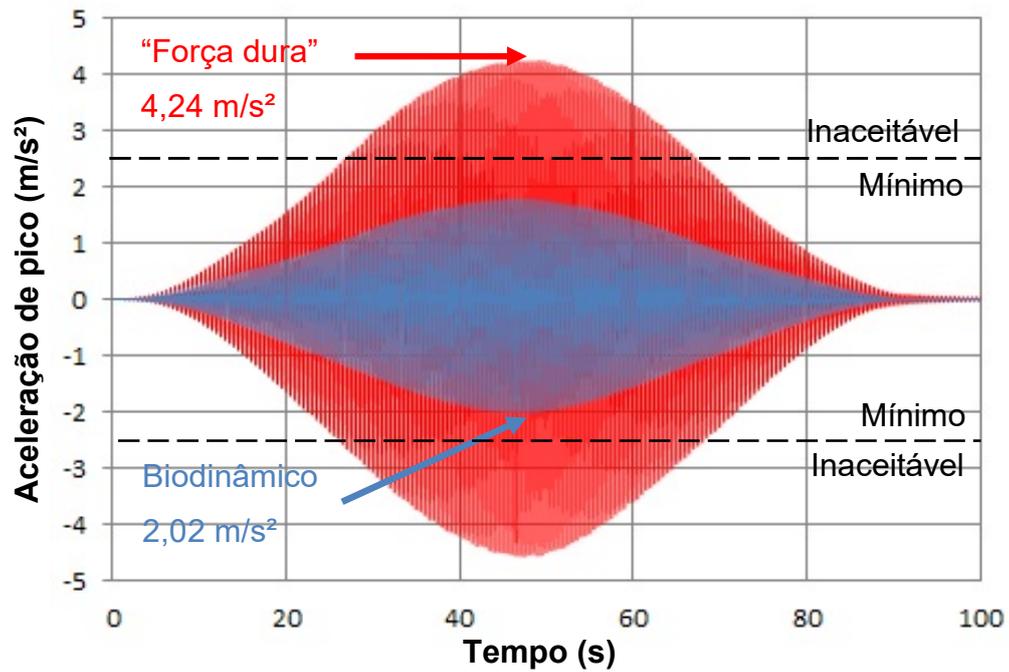


Figura 78 - Aceleração vertical associada ao caminhar de 56 pedestres espaçados em 1,25 m

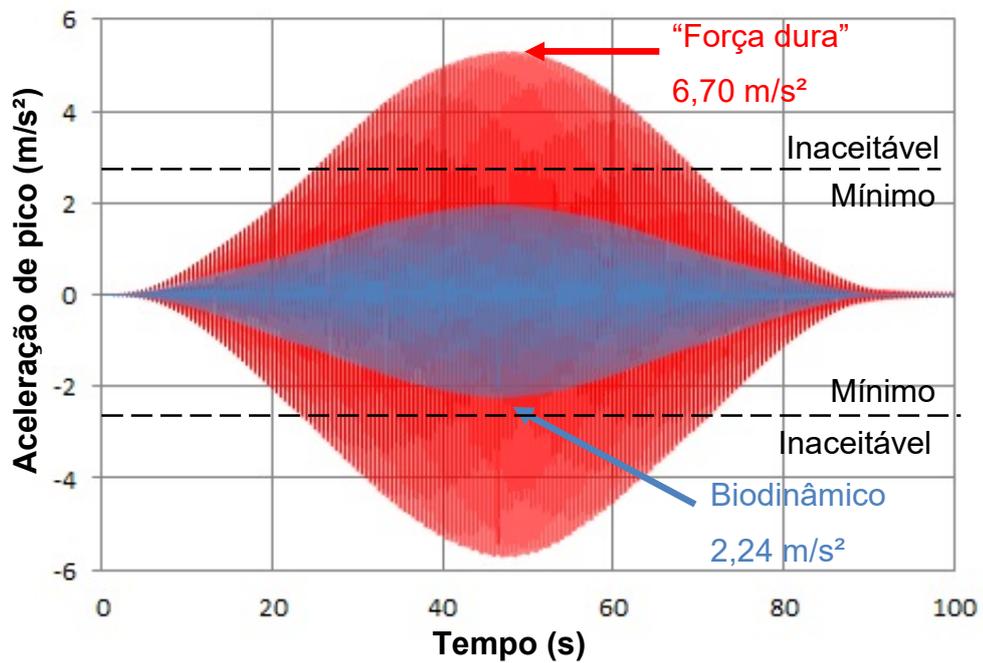


Figura 79 - Aceleração vertical associada ao caminhar de 70 pedestres espaçados em 1,00 m

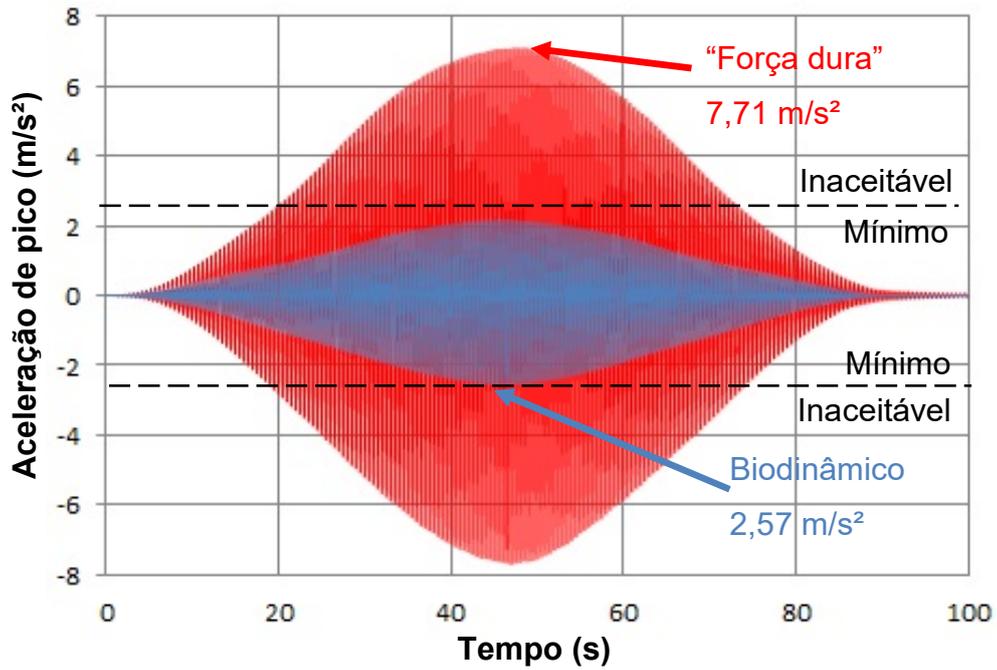


Figura 80 - Aceleração vertical associada ao caminhar de 92 pedestres espaçados em 1,47 m

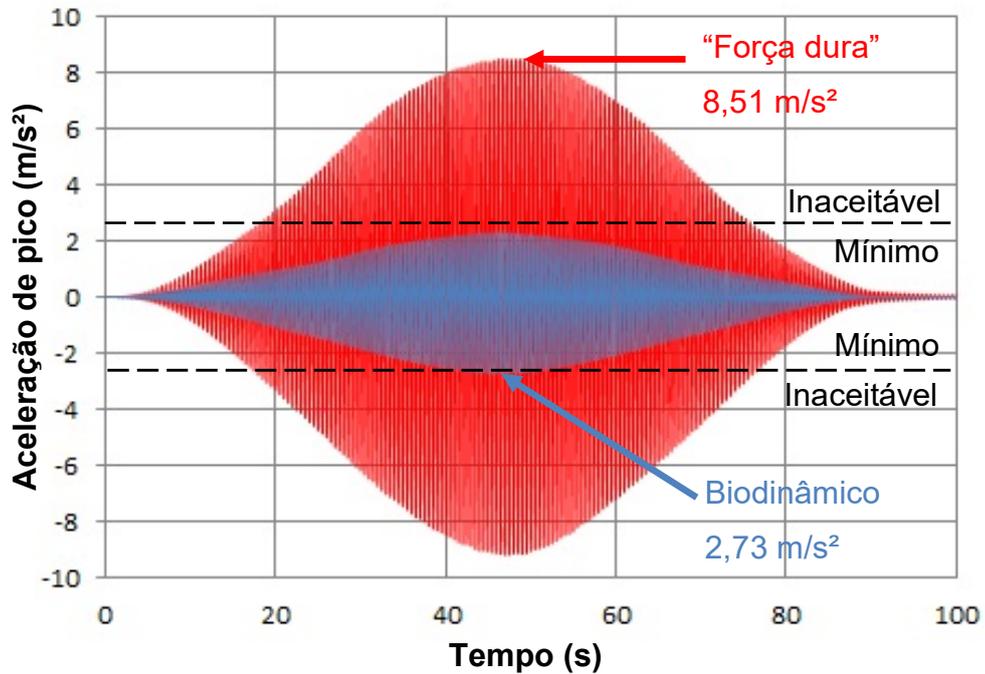


Figure 81 - Aceleração vertical associada ao caminhar de 112 pedestres espaçados em 1,25 m

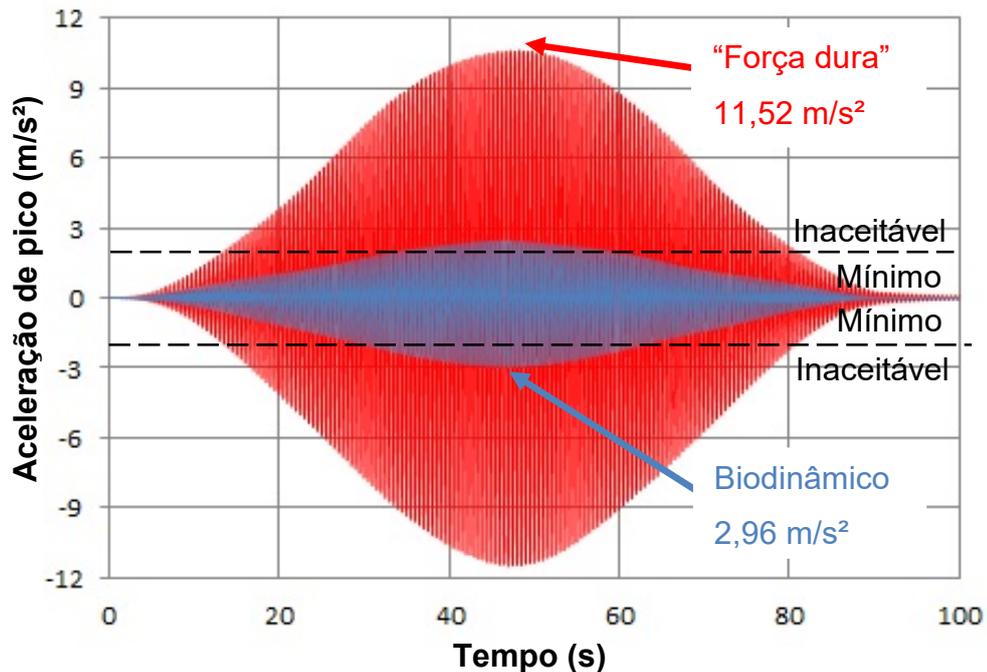


Figura 82 - Aceleração vertical associada ao caminhar de 140 pedestres espaçados em 1,00m

Com base nas análises numéricas demonstradas nas Figuras 78 a 83, pode-se verificar que para todos os casos de carregamento considerados, de 46 a 140 pedestres, os valores obtidos para a aceleração de pico foram superiores quando obtidos por meio do emprego dos modelos de "força dura". Tal fato é justificado principalmente pela proximidade entre os valores de frequência de passo $f_p = 2,0$ Hz adotada para a caminhada normal e a frequência fundamental da estrutura $f_{01} = 1,94$ Hz, o que aumenta o risco de ocorrência da ressonância no modelo estrutural.

