

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DE
PASSARELAS SUBMETIDAS À AÇÃO DE
PEDESTRES**

KAROLINE MATOS DA HORA

**MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM ESTRUTURAS E
CONSTRUÇÃO CIVIL**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

BRASÍLIA / DF: JUNHO – 2018

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DE
PASSARELAS SUBMETIDAS À AÇÃO DE
PEDESTRES**

KAROLINE MATOS DA HORA

**ORIENTADORA: PROF. GRACIELA NORA DOZ DE
CARVALHO**

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL 2

BRASÍLIA – DF, 18 DE JUNHO DE 2018

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DE
PASSARELAS SUBMETIDAS À AÇÃO DE PEDESTRES

KAROLINE MATOS DA HORA

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL II SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL.

APROVADA POR:

Prof^a. Graciela Nora Doz de Carvalho, Dr. Ing. (UnB)
(Orientadora)

Prof. Luis Alejandro Pérez Peña, DSc. (FAU-UnB)
(Examinador interno)

Prof^a. Maura Milfont Shzu, DSc. (FGA-UnB)
(Examinador externo)

BRASÍLIA/DF, 18 DE JUNHO DE 2018

FICHA CATALOGRÁFICA

HORA, KAROLINE MATOS DA

Análise do comportamento dinâmico de passarelas submetidas à ação de pedestres [Distrito Federal] 2018.

xv, 79 p., 210 x 279 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Civil, 2018)

Monografia de Projeto Final. Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Análise dinâmica

3. Normativas

2. Passarelas

4. Método dos Elementos Finitos

I ENC/FT/UnB

II Título (Bacharel)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

HORA, K. M. (2018). Análise do comportamento dinâmico de passarelas submetidas à ação de pedestres. Monografia de Projeto Final em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 79 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Karoline Matos da Hora

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: Análise do comportamento dinâmico de passarelas submetidas à ação de pedestres

GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Civil / 2018

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Karoline Matos da Hora
QNP 26 Conjunto R casa 08
72.235-618 - Ceilândia/DF - Brasil
karolinemhora@gmail.com

AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente a Deus pelo dom da vida, por ter sido meu verdadeiro pai e por sempre me guiar pelos bons caminhos e me fortalecer nos momentos de maiores dificuldades.

Aos meus familiares que sempre torceram por mim. Em especial, à minha mãe Maria por todo amor, apoio, pelas diversas renúncias que fez em meu favor e por sempre estar ao meu lado.

À professora Graciela, pela paciência, solicitude, dedicação e por ter me acolhido inicialmente na Iniciação Científica e, posteriormente, na realização desse trabalho.

Ao professor Luis Alejandro Pérez Peña pela disponibilidade, ajuda e paciência ao longo desses anos.

À minha comunidade do Caminho Neocatecumenal que me acompanhou em todos esses anos, estando sempre presente e ajudando-me com palavras e orações.

Aos meus amigos que me acompanham desde o ensino fundamental Isabela, Saulo, Anna Krause, Carlos, Bruna e Luiz pela amizade e incentivo durante esses anos. Agradecimento especial ao professor Francisco Miranda pela ajuda na escolha desse curso que tanto me identifiquei.

Aos diversos amigos que fiz durante a graduação e com quem tive o prazer de compartilhar essa incrível jornada, em particular Tharcio, Amanda Araújo, Lucas Rincon, Carolina, Camila Lima, Jullianny, Mateus, Marcos, Fernando, André, Bruno e Aline. Aos amigos que fiz na matemática Sâmela, Amanda Villas Bôas e Matheus por me encorajarem a seguir na engenharia.

Aos colegas do Superior Tribunal Militar que fizeram do estágio uma experiência enriquecedora e me acompanharam na fase final da graduação. Particularmente, ao Eng. Victor Castro pelos aprendizados compartilhados e pela paciência em transmiti-los e também aos amigos e futuros arquitetos Bernadete, Juliana, Rafael e Suzane pela amizade.

Aos colegas, professores e funcionários da Universidade de Brasília, em especial do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

Finalmente, a todos aqueles que de alguma forma contribuíram para que esse dia pudesse se tornar uma realidade.

Resumo

Passarelas são estruturas que têm como objetivo permitir uma travessia segura e confortável dos pedestres, interferindo minimamente no trânsito, no entorno e na paisagem urbana. A evolução nas técnicas de dimensionamento e o aumento das opções de materiais, sistemas estruturais e construtivos a serem empregados são fatores que contribuíram para a execução de estruturas mais esbeltas. Consequentemente, essas construções têm se tornado mais suscetíveis a vibrações que causam desconforto aos usuários. O estudo de vibrações trata-se de um assunto complexo devido à dificuldade de caracterização das cargas provenientes das atividades humanas. Muitas vezes as simplificações feitas pelas normativas não representam o carregamento real ao qual a estrutura está submetida de forma adequada. Particularmente, as normas brasileiras não abordam esse assunto de forma especial levando os projetistas a considerar a estrutura como submetida unicamente a cargas estáticas. Diante disso, este trabalho propõe o estudo de diferentes normativas tanto nacionais quanto internacionais e a aplicação das suas diretrizes a duas passarelas estudadas por outros autores. A primeira passarela trata de uma estrutura de concreto cuja análise foi feita no programa SAP 2000. Com os resultados encontrados, foi possível notar que a passarela necessitaria de um redimensionamento visto que apresenta frequências abaixo dos limites mínimos normativos. A segunda passarela é uma estrutura de aço cuja análise foi feita no programa STRAP. Observou-se que devido ao dimensionamento dela ter sido feita com base na norma francesa, ela apresentou resultados melhores que a primeira passarela em relação aos diferentes códigos internacionais. O estudo desenvolvido permitiu identificar as normas mais conservadoras e os aspectos não contemplados pelas normas brasileiras.

Palavras-chave: passarela, vibrações, análise dinâmica, ações dinâmicas, elementos finitos.

Abstract

Footbridges are structures that aims to allow a safe and comfortable crossing for pedestrians, interfering minimally in the traffic, nearby and in the urban space. The evolution in design techniques and new options of materials, structural and constructive systems are factors that have contributed for more slenderness structures. Therefore, these buildings have become more susceptible to vibrations that cause discomfort to the users. The study of vibrations is a complex subject because it is difficult to characterize loads coming from human activities. Many times, the simplifications made by regulations do not represent the real load of the structure properly. Particularly, Brazilian regulations do not deal with this carefully, letting designers consider only static loads on this kind of structures. Thinking about it, this work proposes the study of different national and international codes applied to two footbridges already studied by another authors. The first footbridge is made of concrete whose analyze was done in software SAP 2000. Based on the results, it was possible to see that the footbridge needs to be redesigned because some frequencies are lower than the normative minimum limits. The second footbridge is made of steel whose analyze was done in software STRAP. It was possible to realize that it presents better results than the first structure for some international codes due to design had to been done with French normative. The study developed allowed identifying more conservative normatives and the aspects that are not contemplate in brazilian codes.

Key-words: footbridge, vibrations, dynamics analysis, dynamics actions, finite elements.

Lista de figuras

Figura 1 - Ponte Coalbrookdale, Inglaterra.....	20
Figura 2 - Elementos do arco (Fialho, 2004)	21
Figura 3 - Posição do arco em relação ao tabuleiro (Meyer, 1996)	22
Figura 4 - Passarela Simone de Beauvoir em Paris.....	22
Figura 5 - Elementos da treliça plana (Fialho, 2004).....	23
Figura 6 - Passarela Besos Yacht Port	24
Figura 7 – Vista interna da Passarela Besos Yacht Port	24
Figura 8 - Tipos de seções das vigas (Fialho, 2004)	25
Figura 9 - Passarela em viga Virendel na BR 369 no Paraná.....	26
Figura 10 - Elementos do sistema pênsil (Fialho, 2004).....	26
Figura 11 - Passarela do Milênio na Inglaterra	27
Figura 12 - Vista superior da Passarela do Milênio	28
Figura 13 - Elementos do sistema estaiado (Fialho, 2004).	28
Figura 14 - Passarela da Barra em Santa Catarina	29
Figura 15 - Passarela Solferino em Paris	30
Figura 16 - Padrão típico de forças produzido por: (a) caminhada; (b) corrida (Zivanovic, et al., 2005)	33
Figura 17 - Sistema idealizado de um grau de liberdade: (a) componentes básicos; (b) forças em equilíbrio. (Adaptado de Clough, 2003).....	34
Figura 18 - Força vertical, horizontal lateral e horizontal longitudinal de caminhada (Zivanovic et al., 2005)	37
Figura 19 - Comparação entre a força real (a) e ideal (b) para uma série de 30 passos na caminhada e frequência média de passo de 1,91 Hz (Brownjohn et al , 2004).....	39
Figura 20 - Força de excitação descontínua (Bachmann e Ammann, 1987).....	40
Figura 21 - Variação do fator de impacto (kp) em função da duração do tempo de contato (Bachmann e Ammann, 1987).....	41
Figura 22 - Coeficiente de resposta dinâmico Ψ (BS 5400, 1978)	47
Figura 23 - Limite de aceleração em função da frequência (ONT, 1991).....	49
Figura 24 - Configuração das passarelas (ONT, 1991).....	50
Figura 25 - Relação entre a frequência fundamental na vertical f_{vert} e o coeficiente k_{vert} (EUROCODE 5, 2004)	51
Figura 26 - Relação entre a frequência fundamental na horizontal f_{hor} e o coeficiente k_{hor} (EUROCODE 5, 2004)	52
Figura 27 - Fator de redução ψ situações 1 e 2 (adaptado de SÉTRA, 2006).....	57
Figura 28 - Fator de redução ψ situação 3 (adaptado de SÉTRA, 2006)	58
Figura 29 - Força produzida pela ação de caminhar (ISO 10137, 2007)	59
Figura 30 - Curva base para acelerações máximas no plano vertical (ISO 10137, 2007).....	61
Figura 31 - Curva base para acelerações máximas no plano horizontal (ISO 10137, 2007)	61
Figura 32 - Passarela em Esteio, RS (Barros, 2009)	64
Figura 33 - Seção do vão central (adaptado de Barros, 2009)	64
Figura 34 - Planta de situação da passarela 1 (adaptado de Barros, 2009)	65
Figura 35 - Corte longitudinal da passarela 1 (adaptado de Barros, 2009).....	66
Figura 36 - Modelagem da passarela feita por Barros no SAP2000 (Barros, 2009).....	68
Figura 37 - Função do carregamento (adaptado de Barros, 2009)	72
Figura 38 - Aceleração vertical para uma pessoa caminhando (Barros, 2009).....	73
Figura 39 - Aceleração vertical para três pessoas caminhando defasadas de 1,0 s (Barros, 2009).....	74

Figura 40 - Aceleração vertical para uma pessoa correndo (Barros, 2009)	74
Figura 41 - Aceleração vertical para três pessoas correndo defasadas de 0,8s (Barros, 2009)	75
Figura 42 – Aceleração vertical de uma pessoa pulando no centro do vão (Barros, 2009)	75
Figura 43 – Aceleração vertical de três pessoas pulando no centro do vão (Barros, 2009)	76
Figura 44 - Dimensões da passarela padrão (Queiroz, 2014)	80
Figura 45 – Módulo de acesso (Queiroz, 2014)	81
Figura 46 - Trecho da treliça utilizada (Queiroz, 2014).....	81
Figura 47 - Um vão da treliça (Queiroz, 2014)	82
Figura 48 - Detalhe de ligação do travamento horizontal (Queiroz, 2014).....	82
Figura 49 - Piso em chapa xadrez (Queiroz, 2014).....	83
Figura 50 – Terça Z de alma e mesa enrijecidas (Queiroz, 2014).....	83
Figura 51 - Ação dinâmica longitudinal sobre a passarela 2 (Queiroz, 2014)	88
Figura 52 - Ação dinâmica transversal sobre a passarela 2 (Queiroz, 2014)	88
Figura 53 - Aceleração longitudinal sobre a passarela 2 (Queiroz, 2014)	89
Figura 54 - Aceleração transversal sobre a passarela 2 (Queiroz, 2014)	89

Lista de tabelas

Tabela 1 - Coeficiente de Fourier para ação de caminhar	38
Tabela 2 - Valores médios do comprimento de passo	42
Tabela 3 - Valores médios da velocidade de passo	43
Tabela 4 - Valores médios de frequência de passo.....	43
Tabela 5 - Valor do coeficiente geométrico k	47
Tabela 6 - Coeficiente k para diversas configurações	49
Tabela 7 - Níveis de aceleração para vibrações verticais	55
Tabela 8 - Níveis de aceleração para vibrações horizontais.....	55
Tabela 9 - Risco de ressonância na direção vertical e longitudinal.....	55
Tabela 10 - Risco de ressonância na direção horizontal lateral.....	56
Tabela 11 - Situações dinâmicas a serem consideradas	56
Tabela 12 - Exemplo de parâmetros de projeto para movimentos de uma pessoa.....	60
Tabela 13 - Modos de vibração da estrutura 1	69
Tabela 14 - Caracterização dos carregamentos utilizados na modelagem da estrutura 1.....	72
Tabela 15 - Valores máximos de aceleração, velocidade e deslocamento em cada caso estudado.....	76
Tabela 16 - Resumo das análises realizadas para a passarela 1.....	79
Tabela 17 - Características das seções utilizadas no projeto	84
Tabela 18 - Modos de vibração da estrutura 2	85
Tabela 19 - Classificação dos modos quanto ao risco de ressonância.....	87
Tabela 20 - Força dinâmica resultante	87
Tabela 21 - Classificação do conforto para a passarela 2.....	89
Tabela 22 - Resumo das análises realizadas para a passarela 2.....	91

Lista de símbolos

m	massa
k	rigidez
c	amortecimento
x	deslocamento
t	tempo
f_I	forças de inércia
f_D	forças de amortecimento
f_S	forças elásticas
p	forças externas
\dot{x}	velocidade
\ddot{x}	aceleração
ω	frequência angular
\mathbf{m}	matriz de massa da estrutura
\mathbf{c}	matriz de amortecimento da estrutura
\mathbf{k}	matriz de rigidez da estrutura
$\ddot{\mathbf{x}}$	vetor aceleração
$\dot{\mathbf{x}}$	vetor velocidade
\mathbf{x}	vetor deslocamento
\mathbf{p}	vetor da força externa aplicada sobre o sistema
$\hat{\mathbf{x}}$	modos de vibração do sistema
θ	ângulo de fase
\ddot{Y}_n	acelerações modais da estrutura
\dot{Y}_n	velocidades modais da estrutura
Y_n	deslocamentos modais da estrutura
ξ_n	razão de amortecimento
ω_n	frequência natural circular para o enésimo modo de vibração
P_n	força modal para o enésimo modo
M_n	massa modal para o enésimo modo
ϕ_i	vetor do i-ésimo modo de vibração
l_p	comprimento de passo
v_p	velocidade de passo

f_p	frequência ou razão de passo
G	peso do usuário
α_i	coeficiente de Fourier do i-ésimo harmônico
φ_i	ângulo de fase do i-ésimo harmônico relativo ao 1º harmônico
k_p	fator de impacto dinâmico
$F_{p,max}$	carregamento dinâmico máximo
t_p	tempo de duração do contato entre o pé e o solo
T_p	período de passo
f_o	frequência natural da estrutura
$a_{máx}$	aceleração máxima vertical
y_s	deflexão estática decorrente da ação de um pedestre
k	coeficiente geométrico
Ψ	coeficiente de resposta dinâmico
$F_v(t)$	função de carga na direção vertical
$F_{h,long}(t)$	função de carga na direção horizontal longitudinal
$F_{h,transv}(t)$	função de carga na direção horizontal transversal
L	vão livre da estrutura
N	número de pedestres
$a_{vert,1}$	aceleração vertical da estrutura provocada por um pedestre
$a_{vert,n}$	aceleração vertical da estrutura provocada por n pedestres
M	massa total da passarela
f_{vert}	frequência fundamental da passarela na direção vertical
k_{vert}	coeficiente do código Eurocode 5 na direção vertical
$a_{hor,1}$	aceleração horizontal da estrutura provocada por um pedestre
$a_{hor,n}$	aceleração horizontal da estrutura provocada por n pedestres
f_{hor}	frequência fundamental da passarela na direção horizontal
k_{hor}	coeficiente do código Eurocode 5 na direção horizontal
λ	taxa de pedestres por unidade de tempo
T	período de passo
D	densidade
A	área da passarela
N_{eq}	número de pedestres com a mesma frequência e em fase

Ψ	fator de minoração do risco de ressonância
$\alpha_{n,v}$	coeficiente de Fourier do i-ésimo harmônico na direção vertical
$\alpha_{n,h}$	coeficiente de Fourier do i-ésimo harmônico na direção horizontal
$\phi_{n,v}$	ângulo de fase do i-ésimo harmônico na direção vertical
$\phi_{n,h}$	ângulo de fase do i-ésimo harmônico na direção horizontal
n	número de harmônicos considerados necessários para caracterizar a ação
\bar{k}	número de harmônicos que caracterizam a função na amplitude de interesse
$f_{o,v}$	frequência fundamental da estrutura na direção vertical
W	peso próprio da estrutura
g	aceleração da gravidade
ΔDL	deflexão máxima vertical causada pelo peso próprio

Sumário

1. INTRODUÇÃO	16
1.1. OBJETIVO GERAL	17
1.2. ESTRUTURA DO TRABALHO	17
2. METODOLOGIA	18
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
3.1. CONTEXTO HISTÓRICO	19
3.2. CLASSIFICAÇÃO DAS PASSARELAS	21
3.3. VIBRAÇÕES EM PASSARELAS	29
4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	32
4.1. INTRODUÇÃO	32
4.2. FORMULAÇÃO MATEMÁTICA	33
4.3. AÇÃO DOS CARREGAMENTOS	37
4.3.1. Caminhar	37
4.3.2. Correr	39
4.3.3. Efeito multidão	41
4.4. AÇÃO DO PEDESTRE	42
4.4.1. Comprimento de passo	42
4.4.2. Velocidade de passo	42
4.4.3. Frequência de passo	43
5. CRITÉRIOS NORMATIVOS	44
5.1. INTRODUÇÃO	44
5.2. NBR 7188:2013 – CARGA MÓVEL RODOVIÁRIA E DE PEDESTRES EM PONTES, VIADUTOS, PASSARELAS E OUTRAS ESTRUTURAS	44
5.3. NBR 8800:2008 – PROJETO DE ESTRUTURAS DE AÇO E DE ESTRUTURAS MISTAS DE AÇO E CONCRETO DE EDIFÍCIOS	45
5.4. NBR 6118:2014 – PROJETO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO – PROCEDIMENTO	45
5.5. BS 5400: 1978 – STEEL, CONCRETE AND COMPOSITE BRIDGES – PART 2: SPECIFICATION FOR LOADS	45
5.6. CEB: 1991 – COMITÉ EURO – INTERNATIONAL DU BETÓN	48
5.7. ONT: 1991 – ONTARIO HIGHWAY BRIDGE DESIGN CODE HIGHWAY ENGINEERING DIVISION	48
5.8. EUROCODE 5: 1997 – DESIGN OF TIMBER STRUCTURES – PART 2: BRIDGES	

5.9.	EUROCODE 1: 2003 – ACTIONS ON STRUCTURES – PART 2: TRAFFIC LOADS ON BRIDGES	52
5.10.	SÉTRA/AFGC: 2006 – TECHNICAL GUIDE. FOOTBRIDGES. ASSESSMENT OF VIBRATIONAL BEHAVIOUR OF FOOTBRIDGES UNDER PEDESTRIAN LOADING ..	53
5.10.1.	Análise dinâmica pela SÉTRA 2006	54
5.11.	ISO 10137: 2007 – BASES FOR DESIGN OF STRUCTURES – SERVICEABILITY OF BUILDINGS AND WALKWAYS AGAINST VIBRATIONS	58
5.12.	AASHTO:2009 – GUIDE SPECIFICATIONS FOR DESIGN OF PEDESTRIAN BRIDGES	61
6.	ESTUDO DE CASOS	63
6.1.	INTRODUÇÃO	63
6.2.	MODELO ESTRUTURAL 1 – PASSARELA EM ESTEIO, RS	63
6.2.1.	Descrição do modelo 1	63
6.2.2.	Análise do modelo 1	67
6.2.3.	Análise dos resultados do modelo 1	69
6.2.4.	Comparação com os limites normativos e discussões sobre o modelo 1	77
6.3.	MODELO ESTRUTURAL 2 – PASSARELA PADRÃO	80
6.3.1.	Descrição do modelo 2	80
6.3.2.	Análise do modelo 2	84
6.3.3.	Análise dos resultados do modelo 2	85
6.3.4.	Resultados e discussões do modelo 2	90
7.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	92
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	93

1. INTRODUÇÃO

Ao longo da história, sempre houve a necessidade do ser humano em superar obstáculos ao longo dos caminhos percorridos. Um dos meios adotados foram as passarelas. Observa-se que o aumento na urbanização trouxe diversos problemas, sendo alguns deles relacionados ao tráfego. Para otimizar o sistema viário, há a necessidade de criação de vias expressas. Elas dificultam a travessia dos pedestres, surge dessa forma a necessidade do emprego de passarelas.

Além disso, com o crescimento das cidades ocorreu a incorporação de lagos e rios a suas malhas urbanas surgindo, assim, a demanda por passarelas e pontes de forma a transpor esses corpos d'água. Dessa forma garante-se a integração entre diversos pontos de uma mesma cidade e até entre diferentes localidades.

As passarelas têm como principal objetivo auxiliar na travessia segura e confortável dos pedestres, interferindo minimamente no trânsito, no entorno e na paisagem urbana. São compostas por quatro partes, as quais também podem ser usadas na classificação: acesso, tabuleiro, vedações e sistema estrutural.

Há uma diversidade de opções tanto para o sistema estrutural e construtivo (vigas, treliças, arcos e estais, por exemplo) quanto para o material a ser empregado (aço, concreto e madeira). A evolução nas técnicas de dimensionamento e o aumento nas opções de materiais contribuíram para a execução de estruturas mais esbeltas.

Um fator importante na análise desse tipo de estrutura são as cargas provenientes das atividades humanas. Essas são difíceis de serem descritas por envolver características próprias de cada indivíduo, tais como peso, idade, habilidade física, tipo de calçado e forma de execução da atividade. Recorre-se a modelos matemáticos, muitas vezes simplificados, que acabam por não representar de forma precisa o carregamento real ao qual a estrutura está submetida.

Conforme exposto anteriormente, o estudo de vibrações em passarelas é um assunto complexo. Entretanto, as normas brasileiras não abordam esse assunto de forma especial levando os projetistas a considerar a estrutura como submetida unicamente a cargas estáticas. Frente a esse problema, este trabalho propõe o estudo de diferentes códigos nacionais e internacionais e a aplicação das suas diretrizes a duas passarelas estudadas por outros autores.

1.1. OBJETIVO GERAL

Este trabalho possui como objetivo principal o estudo crítico e comparativo de diferentes regulamentações tanto nacionais (NBR 7188, NBR 8800 e NBR 6118) quanto internacionais (AASHTO 2009, BS 5400, CEB 1991, Eurocode 1, Eurocode 5, ISO 10137, ONT 1991 e Sétra 2006) do ponto de vista de vibrações e critérios de conforto adotados para passarelas. As diretrizes previstas pelos códigos serão aplicadas a duas passarelas já estudadas por Barros (2009) e Queiroz (2014).

1.2. ESTRUTURA DO TRABALHO

No capítulo 1 desse trabalho, faz-se uma breve introdução que trata da visão geral do tema abordado, contendo a importância do assunto tratado, as limitações e os objetivos.

No capítulo 2, é abordada a metodologia adotada ao longo desse trabalho.

No capítulo 3, apresenta-se a revisão bibliográfica, trazendo o contexto histórico, a classificação das passarelas e alguns casos famosos de estruturas com vibrações excessivas que culminaram em pesquisas para entendimento do assunto e resolução do problema.

No capítulo 4, é apresentada toda a fundamentação teórica. Trata inicialmente da formulação matemática do problema dinâmico de passarelas. Em seguida, são apresentadas as ações as quais as passarelas são submetidas ao longo de sua vida útil.

No capítulo 5, exibe-se uma série de regulamentos nacionais e internacionais que tratam especialmente dos limites de serviço ligados a vibrações em passarelas.

No capítulo 6, aborda-se a proposta a ser realizada na parte 2 desse Projeto Final.