Os valores de aceleração de pico encontrados com base no uso da metodologia de análise que considera os sistemas biodinâmicos com um grau de liberdade, foram reduzidos pela influência do amortecimento e rigidez de pedestres acoplados à estrutura. Com o acréscimo no número de pedestres, e conseqüente diminuição da frequência fundamental da estrutura, ocorreu um distanciamento do risco de ocorrência da ressonância para os modelos com biodinâmico, proporcionalmente ao número de sistemas S1GL acoplados ao modelo estrutural.

Na seqüência do estudo, procede-se a avaliação quantitativa do nível de conforto humano da passarela mista (aço-concreto) analisada, referentes aos seis casos de carregamento dinâmicos investigados, de acordo com três dos principais

guias internacionais de projeto (AISC [15], SÉTRA [16] e HIVOSS [17]) que tratam deste tema, conforme apresentado nas Tabelas 20 a 22.

Tabela 20 - Definição do critério de conforto pelo guia de projeto AISC [15]

Número de Pedestres	Aceleração de Pico (m/s ²)		Conforto Humano		
	Força Dura	Modelo Biodinâmico	Valor limite (m/s ²)	Força Dura	Modelo Biodinâmico
46	3,84	1,86	0,50	Inaceitável	Inaceitável
56	4,24	2,02	0,50	Inaceitável	Inaceitável
70	6,70	2,24	0,50	Inaceitável	Inaceitável
92	7,71	2,57	0,50	Inaceitável	Inaceitável
112	8,51	2,73	0,50	Inaceitável	Inaceitável
140	11,52	2,96	0,50	Inaceitável	Inaceitável

Tabela 21 - Definição do critério de conforto pelo guia de projeto SÉTRA [16]

Número de Pedestres	Aceleração de Pico (m/s ²)		Conforto Humano		
	Força Dura	Modelo Biodinâmico	Valor limite (m/s ²)	Força Dura	Modelo Biodinâmico
46	3,84	1,86	2,50	Inaceitável	Mínimo
56	4,24	2,02	2,50	Inaceitável	Mínimo
70	6,70	2,24	2,50	Inaceitável	Mínimo
92	7,71	2,57	2,50	Inaceitável	Inaceitável
112	8,51	2,73	2,50	Inaceitável	Inaceitável
140	11,52	2,96	2,50	Inaceitável	Inaceitável

Tabela 22 - Definição do critério de conforto pelo guia de projeto HIVOSS [17]

Número de Pedestres	Aceleração de Pico (m/s ²)		Conforto Humano		
	Força Dura	Modelo Biodinâmico	Valor limite (m/s ²)	Força Dura	Modelo Biodinâmico
46	3,84	1,86	2,50	Inaceitável	Mínimo
56	4,24	2,02	2,50	Inaceitável	Mínimo
70	6,70	2,24	2,50	Inaceitável	Mínimo
92	7,71	2,57	2,50	Inaceitável	Inaceitável
112	8,51	2,73	2,50	Inaceitável	Inaceitável
140	11,52	2,96	2,50	Inaceitável	Inaceitável

Os valores de aceleração de pico para a caminhada normal são elevados e da ordem de 3,84 m/s² a 11,52 m/s² [$a_p = 3,84 \text{ m/s}^2$ a $a_p = 11,52 \text{ m/s}^2$]. Deste modo, ressalta-se que em nenhuma das situações investigadas foi obtido um nível satisfatório de conforto humano para os pedestres. A Figura 83 ilustra, de forma qualitativa, a variação dos valores das acelerações máximas em função do número de pedestres atuando sobre a estrutura.

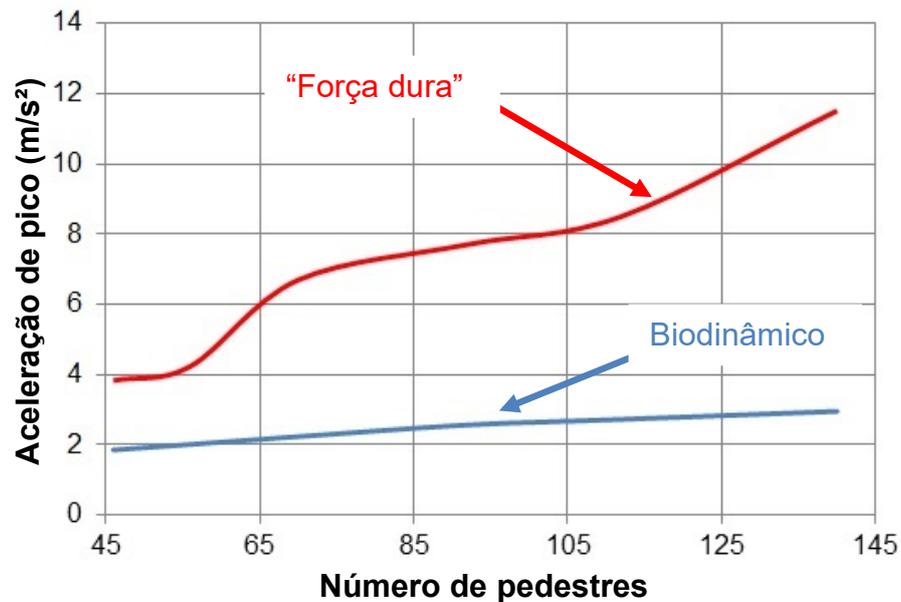


Figura 83 - Acelerações de pico em função do número de pedestres

7.6. Caminhada rápida

Para as análises demonstradas nas Figuras 85 a 90 o caminhar do pedestre foi considerado como sendo rápido, ou seja, com frequência de passo igual a 2,3 Hz, de acordo com a Tabela 1 (item 3.2).

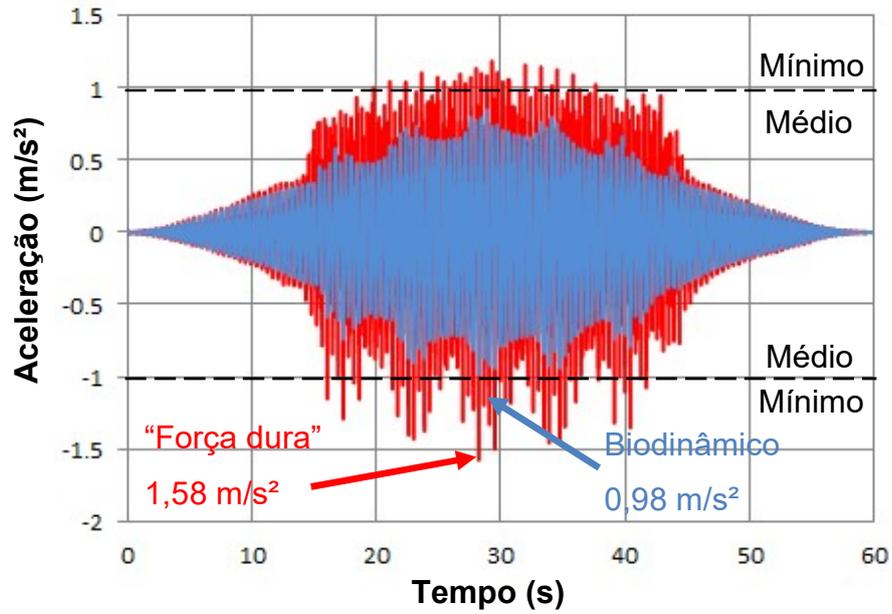


Figura 84 - Aceleração vertical associada ao caminhar de 46 pedestres espaçados em 1,47 m

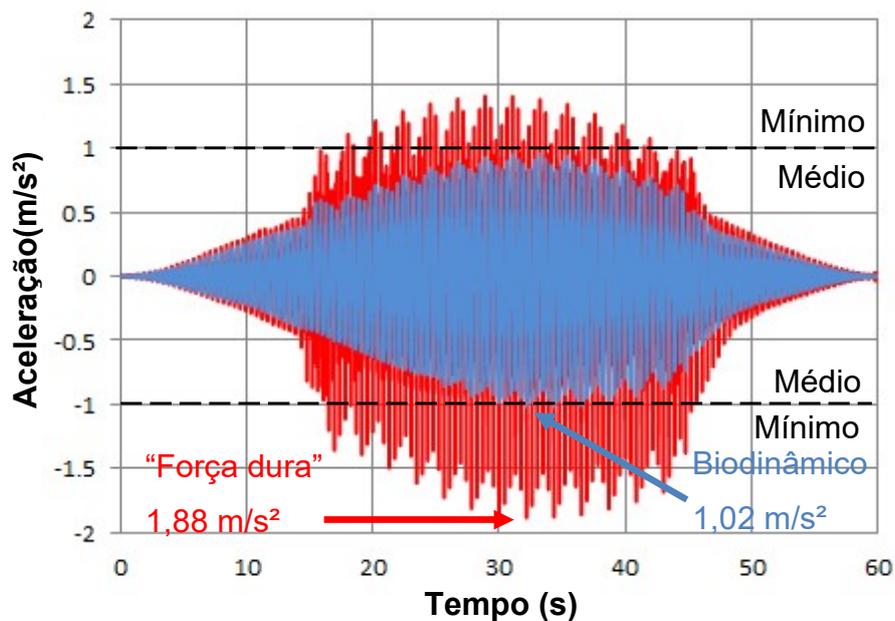


Figura 85 - Aceleração vertical associada ao caminhar de 56 pedestres espaçados em 1,25 m

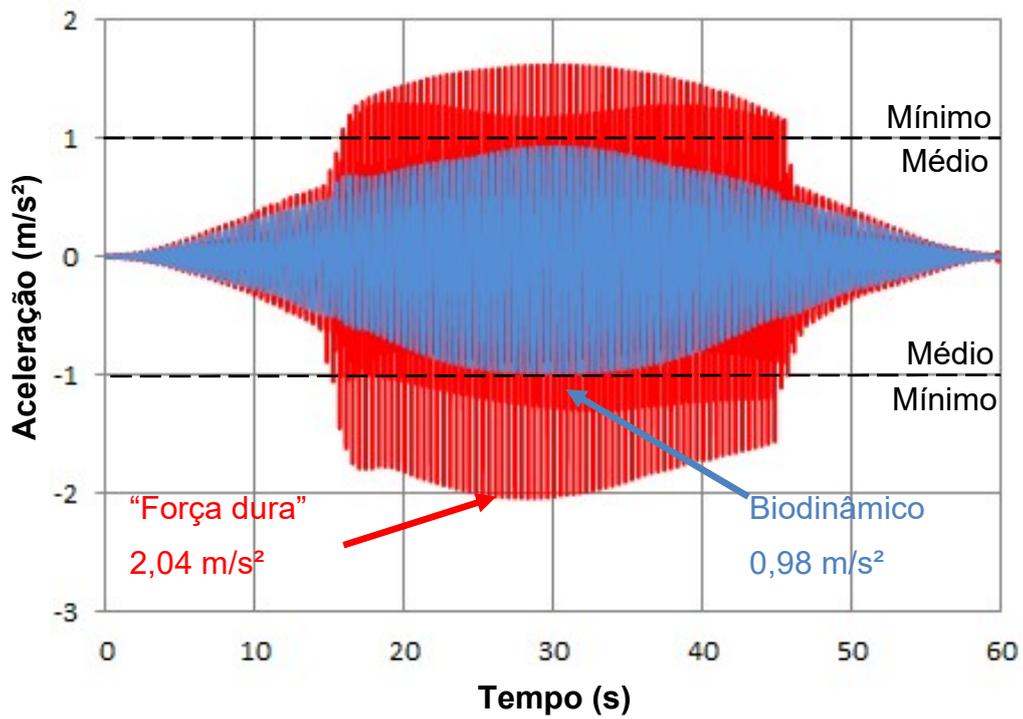


Figura 86 - Aceleração vertical associada ao caminhar de 70 pedestres espaçados em 1,00 m

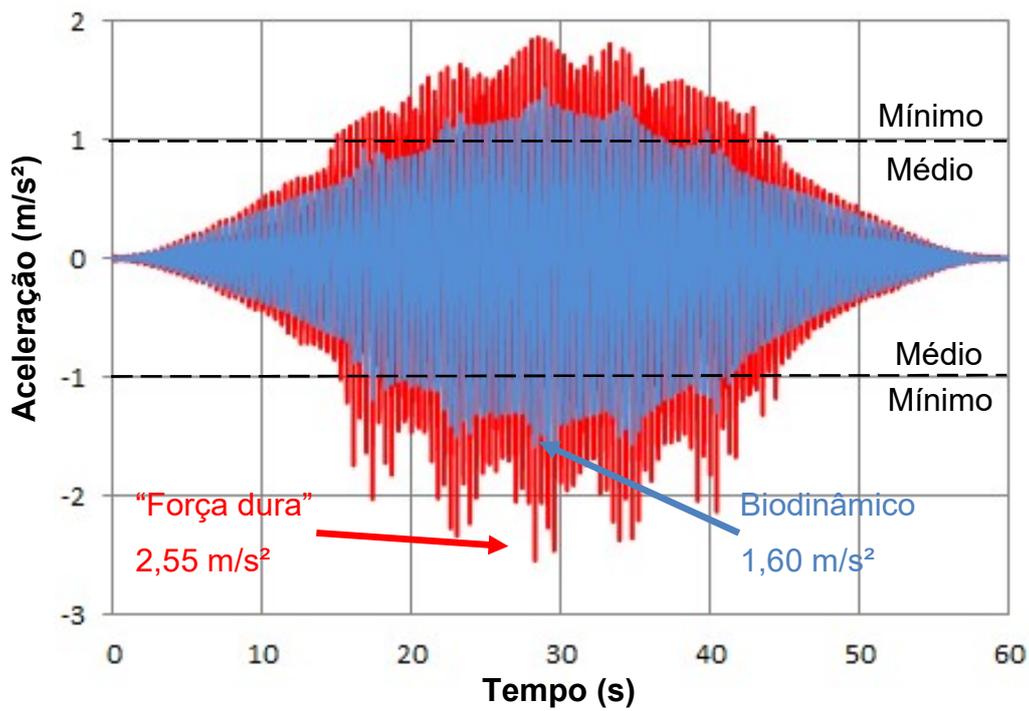


Figura 87 - Aceleração vertical associada ao caminhar de 92 pedestres espaçados em 1,47 m

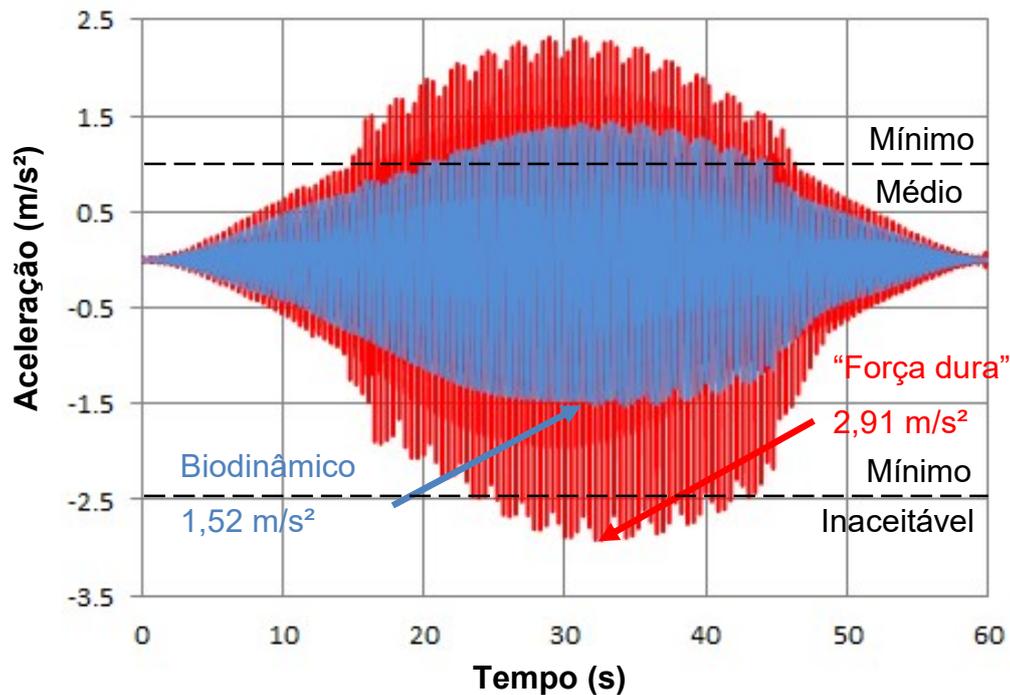


Figura 88 - Aceleração vertical associada ao caminhar de 112 pedestres espaçados em 1,25 m

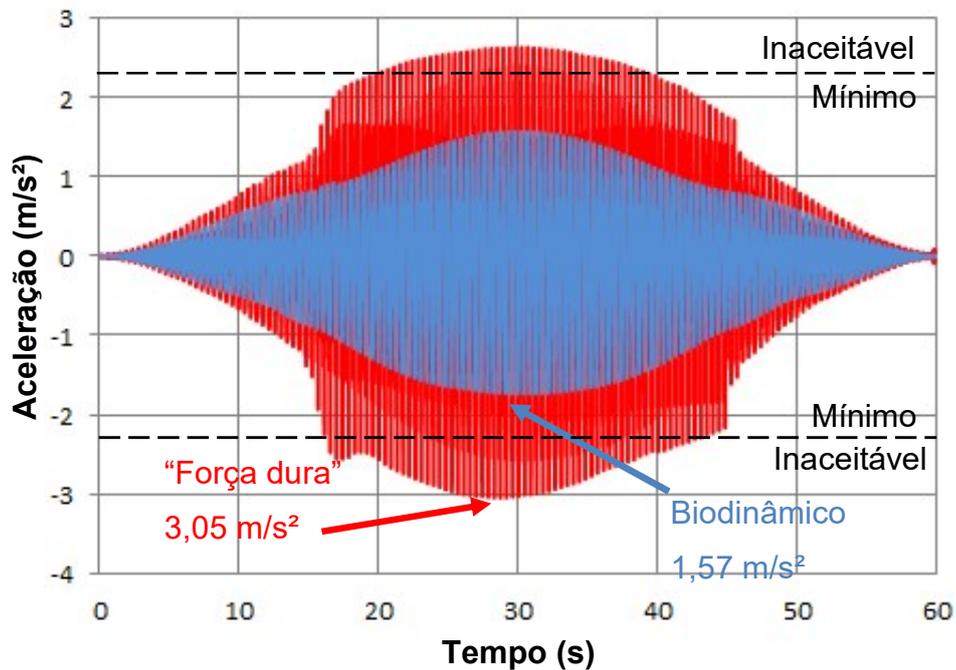


Figura 89 - Aceleração vertical associada ao caminhar de 140 pedestres espaçados em 1,00 m

Com base nas imagens ilustradas nas Figuras 85 a 90, pode ser verificado que para todas as situações de carregamento, ou seja, 46 a 140 pedestres os

valores de acelerações de pico foram superiores para a “força dura”, o que é justificado pelo fato da frequência de passo ($f_p = 2,3$ Hz) ser mais próxima da frequência da estrutura sem os modelos biodinâmicos.

Nas tabelas 23 a 25, estão apresentadas as avaliações quantitativas do nível de conforto humano da passarela mista (aço-concreto) analisada, no que diz respeito aos seis casos de carregamento dinâmicos investigados, de acordo com três dos principais guias internacionais de projeto (AISC[17], SÉTRA [16] e HIVOSS [17]) que apresentam recomendações sobre o tema.