No último capítulo, apresenta-se as referências bibliográficas tidas como base para a elaboração desse projeto final.

2. METODOLOGIA

Para atingir o objetivo desejado, inicialmente é feita uma revisão bibliográfica detalhada com os tipos de passarela, contexto histórico e problemas de vibrações excessivas apresentados em estruturas gerados por pessoas em atividades rítmicas. É estudada também a fundamentação teórica que contém as formulações matemáticas necessárias para o entendimento do problema e as ações referentes ao pedestre e aos carregamentos gerados por ele. Em seguida, são estudadas diversas normativas tanto nacionais quanto internacionais do ponto de vista das vibrações excessivas. Faz-se uma análise crítica dos requisitos apresentados por cada uma delas e os mesmos se aplicam a dois casos específicos.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. CONTEXTO HISTÓRICO

As passarelas e pontes acompanham a história da humanidade. Isso porque o homem sempre necessitou transpor obstáculos ao longo dos seus percursos, tais como corpos d'água e fendas topográficas. Segundo Fialho (2004), as primeiras soluções adotadas foram pedras e troncos de árvore, tratando-se de recursos temporários.

Com o desenvolvimento das primeiras cidades, os problemas de travessia se ampliam para os meios de transporte utilizados pelo homem. Portanto, torna-se necessário soluções mais duradouras. Dessa forma, surgem as primeiras pontes. Inicialmente, não havia distinção entre passarelas e pontes, pois a travessia de pessoas e transportes eram feitas pela mesma estrutura.

Na antiguidade, os romanos se destacaram como os maiores construtores de pontes. De acordo com Fialho (2004), os aquedutos são exemplos de pontes para transporte de água potável. Utilizavam como sistema estrutural o arco circular para as pontes de pedra e sistema de viga ou viga treliçada para as de madeira.

Segundo Fialho (2004), com o fim da Idade Média, novamente há o crescimento de diversas cidades, fazendo-se necessário a conexão entre elas devido à necessidade de comércio. Essas pontes também serviam como defesa e era cobrado pedágios dos pedestres e veículos que desejassem atravessá-las. Além disso, há a incorporação de rios e córregos ao interior das cidades. Dessa forma, as pontes e passarelas passam a ter papel crucial na organização das cidades.

A Revolução Industrial trouxe grandes transformações em diversas áreas da história da humanidade. Uma delas foi a invenção do transporte ferroviário que impulsionou no desenvolvimento da construção de pontes. A velocidade desse novo meio de transporte rompe com a convivência harmônica entre pedestre e meio de transporte. As linhas férreas dentro das cidades geram graves problemas de acessibilidade aos pedestres.

Outra grande transformação observada nesse período é o desenvolvimento do sistema de produção do aço. Esse material passa a ser amplamente utilizada na construção de pontes. O surgimento de novos sistemas, tais como treliças, viga Gerber treliçada com balanços e rótulas, pontes pênséis com cabos e barras de aço, tornam mais popular ainda o uso desse material.

De acordo com Fialho (2004), a primeira ponte em aço foi executada em Coolbrookdale sobre o rio Severn por Abraham Darby III com base em estudos feitos pelo arquiteto Thomar Pritchard. Foi concluída em 1779 e feita em arco semicircular de ferro fundido, vencendo um vão de 30,5 m e consumindo 380 toneladas de ferro fundido. Por desconhecimento das propriedades do material, foram utilizados os mesmos princípios adotados em projetos de estruturas de madeira.



Figura 1 - Ponte Coalbrookdale, Inglaterra.

Fonte: Curtis, 2013. “The first iron bridge”. Acesso em 14 de outubro de 2017.
<http://www.thinglink.com/scene/489436681955442689>.

No século XX, surgiu o automóvel. Não é como a ferrovia que necessita de uma via específica, porém impacta na vida urbana de modo a tomar espaços que outrora pertenciam aos pedestres. O aumento no número de veículos torna o tráfego intenso cuja solução é a adoção de vias de alta velocidade e sem interrupções. Com isso, a travessia de pedestres é prejudicada, muitas vezes expondo-se a grandes riscos e tornando-se vítimas de acidentes.

Nesse ambiente urbano conturbado surge a necessidade das passarelas. Sua função não é de apenas vencer um obstáculo, mas também de garantir a travessia de forma segura e confortável de pedestres interferindo minimamente no trânsito, no entorno e na paisagem urbana.

3.2. CLASSIFICAÇÃO DAS PASSARELAS

De acordo com Fialho (2004), uma das formas de classificar uma passarela é através do sistema estrutural escolhido (arco, treliça, viga, pênsil ou cabo estaiado). Essa escolha interfere diretamente na forma, arquitetura, vãos, apoios, acessos e gabaritos a serem adotados na passarela.

Um dos sistemas adotados é o arco que é o mais utilizado em toda a história da humanidade em pontes, sendo não tão comum em passarelas, segundo Fialho (2004). Podem ter a estrutura de alma cheia, vazada ou caixão, além dos mais variados tipos de treliças.

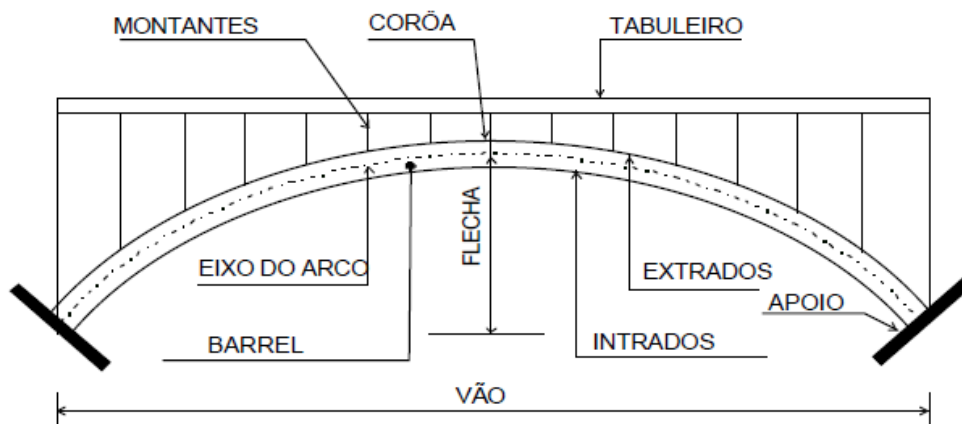


Figura 2 - Elementos do arco (Fialho, 2004)

A flecha do arco é inversamente proporcional aos empuxos laterais, fazendo com que o aumento na altura do arco torne os apoios mais baratos. Passarelas em arco são indicadas para vãos entre 30 e 40 metros.

A grande vantagem desse sistema estrutural é a leveza da estrutura com menor consumo de material. Isso ocorre devido à quase ausência de momentos fletores na estrutura principal. Além disso, permite vencer grandes vãos conforme citado anteriormente.

Em relação as desvantagens, pode haver gabarito variável em situações nas quais o arco está abaixo da linha do tabuleiro, sendo necessário maior afastamento dos apoios e surgindo maior vão que o pensado inicialmente. Outro problema é a exigência de fundações que resistam a esforços horizontais, elevando o custo. Além disso, elementos curvos em aço implicam em custo maior de fabricação e o processo executivo torna-se complicado.

Em relação ao tabuleiro, o arco pode estar localizado na parte inferior, intermediária ou superior, conforme indicado na Figura 3.

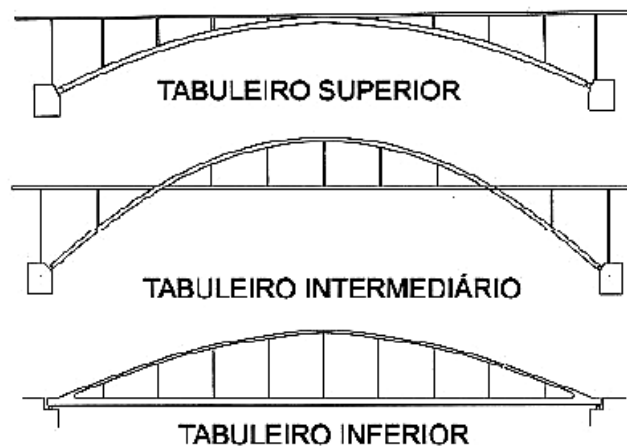


Figura 3 - Posição do arco em relação ao tabuleiro (Meyer, 1996)

Um exemplo de passarela em arco é a Passarela Simone de Beauvoir, localizada sobre o rio Sena na França. Apresenta comprimento total de 304 metros, 12 metros de largura e vão livre de 194 metros. O encontro das duas curvas forma a parte central conhecida como lente. A estrutura é constituída por dois arcos e duas catenárias associados em duas superfícies verticais que distam entre si 5,20 metros.



Figura 4 - Passarela Simone de Beauvoir em Paris

Fonte: Bourret, 2006. “Passerelle Simone de Beauvoir, Paris”. Acesso em 14 de outubro de 2017. <https://structurae.net/structures/simone-de-beauvoir-footbridge/photos?min=225>.

Outro sistema estrutural possível de ser adotado citado por Fialho (2004) é o de treliça que é composta por barras retas submetidas praticamente apenas a esforços axiais (tração ou compressão), formando triângulos e com as ligações sendo rótulas. Tudo isso permite a

construção de estruturas leves e de grande altura. Além de apresentar rigidez em seu plano e poucos deslocamentos e deformações.

As treliças podem ser estruturas planas ou tridimensionais. Por se tratar de sistemas com elementos lineares muito esbeltos, deve ser observado o comprimento de flambagem dos elementos que estiverem submetidos aos esforços de compressão.

Uma boa relação econômica entre a altura da treliça e o vão a ser vencido está entre 1/16 e 1/18 e o melhor ângulo para as diagonais é em torno de 45°. Vãos entre 20 e 50 metros resulta vantajoso o uso de treliças que podem estar associadas a estruturas pênseis e estaiadas.

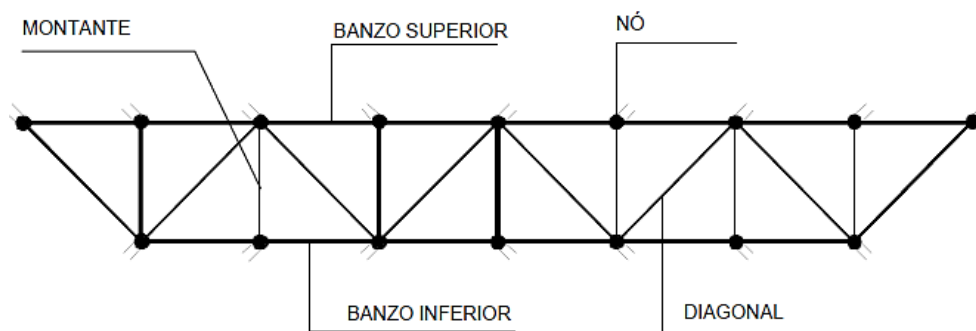


Figura 5 - Elementos da treliça plana (Fialho, 2004)

Dentre as vantagens desse sistema estrutural podem ser citadas pouco peso e grande rigidez que permitem a divisão em partes menores e mais leves, facilitando o transporte e a montagem na execução. Além disso, treliças possuem ótimo comportamento aerodinâmico. O uso de treliça com tabuleiro no banzo inferior é vantajoso também por fazer com que os elementos estruturais funcionem também como estrutura de cobertura e vedação. Em relação as desvantagens, estão o alto custo de fabricação, pintura e manutenção da estrutura.

Um exemplo desse sistema estrutural pode ser observado na Passarela de Besos Yacht Port, em Barcelona, na Espanha. Possui como comprimento total 197 metros e vãos variando entre 55 e 140 metros. A treliça é composta de aço e os pilares são de concreto armado.



Figura 6 - Passarela Besos Yacht Port

Fonte: Kanakaris-Wirtl, 2006. “Besos Yacht Port Footbridge, Barcelona”. Acesso em 14 de outubro de 2017.
<https://structurae.net/structures/besos-yacht-port-footbridge/photos>.



Figura 7 – Vista interna da Passarela Besos Yacht Port

Fonte: Ramos, 2006. “Besos Yacht Port Footbridge”. Acesso em 14 de outubro de 2017.
<https://structurae.net/structures/besos-yacht-port-footbridge/photos>.

Um outro sistema que também pode ser empregado, de acordo com Fialho (2004), é o de vigas. Esses elementos trabalham com esforços de cisalhamento e momento fletor, porém

menos eficientes que a compressão nos arcos ou a tração nas estruturas suspensas. As vigas têm melhor comportamento se tiverem altura suficiente para gerar um binário de esforços capaz de resistir internamente ao momento fletor solicitante.

Sabendo que apenas as fibras extremas são as que estão inteiramente submetidas aos esforços, as seções tipo I apresentam geometria capaz de resolver bem essa questão de forma econômica. Entretanto, é necessário observar que seções em aço de grande altura tendem a ser muito esbeltas e pode haver problemas de flambagem lateral e flambagem da alma.

Pode-se adotar como solução para isso enrijecedores que aumentam o custo ou o uso de viga mista o qual soluciona a instabilidade lateral, mas requer a utilização de tabuleiro em concreto. Outra solução pode ser o uso de vigas com seções variáveis, porém há elevação do custo.

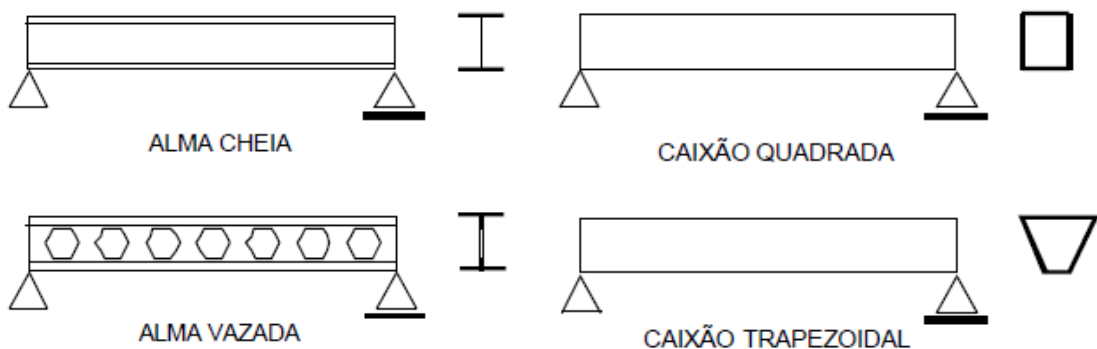


Figura 8 - Tipos de seções das vigas (Fialho, 2004)

O sistema de vigas é eficiente e muito vantajoso do ponto de vista econômico para pequenos vãos, porém é possível utilizá-lo em vãos maiores. Sistema de vigas duplas podem ser utilizados em vãos entre 10 e 25 metros, vigas mistas de 10 a 50 metros e vigas caixa de 20 a 60 metros. Outras vantagens são a facilidade de execução, baixo custo de manutenção e pouca interferência na paisagem urbana.



Figura 9 - Passarela em viga Virendel na BR 369 no Paraná

Fonte: Agência de Notícias do Paraná, 2014. “Passarela Londrina”. Acesso em 14 de outubro de 2017. <http://www.aen.pr.gov.br/modules/noticias/article.php?storyid=79730>.

Conforme Fialho (2004), outro sistema que pode ser empregado é o pênsil. É formado por dois cabos principais, pendurados em torres e ancorados na extremidade. O tabuleiro está suspenso por uma série de outros cabos. Os cabos flexíveis transferem as maiores cargas para a torre e para a ancoragem por tração direta. O tabuleiro é pendurado ao cabo principal por cabos também tracionados e o cabo principal é travado no nível do tabuleiro por um par de treliças ou por um sistema de vigas. Todo esse travamento é necessário e fundamental para controlar os movimentos aerodinâmicos.

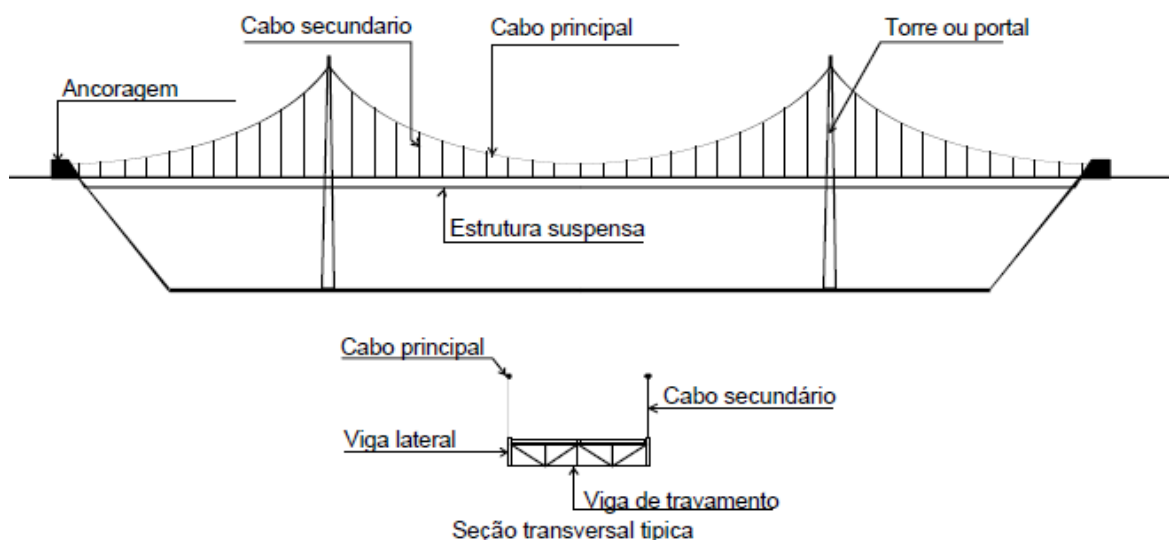


Figura 10 - Elementos do sistema pênsil (Fialho, 2004).

As vantagens são estruturas leves, resultando em economia de material principalmente em grandes vãos, em torno de 70 metros. Esses vãos podem ser vencidos de forma elegante do ponto de visto arquitetônico. Já entre as desvantagens estão o alto custo de pintura, manutenção de seus elementos e de fabricação dos aparelhos de ancoragem. Além disso, a montagem é complexa.

Esse sistema permite que todo o conjunto da passarela fique mais leve, necessitando de cuidado em relação à estabilidade aerodinâmica e as vibrações. Um exemplo bem conhecido de passarela com esse problema foi a Passarela do Milênio. Tendo 325 metros de comprimento e 4 de largura com dois pilares no rio e oito cabos laterais de suspensão, foi inaugurada no ano 2000 sobre o rio Tâmisa e no dia da inauguração apresentou problemas de vibrações, sendo fechada dois dias depois. Apenas dois anos mais tarde, ela foi reaberta ao público após a instalação de amortecedores viscosos e amortecedores de massa sintonizadas. Esse caso será discutido mais adiante.



Figura 11 - Passarela do Milênio na Inglaterra

Fonte: Prandi, 2014. “Ponte do Milênio - Londres”. Acesso em 14 de outubro de 2017.
<http://megaengenharia.blogspot.com.br/2014/11/ponte-do-milenio-londres.html>.



Figura 12 - Vista superior da Passarela do Milênio

Fonte: Prandi, 2014. “Ponte do Milênio - Londres”. Acesso em 14 de outubro de 2017.
<http://megaengenharia.blogspot.com.br/2014/11/ponte-do-milenio-londres.html>.

Uma outra opção citada por Fialho (2004) são as estruturas estaiadas que são semelhantes às pênseis, mas nela os cabos são ancorados diretamente no tabuleiro que fica submetido a esforços de compressão. Esse tabuleiro geralmente é de concreto por ser um material com grande capacidade de resistir a esse tipo de esforço.

É um sistema menos eficiente do ponto de vista de suportar o peso próprio, mas é melhor para suportar cargas dinâmicas. É bastante utilizada para grandes vãos.

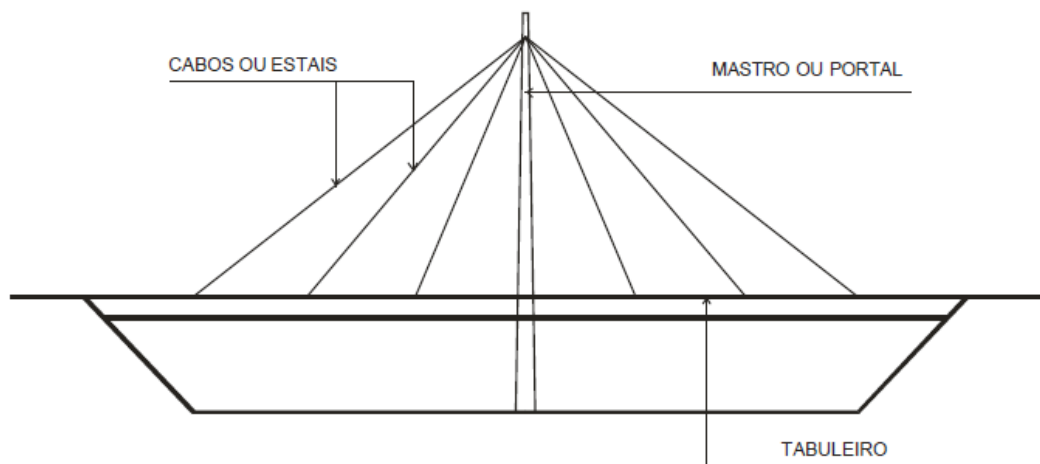


Figura 13 - Elementos do sistema estaiado (Fialho, 2004).

Uma das vantagens é a enorme possibilidade de escolha de arranjos, dando maior liberdade ao projetista. Além disso, as estruturas são mais leves, gerando economia de material e de custo. Em relação as desvantagens, pode-se citar custos de pintura e manutenção elevados. O apoio do tabuleiro e dos mastros também apresentam alto custo.



Figura 14 - Passarela da Barra em Santa Catarina

Fonte: Porto, 2015. “Passarela da Barra”. Acesso em 16 de outubro de 2017.
<http://cdn.wp.clicrbs.com.br/guarda-sol/files/2015/08/passarela.jpg>.

Outras classificações podem ser feitas com base no material empregado (aço, concreto ou madeira) ou pela dimensão do seu vão (pequeno, médio ou grande).

3.3. VIBRAÇÕES EM PASSARELAS

Vibrações em passarelas são um problema antigo ocorrido em diversos momentos. De acordo com Zivanovic (2005), o relato mais antigo conhecido é do ano de 1154 na Inglaterra quando uma passarela de madeira entrou em colapso enquanto uma multidão a atravessava para cumprimentar o Arcebispo William. Entretanto, não se sabe detalhes do ocorrido.

Segundo a pesquisadora, o caso mais antigo de falha por carga dinâmica induzida por ação humana aconteceu em 1831 no Reino Unido. A passarela entrou em colapso enquanto 60 soldados marchavam por ela. Após esse caso, diversas pontes passaram a estampar o aviso para que soldados não marchassem sobre esse tipo de estrutura.

De acordo com Pimenta (2008), a Park Pedestrian Bridge, localizada sobre o rio Dnieper na Ucrânia, foi a primeira passarela que se tem notícia de ser fechada após sua

inauguração, em 1958, por motivos de vibrações laterais excessivas. Blekherman (2005) relata que as frequências para o modo vertical e lateral apresentavam, respectivamente, 2,0 e 1,0 Hz. Para ter uma ideia, esses valores estão bem próximos das frequências que caracterizam o caminhar humano em cada uma dessas direções. O ideal é afastar a frequência fundamental da estrutural tanto quanto for possível desses valores, evitando o fenômeno da ressonância.

Em 1999, a Passarela Solferino (Figura 15) sobre o rio Sena em Paris foi fechada no dia de sua inauguração. Construída em aço e com 140 m de comprimento, apresentou excesso de vibrações laterais sob ação de pedestres que não foram previstas na etapa de projeto.



Figura 15 - Passarela Solferino em Paris

Fonte: Lemoine. “Ponte Solferino”. Acesso em 16 de outubro de 2017.

http://www.constructalia.com/portugues_br/galeria_de_projetos/franca/ponte_solferino.

O caso de maior repercussão e que acabou por motivar diversos estudos na área de passarelas ocorreu em 2000 na Inglaterra. A Passarela do Milênio localizada sobre o rio Tâmesa foi projetada como forma de comemorar a chegada do novo milênio. Inaugura em 10 de junho de 2000, apresentou fortes vibrações laterais, registrando acelerações da ordem de 1,96 e 2,45 m/s^2 e a amplitude máxima de deslocamento atingiu 70 mm, valores bem acima dos citados em literatura (Gomes, 2006). Dois dias após a inauguração, a estrutura foi interditada.