Tabela 23 - Definição do critério de conforto pelo guia de projeto AISC [15]

Número de Pedestres	Aceleração de Pico (m/s^2)		Conforto Humano		
	Força Dura	Modelo Biodinâmico	Valor limite (m/s^2)	Força Dura	Modelo Biodinâmico
46	1,58	0,98	0,50	Inaceitável	Inaceitável
56	1,88	1,02	0,50	Inaceitável	Inaceitável
70	2,04	0,98	0,50	Inaceitável	Inaceitável
92	2,55	1,60	0,50	Inaceitável	Inaceitável
112	2,91	1,52	0,50	Inaceitável	Inaceitável
140	3,05	1,57	0,50	Inaceitável	Inaceitável

Tabela 24 - Definição do critério de conforto pelo guia de projeto SÉTRA [16]

Número de Pedestres	Aceleração de Pico (m/s^2)		Conforto Humano		
	Força Dura	Modelo Biodinâmico	Valor limite (m/s^2)	Força Dura	Modelo Biodinâmico
46	1,58	0,98	2,50	Mínimo	Médio
56	1,88	1,02	2,50	Mínimo	Mínimo
70	2,04	0,98	2,50	Mínimo	Mínimo
92	2,55	1,60	2,50	Inaceitável	Mínimo
112	2,91	1,52	2,50	Inaceitável	Mínimo
140	3,05	1,57	2,50	Inaceitável	Mínimo

Tabela 25 - Definição do critério de conforto pelo guia de projeto HIVOSS [17]

Número de Pedestres	Aceleração de Pico (m/s ²)		Conforto Humano		
	Força Dura	Modelo Biodinâmico	Valor limite (m/s ²)	Força Dura	Modelo Biodinâmico
46	1,58	0,98	2,50	Mínimo	Médio
56	1,88	1,02	2,50	Mínimo	Mínimo
70	2,04	0,98	2,50	Mínimo	Médio
92	2,55	1,60	2,50	Inaceitável	Mínimo
112	2,91	1,52	2,50	Inaceitável	Mínimo
140	3,05	1,57	2,50	Inaceitável	Mínimo

Considerando-se os resultados apresentados nas Tabelas 23 a 25, foi observado que os valores máximos de aceleração encontrados para os casos de caminhada rápida, são da ordem de 1,58 m/s² a 3,05 m/s² [$a_p = 1,58 \text{ m/s}^2$ a $a_p = 3,05 \text{ m/s}^2$], e são menos elevados que os anteriormente estudados no item 7.5 de caminhada normal, o que mostra que para a frequência de passo $f_p = 2,3 \text{ Hz}$, o modelo é menos suscetível ao fenômeno da ressonância. Em seguida, a Figura 90, ilustra a variação das acelerações que ocorre nas modelagens, em função do número de pedestres caminhando sobre o modelo.

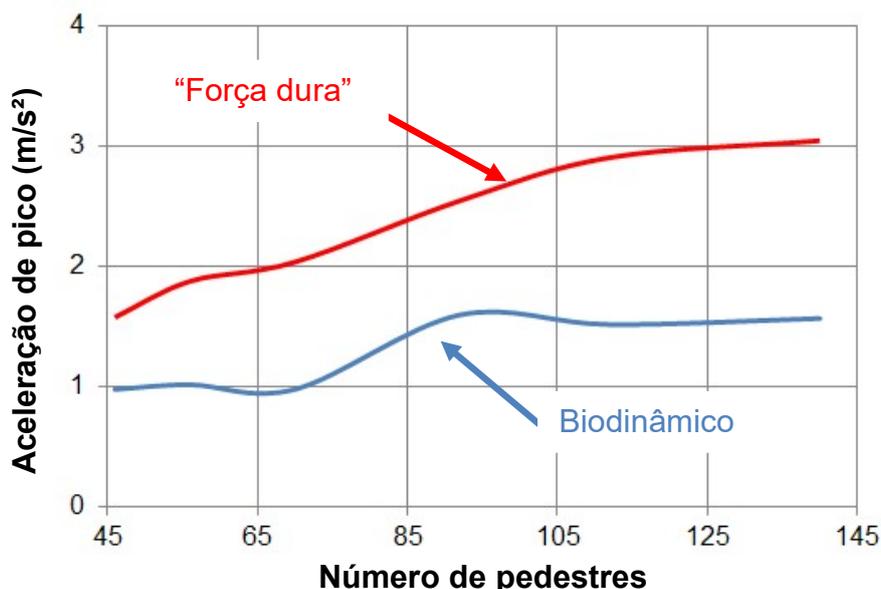


Figura 90 - Acelerações de pico em função do número de pedestres

Como resultado das análises com caminhada rápida, os valores de aceleração de pico foram maiores para os modelos com “força dura” devido à proximidade entre os valores de frequência de passo ($f_p = 2,3$ Hz) e frequência fundamental da estrutura ($f_{01} = 1,95$ Hz), o que torna maior o risco de ocorrência da ressonância.

7.7. Comparação das acelerações de pico na ressonância

Foram feitas análises adicionais com frequências de passos intermediárias entre 1,7 e 2,3 Hz, de acordo com a Tabela 26, com o intuito de se estudar a estrutura quando esta apresenta um comportamento próximo à ressonância, para as duas formas de modelagem, “força dura” e biodinâmica, ao mesmo tempo. Estas análises foram realizadas para as três situações de carregamento com uma fileira, ou seja, 46, 56 e 70 pedestres.

Tabela 26 - Relação entre frequências de vibração da estrutura e frequências de passo adotadas próximas a ressonância.

Número de pedestres	f_{01} (Hz) com modelos biodinâmicos	f_p adotada (Hz)	f_{01} (Hz) sem modelos biodinâmicos	f_p adotada (Hz) (caminhada normal)
46	1,85	1,83	1,94	1,92
56	1,83	1,81	1,94	1,92
70	1,82	1,80	1,94	1,92

Os valores das frequências de passo adotadas na Tabela 26 para as análises em ressonância, são próximos à frequência fundamental da estrutura, para comparação dos valores de aceleração de pico da estrutura quando esta está prestes a sofrer o fenômeno da ressonância. Foi respeitada uma diferença de 0,02Hz entre as frequências de passo (f_p) e fundamental (f_{01}), de modo a se verificar o comportamento da estrutura próximo à ressonância. Os valores de aceleração de pico da estrutura, em um nó localizado no centro do vão da passarela, podem ser visualizados nas Figuras 92 a 94.

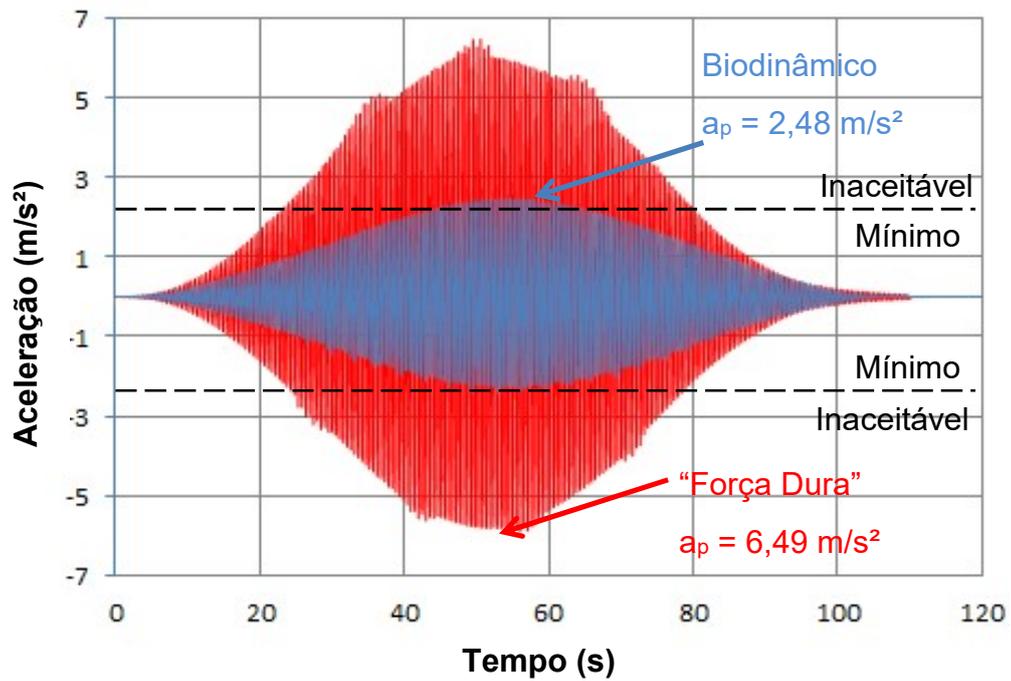


Figura 91 - Gráfico de comparação de aceleração de pico para o caso de modelagem com 46 pedestres

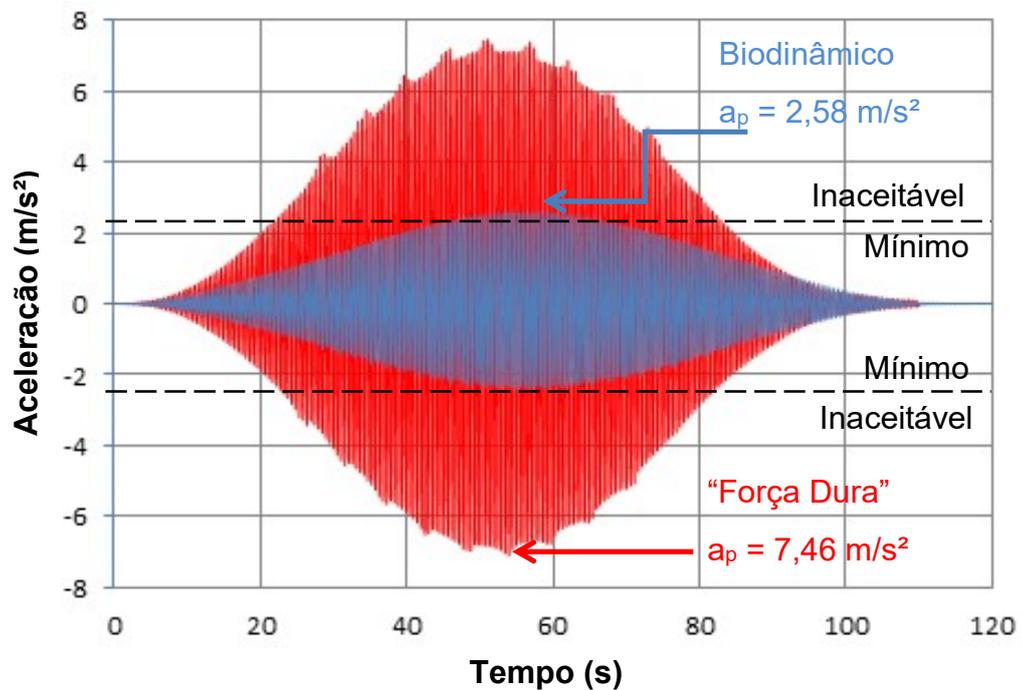


Figura 92 - Gráfico de comparação de aceleração de pico para o caso de modelagem com 56 pedestres