Dallar *et al* (2001) afirmam que o efeito de carregamento lateral estava relacionado à sincronização de forças laterais causadas pelo caminhar da multidão de pedestres sobre a passarela. Ela apresentava valores muito baixos de frequência natural: 1,0 Hz para a primeira

frequência lateral no vão norte; 0,48 Hz e 0,95 Hz para a primeira e segunda frequência lateral no vão central, respectivamente; e 0,8 Hz para a primeira frequência lateral no vão sul. Conforme já citado, a frequência de uma pessoa caminhando está em torno de 2 Hz.

Após dois anos de intenso trabalho, foi reaberta ao público em 22 de fevereiro de 2002. Foram instalados 37 amortecedores viscofluidos e 4 pares de amortecedores de massa sintonizados para controlar vibrações horizontais e 26 pares de amortecedores de massa sintonizados para controlar possíveis vibrações verticais. Dessa forma, aumentou-se o amortecimento da estrutura, tornando possível reduzir a resposta dinâmica da estrutura (Dallard *et al.*, 2001).

Devido a esses dois últimos casos bastante famosos, um grupo de trabalho técnico foi formado e trabalharam por quatro anos em pesquisas bibliográficas, experimentais e teóricas, resultando na publicação de um guia de dimensionamento de passarelas. Além disso, esse grupo conseguiu organizar uma conferência internacional de passarelas, nomeada como Footbridge, cuja primeira edição foi em Paris em novembro de 2002. Ela continua a acontecer de três em três anos, sendo que a última edição ocorreu no ano passado (2017) em Berlim.

Diversos trabalhos publicados na última edição da Footbridge fazem referência ao estudo de vibrações de passarelas já existentes. Mendoza *et al* (2017) afirmam que as soluções possíveis para melhorar o comportamento de passarelas com problemas de vibrações e deslocamento são: aumentar a rigidez, o peso próprio ou o amortecimento. No caso de estruturas já construídas, a solução mais viável é aumentar o amortecimento. O aumento na rigidez e no peso próprio são mais viáveis ainda na fase de concepção da estrutura.

Portanto, é imprescindível um estudo aprofundado desses problemas que causam desconforto para que haja um dimensionamento adequado. Dessa forma, evitam-se problemas graves cujas soluções são mais complexas e com custos maiores.

4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.1. INTRODUÇÃO

Toda a formulação matemática usada para descrever o problema das passarelas é obtida a partir da equação do equilíbrio onde o sistema estrutural está submetido a um carregamento dinâmico. Essa formulação será analisada do ponto de vista de um sistema de um grau de liberdade e, posteriormente, para um sistema com múltiplos graus de liberdade.

Ao longo de sua vida útil, o principal carregamento externo ao qual a passarela é submetida é a ação dos pedestres. Essa ação é difícil de ser descrita, visto que há muitas variáveis envolvidas, pois, cada usuário apresenta um peso diferente, além de terem sua própria forma de se movimentar.

Define-se, portanto, algumas propriedades importantes que ajudam nessa descrição, sendo elas comprimento, velocidade e frequência de passo. Além do mais, faz-se necessário a adoção de valores médios para cada uma delas, visto a impossibilidade de analisar cada uma dessas características para todos os usuários da passarela (interpessoal) e até mesmo as variações de um mesmo indivíduo (intrapessoal) devido ao grande número de dados.

A análise de diversos usuários simultaneamente em passarelas apresenta um grau de complexidade ainda maior. Além das características individuais já citadas, o grau de sincronismo entre elas é difícil de ser descrito.

Ao se movimentar, o pedestre produz uma força dinâmica que varia no tempo e no espaço. Essa força apresenta três componentes: vertical (provocada pelo impacto periódico dos pés na plataforma de forma alternada), horizontal lateral (ocasionada pelo movimento periódico do corpo quando ocorre a troca de perna para dar o passo) e horizontal longitudinal (gerada pelo atrito entre o pé e a plataforma). Elas geralmente apresentam comportamento periódico.

Normalmente, as duas principais ações produzidas pelos usuários de uma passarela podem ser resumidas em caminhar e correr. Ambas variam no tempo e no espaço. A Figura 16 apresenta o padrão típico de forças gerado por essas atividades humanas.

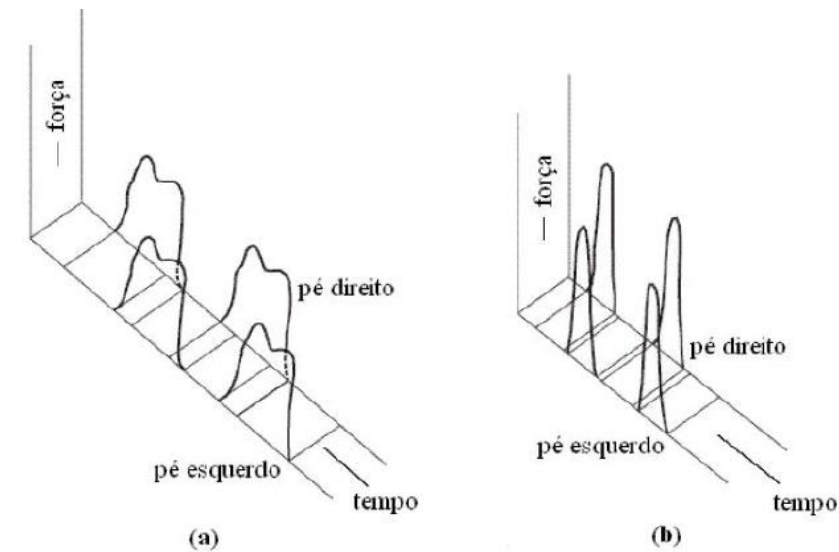


Figura 16 - Padrão típico de forças produzido por: (a) caminhada; (b) corrida (Zivanovic, et al., 2005)

É possível observar que, durante a caminhada, há um curto período de tempo em que os dois pés estão no chão, havendo uma sobreposição das pernas no histórico de caminhada. Já na corrida, há momentos em que os dois pés estão fora do chão, sendo nula a força no instante em que isso acontece (Zivanovic, 2005).

A seguir, são apresentadas as formulações matemáticas envolvidas para melhor entendimento desses fenômenos, as propriedades responsáveis por descrever a ação dos pedestres e os modelos analíticos que expressam as duas ações que possam ser aplicadas nos projetos de passarelas.

4.2. FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

Segundo Clough (2003), as propriedades físicas essenciais de um sistema estrutural linearmente elástico submetidos a um carregamento dinâmico são a massa (m), rigidez (k) e o amortecimento (c). Considerando o sistema como sendo de um grau de liberdade, o movimento pode ser descrito apenas na coordenada $x(t)$. Cada um desses parâmetros pode ser observado na Figura 17.

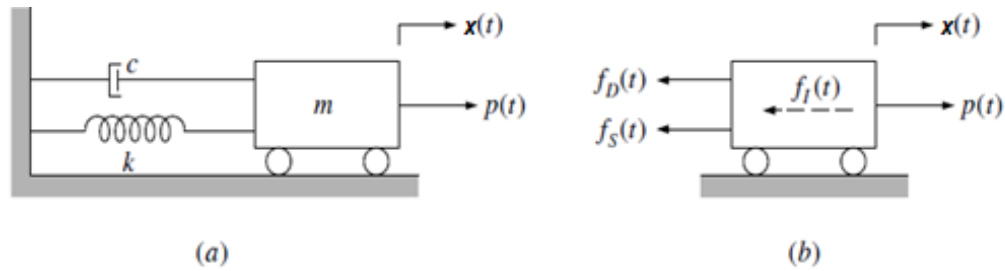


Figura 17 - Sistema idealizado de um grau de liberdade: (a) componentes básicos; (b) forças em equilíbrio. (Adaptado de Clough, 2003)

Fazendo o equilíbrio do sistema entre as forças internas (inércia, amortecimento e rigidez) e a externa ($p(t)$), é obtida a seguinte formulação:

$$f_I(t) + f_D(t) + f_S(t) = p(t) \quad (4.1)$$

As forças de inércia (f_I), amortecimento (f_D) e rigidez (f_S) podem ser descritas em função do deslocamento (x) ou de suas derivadas no tempo – velocidade (\dot{x}) e aceleração (\ddot{x}). Portanto, reescrevendo cada uma das forças dessa maneira, a equação do movimento (Eq. 4.2) para um sistema de um grau de liberdade é obtida.

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = p(t) \quad (4.2)$$

Através da análise do sistema de vibrações livres, são obtidas importantes propriedades dinâmicas, tais como frequência fundamental e os modos de vibração da estrutura. Essa análise é feita anulando o carregamento externo. Para o caso de um sistema sem amortecimento, a equação 4.2 pode ser reescrita conforme abaixo:

$$m\ddot{x}(t) + kx(t) = 0 \quad (4.3)$$

A solução para a equação diferencial anterior é apresentada a seguir:

$$x(t) = x(0) \cos(\omega t) + \frac{\dot{x}(0)}{\omega} \sin(\omega t) \quad (4.4)$$

Onde:

$x(0)$ e $\dot{x}(0)$ são as condições iniciais do sistema, representando o deslocamento e a velocidade inicial, respectivamente;

ω é a frequência angular dos vetores no plano complexo, dada em rad/s.

Essa frequência angular (ω) pode ser expressa em função da rigidez e da massa do sistema.

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (4.5)$$

Analogamente, a equação de equilíbrio para um sistema de múltiplos graus de liberdade é dada por:

$$\mathbf{m}\ddot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{c}\dot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{k}\mathbf{x}(t) = \mathbf{p}(t) \quad (4.6)$$

Onde:

\mathbf{m} , \mathbf{c} e \mathbf{k} são as matrizes de massa, de amortecimento e de rigidez do sistema, respectivamente, com dimensão $n \times n$ sendo n o número de graus de liberdade do sistema;

$\ddot{\mathbf{x}}(t)$, $\dot{\mathbf{x}}(t)$ e $\mathbf{x}(t)$ são os vetores, respectivamente, de aceleração, velocidade e deslocamento do sistema com dimensão $n \times 1$;

$\mathbf{p}(t)$ é o vetor coluna da força externa aplicada sobre o sistema.

As matrizes de massa e rigidez são desenvolvidas com base na geometria da passarela e nas propriedades dos materiais envolvidos.

Para o caso de vibrações livres não amortecidas, a Eq. (4.6) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\mathbf{m}\ddot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{k}\mathbf{x}(t) = \mathbf{0} \quad (4.7)$$

A solução do sistema descrito na Eq. (4.7) está descrita a seguir:

$$\mathbf{x}(t) = \hat{\mathbf{x}} \sin(\omega t + \theta) \quad (4.8)$$

Onde:

θ é o ângulo de fase;

$\hat{\mathbf{x}}$ representa os modos de vibração do sistema (formas como a estrutura reage frente a um carregamento e, no caso de uma solicitação externa, a estrutura vibrará em uma combinação linear desses modos).

Substituindo a solução do sistema e sua derivada na Eq. (4.7), é obtida a equação a seguir:

$$-\omega^2 \mathbf{m} \hat{\mathbf{x}} \sin(\omega t + \theta) + \mathbf{k} \hat{\mathbf{x}} \sin(\omega t + \theta) = \mathbf{0} \quad (4.9)$$

Dividindo ambos os membros da equação pelo termo senoidal, é possível reescrever a Eq. (4.9) da seguinte forma:

$$[\mathbf{k} - \omega^2 \mathbf{m}] \hat{\mathbf{x}} = \mathbf{0} \quad (4.10)$$

A solução não trivial para a formulação anterior é determinada conforme descrição adiante.

$$|\mathbf{k} - \omega^2 \mathbf{m}| = 0 \quad (4.11)$$

A Eq. 4.10 apresenta um problema de autovalores (ω^2) e autovetores ($\hat{\mathbf{x}}$). As raízes positivas ($\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$) são as frequências naturais de vibração e o vetor $\hat{\mathbf{x}}$ associado a cada frequência corresponde ao modo de vibração do sistema correspondente.

Em passarelas convencionais, pode-se utilizar o Método da Superposição Modal para obter a resposta dinâmica do sistema. Isso porque pode-se assumir que a estrutura tem comportamento linear e amortecimento proporcional. Dessa forma, o sistema de n equações acopladas e com n incógnitas é desacoplado em n equações de uma incógnita. Essas equações são escritas da forma a seguir:

$$\ddot{Y}_n(t) + 2 \xi_n \omega_n \dot{Y}_n(t) + \omega_n^2 Y_n(t) = \frac{P_n(t)}{M_n} \quad (4.12)$$

Onde:

\ddot{Y}_n , \dot{Y}_n e Y_n representam, respectivamente, as acelerações, velocidades e deslocamentos modais (ou generalizados) da estrutura;

ξ_n é a razão de amortecimento;

ω_n é a frequência natural circular para o n ésimo modo de vibração;

P_n é a força modal para o n ésimo modo;

M_n é a massa modal para o n ésimo modo.

Logo o deslocamento total em qualquer nó da estrutura pode ser descrito de acordo com a combinação linear abaixo:

$$x(t) = \phi_1 Y_1(t) + \phi_2 Y_2(t) + \dots + \phi_n Y_n(t) \quad (4.13)$$

4.3. AÇÃO DOS CARREGAMENTOS

4.3.1. Caminhar

Conforme já mencionado, a força produzida pela ação de andar apresenta três componentes: vertical, horizontal lateral e horizontal longitudinal. A primeira é a que apresenta maior valor, portanto é considerada como sendo a mais importante. Entretanto, as componentes horizontais não podem ser consideradas sempre desprezíveis, como no caso de passarelas muito flexíveis (Pereira, 2017). Essas três componentes apresentam comportamento geralmente periódico, conforme pode ser observado na Figura 18.

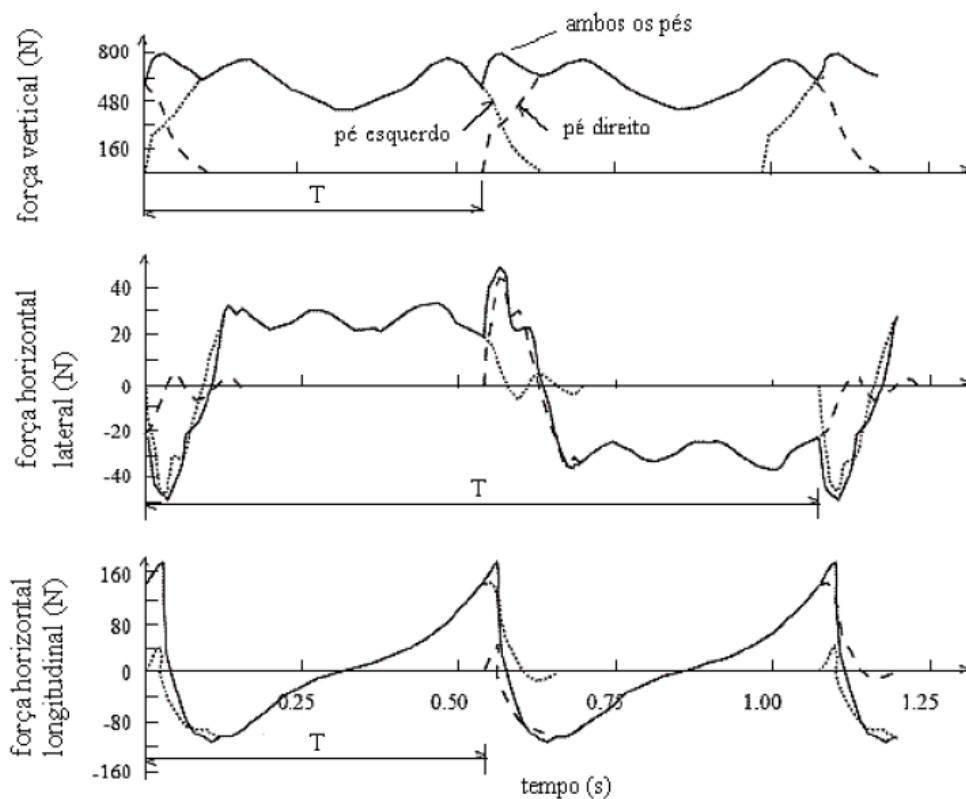


Figura 18 - Força vertical, horizontal lateral e horizontal longitudinal de caminhada (Zivanovic et al., 2005)

Conforme mencionado anteriormente e observado na Figura 16(a), o movimento de caminhar tem como característica o contínuo contato com a superfície, em alguns momentos de apenas um pé enquanto que em outros de ambos. Bachmann e Ammann (1987) sugerem a seguinte formulação para a força vertical gerada por movimentos que apresentam contato contínuo com a superfície:

$$F_p(t) = G + \alpha_1 \cdot \sin(2\pi \cdot f_p \cdot t) + \alpha_2 \cdot \sin(4\pi \cdot f_p \cdot t - \varphi_2) + \alpha_3 \cdot \sin(6\pi \cdot f_p \cdot t - \varphi_3) \quad (4.14)$$

Onde:

G é o peso da pessoa, adotado como sendo 800 N;

α_i é a fator dinâmico de carga ou coeficiente de Fourier do i -ésimo harmônico;

f_p é a frequência de passo;

φ_i é o ângulo de fase do i -ésimo harmônico relativo ao 1º harmônico.

Os coeficientes de Fourier para frequências de passo igual 2 Hz são sugeridos por Bachmann e Ammann (1987) como dado pelas seguintes expressões:

$$\alpha_1 = 0,4 \cdot G \quad (4.15)$$

$$\alpha_2 \cong \alpha_3 \cong 0,1 \cdot G \quad (4.16)$$

Os ângulos de fase apresentam larga escala de variação, pois dependem de diversos parâmetros. Bachmann e Ammann (1987) sugerem a utilização de $\varphi_2 \cong \pi/2$ e $\varphi_3 \cong \pi/2$. Na maioria dos casos, entretanto, as vibrações induzidas pela ação de caminhar são regidas apenas pelo 1º harmônico, tornando esses ângulos de fase desprezíveis.

A Eq. (4.14) apresenta o efeito da ação estática (peso da pessoa) somado ao efeito dinâmico, resultando no efeito total da ação periódica à qual a passarela está submetida. A força na direção horizontal também pode ser encontrada com essa equação, sendo que a contribuição dinâmica é a única existente pois a parcela estática é nula.

Alguns autores sugerem que haja ainda mais parcelas dinâmicas na Eq. (4.14), enquanto outros sugerem menos. Assim, a expressão pode ser reescrita da seguinte forma:

$$F_p(t) = G + \sum_{i=1}^n G \cdot \alpha_i \sin(2\pi \cdot i \cdot f_p \cdot t - \varphi_i) \quad (4.17)$$

Os coeficientes de Fourier (α_i) obtidos experimentalmente por diversos pesquisadores estão apresentados na Tabela 1. Observa-se a variedade de valores encontrados por cada autor.

Tabela 1 - Coeficiente de Fourier para ação de caminhar

Autores	Coeficiente de Fourier para cada harmônico	Observação	Direção
Blanchard et al.	$\alpha_1 = 0,257$	Reduzido para frequências entre 4 e 5 Hz.	Vertical
Bachmann e Ammann	$\alpha_1 = 0,4 - 0,5$ $\alpha_2 = \alpha_3 = 0,1$	Entre 2,0 e 2,4 Hz Aproximadamente 2,0 Hz	Vertical
Schulze	$\alpha_1 = 0,37$ $\alpha_2 = 0,10$ $\alpha_3 = 0,12$ $\alpha_4 = 0,04$ $\alpha_5 = 0,08$	2,0 Hz	Vertical
	$\alpha_1 = 0,039$ $\alpha_2 = 0,01$ $\alpha_3 = 0,043$ $\alpha_4 = 0,012$ $\alpha_5 = 0,015$	2,0 Hz	Lateral

	$\alpha_{1/2} = 0,037$ $\alpha_1 = 0,204$ $\alpha_{3/2} = 0,026$ $\alpha_2 = 0,083$ $\alpha_{5/2} = 0,024$	2,0 Hz	Longitudinal
Bachmann et al.	$\alpha_1 = 0,4$ $\alpha_2 = \alpha_3 = 0,1$	2,0 Hz	Vertical
	$\alpha_1 = 0,5$ $\alpha_2 = \alpha_3 = -$	2,4 Hz	
	$\alpha_1 = \alpha_3 = 0,1$	2,0 Hz	Lateral
	$\alpha_{1/2} = 0,1$ $\alpha_1 = 0,2$ $\alpha_2 = 0,1$	2,0 Hz	Longitudinal
Young	$\alpha_1 = 0,37 (f_p - 0,95) \leq 0,5$ $\alpha_2 = 0,054 + 0,0044f_p$ $\alpha_3 = 0,026 + 0,0050f_p$ $\alpha_4 = 0,010 + 0,0051f_p$	Valores médios para os coeficientes de Fourier.	Vertical

Fonte: adaptado de Zivanovic et al, 2005

Brownjohn *et al* (2004) questionam as diferenças entre as formas imperfeitas das forças geradas pelo movimento de caminhar e a simulação equivalente perfeitamente periódica. Essas diferenças são maiores para os harmônicos maiores onde o comportamento real é superestimado consideravelmente. Na Figura 19, é possível observar essas divergências que, para o caso estudado pelo autor, não são tão relevantes.

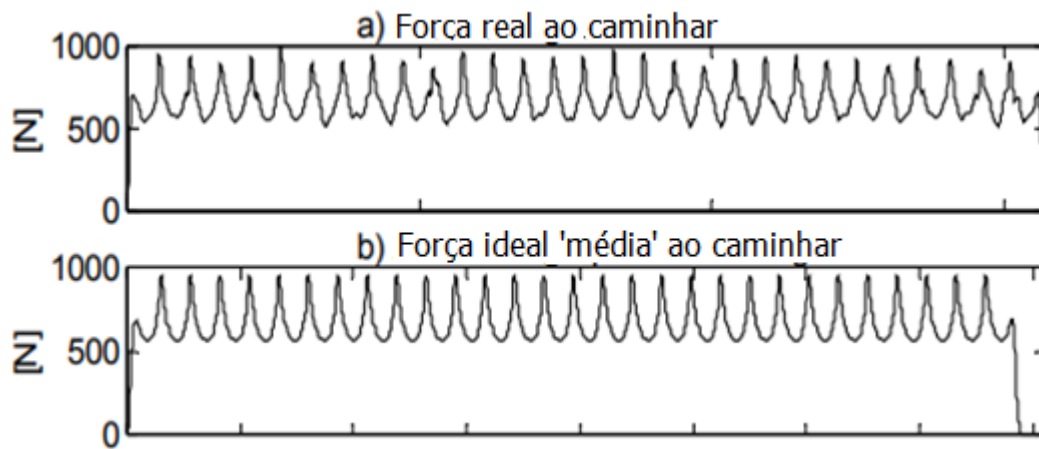


Figura 19 - Comparação entre a força real (a) e ideal (b) para uma série de 30 passos na caminhada e frequência média de passo de 1,91 Hz (Brownjohn *et al*, 2004)

4.3.2. Correr

O movimento de correr apresenta maiores frequências de passo do que a atividade de caminhar. Assim como já dito anteriormente, a atividade de correr apresenta instantes em que a força sobre a superfície é nula quando acontece uma interrupção do contato dos pés com o solo de acordo com a Figura 16(b) vista anteriormente.

Bachmann e Ammann (1987) descrevem a função de força produzida pela ação de correr como sendo semi senoidal como pode ser vista na Figura 20.