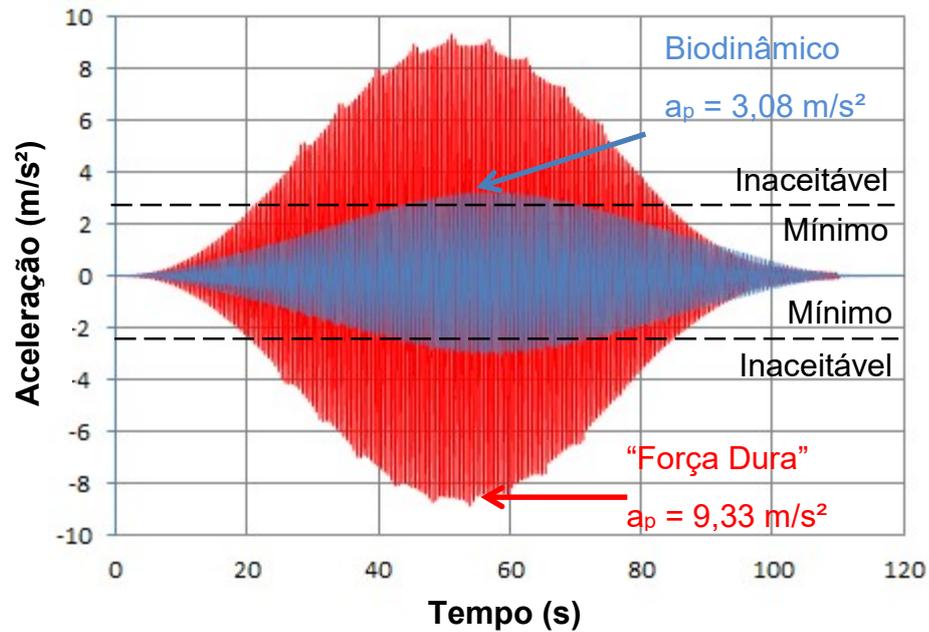


Figura 93 - Gráfico de comparação de aceleração de pico para o caso de modelagem com 70 pedestres

As tabelas 27 a 29 mostram uma análise qualitativa dos valores de aceleração de pico do modelo estrutural em situação próxima à ressonância.

Tabela 27 - Definição do critério de conforto pelo guia de projeto AISC [15]

Número de Pedestres	Aceleração de Pico (m/s ²)		Conforto Humano		
	Força Dura	Modelo Biodinâmico	Valor limite (m/s ²)	Força Dura	Modelo Biodinâmico
46	6,49	2,48	0,50	Inaceitável	Inaceitável
56	7,46	2,58	0,50	Inaceitável	Inaceitável
70	9,33	3,08	0,50	Inaceitável	Inaceitável

Tabela 28 - Definição do critério de conforto pelo guia de projeto SÉTRA [16]

Número de Pedestres	Aceleração de Pico (m/s ²)		Conforto Humano		
	Força Dura	Modelo Biodinâmico	Valor limite (m/s ²)	Força Dura	Modelo Biodinâmico
46	6,49	2,48	2,50	Inaceitável	Inaceitável
56	7,46	2,58	2,50	Inaceitável	Inaceitável
70	9,33	3,08	2,50	Inaceitável	Inaceitável

Tabela 29 - Definição do critério de conforto pelo guia de projeto HIVOSS [17]

Número de Pedestres	Aceleração de Pico (m/s ²)		Conforto Humano		
	Força Dura	Modelo Biodinâmico	Valor limite (m/s ²)	Força Dura	Modelo Biodinâmico
46	6,49	2,48	2,50	Inaceitável	Inaceitável
56	7,46	2,58	2,50	Inaceitável	Inaceitável
70	9,33	3,08	2,50	Inaceitável	Inaceitável

A Figura 94 ilustra a variação dos valores de aceleração de pico que ocorre nas duas situações de modelagem, em função do número de pedestres caminhando sobre o modelo estrutural.

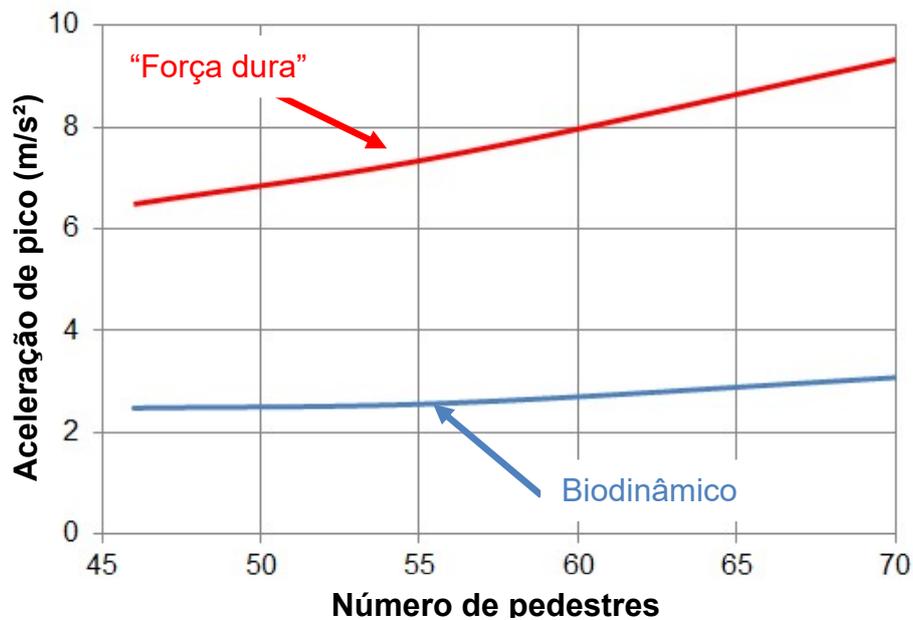


Figura 94 - Variação das acelerações de pico em função do número de pedestres

Comparando-se os modelos com as duas formas de modelagem de carregamento propostas, é observado que os maiores valores de aceleração de pico em situação próxima à ressonância, ocorrem nos modelos com “força dura”. Para a maior solicitação estudada, com 70 pedestres, o valor da aceleração de pico encontrada para “força dura” ($a_p = 9,33 \text{ m/s}^2$) foi aproximadamente três vezes superior ao encontrado para o biodinâmico ($a_p = 3,08 \text{ m/s}^2$), tal fato ocorre devido às características de amortecimento e rigidez que os sistemas biodinâmicos com um grau de liberdade acrescentam ao modelo estrutural.

7.8. Emprego dos guias de projeto para avaliação das acelerações de pico

Na sequência do texto, a Tabela 30 apresenta os valores das acelerações de pico obtidas com base no emprego das recomendações simplificadas de projeto prescritas nos principais guias internacionais utilizados atualmente para a análise de conforto humano de passarelas de pedestres (SETRA [16], HIVOSS [17]). Os valores das acelerações calculadas a partir do uso dos guias de projeto (SETRA [16], HIVOSS [17]) são comparados com aqueles obtidos através das análises numéricas realizadas ao longo desta dissertação para os casos de carregamento investigados.

Tabela 30 - Avaliação das acelerações de pico calculadas com base no emprego dos guias internacionais de projeto SETRA [16], HIVOSS [17]

Casos de carregamento	SETRA [16] e HIVOSS [17]	Caminhada lenta	Caminhada normal	Caminhada rápida
46 pedestres	2,20	1,18	1,86	0,98
56 pedestres	2,41	1,44	2,02	1,02
70 pedestres	2,66	1,89	2,24	0,98
92 pedestres	2,99	2,84	2,57	1,60
112 pedestres	3,24	3,60	2,73	1,52
140 pedestres	3,53	4,97	2,96	1,57

Considerando-se os resultados apresentados na Tabela 30 pode-se concluir que os valores das acelerações de pico (a_p), obtidos através dos guias internacionais de projeto são da mesma ordem de grandeza daqueles obtidos por meio da análise dinâmica com o uso dos modelos biodinâmicos. Tal fato evidencia a coerência dos resultados alcançados a partir do emprego da metodologia de análise desenvolvida neste estudo, em consonância com os valores das acelerações obtidas mediante o emprego de fórmulas expeditas dos guias de projeto (SETRA [16], HIVOSS [17]).

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

8.1. Introdução

Basicamente, o objetivo principal deste trabalho de pesquisa consistiu no estudo e avaliação do comportamento dinâmico de uma passarela real, existente, construída em estrutura mista (aço-concreto) e sistema estrutural treliçado, com vão de 68,6 m, quando submetida a carregamentos de multidão referentes à ação dos pedestres. Ao longo do estudo, foram desenvolvidas duas estratégias para a modelagem numérica representativa da excitação dinâmica induzida pelo caminhar dos pedestres: metodologia de análise com base no emprego de modelos biodinâmicos acoplados à estrutura, levando-se em consideração o efeito da massa, rigidez e amortecimento dos indivíduos (interação dinâmica pedestre-estrutura); e, também, metodologia tradicional de projeto, associando a modelagem numérica da carga dinâmica como sendo do tipo “força dura”.

Foram desenvolvidos modelos numérico-computacionais, via emprego do método dos elementos finitos, com base na utilização do programa computacional ANSYS [14], de forma a respaldar as análises numéricas (análises modal, harmônica e de vibração forçada) realizadas. Para as análises de vibração forçada (caminhar humano) foram considerados modelos de carregamento com um número máximo de 140 pedestres. Considerando-se que a frequência fundamental da passarela investigada encontra-se próxima da frequência de passo dos pedestres, foram realizadas inúmeras análises numéricas variando-se o ritmo da caminhada (lenta, normal e rápida), objetivando verificar as situações mais críticas de projeto. A resposta dinâmica da passarela foi obtida em termos dos valores das acelerações de pico e, em seguida, estes valores foram comparados com os limites estabelecidos em normas e guias internacionais de projeto.