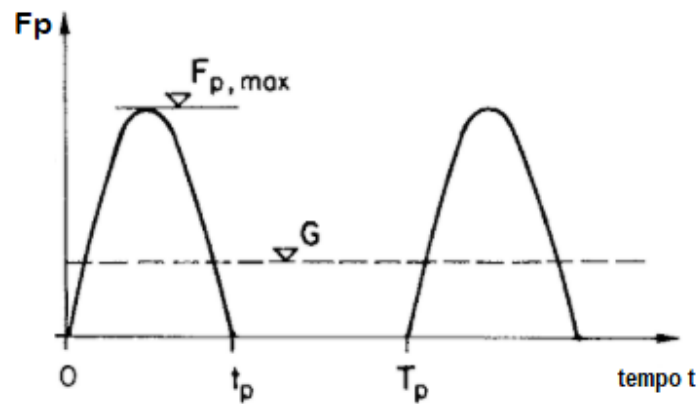


Figura 20 - Força de excitação descontínua (Bachmann e Ammann, 1987)

A função pode ser escrita usando a formulação abaixo.

$$F_p = \begin{cases} k_p \cdot G \cdot \sin(\pi \cdot t / t_p) & \text{para } t \leq t_p \\ 0 & \text{para } t_p \leq t \leq T_p \end{cases} \quad (4.18)$$

Onde:

k_p é o fator de impacto dinâmico, podendo ser escrito como $F_{p,max}/G$;

$F_{p,max}$ é o pico do carregamento dinâmico;

G é o peso da pessoa, adotado como sendo 800 N;

t_p é o tempo de duração do contato entre o pé e o solo;

T_p é o período de passo, definido como o inverso da frequência de passo.

O fator de impacto dinâmico (k_p) pode ser representado em função da relação dos tempos de contato, apresentado na Figura 21.

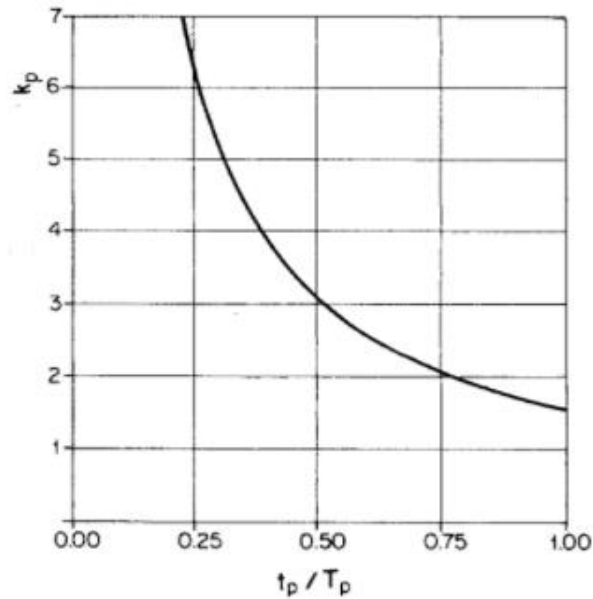


Figura 21 - Variação do fator de impacto (k_p) em função da duração do tempo de contato (Bachmann e Ammann, 1987)

De acordo com Zoltowsky (2008), pular é uma atividade que gera grandes reações na plataforma. Entretanto, os testes feitos pelo autor numa plataforma vibratória mostraram que a fase mais importante desse movimento é aquela em que não há contato com o chão. Portanto, não há sincronização dessa fase com o movimento da passarela.

4.3.3. Efeito multidão

Os resultados apresentados anteriormente são exclusivos para a ação de uma pessoa. Muitas vezes, porém, as passarelas estão submetidas a ações de grupos, especialmente na ação de caminhar. Analisar casos como esse torna-se uma tarefa ainda mais complicada, visto que além das variações intrapessoais já vistas, ocorre também as interpessoais. É preciso ressaltar alguns aspectos relativos ao efeito multidão:

- A densidade de pedestres é limitada pela viabilidade da restrição de caminhar. Por questões de segurança, passarelas são dimensionadas utilizando uma alta sobrecarga (pessoas/m²), entretanto é quase impossível atingir tal valor;
- Diversos estudos relatam que pedestres iniciam o movimento em passarelas com uma certa frequência de passo e, inconscientemente, eles tendem a ajustar seus passos conforme a vibração do piso. Essa sincronização torna-se mais notável à medida que aumenta a vibração na estrutura, caso não ocorra há risco do usuário a cair.

Nimmenn (2017) avaliou o efeito de multidão em algumas faixas de frequência. Conclui que passarelas com baixos valores de frequência natural (menores que 2,0 Hz), a ação dos pedestres atua principalmente como acréscimo de massa, apresentando amortecimento considerável. Isso ocorre devido às frequências dos modelos do corpo humano que são relativamente altas em comparação com a frequência natural da passarela vazia.

Setareh (2017) estudou o efeito de grupo em duas passarelas esbeltas. Após a análise dos resultados, uma das conclusões que o autor chegou é que a relação \sqrt{n} , encontrada na literatura (sendo n igual ao número de pedestres sobre a estrutura), só se aproxima dos valores reais medidos para um alto número de pedestres.

4.4. AÇÃO DO PEDESTRE

4.4.1. Comprimento de passo

O comprimento de passo (l_p) é definido como a distância entre dois passos consecutivos. Varia de pessoa para pessoa pois depende da altura do corpo e comprimento das pernas do indivíduo. Diversos autores apresentam valores médios desse parâmetro dependendo da atividade realizada pelo ser humano, alguns são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Valores médios do comprimento de passo

Movimento	Comprimento de Passo (m)	
	Bachmann e Ammann (1982)	Gonilha et al. (2013)
Caminhada Lenta	0,60	~ 0,55
Caminhada Normal	0,75	~ 0,67
Caminhada Rápida	1,00	~ 0,86
Corrida Lenta	1,30	-
Corrida Rápida	1,75	-

Fonte: Pereira, 2017

4.4.2. Velocidade de passo

A velocidade de passo (v_p) representa a velocidade média de deslocamento de uma pessoa. Os mesmos autores citados anteriormente também apresentaram valores médios para essa variável, conforme consta na Tabela 3.

Tabela 3 - Valores médios da velocidade de passo

Movimento	Velocidade de Passo (m/s)	
	Bachmann e Ammann (1982)	Gonilha et al. (2013)
Caminhada Lenta	1,10	0,78 ± 0,06
Caminhada Normal	1,50	1,20 ± 0,07
Caminhada Rápida	2,20	1,81 ± 0,18
Corrida Lenta	3,30	-
Corrida Rápida	5,50	-

Fonte: Pereira, 2017

4.4.3. Frequência de passo

A frequência ou razão de passo (f_p) é o número de passos dados em um intervalo de tempo de um segundo, expressado em hertz (H_z), ou seja, inverso do segundo (s^{-1}). É a principal propriedade para caracterizar a ação do usuário e pode ser encontrado a partir do comprimento de passo (l_p) e a velocidade de passo (v_p) que pode ser expressa pela equação a seguir.

$$f_p = \frac{v_p}{l_p} \quad (4.19)$$

Além disso, indivíduos com a mesma frequência de passo podem apresentar velocidade e comprimento de passos diferentes (Bachmann e Ammann, 1987).

Baseado em estudos e experimentos realizados por diversos pesquisadores, tornou-se possível a quantificação das frequências de passos que descrevem ações humanas usuais em passarelas. Alguns desses valores estão apresentados na Tabela 4. **Tabela 4**

Tabela 4 - Valores médios de frequência de passo

Movimento	Frequência (Hz)			
	Wheeler (1982)	Bachmann e Ammann (1987)	J. Strásky (2005)	Gonilha et al. (2013)
Caminhada Lenta	1,40 – 2,40	~1,70	1,40 – 1,70	1,36 ± 0,10
Caminhada Normal	1,40 – 2,40	~ 2,00	1,70 – 2,20	1,76 ± 0,16
Caminhada Rápida	1,40 – 2,40	~ 2,30	2,20 – 2,40	1,81 ± 0,13
Corrida Lenta	1,90 – 3,30	~ 2,50	1,90 – 2,20	-
Corrida Normal	1,90 – 3,30	-	2,20 – 2,70	-
Corrida Rápida	1,90 – 3,30	> 3,20	2,70 – 3,30	-

Fonte: Pereira, 2017

Observando os resultados obtidos pelos diversos autores, a frequência de passo pode ser considerada com o valor médio de 2,00 Hz para caminhadas.

5. CRITÉRIOS NORMATIVOS

5.1. INTRODUÇÃO

Inicialmente é feito um breve resumo das normativas brasileiras: NBR 7188, NBR 8800 e NBR 6118. A primeira trata especificamente da carga móvel adotada em passarelas, a segunda de projeto de estruturas em aço ou mistas de aço e concreto e a última trata de estruturas de concreto. É possível notar que as normas brasileiras são superficiais em relação ao assunto, normalmente apresentando análises em regime linear sem considerar completamente os efeitos dinâmicos.

Após isso, são apresentados alguns códigos internacionais que tratam do tema. É possível ver que eles aprofundam mais em relação aos requisitos, entretanto a análise continua sendo linear e simplificada devido à complexidade de uma avaliação mais precisa.

A seguir, estão apresentadas a metodologia das normas brasileiras NBR 7188, NBR 8800 e NBR 6118 e das internacionais BS 5400, CEB 1991, ONT 1991, Eurocode 5, Eurocode 1, SÉTRA 2006, ISO 10137 e AASHTO (2009).

5.2. NBR 7188:2013 – CARGA MÓVEL RODOVIÁRIA E DE PEDESTRES EM PONTES, VIADUTOS, PASSARELAS E OUTRAS ESTRUTURAS

Trata-se da norma brasileira específica para dimensionamento de passarelas. Apesar disso, apresenta poucos detalhes em relação ao assunto. Sugere que a carga móvel a ser aplicada sobre o pavimento e entre os guarda corpos na posição mais desfavorável deve ser de 5 kN/m².

Além disso, sugere também que haja o acréscimo de uma carga pontual horizontal excepcional de 100 kN no ponto mais desfavorável da passarela no sentido do tráfego, sendo que se trata de uma avaliação das ligações e dos pilares da estrutura em caso de possíveis impactos.

A norma também indica que estruturas muito esbeltas, leves, sensíveis ao vento e à ação dinâmica dos pedestres (estruturas em aço, mistas, pênseis ou estaiadas) necessitam de verificação quanto à sua estabilidade global e de seus elementos através de modelos dinâmicos e verificação à fadiga.

Com isso, é possível observar que as cargas utilizadas no dimensionamento são estáticas. A falta de parâmetros relacionados ao conforto humano e a não indicação de como devem ser feitas as verificações para estruturas esbeltas demonstram a escassez de informações presentes em tal normativa.

5.3. NBR 8800:2008 – PROJETO DE ESTRUTURAS DE AÇO E DE ESTRUTURAS MISTAS DE AÇO E CONCRETO DE EDIFÍCIOS

A norma determina que em nenhum piso a frequência natural seja inferior a 3 Hz. Também sugere valores de referência para a frequência da estrutura em função de algumas atividades humanas normais.

Em pisos que as pessoas caminham regularmente a frequência fundamental do piso não pode ser inferior a 4 Hz e o deslocamento vertical total do piso não deve ultrapassar 20 mm. Já nos pisos com atividades de saltos ou danças de forma rítmica, como salões de dança, ginásios e estádios de futebol, essa frequência deve ser aumentada para 6 Hz e em caso de atividades muito repetitivas dessa natureza, como ginástica aeróbica, deve ser aumentada para 8 Hz. Em ambos os casos o deslocamento não deve ser superior a 9 mm.

5.4. NBR 6118:2014 – PROJETO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO – PROCEDIMENTO

A análise de vibrações para passarelas é feita em regime linear por se tratar de uma estrutura usual. A norma indica que a frequência própria da estrutura deva estar mais afastada possível da frequência crítica. Dessa forma, é sugerida que a frequência da estrutura seja 20% maior que a frequência crítica.

No caso particular de passarelas, a frequência crítica recomendada é de 4,5 Hz.

5.5. BS 5400: 1978 – STEEL, CONCRETE AND COMPOSITE BRIDGES – PART 2: SPECIFICATION FOR LOADS

A norma britânica datada de 1978 apresenta como primeiro parâmetro a ser avaliado a frequência natural da estrutura (f_o). Estruturas sem carga que apresentem esse parâmetro

como sendo maior que 5 Hz atendem aos critérios de utilização sem risco de vibrações excessivas.

Para estruturas onde esse valor for igual ou menor que 5 Hz, a aceleração máxima vertical deve ser calculada com base na ação dinâmica de um pedestre movendo-se pelo vão principal da passarela (Eq. 5.1) e com velocidade dada pela Eq. 5.2, apresentada a seguir:

$$F(t) = 180 \cdot \sin(2\pi \cdot f_o \cdot t) \quad (5.1)$$

$$V_p = 0,9 \cdot f_o \quad (5.2)$$

Destaca-se que a aceleração máxima calculada pode ser reduzida quando a frequência (f_o) estiver entre 4 e 5 Hz. Essa redução pode ser obtida através de uma variação linear de zero para frequência igual a 4 Hz até 70% de redução para a frequência igual a 5 Hz.

A aceleração vertical (a) permitida em qualquer ponto da estrutura é apresentada na equação a seguir:

$$a_{m\acute{a}x} = 0,5 \cdot \sqrt{f_o} \quad (5.3)$$

A normativa ainda sugere um cálculo simplificado para obter a aceleração vertical máxima em passarelas de vão único, e de dois ou três vãos contínuos simétricos e seção constante idealizadas com apoios simples. A formulação simplificada sugerida pela BS 5400 encontra-se apresentada abaixo:

$$a_{m\acute{a}x} = 4 \cdot \pi^2 \cdot f_o^2 \cdot y_s \cdot k \cdot \Psi \quad (5.4)$$

Onde:

f_o é a frequência fundamental da estrutura;

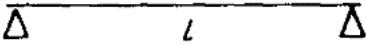
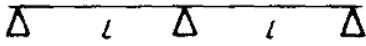
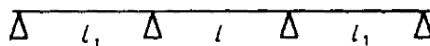
y_s é a deflexão estática decorrente da ação de um pedestre com 700 N parado no ponto de maior deformação da estrutura;

k é o coeficiente geométrico, explicitado a seguir;

Ψ é o coeficiente de resposta dinâmico, obtido através do ábaco da Figura 22.

O coeficiente geométrico (k) está associado ao comprimento dos vãos existentes na passarela, conforme Tabela 5.

Tabela 5 - Valor do coeficiente geométrico k

Configuração da passarela	Relação l_1/l	k
	-	1,0
	-	0,7
	1,0	0,6
	0,8	0,8
	0,6 ou menos	0,9

Fonte: adaptado de BS 5400, 1978

O fator de resposta dinâmico (Ψ) é obtido pelo ábaco apresentado na Figura 22.

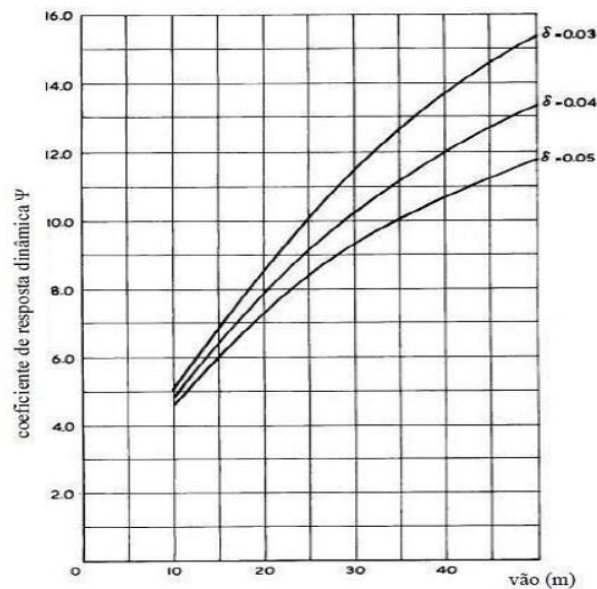


Figura 22 - Coeficiente de resposta dinâmico Ψ (BS 5400, 1978)

O ábaco acima relaciona valores do coeficiente de resposta dinâmico em função do vão e do amortecimento da estrutura (δ). Na falta de uma informação mais precisa, podem ser utilizados os valores de δ como sendo: 0,03 para estruturas metálicas com superfície em pavimento asfáltico, 0,04 para estruturas mistas em concreto e aço e 0,05 para estruturas protendidas ou em concreto armado.

Em relação aos danos permanentes causados por grupos de pedestres, a norma sugere que para evitar o efeito de ressonância, os rolamentos da estrutura sejam robustos.

5.6. CEB: 1991 – COMITÉ EURO – INTERNATIONAL DU BETÓN

Em 1991, o Comitê Euro Internacional de Concreto (CEB) elaborou seu Boletim nº 209 e apresentou o problema de vibrações em passarelas. Foram estudadas 67 estruturas de diversos países com objetivo de encontrar equações que representassem a frequência natural delas. Após análise dos dados, obtiveram-se as expressões a seguir com a frequência em função do vão livre da estrutura (L):

$$\text{Passarelas de concreto: } f_o = 39 \cdot L^{-0,77} \quad (5.5)$$

$$\text{Passarelas de aço: } f_o = 35 \cdot L^{-0,73} \quad (5.6)$$

$$\text{Passarelas mistas: } f_o = 42 \cdot L^{-0,84} \quad (5.7)$$

Outro resultado apresentado pelo CEB refere-se à razão de passo de pedestres. Essa está propensa a se aproximar da frequência fundamental da passarela em função do tamanho do vão da estrutura. Passarelas de concreto com vãos maiores de 25m e de aço com vãos maiores de 35m tendem a apresentarem problemas de vibrações.

A CEB adotou para representar a ação de caminhar a equação apresentada por Bachmann e Ammann (Eq. 4.14), assim como os coeficientes (Eq. 4.15 e 4.16) e ângulo de fase sugeridos também pelos mesmos pesquisadores.

A norma indica que a aceleração máxima vertical aceita para esse tipo de estrutura é de 0,5 m/s². Em relação ao amortecimento da passarela, a CEB apenas cita a dificuldade em obter esses valores e orienta os projetistas a se basearem em projetos já executados.

5.7. ONT: 1991 – ONTARIO HIGHWAY BRIDGE DESIGN CODE HIGHWAY ENGINEERING DIVISION

A norma canadense (ONT, 1991) foi baseada na norma britânica BS 5400 (1978). Sugere que ao se projetar passarelas com frequência fundamental menor ou igual que 4,0 Hz, a aceleração máxima vertical deve ser calculada com a ação dinâmica de um pedestre como sendo uma carga movendo-se pelo vão principal da passarela (Eq. 5.1) e com velocidade (Eq. 5.2) já apresentada.

A norma apresenta um ábaco com os valores limites para a aceleração vertical máxima de uma passarela, mostrado na Figura 23.

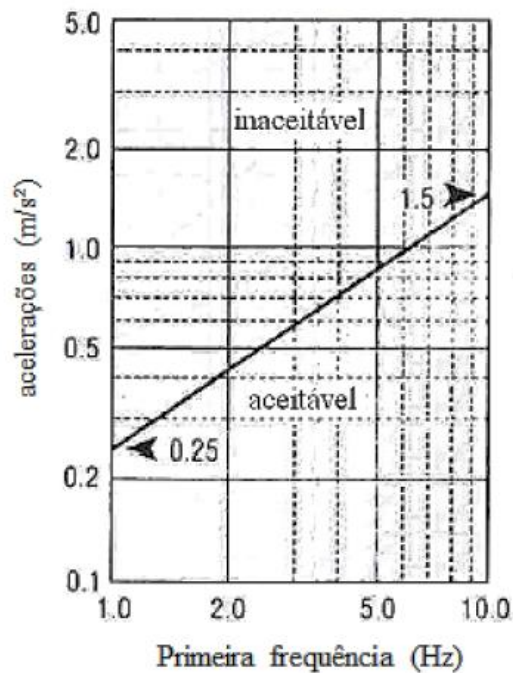


Figura 23 - Limite de aceleração em função da frequência (ONT, 1991)

O cálculo da aceleração vertical máxima ($a_{máx}$) é obtido através da mesma formulação sugerida pela BS 5400 (Eq. 5.4). Apenas os valores do coeficiente k mudam. O coeficiente geométrico (k) é igual a 1 para passarelas com vãos únicos. Para as demais configurações, os valores podem ser obtidos através da Tabela 6 e Figura 24.

Tabela 6 - Coeficiente k para diversas configurações

Relação a/L	Valor de k	
	2 vãos contínuos	3 vãos contínuos
1	0,70	0,60
0,8	0,92	0,82
0,6	0,96	0,92
0,4	0,96	0,92
0,2	0,95	0,90

Fonte: ONT, 1991

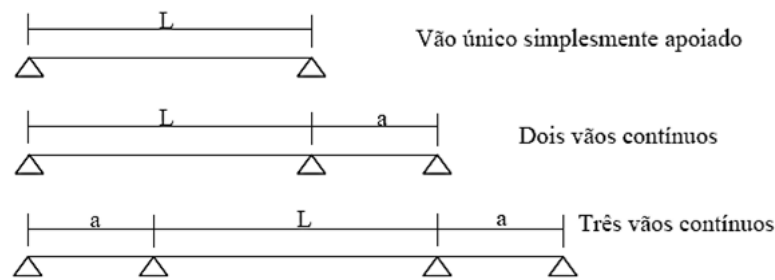


Figura 24 - Configuração das passarelas (ONT, 1991)

5.8. EUROCODE 5: 1997 – DESIGN OF TIMBER STRUCTURES – PART 2: BRIDGES

O Código Europeu 5 impõe limites que se aplicam às pontes de madeira em vigas simplesmente apoiadas ou em sistemas de treliça. Portanto, não podem ser empregados em boa parte das situações de passarelas.

A normativa descreve a aceleração vertical de um pedestre atravessando a passarela conforme a seguinte função:

$$a_{vert,1} = \begin{cases} \frac{200}{M \cdot \xi} & \text{para } f_{vert} \leq 2,5 \text{ Hz} \\ \frac{100}{M \cdot \xi} & \text{para } 2,5 \text{ Hz} \leq f_{vert} \leq 5,0 \text{ Hz} \end{cases} \quad (5.8)$$

Sendo que:

M é a massa total da passarela, dada pelo produto entre o vão e a massa por unidade de comprimento;

ξ é a relação de amortecimento;

f_{vert} é a frequência fundamental da passarela na direção vertical.

No caso de muitas pessoas atravessando a passarela, a aceleração vertical da estrutura ($a_{vert,N}$) pode ser calculada como sendo:

$$a_{vert,N} = 0,23 \cdot a_{vert,1} \cdot N \cdot k_{vert} \quad (5.9)$$

Onde:

$a_{vert,1}$ é a aceleração vertical sob ação de uma pessoa, já explicitada na Eq. 5.8;

N é o número de pedestres, adotado como 13 para grupo distinto de pedestres ou como sendo 0,6 da área da passarela no caso de um grupo contínuo de pedestres;

k_{vert} é o coeficiente retirada da Figura 25.

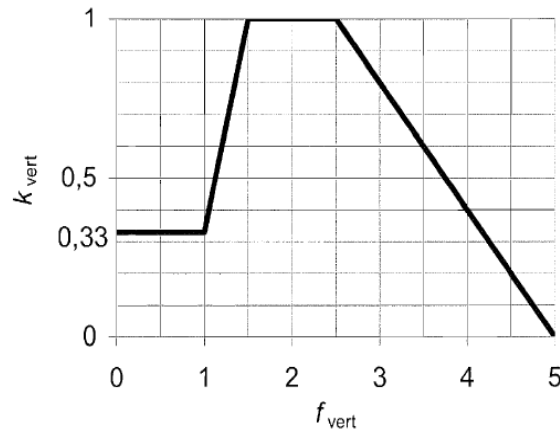


Figura 25 - Relação entre a frequência fundamental na vertical f_{vert} e o coeficiente k_{vert} (EUROCODE 5, 2004)

Há ainda a formulação que pode ser aplicada para acelerações verticais causadas por uma pessoa correndo sobre a passarela:

$$a_{vert,1} = \frac{600}{M \cdot \xi} \quad \text{para } 2,5 \text{ Hz} \leq f_{vert} \leq 3,5 \text{ Hz} \quad (5.10)$$

Para as vibrações na direção horizontal, a aceleração nessa direção apresenta uma formulação semelhante à já apresentada para a direção vertical.

$$a_{hor,1} = \frac{50}{M \cdot \xi} \quad \text{para } 0,5 \text{ Hz} \leq f_{hor} \leq 2,5 \text{ Hz} \quad (5.11)$$

Onde:

f_{hor} é a frequência fundamental da passarela na direção horizontal.

Da mesma forma que para a direção vertical, a norma também apresenta uma formulação para obter a aceleração na direção horizontal ($a_{hor,N}$) da estrutura sob ação de muitas pessoas.

$$a_{hor,N} = 0,23 \cdot a_{hor,1} \cdot N \cdot k_{hor} \quad (5.12)$$

Onde:

$a_{hor,1}$ é a aceleração horizontal sob ação de uma pessoa, já explicitada na Eq. 5.11;

N é o número de pedestres, adotado como 13 para grupo distinto de pedestres ou como sendo 0,6 da área da passarela no caso de um grupo contínuo de pedestres;

k_{hor} é o coeficiente retirada da Figura 26.