8.2. Conclusões

Neste capítulo, ao longo do texto, são apresentadas resumidamente as principais conclusões, obtidas com referência às análises numéricas realizadas ao longo do estudo, de forma sequencial, de acordo com a ordem apresentada na sequência da dissertação.

a) Análise modal

Ao longo das análises, foi observado que o valor da frequência fundamental da passarela mista (aço-concreto) investigada encontra-se abaixo daquele recomendado pelos guias internacionais de projeto ($f_{01} = 1,94$ Hz). Tal fato explica o alto nível de desconforto sentido pelos usuários da passarela, pois o valor desta frequência fundamental encontra-se muito próximo do valor da frequência de passo do pedestre, por exemplo, para uma caminhada normal ($f_{01} = 1,94$ Hz e $f_p = 2,0$ Hz).

Foi possível concluir que o acoplamento dos modelos biodinâmicos ao modelo em elementos finitos representativo da passarela influenciou de forma bastante significativa os resultados obtidos, em especial, no que tange a variação da frequência fundamental da estrutura. Tal fato se deve ao significativo incremento do valor da massa modal do modelo analisado, ocasionando uma redução importante no valor da frequência fundamental da passarela. Por exemplo, destaca-se a situação em que 140 pedestres são considerados na análise modal, caso em que o valor da frequência fundamental da passarela foi reduzida de 1,94 Hz para 1,73 Hz ($f_{01} = 1,94$ Hz para 1,74 Hz), valor que se situa muito próximo ao da frequência de passo do pedestre para uma caminhada lenta ($f_p = 1,70$ Hz).

b) Metodologias de análise: modelos biodinâmicos versus “força dura”

Comparando-se as duas estratégias desenvolvidas ao longo desta dissertação, no que tange a modelagem numérica representativa da excitação dinâmica induzida pelo caminhar dos pedestres [metodologia de análise com base no emprego de modelos biodinâmicos acoplados à estrutura (interação dinâmica pedestre-estrutura) e a metodologia tradicional, associando a modelagem da ação dinâmica como sendo do tipo “força dura” foi verificado que os valores mais elevados para as acelerações de pico, em situações de projeto próximas à ressonância, geralmente ocorrem quando o modelo de “força dura” é utilizado. Entretanto, ressalta-se a importância da comparação numérica realizada ao longo de cada caso investigado nesta dissertação, pois o ajuste dos valores das frequências naturais da passarela em relação a frequência do passo dos pedestres é relevante e pode induzir a uma falsa interpretação dos resultados encontrados.

Por outro lado, de maneira geral, estes valores de aceleração tendem a ser menores quando os modelos biodinâmicos (interação dinâmica pedestre-estrutura) são empregados nas análises, visto que nesta situação o efeito inercial e de amortecimento contribuem favoravelmente para atenuar a resposta dinâmica da estrutura. Cabe ressaltar, também, que a metodologia que utiliza os modelos matemáticos de “força dura” (modelos simplificados) tende a fornecer valores de acelerações muito elevados, geralmente fora da realidade prática de projeto, em função da própria natureza da modelagem. Destaca-se, ainda, que os modelos numéricos biodinâmicos precisam ser ainda melhor investigados e faz-se necessária a realização de um extenso estudo paramétrico, levando-se em conta a variação do número de graus de liberdade destes modelos e, bem como, as propriedades dinâmicas das pessoas (massa, rigidez e amortecimento).

c) Valores das acelerações de pico (acelerações máximas)

Considerando-se o caminhar humano investigado ao longo deste trabalho de pesquisa [caminhada lenta, normal e rápida]; e, ainda, a variação do número de pedestres considerada nos casos de carregamento [40 a 140 pedestres], foi possível verificar que os valores das acelerações de pico foram bastante elevados, em especial, no tocante a ressonância existente no modelo estrutural analisado, em função da proximidade da frequência fundamental da passarela [$f_{01} = 1,94$ Hz] e as frequências de excitação associadas ao caminhar das pessoas [$f_p = 1,70$ Hz (lento), $f_p = 2,00$ Hz (normal), $f_p = 2,30$ Hz (rápido)]. Tal fato, sem sombra de dúvidas, provoca o surgimento de vibrações excessivas e desconforto humano.

Cabe ressaltar que, em termos quantitativos, de forma a ilustrar o exposto anteriormente, com base no emprego dos modelos biodinâmicos na análise dinâmica da estrutura, os valores das acelerações de pico variam na faixa de $1,0\text{m/s}^2$ até $5,0\text{m/s}^2$. Evidentemente, os valores mais elevados de aceleração encontrados ao longo das análises correspondem a determinadas situações extremas e, bem como, a carregamentos idealizados que nem sempre são encontrados na realidade prática de projeto. Todavia, deve-se enfatizar que, apesar disto, os valores das acelerações de pico conduzem a passarela mista (aço-concreto) investigada a um estado de vibrações excessivas e de desconforto humano, de acordo com as análises realizadas e dos guias de projeto utilizados.

d) Avaliação do conforto humano da passarela mista (aço-concreto)

Com referência as situações de carregamento investigadas ao longo desta dissertação, ressalta-se que a passarela de pedestre mista (aço-concreto) se mostrou desfavorável em relação ao conforto humano dos usuários. Como foi demonstrado detalhadamente ao longo do trabalho de pesquisa, o valor da frequência fundamental da estrutura e, bem como, a proximidade deste valor com a frequência de passo dos pedestres, em inúmeras situações de projeto (caminhadas lenta, normal e rápida), conduziu a valores de acelerações máximas (acelerações de pico) muito acima dos valores limites estabelecidos nos guias internacionais de projeto [$a_p \text{ (m/s}^2\text{)} > a_{lim} \text{ (m/s}^2\text{)}$] AISC [15], HIVOSS [16] e SÉTRA [17]. Deste modo, pode-se concluir que estrutura em estudo não é recomendável para situações de carregamentos de multidão (46 a 140 pedestres), sob o ponto de vista de conforto humano.

8.3. Sugestões para trabalho futuros

a) Planejar e realizar testes experimentais na passarela de pedestres investigada e, também, em outros modelos estruturais de passarelas, objetivando calibrar os resultados fornecidos pelas análises numéricas, a partir da comparação entre os resultados obtidos (valores das acelerações), mediante o emprego dos modelos numéricos e aqueles medidos experimentalmente.

b) Modelagem de outros sistemas biodinâmicos, além do S1GL utilizado nesta dissertação, para uma representação mais refinada dos pedestres caminhando sobre a estrutura (efeito da interação dinâmica pedestre-estrutura).

c) Realização de estudos com outras hipóteses de carregamentos dinâmicos, considerando-se a aleatoriedade do caminhar dos pedestres, bem como variação de outros parâmetros, tais como peso e frequências do passo.

d) Desenvolvimento de estudos numéricos e experimentais com sistemas estruturais de passarelas com diferentes tipos de materiais (concreto e madeira), objetivando a realização de estudos comparativos.

REFERÊNCIAS

- [1] Autopista litoral sul, notícia institucional publicada em autopistalitoralsul.com.br, 2013.
- [2] Ekerman, S. K.; “Um quebra cabeça chamado Lelé”, artigo publicado em “vitruvius.com.br”, 2005.
- [3] *DER, Departamento de Estradas e Rodagem de São Paulo, Projeto de passarela para pedestres – instrução de projeto, cód IP-DE-C00/004, 35 f, 2009.*
- [4] Associação Brasileira de normas técnicas, NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto: Procedimento. Rio de Janeiro, 2007. 221p.
- [5] I.T. Transport Ltd., Footbridges – A manual for construction at community and district level, DFID, Reino Unido, 2004.
- [6] Blanco, C. M.; Bouillard, Ph.; Bodarwé, E.; Ney, L.; Structural dynamic design of a footbridge under pedestrian loading, 9th SAMTECH Users Conference, Universidade de Bruxelas, Brussels, Bélgica, 2005, 19p.
- [7] Ch. Petersen, Dynamik der Baukonstruktionen, Vierweg, Braunschweig /Wiesbaden, 1996.
- [8] Zivanovic, S.; Pavic, A.; Reynolds, P.; Vibration Serviceability of footbridges under human-induced excitation: A literature review. Journal of Sound and Vibration, v. 279, p. 1-74, 2005.
- [9] Stoyanoff, S.; Hunter, M.; Footbridges: Pedestrian Induced Vibration, Technotes issue n° 15, RWDI Consulting Engineers & Scientists.

- [10] *Rainer, J.H.; Pernica, G.; Allen, D.E.; Dynamic loading and response of footbridges, Institute for Research in Construction, Canadian Journal of Civil Engineering, vol. 15, pp. 66-71, 1988.*
- [11] BBC NEWS; Scores hurt as US bridge collapses; <http://news.bbc.co.uk>, 21 de Maio de 2000.
- [12] MRN, motor race network; <http://www.mrn.com>, 20 de Maio de 2000.
- [13] 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.
- [14] ANSYS Swanson Analysis Systems, Inc., P. O. Box 65, Johnson Road, Houston, PA, 15342-0065. Release 11.0, SP1 UP20070830, ANSYS, Inc. is a UL registered ISO 9001:2000 Company. Products ANSYS Academic Research, 2007.
- [15] Murray, T. M.; Allen, D.E.; Ungar, E.E.; Steel Design Guide Series 11: Floor Vibrations due to Human Activity. Chicago, USA: American Institute of Steel Construction (AISC), 2003.
- [16] SÉTRA Footbridge – Assessment of Vibrational Behaviour of Footbridge Under Pedestrian Loading, Technical guide. Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes, Paris, 2006.
- [17] HIVOSS Human Induced Vibration of Steel Structures, Design of Footbridges Guideline. Reserch Fund for Coal and Steel, 2008.
- [18] Bachmann, H. et al.; Vibration Problem in Structures – Practical Guidelines, Institut für Baustatik und Konstruktion, 1st Ed, Basel, Birkhäuser Verlag, 1995.
- [19] 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.

- [20] SAMCEF, software de modelagem numérica em elementos finitos, <http://www.samcef.com>.
- [21] Figueiredo, P. F.; Estudo do comportamento dinâmico de passarelas devido ao caminhar de pedestres. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, PGECIV. Universidade do estado do Rio de Janeiro, UERJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 115p.
- [22] Lima, L. A. N.; Efeito da modelagem do carregamento, do impacto do calcanhar humano e do amortecimento estrutural na resposta dinâmica de passarelas mistas. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, PGECIV. Universidade do estado do Rio de Janeiro, UERJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 160p.
- [23] Wyatt, T.A. Design Guide on the Vibration of Floors, SCI Publication 076, The Steel Construction Institute and Construction Industry Research and Information, London, 1989.
- [24] Silva, J.G.S. da; Vellasco, P.C.G da S.; Andrade, S.A.L. de; Lima, L.R.O. de; Figueiredo, F.P.; Vibration analysis of footbridges due to vertical human loads. *Computers & Structures*, v. 85, p. 1693-1703, 2007.
- [25] Barros, P. T.; Análise dinâmica em passarela sujeita à movimentação humana, UFRS, Porto Alegre, RS, Brasil, 60p, 2009.
- [26] Computers and Structures, Inc., SAP2000 14.1, Structural Analysis Program, 2009.
- [27] Ingólfsson, E.T.; Georgakis, C.T.; Ricciardelli, F.; Jonsson, J.; Experimental identification of pedestrian-induced lateral forces on footbridges; *Journal of Sound and Vibration*, 2010.
- [28] Zivanovic, M.; PAVIC, A., Dynamic response of footbridges due to vertical load models of pedestrians, EURO DYN 2011, Leuven, Bélgica, 2011, 8p.

- [29] Debona, L. G.; Modelagem do comportamento dinâmico de passarelas tubulares em aço e mistas (aço-concreto). Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, PGECIV. Universidade do estado do Rio de Janeiro, UERJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 156p.
- [30] Ingólfsson, E.T.; Georgakis, C.T; Jonsson, J.; Pedestrian-induced lateral vibrations of footbridges: A literature review, *Engineering Structures* 45, pág 21 – 52, 2012.
- [31] Bocian, M.; Macdonald, J. H. G.; Burn, J. F.; Biomechanically Inspired Modeling of Pedestrian-Induced Vertical Self-Excited Forces, American Society of Civil Engineers, 2013.
- [32] Mendes, P. J.; Análise dinâmica e controle de vibrações de passarelas de pedestres submetidas ao caminhar humano. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, PGECIV. Universidade do estado do Rio de Janeiro, UERJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 212p.
- [33] Zhang, M.; Georgakis, C. T.; Chen, J.; Biomechanically Excited SMD Model of a Walking Pedestrian; American Society of Civil Engineers, 2016.
- [34] Clough, R.W. and Penzien J.; "Dynamics of Structures", McGraw-Hill, 634 pages, 1993.
- [35] Silva, J.G.S. da; "Dinâmica das Estruturas. Volume 1: Análise no Domínio do Tempo" (Notas de Aula), 199 páginas, 2016.
- [36] Silva, F.T. da; Vibrações de passarelas de pedestres na direção vertical considerando modelos biodinâmicos de pessoas caminhando. Tese de Doutorado. Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, PB, Brasil, 2011, 162p.
- [37] Debona, G.L.; Monitoração experimental e modelagem numérica sobre o comportamento dinâmico de passarelas submetidas ao caminhar de

- pedestres com base no emprego de modelos biodinâmicos. Tese de Doutorado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, PGECIV. Universidade do estado do Rio de Janeiro, UERJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2016, 250p (Em desenvolvimento).
- [38] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8800: Projetos de estrutura de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, 2008. 237p.
- [39] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7188: Carga móvel rodoviária e de pedestres em pontes, viadutos, passarelas e outras estruturas. Rio de Janeiro, 2013. 14p.
- [40] USIMINAS, catálogo USI-SAC 300, site: www.usiminas.com.br
- [41] Boere, N.; “Arroio Fundo: um rio em tratamento”, Jornal extra, publicado em 23 de Março de 2012, <http://extra.globo.com>.
- [42] Filho, A. A.; Elementos finitos – a base da tecnologia CAE, Análise Dinâmica, editora ÉRICA, 2005.
- [43] Mendes, J. P; Análise dinâmica e controle de vibrações de passarelas de pedestres submetidas ao caminhar humano

ANEXO A– NORMAS E GUIAS DE PROJETO

Neste presente capítulo serão apresentadas as metodologias de cálculo dos principais guias de projetos e normas internacionais no que diz respeito ao conforto humano em estruturas submetidas ao caminhar humano. O principal critério utilizado pelos guias é a limitação da frequência da estrutura a intervalos de segurança, de acordo com os padrões locais de sensação de movimento. Entretanto, algumas normas fixam também valores limites de aceleração de pico vertical e horizontal, o que sem dúvida é um aspecto importante na avaliação do conforto de uma passarela.

A - 1. Guia de projeto AISC [15]

O Manual “Steel Design Guide Séries 11” [15], se trata de um manual para verificação de estruturas mistas de aço e concreto, submetidas a carregamentos dinâmicos, faz parte de um conjunto obras elaboradas por pesquisadores do AISC [15] Murray, Allen e Ungar.

O guia propõe uma metodologia de carregamento que simule o efeito do caminhar humano através da utilização de uma função harmônica cossenoidal, conforme Equação (14).

$$F_i = P\alpha_i \cos(2\pi i f_{step} t) \quad (14)$$

Onde:

P - Peso de uma pessoa, estimado em 700 N.

α_i - Coeficiente harmônico dinâmico (Tabela 31)

i -Número do harmônico

f_{step} - Frequência de passo do pedestre

A taxa de aceleração a/g , corresponde ao valor da aceleração de pico do piso ou passarela, sobre o valor da aceleração da gravidade, e é dado pela Equação (15).

$$\frac{a}{g} = \frac{R\alpha_i P}{\beta W} \cdot \cos(2\pi i f_{\text{step}} t) \quad (15)$$

onde:

a/g - Taxa de aceleração de pico

R - Fator de redução

B - Taxa de amortecimento modal

W - Peso efetivo do piso.

O Fator de redução R que leva em consideração que o estado de ressonância não é atingido apenas pelo ato de caminhar, e que a pessoa que sente o incômodo não se encontra no mesmo ponto, simultaneamente, com a pessoa que provoca esse incômodo.

Os valores do coeficiente dinâmico α_i , assim como o de frequência de passo f_{step} , podem ser obtidos da Tabela 31, para valores correspondentes ao número do harmônico i em consideração.

Tabela 31 – Valores habituais de frequência de passo (f_p) [15]

Número do Harmônico i	Caminhada		Exercício aeróbico		Grupo de dança	
	f (Hz)	α_i	f(Hz)	α_i	f(Hz)	α_i
1	1,6 – 2,2	0,5	2 – 2,75	1,5	1,5 - 3	0,5
2	3,2 – 4,4	0,2	4 – 5,5	0,6	–	–
3	4,8 – 6,6	0,1	6 – 8,25	0,1	–	–
4	6,4 - 8,8	0,05	–	–	–	–

O guia propõe uma simplificação para a Equação (15), que, considerando o valor da frequência de passo do primeiro harmônico igual à frequência natural (f_{01}) da estrutura, e com o uso da relação da Equação (16), resulta em uma fórmula de mais simples aplicação mostrada na Equação (17).

$$\alpha_i = 0,83 \exp(-0,35f_{01}) \quad (16)$$

$$\frac{a_p}{g} = \frac{P_0 \exp(-0,35f_n)}{\beta W} \leq \frac{a_0}{g} \quad (17)$$

onde:

a_p/g - Taxa estimada de aceleração de pico

a_0/g - Taxa de aceleração limite (Ver Tabela 32)

P_0 - Valor constante de força (ver Tabela 32)

W - Peso efetivo da estrutura.

O termo $P_0 \cdot \exp(-0,35f_{01})$ da Equação (17) representa a força harmônica devido ao caminhar humano, que provoca a ressonância na estrutura. Na Tabela 32 é possível encontrar o valor correspondente de P_0 para a situação em estudo.

Tabela 32 –Valores recomendados para os parâmetros [15]

Tipo de ocupação	Força constante (P_0)	Taxa de amortecimento (β)	Aceleração limite ($a_0/g \times 100 \%$)
Escritórios, residências e igrejas	0,29 kN	0,02 – 0,05*	0,50 %
Shoppings Centers	0,29 kN	0,02	1,50 %
Passarela interna	0,41 kN	0,01	1,50 %
Passarela externa	0,41 kN	0,01	5,00 %

* 0,02 para pisos com poucos componentes não estruturais como pode ocorrer em áreas de trabalho e igrejas.

* 0,03 para pisos com poucos componentes estruturais e móveis, mas com somente pequenas divisórias desmontáveis, típicas de muitas áreas de escritórios modulares.

* 0,05 para pisos com divisórias de altura total entre os pisos.

O valor da taxa limite é específico para cada tipo de estrutura, e pode ser mais precisamente obtido através do gráfico fornecido pelo guia, de acordo com a Figura 95.

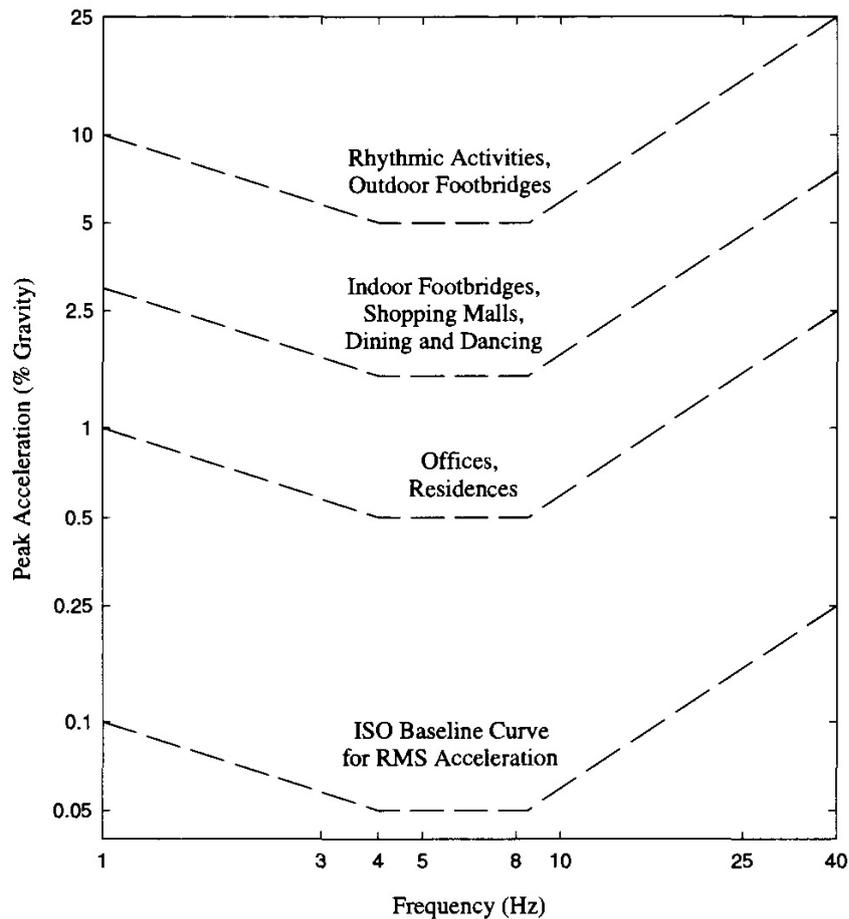


Figura 95 – Pico máximo de aceleração recomendado [15]

A - 2. Guia de projeto SÉTRA [16]

O Instituto SÉTRA [16], publicou em 2006 um guia sobre análise do comportamento vibracional de passarelas submetidas ao carregamento dinâmico humano, que foi um projeto elaborado por um grupo de trabalho liderado por Charles Pascal e Wasoodev Hoorpah.