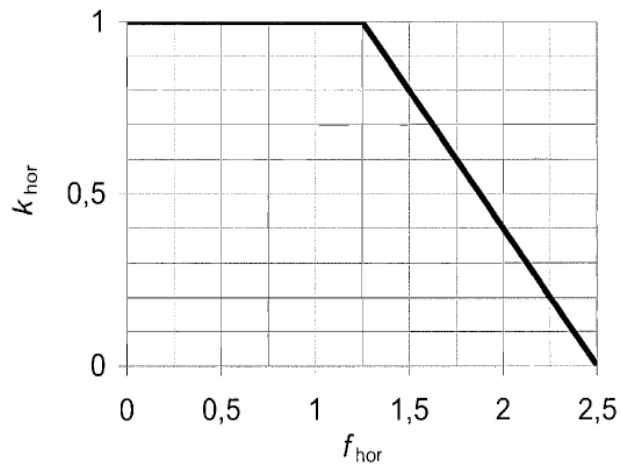


Figura 26 - Relação entre a frequência fundamental na horizontal f_{hor} e o coeficiente k_{hor} (EUROCODE 5, 2004)

5.9. EUROCODE 1: 2003 – ACTIONS ON STRUCTURES – PART 2: TRAFFIC LOADS ON BRIDGES

O Código Europeu 1 (2003) não apresenta metodologias para forças produzidas por pedestres nas estruturas estudadas. A normativa apresenta valores de base a serem adotados para o conforto dos usuários. Sugere também que seja aplicada uma carga móvel de 5 kN/m² uniformemente distribuída como sendo a ação vertical provocada pela carga móvel de pedestres em passarelas. Além disso, sugere a aplicação de uma força horizontal como sendo 10% da carga vertical citada anteriormente.

A norma também cita valores de frequência para cada ação a qual a passarela está submetida. Para caminhada, a frequência na direção vertical encontra-se entre 1 e 3 Hz e na horizontal entre 0,5 e 1,5 Hz. Já para corrida, a frequência na mesma direção pode ser adotada como sendo 3 Hz.

A verificação dos critérios de conforto dos usuários será aplicada em casos em que as frequências da estrutura apresentarem baixos valores, sendo 3,0 Hz para a direção vertical e 1,4 Hz para a horizontal.

5.10. SÉTRA/AFGC: 2006 – TECHNICAL GUIDE. FOOTBRIDGES. ASSESSMENT OF VIBRATIONAL BEHAVIOUR OF FOOTBRIDGES UNDER PEDESTRIAN LOADING

A normativa francesa foi baseada em estudos feitos para a solução de problemas na Passarela Solferino em Paris e na Passarela do Milênio em Londres. Tem como objetivo fornecer informações para evitar que esses problemas se repitam e consideram apenas os critérios de conforto dos usuários. Considera ainda a ação causada por atos de vandalismo que possam ocorrer nessas estruturas.

Considera a frequência para a caminhada como tendo frequência entre 1,6 e 2,4 Hz e para a corrida entre 2,0 e 3,5 Hz. No caso da caminhada, ela pode ser descrita pela série de Fourier já detalhada na Eq. 4.18. O peso do usuário é adotado como sendo 700 N e os valores dos coeficientes são considerados os mesmos obtidos por Bachmann e Ammann (1987) já mencionados.

Em relação à corrida, a norma destaca que a duração dessa atividade na passarela normalmente é curta, não havendo tempo suficiente para que o fenômeno da ressonância aconteça de fato e incomode os usuários. Portanto, a normativa não trata do caso de corridas.

A respeito do efeito multidão, o código francês destaca que essa análise é bastante complexa uma vez que cada pedestre possui suas próprias características e, ainda resulta complicado estimar a sincronia entre os diversos pedestres entre e com a própria passarela. Portanto, é difícil analisar a ação real da multidão sobre a passarela. Como alternativa, são apresentadas algumas metodologias com boas simplificações que podem ser utilizadas em projetos.

A mais simples delas é conhecida como modelo convencional e resulta a mais conservadora também. Considera que todos os usuários possuem a mesma frequência de passo como simplificação. Consiste em majorar a ação de um pedestre por um coeficiente k , obtido pela seguinte formulação:

$$k = \sqrt{\lambda \cdot T} \quad (5.13)$$

Onde:

λ expressa a taxa de pessoas/segundo;

T é o comprimento da passarela dividido pela velocidade de passo.

Outras metodologias foram obtidas com base em resultados de ensaios experimentais. Entretanto, apresentam limitações que devem ser adequadamente observadas na normativa.

A análise dinâmica sugerida pela normativa é bastante detalhada e apresenta seis etapas: classificação da passarela, escolha do nível de conforto pelo projetista, determinação das frequências e verificação da necessidade da análise dinâmica, análise com carregamentos dinâmicos, alteração do projeto e verificação estrutural sob ação de carga dinâmica. A seguir são detalhadas cada uma dessas etapas.

5.10.1. Análise dinâmica pela SÉTRA 2006

A primeira etapa consiste em classificar a passarela conforme o nível de tráfego apresentado por ela. A normativa propõe quatro classes, sendo elas:

- Classe I: passarelas urbanas sujeitas a um tráfego intenso como ligação de áreas com grande densidade de pedestres (passarelas de estações de trem ou metrô, por exemplo) ou muito utilizada por multidões (turistas, por exemplo);
- Classe II: passarelas ligando áreas populosas, sujeitas a tráfego intenso e que podem em algum momento da vida útil estarem com a área totalmente preenchida;
- Classe III: passarelas de uso padrão que em alguns momentos estão submetidas a grandes grupos que nunca preencherão totalmente sua área;
- Classe IV: passarelas raramente utilizadas, construídas em áreas com baixa densidade de pedestres ou para permitir a passagem em rodovias ou vias rápidas.

Apesar de parecer fácil identificar o tipo de passarela, é necessário considerar o possível aumento no tráfego ao longo do tempo. As passarelas classificadas no último grupo não necessitam de análise dinâmica. Além disso, o código sugere que passarelas esbeltas sejam consideradas pelo menos na Classe III.

A segunda fase consiste na escolha do nível de conforto pelo projetista a depender das características necessárias do projeto: tipos de usuários (crianças e idosos são mais sensíveis, por exemplo), tempo para atravessar a passarela, entre outros. A partir desses requisitos, opta-se por algum dos três níveis apresentados a seguir:

- Conforto máximo: acelerações sofridas pela estrutura são quase imperceptíveis para os usuários;

- Conforto médio: acelerações sofridas pela estrutura são pouco perceptíveis aos usuários;
- Conforto mínimo: acelerações sofridas pela estrutura são perceptíveis aos usuários, porém são toleráveis.

Para cada classe e nível de conforto adotado, é possível obter os valores limites de aceleração nas direções verticais e horizontais (Tabela 7 e Tabela 8). Destaca-se que na horizontal, a aceleração é limitada em $0,10 \text{ m/s}^2$ afim de evitar o efeito *lock-in*.

Tabela 7 - Níveis de aceleração para vibrações verticais

Níveis de aceleração (m/s^2)	0	0,5	1	2,5
Nível 1	Máx			
Nível 2		Médio		
Nível 3			Mínimo	
Nível 4				

Fonte: adaptado de SÉTRA, 2006

Tabela 8 - Níveis de aceleração para vibrações horizontais

Níveis de aceleração (m/s^2)	0	0,1	0,15	0,3	0,8
Nível 1	Máx				
Nível 2			Médio		
Nível 3				Mínimo	
Nível 4					

Fonte: adaptado de SÉTRA, 2006

Seguindo para a próxima etapa, as passarelas pertencentes às classes I, II ou III devem ter suas frequências fundamentais calculadas nas 3 direções. Essa determinação é feita considerando duas situações: passarela vazia e passarela carregada ao longo de sua extensão com um pedestre por metro quadrado (70 kg/m^2). Em todas as direções há quatro escalas de frequência, observadas na Tabela 9 e Tabela 10.

Tabela 9 - Risco de ressonância na direção vertical e longitudinal

Frequência (Hz)	0	1	1,7	2,1	2,6	5
Nível 1			Máx			
Nível 2		Méd		Méd		
Nível 3					Mínimo	
Nível 4	Irrel.					Irrel.

Fonte: adaptado de SÉTRA, 2006

Tabela 10 - Risco de ressonância na direção horizontal lateral

Frequência (Hz)	0	0,3	0,5	1,1	1,3	2,5
Nível 1			Máx			
Nível 2		Méd		Méd		
Nível 3					Mínimo	
Nível 4	Irrel.					Irrel.

Fonte: adaptado de SÉTRA, 2006

A partir da classe e do risco de ressonância é obtido a situação a ser analisada para o cálculo dinâmico:

- Situação 1: tráfego pouco denso a denso;
- Situação 2: tráfego muito denso;
- Situação 3: consideração dos efeitos do segundo harmônico.

Tabela 11 - Situações dinâmicas a serem consideradas

Tráfego	Classe	Risco de ressonância		
		1	2	3
Pouco denso	III	Situação 1	Verificação dispensada	Verificação dispensada
Denso	II		Situação 1	
Muito denso	I	Situação 2	Situação 2	Situação 3

Fonte: adaptado de SÉTRA, 2006

A quarta etapa consiste na realização da análise dinâmica nas situações necessárias, conforme já explicitado anteriormente.

- Situação 1: tráfego pouco denso a denso

Inicialmente é determinada a densidade (d) com base na classe da passarela, adotada como 0,5 e 0,8 pedestres/m², respectivamente, para as classes III e II. Essa densidade deve ser distribuída por toda a área da passarela (A), portanto, o número de pedestres passa a ser:

$$N = A \cdot d \quad (5.14)$$

O número de pedestres com a mesma frequência e em fase (N_{eq}) é determinado pela expressão a seguir, em função da razão de amortecimento (ξ) obtida na literatura:

$$N_{eq} = 10,8 \cdot (\xi \cdot N)^{1/2} \quad (5.15)$$

Ainda é sugerido que a carga seja minorada por um fator (ψ) que prevê a diminuição do risco de ressonância em passarelas com frequências para acelerações verticais longe do intervalo entre 1,7 e 2,0 Hz e horizontais entre 0,5 e 1,1 Hz. Os valores desse coeficiente podem ser obtidos na Figura 27.

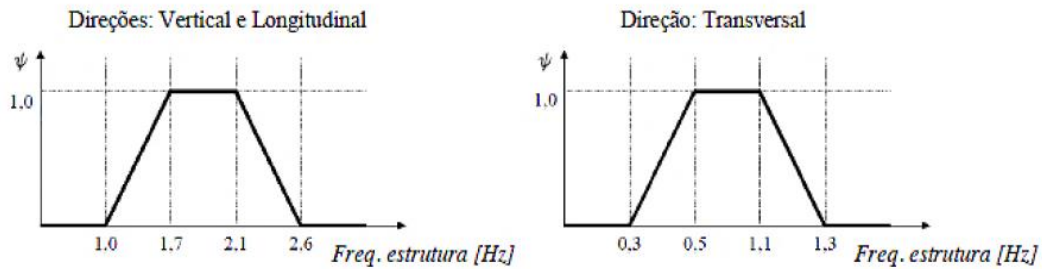


Figura 27 - Fator de redução ψ situações 1 e 2 (adaptado de SÉTRA, 2006)

Dessa forma, as cargas dinâmicas aplicadas em cada uma das direções podem ser descritas pelas equações 5.16, 5.17 e 5.18.

$$F_v = d \cdot (280 \cdot N) \cdot \cos(2\pi \cdot f_v \cdot t) \cdot 10,8 \cdot (\xi \cdot N)^{1/2} \cdot \psi \quad (5.16)$$

$$F_{h,long} = d \cdot (140 \cdot N) \cdot \cos(2\pi \cdot f_h \cdot t) \cdot 10,8 \cdot (\xi \cdot N)^{1/2} \cdot \psi \quad (5.17)$$

$$F_{h,transv} = d \cdot (35 \cdot N) \cdot \cos(2\pi \cdot f_v \cdot t) \cdot 10,8 \cdot (\xi \cdot N)^{1/2} \cdot \psi \quad (5.18)$$

- Situação 2: tráfego muito denso

A densidade é considerada como sendo igual a 1 pedestre/m². Nesse caso, o número de pedestres com a mesma frequência e em fase (N_{eq}) é obtido pela expressão a seguir:

$$N_{eq} = 1,85 \cdot (\xi \cdot N)^{1/2} \quad (5.19)$$

Aqui também se aplica o fator de minoração (ψ) da mesma forma que na situação 1. As forças dinâmicas podem ser expressas conforme as formulações abaixo:

$$F_v = d \cdot (280 \cdot N) \cdot \cos(2\pi \cdot f_v \cdot t) \cdot 1,85 \cdot (1/N)^{1/2} \cdot \psi \quad (5.20)$$

$$F_{h,long} = d \cdot (140 \cdot N) \cdot \cos(2\pi \cdot f_v \cdot t) \cdot 1,85 \cdot (1/N)^{1/2} \cdot \psi \quad (5.21)$$

$$F_{h,transv} = d \cdot (35 \cdot N) \cdot \cos(2\pi \cdot f_v \cdot t) \cdot 1,85 \cdot (1/N)^{1/2} \cdot \psi \quad (5.22)$$

- Situação 3: considerações dos efeitos do segundo harmônico

A densidade é considerada como sendo igual a 1 e 0,8 pedestre/m², respectivamente, para as classes I e II. O N_{eq} é obtido com as mesmas formulações dos casos anteriores. O fator de minoração (ψ) também está presente, porém agora com os valores da Figura 28.

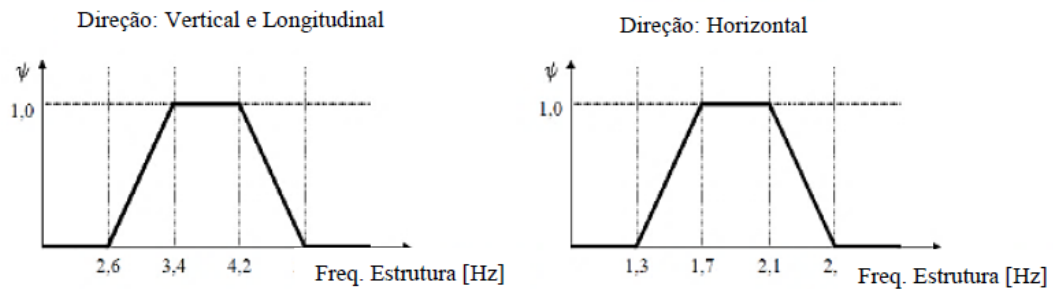


Figura 28 - Fator de redução ψ situação 3 (adaptado de SÉTRA, 2006)

As forças dinâmicas podem ser expressas conforme as formulações abaixo:

$$F_v = d \cdot (70 \cdot N) \cdot \cos(2\pi \cdot f_v \cdot t) \cdot 1,85 \cdot (N_{eq}/N) \cdot \psi \quad (5.23)$$

$$F_{h,long} = d \cdot (7 \cdot N) \cdot \cos(2\pi \cdot f_v \cdot t) \cdot 1,85 \cdot (N_{eq}/N) \cdot \psi \quad (5.24)$$

$$F_{h,transv} = d \cdot (35 \cdot N) \cdot \cos(2\pi \cdot f_v \cdot t) \cdot 1,85 \cdot (N_{eq}/N) \cdot \psi \quad (5.25)$$

Finalizado o cálculo das forças dinâmicas, as condições obtidas devem ser comparadas com os critérios adotados na segunda etapa. Caso não estejam conforme, a passarela deve passar por um processo de redimensionamento. No caso de estruturas já existentes, devem ser adotadas soluções que possam resolver o problema de vibrações.

Por último, devem ser analisadas as tensões e deslocamentos provocados pelas cargas dinâmicas juntamente com as estáticas.

5.11. ISO 10137: 2007 – BASES FOR DESIGN OF STRUCTURES – SERVICEABILITY OF BUILDINGS AND WALKWAYS AGAINST VIBRATIONS

A norma internacional indica a representação da carga proveniente de diversas atividades humanas. No caso de passarelas, a ação do homem mais relevante é o caminhar, apresentada na Figura 29.

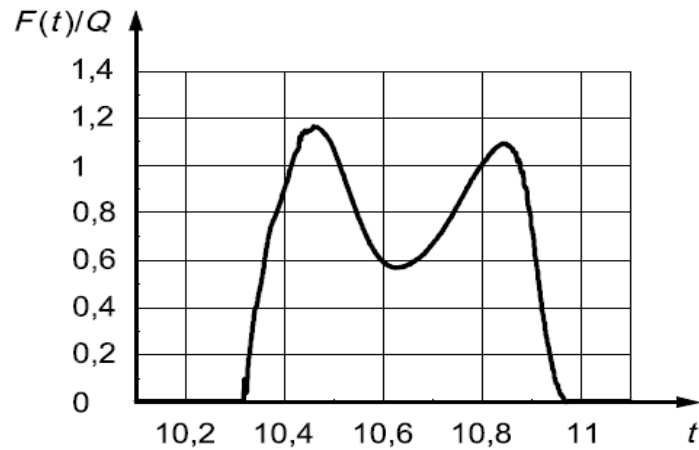


Figura 29 - Força produzida pela ação de caminhar (ISO 10137, 2007)

Essas ações são expressas matematicamente através de séries de Fourier, conforme as equações apresentadas a seguir, sendo a primeira para a direção vertical (F_{vert}) e a segunda para a horizontal (F_{hor}):

$$F_{vert}(t) = G \left(1 + \sum_{n=1}^{\bar{k}} \alpha_{n,v} \sin(2\pi \cdot n \cdot f_p \cdot t + \varphi_{n,v}) \right) \quad (5.26)$$

$$F_{hor}(t) = G \left(1 + \sum_{n=1}^{\bar{k}} \alpha_{n,h} \sin(2\pi \cdot n \cdot f_p \cdot t + \varphi_{n,h}) \right) \quad (5.27)$$

Onde:

$\alpha_{n,v}$ é o fator dinâmico de carga (ou coeficiente de Fourier) do i -ésimo harmônico para a direção vertical;

$\alpha_{n,h}$ é o fator dinâmico de carga (ou coeficiente de Fourier) do i -ésimo harmônico para a direção horizontal;

G é o peso da pessoa, adotado como sendo igual a 700 N;

f_p é o componente da frequência do passo, sendo que para a direção horizontal é metade do valor da direção vertical, em Hz;

$\varphi_{n,v}$ é o ângulo de fase do i -ésimo harmônico na direção vertical;

$\varphi_{n,h}$ é o ângulo de fase do i -ésimo harmônico na direção horizontal;

n é o número de harmônicos considerados necessários para caracterizar a ação;

\bar{k} é o número de harmônicos que caracterizam a função na amplitude de interesse.

Valores para os coeficientes de Fourier são fornecidos pela norma com base no tipo de atividade e no harmônico analisado.

Tabela 12 - Exemplo de parâmetros de projeto para movimentos de uma pessoa

Atividade	Número do harmônico	Faixa de frequência de passo (Hz)	Coefficiente de Fourier para a direção vertical	Coefficiente de Fourier para a direção horizontal
Caminhar	1	1,2 a 2,4	$0,37(f - 1,0)$	0,1
	2	2,4 a 4,8	0,1	
	3	3,6 a 7,2	0,06	
	4	4,8 a 9,6	0,06	
	5	6,0 a 12,0	0,06	
Correr	1	2,0 a 4,0	1,4	0,2
	2	4,0 a 8,0	0,4	
	3	6,0 a 12,0	0,1	

Fonte: adaptado de ISO 10137, 2007

A norma ainda cita que passarelas cuja frequência horizontal fundamental seja menor que 1,3 Hz não podem desprezar o efeito de vibrações induzidas por pedestres nessa mesma direção.

Além disso, no projeto devem ser consideradas quatro situações de carregamento da passarela:

- Uma pessoa caminhando pela passarela e outra no meio do vão;
- Um fluxo médio de usuários com base numa taxa de ocorrência diária;
- Um fluxo contínuo de pessoas, grupo de 8 a 15 pessoas;
- Eventos e/ou coreografias ocasionais.

Na falta de dados, o nível de vibração da estrutura não pode exceder 60 vezes o da curva base, apresentada na Figura 30. Quando houver muitas pessoas, não pode ultrapassar 30 vezes o valor a ser retirado da curva base.

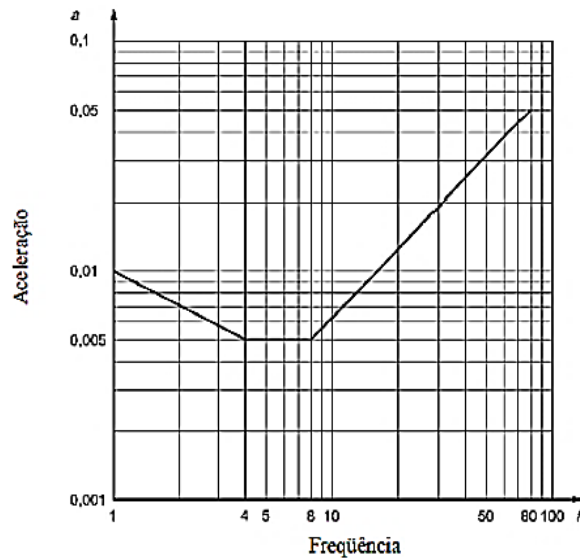


Figura 30 - Curva base para acelerações máximas no plano vertical (ISO 10137, 2007)

Da mesma forma ocorre na direção horizontal. O nível de vibração nessa direção não pode exceder 60 vezes o da curva base da Figura 31.

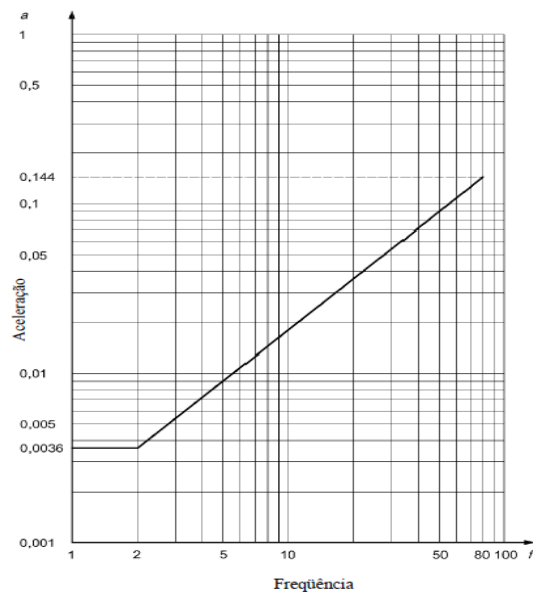


Figura 31 - Curva base para acelerações máximas no plano horizontal (ISO 10137, 2007)

5.12. AASHTO:2009 – GUIDE SPECIFICATIONS FOR DESIGN OF PEDESTRIAN BRIDGES

A Associação Norte-Americana de especialistas rodoviários e de transporte sugere o uso de carga estática para representar a ação de pedestres sobre uma passarela. Essa carga

equivale a 4,309 kN/m². A normativa também cita que é necessário analisar as frequências naturais da estrutura para evitar faixas críticas. Passarelas com frequência natural vertical e horizontal maiores que 3,0 Hz e 1,3 Hz, respectivamente, estão dispensadas das verificações de acelerações.

Caso não seja atendido esse requisito, é necessário avaliar a passarela dinamicamente. Deve ser considerada a frequência e magnitude das cargas dos usuários, a aplicação progressiva da carga de vários pedestres na passarela incluindo o fenômeno *lock-in* (amplificação das vibrações devido a ação de muitos pedestres atravessando a estrutura), estimativa adequada de amortecimento estrutura e os limites em função da aceleração e/ou velocidade.

Como essa análise é complexa, um método alternativo é proposto pela AASHTO. Se uma das equações a seguir for satisfeita, pode-se considerar a estrutura conforme os critérios de conforto:

$$f_{o,v} \geq 2,86 \ln \left(\frac{180}{W} \right) \quad (5.28)$$

$$W \geq 180 \cdot e^{(-0,35 \cdot f_{vert})} \quad (5.29)$$

Sendo:

$f_{o,v}$ é a frequência fundamental na direção vertical;

W é o peso próprio da estrutura, em Kips.

$$f_{o,v} = 0,18 \cdot \sqrt{\frac{g}{\Delta DL}} \quad (5.30)$$

Onde:

g é a aceleração da gravidade em ft/s²;

ΔDL é a deflexão máxima vertical causada pelo peso próprio.