Segundo o guia, as passarelas de pedestres da Classe IV não precisam ser avaliadas dinamicamente, tendo em vista o seu tipo de localização e utilização, entretanto Para passarelas muito leves é recomendada a escolha ao menos da Classe III.

Segundo o guia de projeto SÉTRA [16], as passarelas são classificadas em quatro classes distintas, de acordo com a Tabela 33.

Tabela 33 – Classificação das passarelas segundo SÉTRA [16]

CLASSE	Descrição	d
CLASSE IV	Raramente utilizadas, construídas em áreas pouco habitadas ou para assegurar a continuidade da caminhada de pedestres sobre as rodovias.	---
CLASSE III	Empregadas para uso padrão e ocasionalmente são submetidas ao carregamento associado ao fluxo de pedestres	0,5
CLASSE II	Urbanas construídas para ligar áreas populosas submetidas a tráfego pesado e ocasionalmente toda sua área é submetida ao carregamento de pedestres	0,8
CLASSE I	Urbanas construídas em áreas com alta concentração de pedestres (estações de trem, estádios de futebol, etc.), submetidas frequentemente a tráfego pesado.	1,0

Onde d é a concentração de pedestres, dada em pedestre/m².

Com o intuito de facilitar a classificação quanto ao nível de conforto o guia trás em seu conteúdo algumas tabelas que correlacionam o tipo de classe a qual a passarela pertence, a aceleração de pico e a classificação de conforto, conforme Tabela 34 e 35.

Tabela 34 – Classificação quanto ao conforto para vibrações verticais [16]

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

Tabela 35 – Classificação quanto ao conforto para vibrações horizontais [16]

Faixas de aceleração (m/s ²)	0,0	0,15	0,3	0,8>
Faixa 1	Máximo			
Faixa 2		Médio		
Faixa 3			Mínimo	
Faixa 4				Inaceitável

A Tabela 36 apresenta, em níveis decrescentes, as faixas de frequências naturais de maior probabilidade de ocorrência do fenômeno físico da ressonância (frequência natural da estrutural igual ou próxima da frequência da excitação). Os níveis 1, 2, 3 e 4 representam, portanto, as faixas de maior, médio, mínimo e risco negligenciável de ocorrência de ressonância.

Tabela 36 – Risco de ressonância – vibrações verticais e Longitudinais [16]

Faixas de aceleração (m/s ²)	0	1,0	1,7	2,1	2,6	5,0>
Faixa 1			Máximo			
Faixa 2		Médio		Médio		
Faixa 3					Mínimo	
Faixa 4	Negligenciável					Negligenciável

O cálculo da aceleração de pico vertical é obtido com o uso da Equação (18).

$$a = \frac{1}{2\xi} \cdot \frac{4F_N}{\pi\rho A} \quad (18)$$

Onde:

A - é a Área da seção do tabuleiro.

ψ - é o fator redutor da resposta dinâmica

ξ - é o coeficiente de amortecimento estrutural

ρ - é a massa específica da ponte

F_N é a força dinâmica

A força dinâmica pode ser calculada pelas equações fornecidas na Tabela 37, para as classes de passarelas II e III, e pelas equações da Tabela 38 para estruturas de classe I:

Tabela 37 – Força dinâmica para as classes II e III [16]

Direção		
Vertical (v)	$d \times (280N) \times \cos(2\pi f_v t) \times 10,8 \times (\xi / n)^{1/2} \times \psi$	(19)
Longitudinal (L)	$d \times (140N) \times \cos(2\pi f_v t) \times 10,8 \times (\xi / n)^{1/2} \times \psi$	(20)
Transversal (t)	$d \times (35N) \times \cos(2\pi f_v t) \times 10,8 \times (\xi / n)^{1/2} \times \psi$	(21)

Onde: $N_{eq} = 10,8\sqrt{\xi N}$ para $< 1,0$ pedestre/m²

Tabela 38 – Força dinâmica para a classe I [16]

Direção		
Vertical (v)	$1,0 \times (280N) \times \cos(2\pi f_v t) \times 1,85 \times (1 / n)^{1/2} \times \psi$	(22)
Longitudinal (L)	$1,0 \times (140N) \times \cos(2\pi f_v t) \times 1,85 \times (1 / n)^{1/2} \times \psi$	(23)
Transversal (t)	$1,0 \times (35N) \times \cos(2\pi f_v t) \times 1,85 \times (1 / n)^{1/2} \times \psi$	(24)

Onde: $N_{eq} = 1,85\sqrt{N}$ para $> 1,0$ pedestre/m²

ψ - é o fator redutor da resposta dinâmica

n - é o número de pedestres na passarela

A - 3. Guia de projeto HIVOSS [17]

Segundo o guia HIVOSS [17], as classes de conforto podem ser definidas de acordo com a aceleração máxima a ser atingida pela estrutura, dentro de uma das quatro categorias, de acordo com a Tabela 39:

Tabela 39 – Classe de conforto segundo o guia HIVOSS [17]

CLASSE DE CONFORTO	NÍVEL DE CONFORTO	ACELERAÇÃO LIMITE VERTICAL	ACELERAÇÃO LIMITE HORIZONTAL
CL 1	Máximo	$< 0,50\text{m/s}^2$	$<0,10\text{ m/s}^2$
CL 2	Médio	$0,5\text{ a }1,00\text{ m/s}^2$	$0,1\text{ a }0,3\text{ m/s}^2$
CL 3	Mínimo	$1,00\text{ a }2,5\text{ m/s}^2$	$0,3\text{ a }0,8\text{ m/s}^2$
CL 4	Inaceitável	$> 2,5\text{ m/s}^2$	$> 0,8\text{m/s}^2$

Para se realizar os cálculos pelo guia de projeto HIVOSS [17], deve ser usada uma das classes de tráfego propostas na Tabela 40.

Tabela 40 – Classe de tráfego pela metodologia HIVOSS I [17]

Classe de tráfego	Densidade d (P = pessoa)	Descrição	Características
TC 1	$d = 15\text{ p}/(B \cdot L)$	Tráfego muito fraco	B = largura do tabuleiro; L=comprimento do tabuleiro
TC 2	$d = 0,2\text{ p/m}^2$	Tráfego fraco	Confortável e andamento livre, Ultrapassagem é possível, pedestres isolados podem escolher livremente a passada
TC 3	$d = 0,5\text{ p/m}^2$	Tráfego denso	Andamento ainda não restringido Ultrapassagem pode ser inibida intermitentemente
TC 4	$d = 1,0\text{ p/m}^2$	Tráfego muito denso	Liberdade de movimento é restringida, Ultrapassagem já não é possível
TC 5	$d = 1,5\text{ p/m}^2$	Tráfego excepcionalmente denso	Andamento desagradável já não é possível escolher livremente a passada

O guia recomenda também a utilização de um dos valores na Tabela 41 para o amortecimento adotado para a estrutura, em função do tipo da estrutura ou do material adotado.

Tabela 41 – Amortecimento recomendado pela guia HIVOSS I [17]

Tipo de construção	ξ Mínimo	ξ Médio
Concreto Armado	0,8 %	1,3 %
Concreto Protendido	0,5 %	1,0 %
Estrutura Mista	0,3 %	0,6 %
Estrutura Metálica	0,2 %	0,4 %
Estrutura de Madeira	1,0 %	1,5 %
Stress-Ribbon	0,7 %	1,0 %

O cálculo da carga harmônica uniformemente distribuída sobre a superfície carregada S é dada pela Equação (25), com a utilização dos parâmetros fornecidos pela Tabela 42:

$$p(t) = P \cdot \cos(2\pi \cdot f_p t) \cdot n' \cdot \Psi \quad (25)$$

Onde:

P – É componente da força de um pedestre isolado, que varia conforme a direção do modo de vibração em estudo, indicada na Tabela 42;

f_p - frequência de passo, assumida igual à frequência própria da estrutura para o modo de vibração em estudo;

n' - É o número de pedestres equivalente, definido com base na densidade do fluxo, conforme a Tabela 42.

Ψ – é o coeficiente de redução que considera a probabilidade da frequência de passo se aproximar da frequência própria da estrutura.

Tabela 42 – Parâmetros recomendados pelo guia HIVOSS I [17]

P (N)		
Vertical 280	Longitudinal 140	Lateral 35
Coeficiente de redução ψ		
Número equivalente n' de peões sobre a superfície carregada S para o modelo de carga de:		
TC1 A TC3 - (DENSIDADE $d < 1,0$ P/m ²): $n' = \frac{10,8\sqrt{(\xi \cdot n_{ped})}}{S}$ [1/m ²]		
TC4 A TC5 - (DENSIDADE $d > 1,0$ P/m ²): $n' = 1,85 \cdot \frac{\sqrt{n}}{S}$ [1/m ²]		

Onde:

ξ é o fator de amortecimento estrutural

n é o número de pedestres sobre a superfície carregada S ($n = S \times d$).

A aceleração máxima devido ao caso de ressonância será dada pela Equação (16):

$$a_{m\acute{a}x} = \frac{p^* \pi}{m^* \delta} = \frac{p^*}{m^*} \frac{1}{2\xi} \quad (26)$$

Onde:

p^* - A ação generalizada para a carga distribuída $p(x)$

m^* - É a massa generalizada da estrutura