A frequência fundamental na direção horizontal é calculada da mesma forma, apenas substituindo a deflexão máxima vertical pela horizontal.

Todas essas normas serviram de base para analisar o comportamento dinâmico de duas passarelas, estudo descrito no capítulo a seguir.

6. ESTUDO DE CASOS

6.1. INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta os resultados obtidos por Barros (2009) e Queiroz (2014) na análise dinâmica realizada em duas passarelas que apresentam modelos estruturais diferentes. Baseado nisso, esses resultados foram analisados sob o ponto de vista cada normativa apresentada no capítulo anterior.

Inicialmente, foi feita uma análise modal. Posteriormente, foram estudados movimentos de pedestre sobre as estruturas e as respostas geradas por esses movimentos. Ao final, foi realizada uma análise desses resultados com base nas normativas estudadas até aqui.

6.2. MODELO ESTRUTURAL 1 – PASSARELA EM ESTEIO, RS

6.2.1. Descrição do modelo 1

A primeira estrutura a ser estudada é um projeto de passarela que seria construída no município de Esteio, no estado do Rio Grande do Sul, sobre a rodovia BR-116 no km 256. O trecho apresenta alto índice de acidentes devido à falta de meios seguros para a travessia da população.

Não saiu da fase de projeto devido a problemas na licitação, sendo substituída por uma passarela com sistema de treliça. Porém, não deixa de ser interessante a análise do ponto de vista dinâmico da estrutura por se tratar de uma passarela estaiada.

A escolha de se estudar essa passarela foi motivada pelo fato desse sistema estrutural ser melhor para suportar cargas dinâmicas, ser mais leve e utilizada para vencer grandes vãos. A Figura 32 apresenta a passarela.

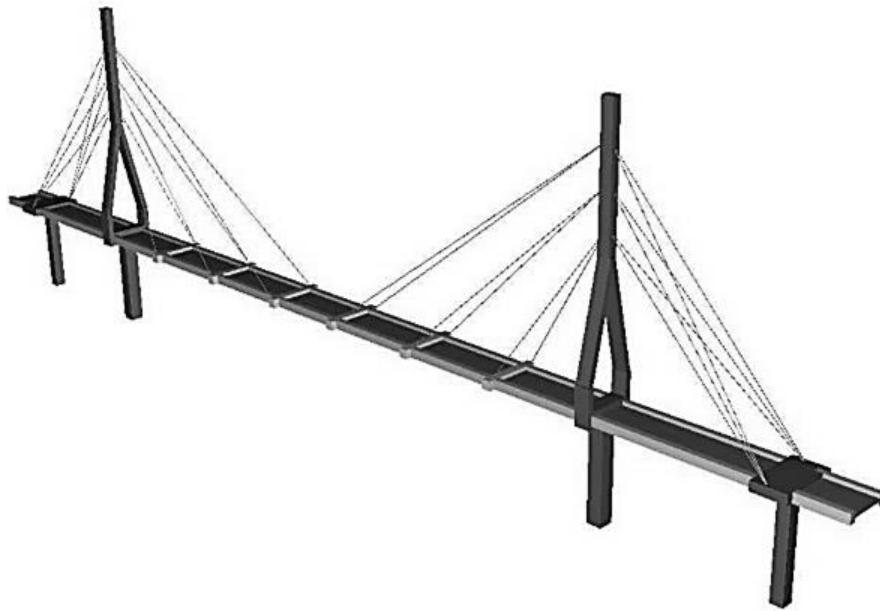


Figura 32 - Passarela em Esteio, RS (Barros, 2009)

O projeto é composto por três vãos, além de dois balanços nas extremidades. Possui quatro pilares, sendo dois externos menores e duas torres centrais, onde são fixados seis estais para sustentação do tabuleiro do vão central. Os vãos são formados por duas longarinas de concreto protendido unidas pelo tabuleiro de concreto. Em ambas as extremidades da passarela, existem sete rampas de acesso intercaladas por seis patamares. As dimensões de todos os elementos da estrutura podem ser visualizadas nas figuras a seguir.

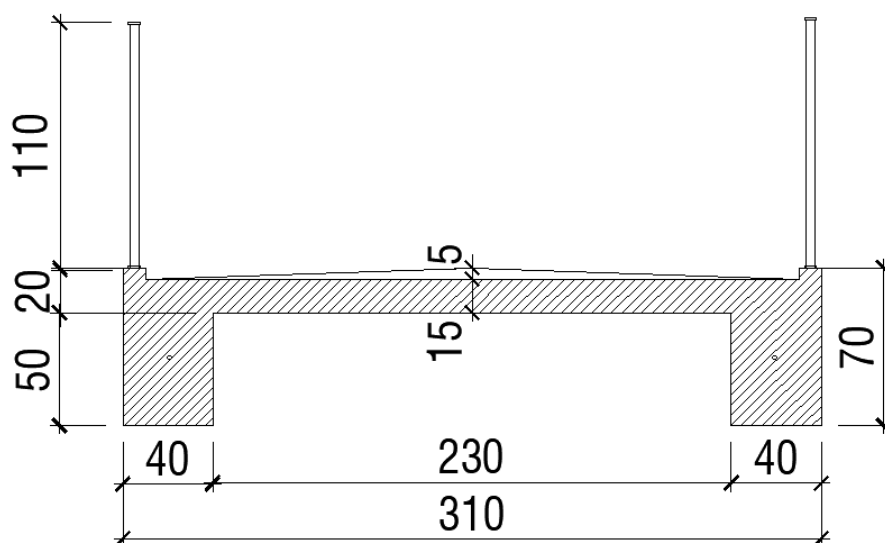


Figura 33 - Seção do vão central (adaptado de Barros, 2009)

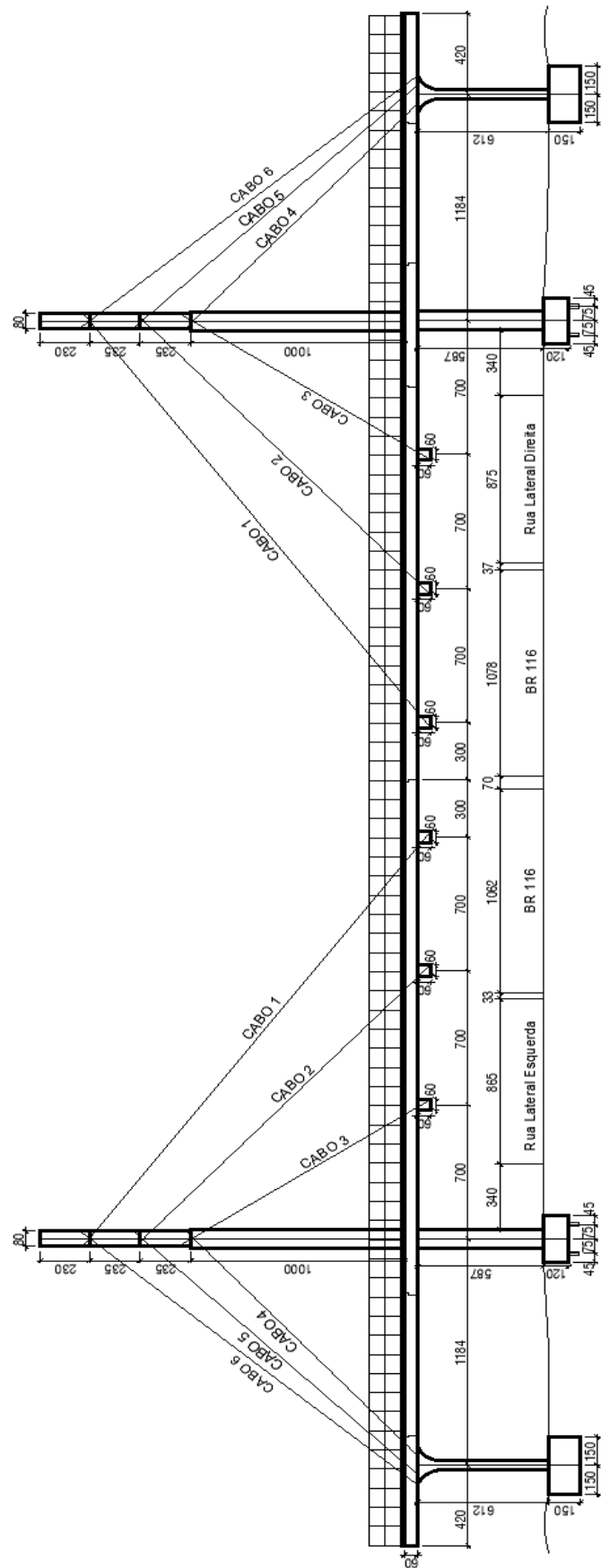


Figura 35 - Corte longitudinal da passarela 1 (adaptado de Barros, 2009)

As características dos materiais especificados para o projeto são:

- Concreto da superestrutura: $f_{ck} = 30 \text{ MPa}$;
- Concreto dos blocos: $f_{ck} = 20 \text{ MPa}$;
- Cabos dos estais: Dywidag $\phi 32 \text{ mm}$ (barras);
- Cabos de protensão: $\phi 12,7 \text{ mm}$ – CP-190RB
- Aço CA-50.

6.2.2. Análise do modelo 1

A modelagem feita por Barros (2009) foi realizada no *software* SAP2000 (COMPUTERS AND STRUCTURES INCORPORATION, 2005), baseado no método dos elementos finitos. O programa possui diversas opções quanto às propriedades dos materiais, formas de carregamento e torna possível analisar estruturas do ponto de vista estático e dinâmico.

Os pilares, as torres, as longarinas e as transversinas foram modelados com o elemento Frame. Já para o tabuleiro utilizou-se o elemento Shell-Thin, enquanto que nos estais foram usados os elementos do tipo Tendon. Engastes rígidos foram usados nas vinculações da base dos quatro pilares, visto que dados sobre o solo não constavam nos projetos obtidos pelo autor. É importante ressaltar que essa consideração está a favor da segurança. A modelagem da passarela pode ser vista na Figura 36.

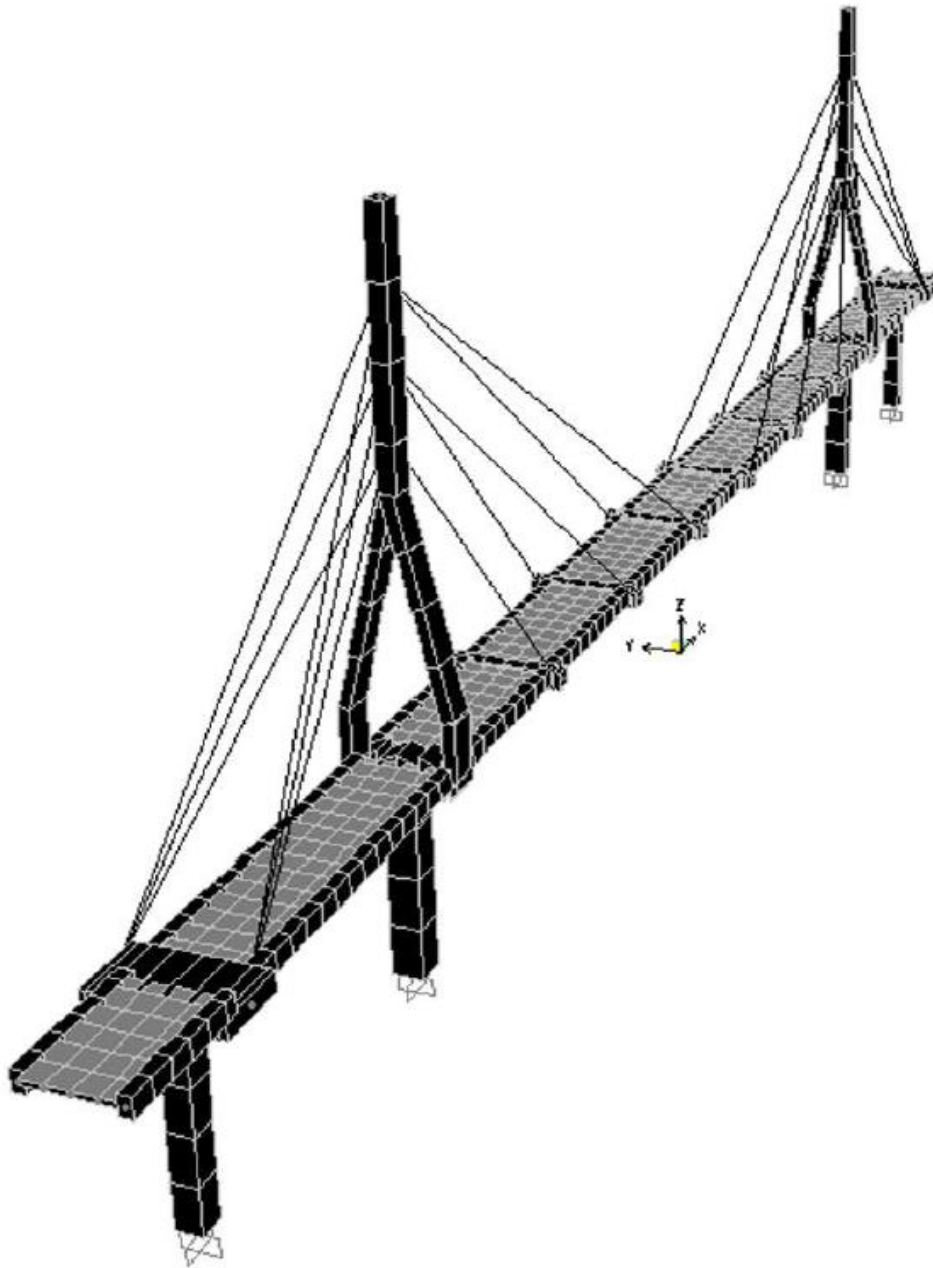


Figura 36 - Modelagem da passarela feita por Barros no SAP2000 (Barros, 2009).

Em seguida, os carregamentos para as análises estática e dinâmica foram inseridos. O peso próprio da estrutura foi o encontrado pelo próprio programa, nomeado pelo *software* como carga do tipo “Dead”. Essa carga é calculada pelas dimensões dos elementos e pelo peso específico adotado para os materiais. A carga acidental, nomeada pelo programa de “Live”, é uma carga distribuída citada pela NBR 7188:2013. Na modelagem de Barros (2009), ela foi aplicada ao longo da superfície do vão central.




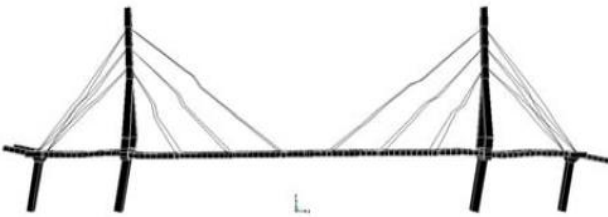
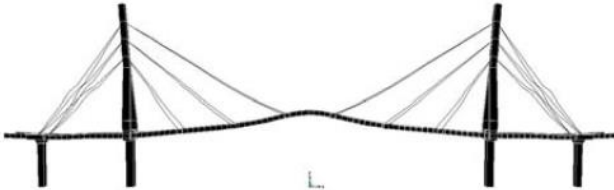
O valor médio da razão de amortecimento foi adotado no modelo igual a 0,010 conforme determinação do CEB 1991 para passarelas de pedestres em concreto protendido.



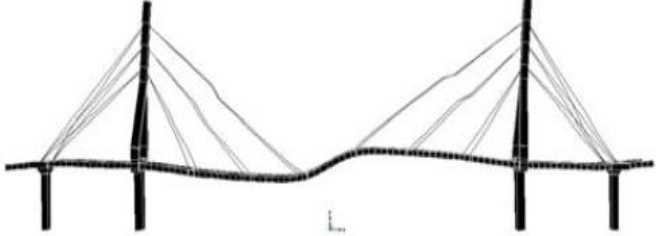


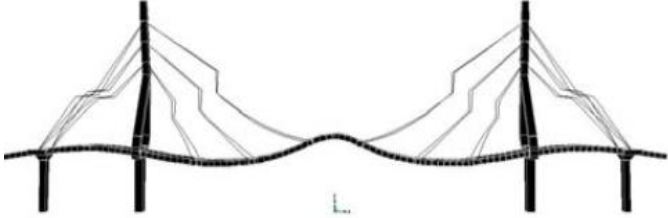
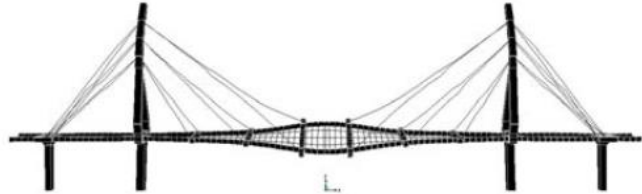
6.2.3. Análise dos resultados do modelo 1

A primeira análise a ser feita é a de vibração livre ou análise modal, através dela determinam-se as frequências naturais e os modos de vibração da estrutura. As frequências naturais são importantes para observar sob quais frequências o sistema pode oscilar livremente, enquanto que os modos de vibração exibem as configurações deformadas da estrutura. Tudo isso é feito com base na massa e na rigidez da estrutura, obtidas por meio das propriedades geométricas e nas propriedades dos materiais da estrutura.

Essa análise de vibração livre foi feita pelo autor para os 12 primeiros modos de vibração, com suas respectivas frequências, classificações e modos de vibração. Todas essas informações são mostradas na Tabela 13.

Tabela 13 - Modos de vibração da estrutura 1

Modo	Frequência (Hz)	Classificação	Vistas do modo de vibração
1	1,26	Flexão lateral	
2	1,75	Flexão lateral	
3	2,85	Flexão lateral	
4	2,85	Axial	
5	3,99	Flexão vertical	

6	4,28	Flexão lateral	
7	4,66	Flexão lateral	
8	5,93	Flexão vertical	
9	5,95	Flexão lateral	
10	7,77	Flexão lateral	
11	8,83	Flexão vertical	
12	3,97	Torção	

Fonte: Barros, 2009

Pode-se observar que os modos com flexões laterais (primeiro, segundo, terceiro, sexto, sétimo, nono e décimo) mostram que a estrutura pode apresentar vibrações laterais excessivas. O estudo desses modos é importante para a consideração das cargas que atuam de forma perpendicular ao plano da passarela, sendo o vento a mais considerável dentre elas.

O modo axial, representado pelo quarto modo de vibração, é interessante para o estudo de acelerações e frenagem de veículos. Por se tratar de estruturas exclusivas com ação de pedestres, essa situação não será estudada neste trabalho.

Em compensação, os modos que apresentam as flexões verticais (quinto, oitavo e décimo primeiro) são de extrema importância, assim como o modo de torção (décimo segundo). Isso porque são as cargas ligadas ao sentido da força da gravidade, como por exemplo, a ação provocada pela ação humana.

A análise dinâmica transiente ou de vibração forçada é utilizada para encontrar a resposta da estrutura sob a ação de um carregamento variável no tempo. É possível determinar as variações no tempo para deslocamentos, esforços e tensões na estrutura como resposta a uma combinação de carregamentos estáticos e dinâmicos.

Essa análise foi usada para estudar a ação produzida pelos pedestres na estrutura. Três movimentos foram considerados por Barros (2009): caminhar, correr e pular. O autor buscou descrever os carregamentos de forma a maximizar os efeitos produzidos pelos pedestres.

Portanto adotou uma frequência de passo de 2,0 Hz (caminhada normal), cujos primeiros harmônicos são bem próximos dos primeiros modos de vibração vertical. Foi adotada a mesma consideração para a ação de pular, onde o autor ainda optou pela redução ao máximo do tempo de contato dos pés com a estrutura, amplificando a carga. No caso da ação de correr, o autor optou por utilizar uma corrida lenta.

Os carregamentos provenientes da caminhada e da corrida foram modelados como atuantes apenas no vão central. O carregamento resultante da ação de pular foi considerado como atuante no centro do vão central. Esses locais foram escolhidos por estarem em correspondência com as maiores amplitudes.

Com as frequências definidas, é preciso obter os demais parâmetros necessários para caracterizar cada uma das ações, conforme já explicados no capítulo 4.3 deste trabalho. Fazendo o inverso da frequência de passo, encontra-se o tempo de passo. Adotando o comprimento de passo conforme a Tabela 2 de acordo com o movimento escolhido, é possível encontrar a velocidade de passo através da equação 4.14. Dividindo-se o comprimento do vão central (48 metros) pelo comprimento de passo, é possível encontrar o número de passos necessários para percorrê-lo. Além disso, com o produto entre esse resultado e o tempo de passo, o tempo total de travessia do vão central é encontrado.

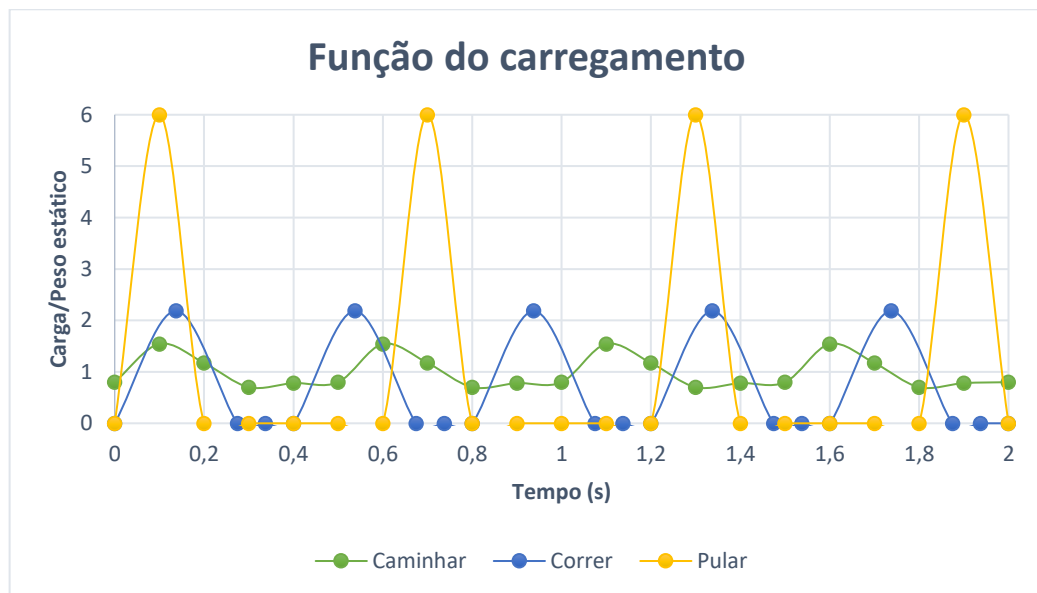
Todas essas informações estão reunidas na Tabela 14.

Tabela 14 - Caracterização dos carregamentos utilizados na modelagem da estrutura 1

Característica	Caminhar	Correr	Pular
Frequência de passo (Hz)	2,0	2,5	2,0
Tempo de passo (s)	0,50	0,40	0,50
Tempo de contato com o piso por passo (s)	0,50	0,275	0,15
Comprimento de passo (m)	0,75	1,30	-
Velocidade de passo (m/s)	1,50	3,25	-
Número de passos para atravessar o vão	64	37	-
Tempo para atravessar o vão (s)	32,00	14,77	-

Fonte: Barros, 2009

A Figura 37 compara os carregamentos estudados em função da relação da carga dinâmica pelo peso estático de um pedestre de 800 N para um tempo de 2,0 s. As equações utilizadas foram 4.14, 4.15 e 4.16 para o movimento de caminhar e 4.18 para correr e pular, preenchidas com os valores da tabela anterior.

**Figura 37** - Função do carregamento (adaptado de Barros, 2009)

É importante observar o quanto a carga gerada por uma pessoa em movimento é maior que o peso dela (carga estática), essa relação é conhecida como amplificação dinâmica. Para a ação de caminhar, uma pessoa apresenta esse fator da ordem de 1,5. Já no movimento de correr, a pessoa apresenta um coeficiente um pouco maior que 2, enquanto que para a ação de pular esse coeficiente está próximo de 6.

Todos os carregamentos citados acima foram feitos considerando apenas a ação de uma única pessoa. Entretanto, é bastante comum que as passarelas estejam submetidas à ação

de diversos pedestres de forma simultânea. Portanto, Barros (2009) optou por estudar movimentos provocados por um pedestre e por mais de um. Os efeitos analisados serão:

- Um pedestre caminhando;
- Três pedestres caminhando defasados de 1,0 s;
- Um pedestre correndo;
- Três pedestres correndo defasados de 0,8 s;
- Um pedestre pulando no centro do vão;
- Três pedestres pulando no centro do vão.

Após inserir os carregamentos no modelo, o autor encontrou as acelerações verticais para cada um dos casos. Destaca-se que os gráficos não estão representados em uma mesma escala para o eixo do tempo, nem para o eixo das acelerações. Isso foi feito para possibilitar uma melhor visualização.

Para uma pessoa caminhando, foram necessários 64 passos e 32 s para a travessia do vão central da passarela. As acelerações verticais podem ser observadas na Figura 38.

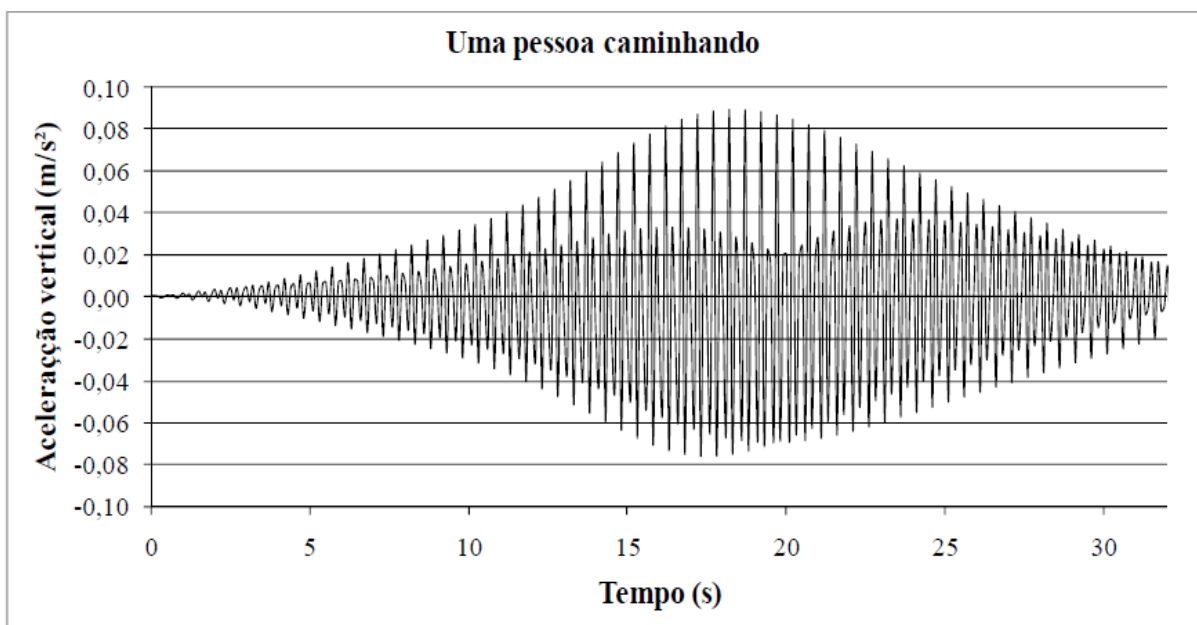


Figura 38 - Aceleração vertical para uma pessoa caminhando (Barros, 2009)

O próximo caso representa três pessoas caminhando pelo vão central da passarela defasadas de 1,0 s. Foram necessários 64 passos de cada uma e o tempo total foi de 33 s. As acelerações verticais causadas por esse movimento se encontram na Figura 39.

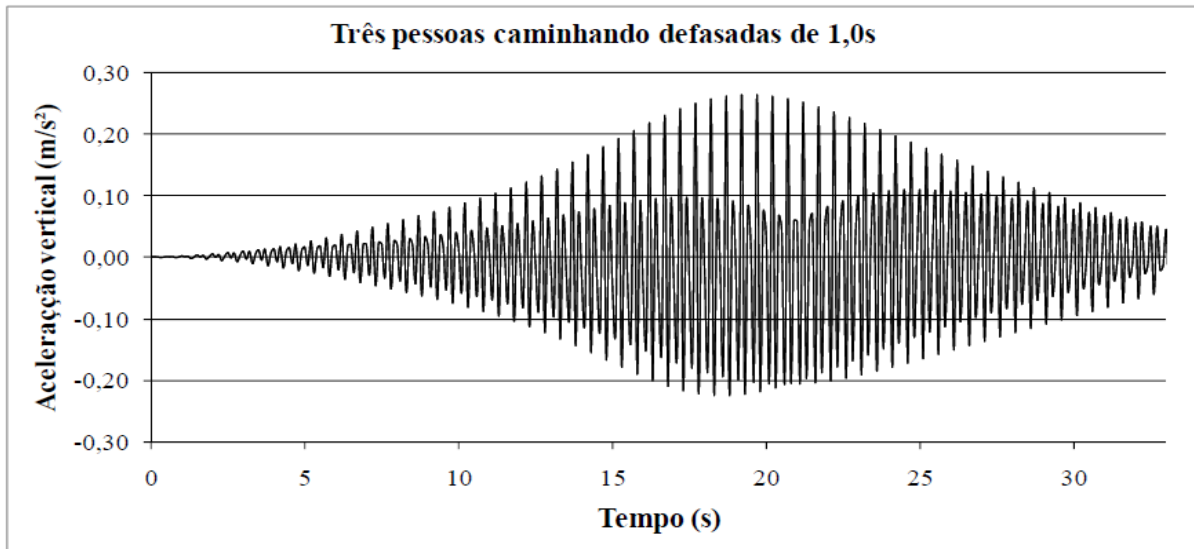


Figura 39 - Aceleração vertical para três pessoas caminhando defasadas de 1,0 s (Barros, 2009)

Analisando agora a corrida, o pedestre necessita de 37 passos para atravessar o vão central, levando 32 s. As acelerações verticais geradas por esse movimento estão reunidas na Figura 40.

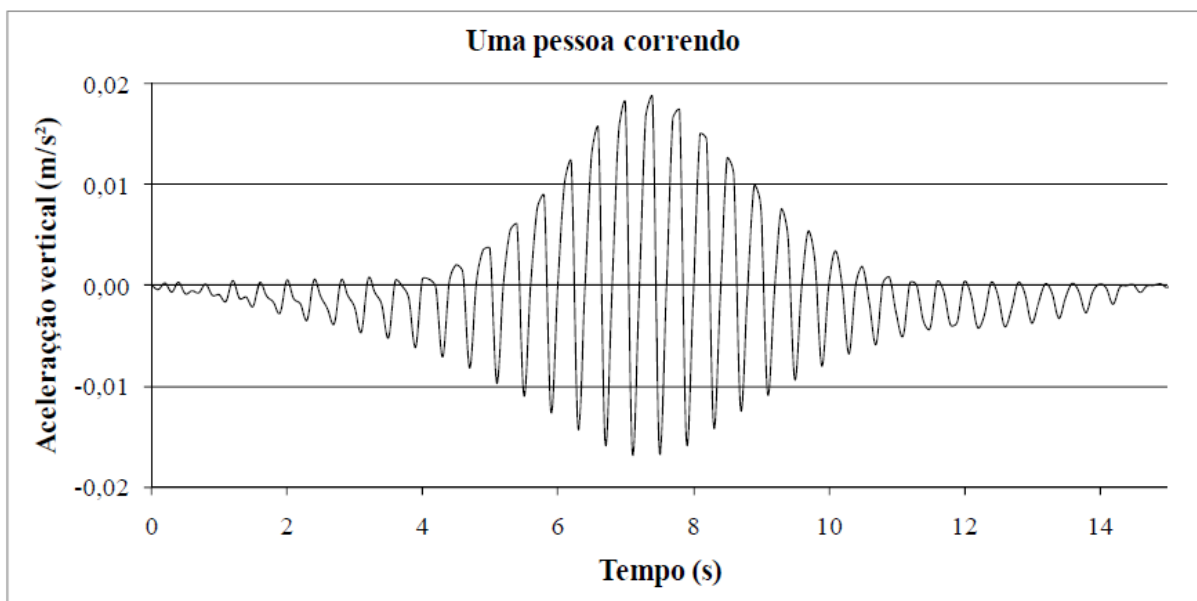


Figura 40 - Aceleração vertical para uma pessoa correndo (Barros, 2009)

Já o próximo caso analisado de corrida foi com três pessoas defasadas de 0,8 s. Observou-se que levou 16 s para que elas concluíssem essa travessia e com 37 passos cada uma. As acelerações verticais se encontram na Figura 41.

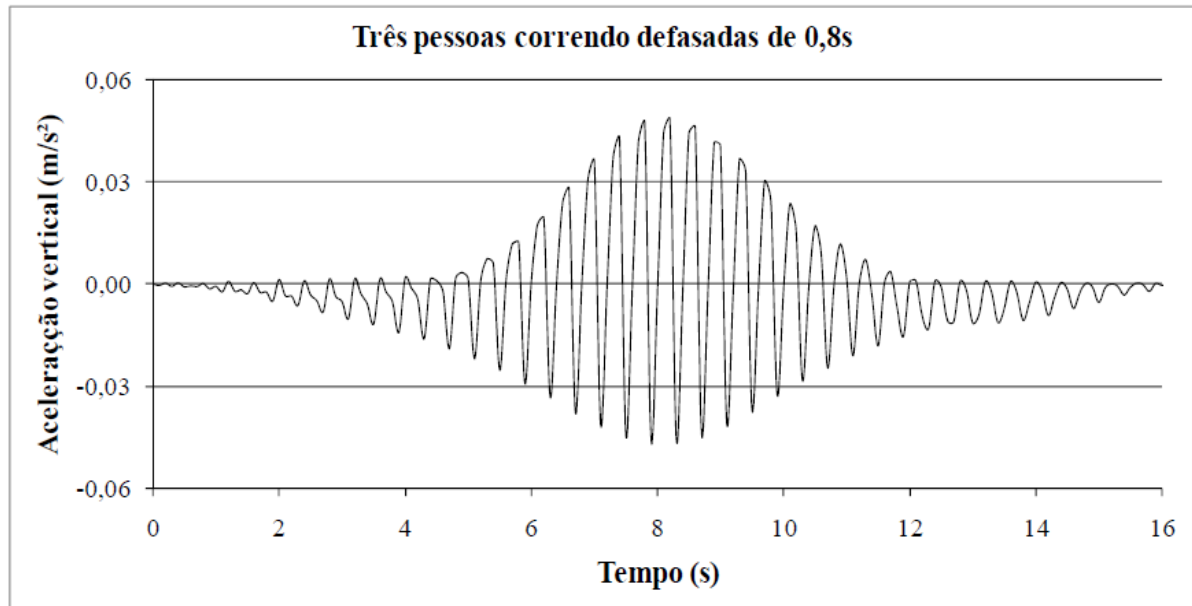


Figura 41 - Aceleração vertical para três pessoas correndo defasadas de 0,8s (Barros, 2009)

O pulo de uma única pessoa no centro do vão (local escolhido por ser o mais crítico) provoca uma aceleração variável que atinge o valor máximo próximo dos 15 s. As acelerações verticais estão apresentadas na Figura 42.

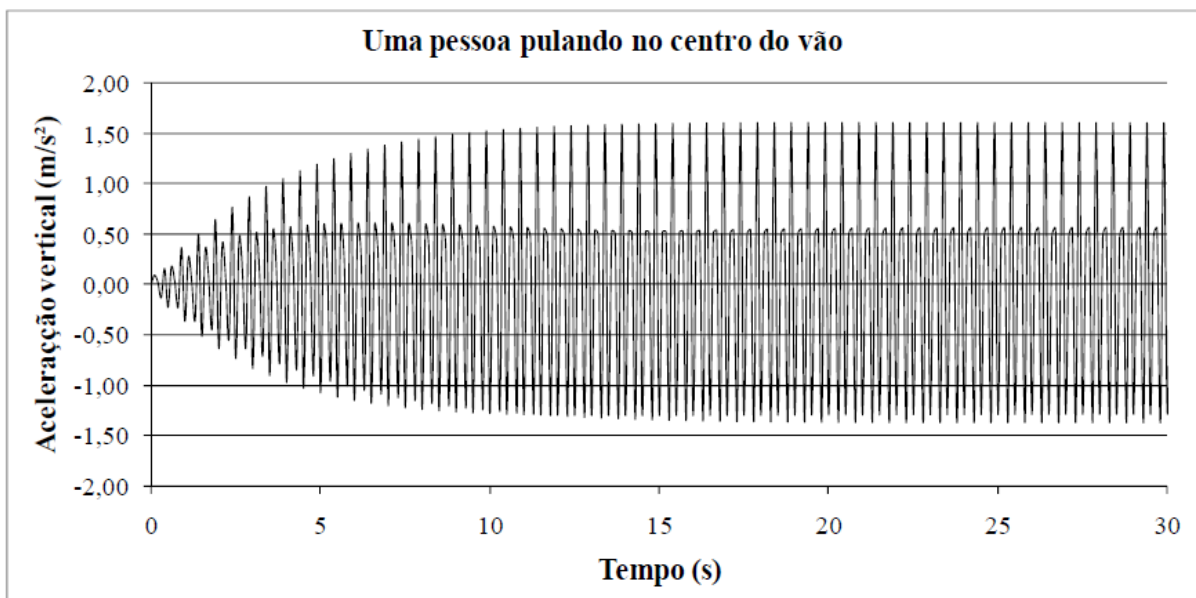


Figura 42 – Aceleração vertical de uma pessoa pulando no centro do vão (Barros, 2009)

O último caso analisado é o de três pedestres pulando no meio do vão, simulando uma situação de vandalismo. Por volta dos 12 s, atinge-se o valor máximo de aceleração, conforme pode ser observado na figura a seguir.

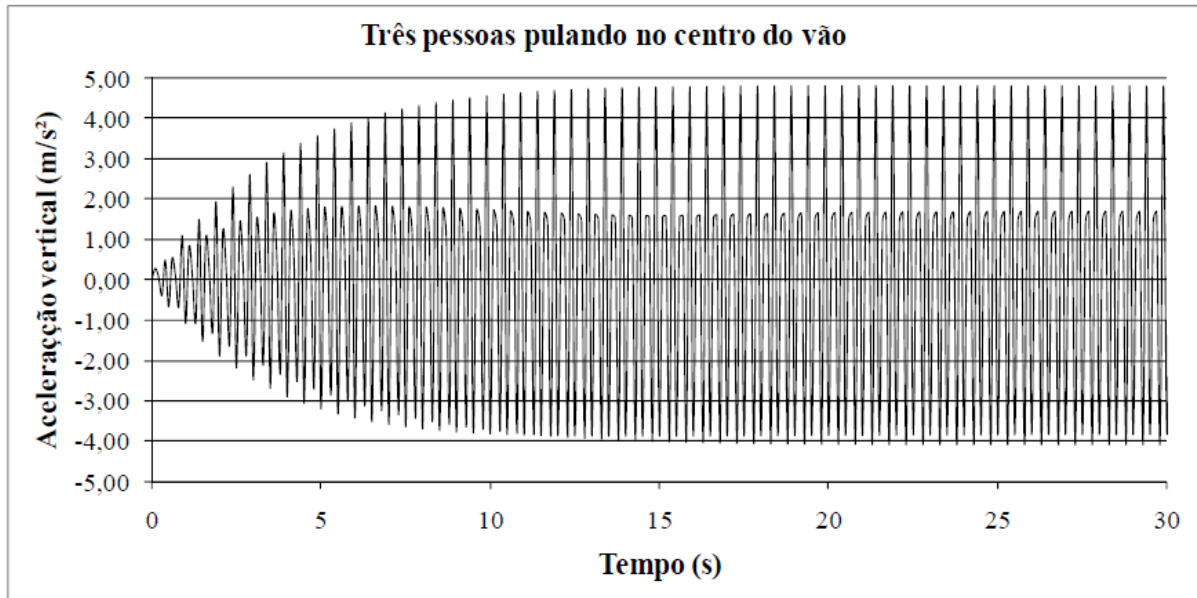


Figura 43 – Aceleração vertical de três pessoas pulando no centro do vão (Barros, 2009)

Na Tabela 15, estão apresentados a aceleração, velocidade e deslocamento encontrados após a análise de cada movimento.

Tabela 15 - Valores máximos de aceleração, velocidade e deslocamento em cada caso estudado

Valores máximos	$ a_z $ (m/s ²)	$ v_z $ (cm/s)	$ d_z $ (mm)
Uma pessoa caminhando	0,089	0,328	0,180
Três pessoas caminhando defasadas de 1,0s	0,265	0,974	0,539
Uma pessoa correndo	0,018	0,100	0,095
Três pessoas correndo defasadas de 0,8s	0,048	0,284	0,264
Uma pessoa pulando no centro do vão	1,608	6,430	2,580
Três pessoas pulando no centro do vão	4,796	19,177	7,700

Fonte: Barros, 2009

Após analisar a tabela anterior, é possível observar que a ação de correr foi a menos impactante dentre todas as estudadas, mesmo possuindo amplificação de carga maior que a

caminhada. Isso pode ser explicado devido a que a frequência da caminhada e suas harmônicas são praticamente coincidentes com as dos modos verticais, entrando na faixa de ressonância da estrutura e amplificando os efeitos. Enquanto a ação de correr caracteriza-se por uma frequência que está distante das correspondentes aos modos verticais da estrutura.

Também é possível ver que a ação de pular é a mais danosa devido a possuir um alto coeficiente de impacto do carregamento, ter sido aplicada no ponto mais crítico do vão de forma contínua e por sua frequência ser coincidente com a frequência natural da estrutura.

6.2.4. Comparação com os limites normativos e discussões sobre o modelo 1

Iniciando a análise pelas normativas brasileiras, a NBR 7188:2013 não será utilizada por tratar apenas de critérios de dimensionamento de projeto. Além disso, como a passarela em estudo apresenta piso em concreto, será utilizada a NBR 6118:2014 ao invés da NBR 8800:2008.

Observando os resultados obtidos é possível notar que há grandes chances da passarela apresentar vibrações excessivas. Isso porque as frequências naturais da estrutura deveriam ser maiores que 4,5 Hz, porém o primeiro modo de flexão vertical (5º modo de vibração) apresenta valor menor que esse.

Em relação aos códigos internacionais, o primeiro a ser analisado é a norma britânica BS 5400:1978. Uma vez que o primeiro modo de vibração vertical apresenta uma frequência menor que 5 Hz, é necessário calcular a aceleração máxima permitida em todos os pontos da estrutura. Utilizando a Eq. 5.3, é possível encontrar essa aceleração como sendo igual a 1 m/s². Ao comparar esse resultado com as acelerações dos movimentos simulados Tabela 15, nota-se que as acelerações pertencentes aos movimentos de pular não atendem ao limite da aceleração máxima.

Considerando agora as orientações dadas pela CEB 1991, é possível obter a frequência fundamental baseado no tamanho do vão livre da estrutura como sendo 2,01 Hz para a estrutura conforme Eq. 5.5. É possível observar que o valor está bem distante do encontrado pela modelagem no SAP 2000. A justificativa para tal fato é que as expressões sugeridas pela CEB são baseadas em resultados experimentais e sem considerar outros fatores relacionados à geometria da passarela que influenciam na sua frequência fundamental.

Nesse caso, as expressões para as ações de correr e caminhar utilizadas no modelo de Barros (2009) são exatamente as sugeridas pela norma, baseadas nas expressões formuladas por Bachmann e Ammann (1987).

Além disso, a CEB 1991 traz como limite de aceleração $0,5 \text{ m/s}^2$. No caso da passarela estudada, observa-se que o efeito causado por três pessoas caminhando, uma pulando e três pulando produzem acelerações muito maiores que a permitida.

A norma canadense (ONT 1991) avalia a estrutura da mesma forma que a norma britânica. É interessante observar o ábaco apresentado na Figura 23 onde é possível ver que a frequência fundamental de $3,99 \text{ Hz}$ teria como aceleração limite $0,7 \text{ m/s}^2$. Portanto, nota-se que esses limites são ultrapassados com os movimentos da ação de pular.

O Eurocode 5 trata de estruturas de madeira em vigas simplesmente apoiadas ou em sistemas de treliça, não podendo ser aplicada na presente situação.

Já o Eurocode 1 é mais focado em metodologias para dimensionamento de estruturas. Porém, cita valores de referência que devem preocupar o projetista ($3,0 \text{ Hz}$ para a direção vertical e $1,4 \text{ Hz}$ para a horizontal), conforme já mencionado. Comparando esses valores com os da Tabela 13 é possível notar que apenas o primeiro modo de vibração da estrutura não atende ao valor limite.

A normativa francesa trata de critérios de dimensionamento de passarelas. Entretanto é possível analisar alguns aspectos interessantes do modelo de Barros (2009) sob o ponto de vista dessa norma. Inicialmente é interessante estabelecer que a classe II seria a mais próxima da realidade da passarela estudada, devido ao tipo de tráfego ao qual ela estaria sujeita.

Considerando a Tabela 7 e os resultados obtidos na Tabela 15, nota-se que todos os movimentos exceto pular induzem acelerações tais que levariam a considerar a passarela com classificação de conforto máxima. Entretanto com as acelerações obtidas nas duas últimas situações da Tabela 15 é possível ver que a passarela necessitaria ser redimensionada. Essa análise não pode ser estendida aos critérios da Tabela 8 devido à falta de valores das acelerações horizontais dos movimentos estudados.

Conhecendo as frequências naturais da estrutura, é possível concluir com auxílio da Tabela 9 e Tabela 10 que o risco de ressonância é mínimo na direção vertical e médio na direção horizontal.

A ISO 10137:2007 foca mais em apresentar critérios de dimensionamento, portanto não será analisada neste trabalho.

Por último, a AASHTO:2009 estabelece que passarelas com frequências verticais e horizontais maiores que 3,0 Hz e 1,3 Hz, respectivamente, estão dispensadas das verificações de acelerações. Nota-se que o primeiro modo de vibração não atende a esse critério. Portanto, faz-se necessária a verificação através das Eqs. 5.28, 5.29 e 5.30. Inicialmente, calcula-se o peso próprio (W) pela Eq. 5.29 onde obteve-se o valor de 515,1 kN. Em seguida, utilizou-se a Eq. 5.30 para encontrar a $f_{o,h}$ igual 12,07 Hz. Ao final, utilizando o valor encontrado para o peso próprio, é possível encontrar o valor de 1,26 Hz para o lado direito da Eq. (5.28). Comparando esse valor com o obtido anteriormente, é possível observar que a estrutura atende ao critério da norma americana.

Reúne-se na Tabela 16 os resultados encontrados em cada uma das normativas estudadas.

Tabela 16 - Resumo das análises realizadas para a passarela 1

Norma	Atende critérios?	Comentários
NBR 7188	Não se aplica	Trata de critérios de dimensionamento.
NBR 8800	Não se aplica	Essa normativa trata de estruturas em aço, não sendo o caso da presente estrutura.
NBR 6118	Não	5° modo de vibração não atende ao valor recomendado pela normativa.
BS 5400	Não	Acelerações resultantes do movimento de pular não atendem aos limites.
CEB 1991	Não	Acelerações resultantes do movimento de pular e de três pessoas caminhando não atendem aos limites.
ONT 1991	Não	Acelerações resultantes do movimento de pular não atendem aos limites.
EUROCODE 5	Não se aplica	
EUROCODE 1	Não	1° modo de vibração não atende ao valor recomendado pela normativa.
AFGC 2006	Não	Acelerações resultantes do movimento de pular indicam que a estrutura deveria ser redimensionada.
ISO 10137	Não se aplica	
AASHTO	Sim	

Conclui-se que a passarela de pedestres apresenta modos de vibração que não atendem as recomendações da NBR 6118 e do Eurocode 1. Já no caso dos códigos BS 5400, ONT 1991 e o AFGC 2006, a passarela não atenderia aos limites estabelecidos para os movimentos ocasionados por vandalismo. Em especial para a normativa francesa, as acelerações analisadas conduziram a estrutura ao redimensionamento.

6.3. MODELO ESTRUTURAL 2 – PASSARELA PADRÃO

6.3.1. Descrição do modelo 2

A segunda estrutura a ser estudada é um projeto de passarela padrão constituída em perfis formados a frio e laminados sugerido por Queiroz (2014) para ser adotado de forma a unificar e simplificar o processo fabril, facilitando a montagem, o transporte e o baixo consumo de aço. Destina-se a fazer a travessia de vias com pistas duplas. Essas razões motivaram o estudo desse tipo de estrutura, apresentada na Figura 44.

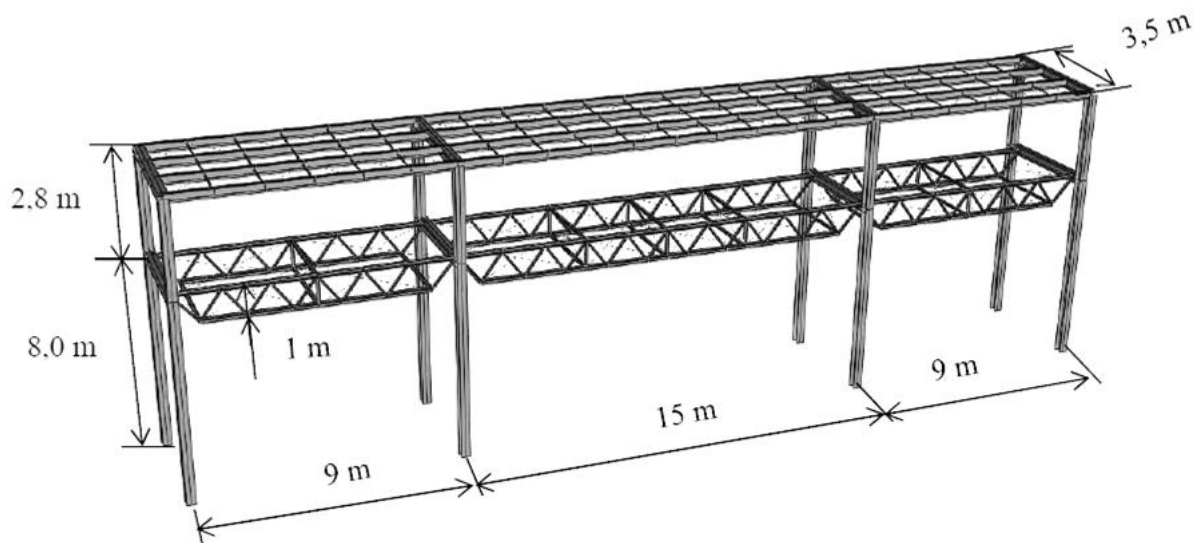


Figura 44 - Dimensões da passarela padrão (Queiroz, 2014)

O projeto é composto por um vão central de 15 m, pensado para a travessia de duas pistas. A altura livre da passarela com relação ao nível acabado da pista é de 7 m. O pé direito interno é 2,8 m. Apresenta cobertura composta por telhas trapezoidais com 0,5 mm de espessura e guarda-corpos tubulares de 1" de diâmetro e 1,2 m de altura. Essas passarelas também contam com fechamentos laterais compostos por chapas enrijecidas em todo o seu comprimento para evitar o acúmulo de água ou detritos nas treliças longitudinais.

O módulo de acesso não fez parte da análise do autor e pode ser visto na Figura 45.

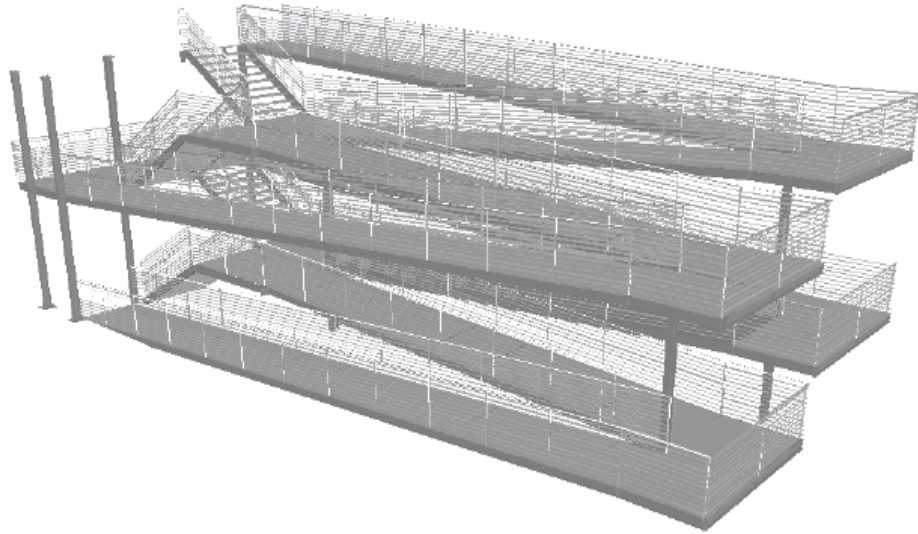


Figura 45 – Módulo de acesso (Queiroz, 2014)

Nas longarinas, foram usadas treliças padronizadas, onde todo o processo de fabricação é automatizado, exceto a ligação entre os banzos e diagonais que é manual e pode ser feito facilmente no próprio local. A treliça é totalmente composta por perfis formados a frio com desenvolvimento linear e evitando sobras, assim aproveitando da melhor forma o consumo da sua chapa de origem. A Figura 46 apresenta um dos trechos da treliça e a Figura 47 mostra um dos vãos da treliça.



Figura 46 - Trecho da treliça utilizada (Queiroz, 2014)



Figura 47 - Um vão da treliça (Queiroz, 2014)

Os pórticos transversais da passarela são compostos por perfis laminados ou soldados, sendo escolhidos em cada caso os que forem mais econômicos no custo global entre matéria-prima e fabricação. Foram incluídos neles inclinações de queda de água para a drenagem adequada na parte do telhado. Os travamentos dos banzos superiores e inferiores são feitos com barras redondas, capazes de resistir apenas as solicitações de tração. A ligação entre esses elementos e os banzos é feita com chapas conformadas por prensagem, de forma a facilitar o processo de fabricação das ligações. O detalhe desse travamento pode ser visto na Figura 48.

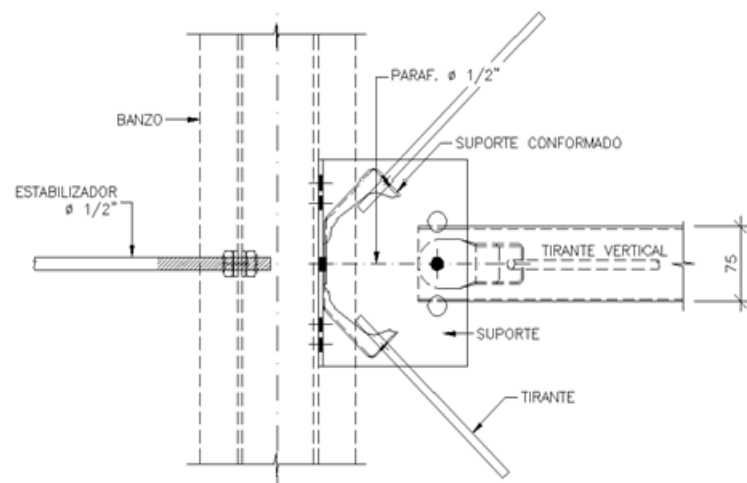


Figura 48 - Detalhe de ligação do travamento horizontal (Queiroz, 2014)

O piso da passarela é feito com tabuleiro chapas xadrez enrijecidas com perfis formados a frio, criando um painel modulado e sendo de fácil transporte e montagem. Esses perfis são dispostos perpendicularmente à passarela a cada 1,5 m, permitindo que as ações provenientes das chapas sejam diretamente transmitidas para os nós da treliça da longarina.

Os perfis secundários adicionais são usados entre os transversais para reduzir o painel de flexão da chapa xadrez, tornando possível o uso de menores espessuras desses elementos. A Figura 49 apresenta o formato do tabuleiro em chapa xadrez.



Figura 49 - Piso em chapa xadrez (Queiroz, 2014)

Foram utilizadas terças de alma e mesa enrijecidas, conforme mostrado na Figura 50. As dobras presentes na alma ajudam na redução dos parâmetros de flambagem e na resistência as solicitações de flexão e compressão.

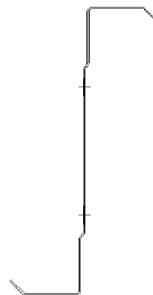
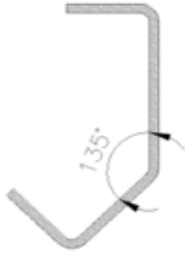




Figura 50 – Terça Z de alma e mesa enrijecidas (Queiroz, 2014)

A Tabela 17 apresenta um resumo dos elementos utilizados no projeto da passarela.

Tabela 17 - Características das seções utilizadas no projeto

Elemento estrutural	Seção	Características
Banzo		Utilizados nas espessuras de 4,75 e 6,35 mm
Diagonais		Utilizados nas seções de 3,0 mm e 3,75 mm
Pilares e vigas		Perfis I laminados e soldados

Fonte: Queiroz, 2014

6.3.2. Análise do modelo 2

A análise numérica foi feita por Queiroz com o *software* comercial STRAP, baseado no método dos elementos finitos. Utilizou-se elementos finitos unidimensionais com seis graus de liberdade por nó.

As chapas e suportes de piso foram considerados apenas em relação aos seus pesos, visto que não são adequadamente fixos à passarela, portanto, matematicamente, contribuem de forma desprezível para a rigidez da estrutura.

Em relação às vinculações, foram adotadas que as das diagonais girem livremente sem gerar momentos nas suas extremidades. O mesmo conceito foi adotado nos encontros entre treliça e a viga do pórtico. Já em relação às condições de apoio na base dos pilares são restringidas as rotações e translações em torno dos três eixos cartesianos, para estabilizar toda a estrutura contra solicitações horizontais do vento.

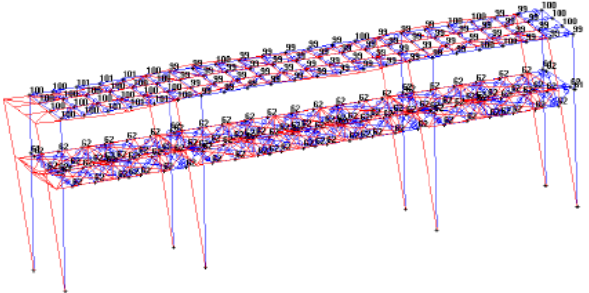
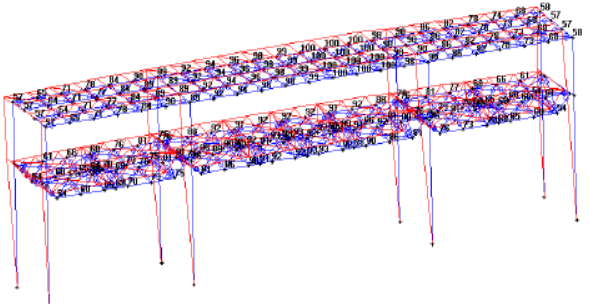
Devido à tentativa de padronizar as passarelas, essas foram dimensionadas para as situações de tráfego intenso e consideradas submetidas à maior velocidade básica de vento entre as capitais nacionais (45 m/s em Porto Alegre). O autor explica que a adoção desses critérios, apesar de ser bastante conservadora, tem como objetivo fazer com que a estrutura possa ser implantada em qualquer lugar do país e em qualquer condição.

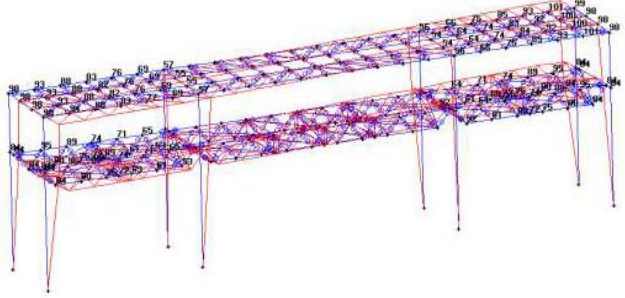
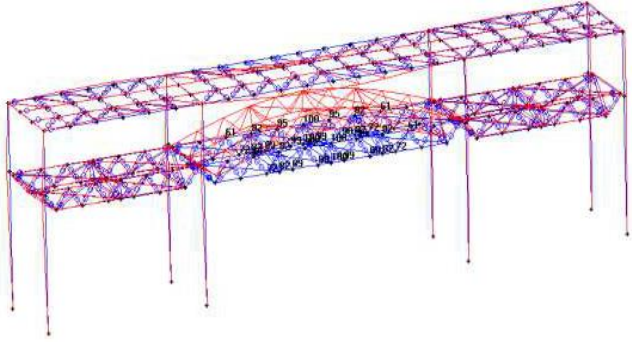
As ações permanentes foram traduzidas como massas e agregadas à estrutura, enquanto que as ações variáveis foram consideradas como massas participativas. Segundo Queiroz (2014), essa recomendação foi adotada em obediência às recomendações do código francês, já que a massa modal associada aos pedestres é superior a 5% da massa modal do tabuleiro. Além disso, o autor optou por utilizar um fator de amortecimento de 0,4% conforme recomendações também do código francês.

6.3.3. Análise dos resultados do modelo 2

De modo semelhante à estrutura 1, a análise inicial é a de vibração livre ou análise modal. O autor decidiu apresentar apenas os modos que apresentavam risco de coincidir com os harmônicos da excitação. Esses modos estão representados na Tabela 18.

Tabela 18 - Modos de vibração da estrutura 2

Modo	Frequência (Hz)	Classificação	Vistas do modo de vibração
1	1,44	Flexão Longitudinal	
2	1,94	Flexão Lateral	

3	2,56	Flexão Lateral	
8	5,32	Flexão Vertical	

Fonte: Queiroz, 2014

É possível observar que a estrutura apresenta baixa rigidez na direção horizontal, tanto lateralmente quanto longitudinalmente. Já o 8º modo de vibração, que apresenta flexão vertical, é importante ser analisado por ter ligação com as cargas relacionadas ao sentido da força da gravidade, sendo as principais atuantes nessa estrutura aquelas geradas pela ação humana. É possível notar que a frequência desse modo apresenta um valor maior que 5 Hz, considerado satisfatório para esse tipo de estrutura por diversas normas.

Análogo ao que foi feito na passarela 1, é realizada uma análise dinâmica transiente ou de vibração forçada. Essa avaliação tem como objetivo simular as ações atuante durante o tráfego de pedestres para verificar se as estruturas têm um comportamento dinâmico adequado.

O autor utiliza os critérios de dimensionamento provenientes da SÉTRA (2006). Conforme já explicitado, o tráfego da passarela padrão será considerado como intenso, portanto, pertence a classe I segundo a normativa francesa.

O manual SÉTRA (2006) especifica o uso das funções de carga e dos coeficientes ψ conforme já explicitado no item 5.10.1 do presente trabalho. A partir da frequência de cada modo, é possível encontrar o risco de ressonância de cada modo de vibração baseado em sua

direção, além do nível de classificação (Tabela 9 e Tabela 10). Esses dados estão reunidos na Tabela 19.

Tabela 19 - Classificação dos modos quanto ao risco de ressonância

Modo	Descrição	T (s)	Frequência (Hz)	Risco	Nível de classificação
1	Longitudinal	0,69	1,44	Médio	2
2	Transversal	0,52	1,94	Mínimo	3
3	Transversal	0,39	2,56	Irrelevante	4
8	Vertical	0,19	5,32	Irrelevante	4

Fonte: adaptado de Queiroz, 2014

Baseado nos níveis de classificação e no risco encontram-se as situações estudadas, conforme detalhado na Tabela 11. Portanto, para o 1º modo é necessária uma análise da situação 2 (tráfego muito denso) e para o 2º modo uma análise da situação 3 (consideração dos efeitos do segundo harmônico). A observação dos modos 3º e 8º indica que não é necessária uma análise adicional uma vez que as frequências estão acima dos limites estabelecidos pela SÉTRA (2006).

No caso do 1º modo, foram utilizadas as Eqs. 5.19 e 5.21 para obter, respectivamente, o número de pedestres equivalentes e a força dinâmica horizontal longitudinal. Analogamente, foram utilizadas as Eqs. 5.19 e 5.25 para encontrar, respectivamente, o número de pedestres equivalentes e a força dinâmica horizontal transversal. O número de pedestres foi considerado como sendo 117 devido à aproximação feita pelo autor considerando a densidade (d) como sendo de 1 pessoa por metro quadrado. Os valores obtidos estão reunidos na Tabela 20.

Tabela 20 - Força dinâmica resultante

Modo	d	N	Neq	ψ
1	1	116	20	0,62
2	1	116	20	1,0

Fonte: adaptado de Queiroz, 2014

A seguir, são inseridos os parâmetros das forças e obtida a distribuição da ação dinâmica sobre a passarela.

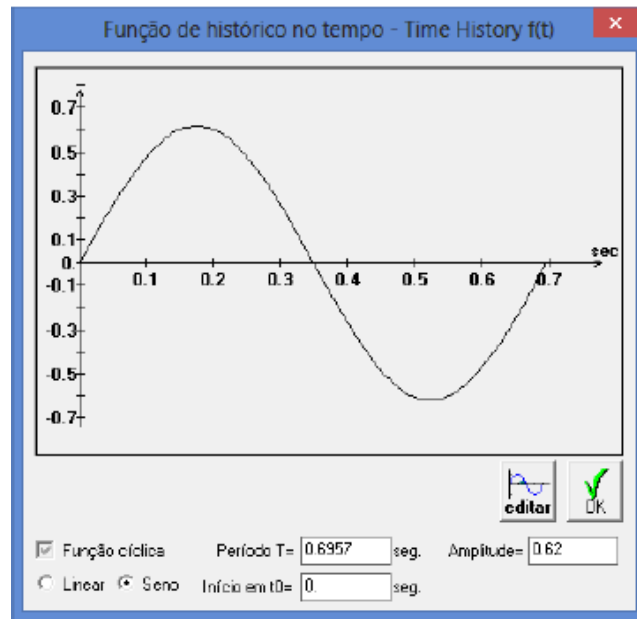


Figura 51 - Ação dinâmica longitudinal sobre a passarela 2 (Queiroz, 2014)

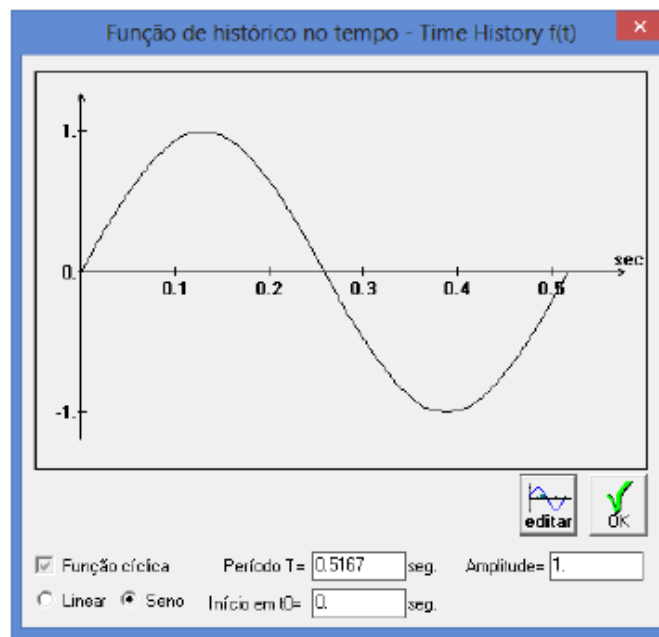


Figura 52 - Ação dinâmica transversal sobre a passarela 2 (Queiroz, 2014)

Após esse lançamento das ações, é realizado o estudo referente às acelerações em pontos ao longo do tabuleiro. Os pontos de análise escolhidos pelo autor foram aqueles que possuíam os maiores componentes modais ao longo do tabuleiro da passarela. O intervalo da análise ficou entre 40 e 45 segundos devido a ser o intervalo sem influência da parcela transiente da resposta. O tempo de exposição do usuário à vibração, segundo o Queiroz, é de

40 s se ele andar a uma velocidade de 1,2 m/s. Dessa forma, foram obtidas as acelerações apresentadas abaixo.



Figura 53 - Aceleração longitudinal sobre a passarela 2 (Queiroz, 2014)

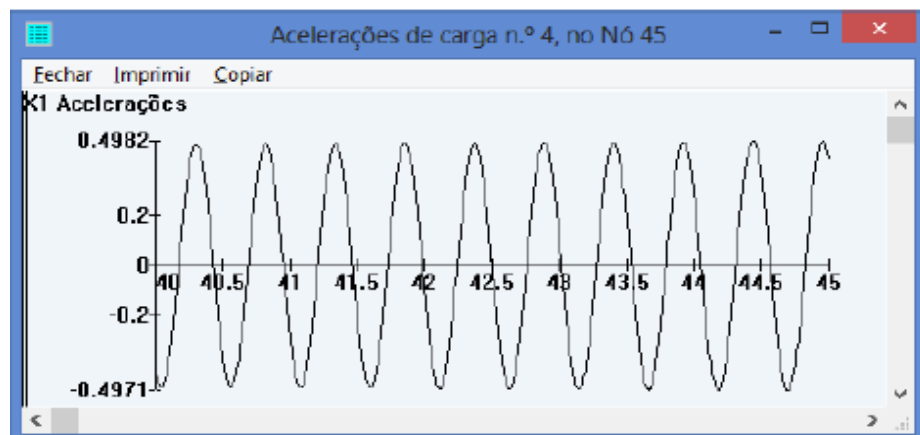


Figura 54 - Aceleração transversal sobre a passarela 2 (Queiroz, 2014)

Observando as acelerações obtidas sob o ponto de vista das recomendações da SÉTRA (2006), é possível ver que as acelerações encontradas apresentam valores superiores aos recomendados. Os resultados encontrados por Queiroz (2014) estão reunidos na Tabela 21.

Tabela 21 - Classificação do conforto para a passarela 2

Modo	Descrição	Aceleração (m/s ²)	Conforto
1	Longitudinal	4,14	Inaceitável
2	Transversal	0,50	Mínimo
3	Transversal	-	Mínimo
8	Vertical	-	Máximo

6.3.4. Resultados e discussões do modelo 2

De forma análoga à primeira estrutura, a passarela 2 não é analisada do ponto de vista na NBR 7188 devido a essa tratar de critérios de dimensionamento de projeto. Dessa vez, é utilizada a 8800 para análise do piso já que a passarela é em aço. Comparando a primeira frequência vertical (correspondente ao 8º modo e igual a 5,32 Hz) com a sugestão da norma, é possível observar que a frequência é atendida considerando apenas movimentos de caminhada regulares.

Sob o ponto de vista da norma britânica, devido a frequência na direção vertical ter dado maior que 5 Hz mostra que a estrutura não apresenta risco de vibrações excessivas.

Considerando agora as orientações dadas pela CEB 1991, é possível obter a frequência fundamental em função do tamanho do vão livre da estrutura como sendo igual a 2,73 Hz, conforme Eq. (5.6). O distanciamento do valor encontrado pela formulação da CEB e o valor encontrado na simulação numérica também pode ser explicado por conta das diferenças entre as passarelas estudadas para a obtenção da equação e a passarela estudada.

Do ponto de vista da norma canadense, é possível comparar as frequências encontradas em relação aos limites recomendados na Figura 23. Devido à frequência na direção vertical ter dado 5,32 Hz, o limite da aceleração nessa direção estaria entre 0,8 e 0,9 m/s^2 . Já na direção longitudinal, o limite da aceleração seria de 0,3 enquanto que na direção transversal daria por volta de 0,4 m/s^2 . Esses dois últimos limites não são atendidos conforme indicado na Tabela 21.

Da mesma forma que para a primeira passarela, o Eurocode 5 não será estudado por tratar de estruturas de madeira em vigas simplesmente apoiadas ou em sistemas de treliça.

Já o Eurocode 1 sugere valores mínimos de frequência da estrutura em cada direção (vertical - 3 Hz; horizontal -1,4 Hz). Nota-se que os valores foram atendidos pela passarela em estudo.

A análise em relação à normativa francesa (Tabela 21) já realizada na etapa anterior mostra o não atendimento da estrutura quanto à aceleração longitudinal. Portanto, necessitaria de redimensionamento da estrutura para atendimento desse critério.

Da mesma forma que para a primeira passarela, a ISO 10137:2007 não se aplica, visto que tem como objetivo apresentar critérios de dimensionamento.

Por último, a AASHTO:2009 estabelece que passarelas com frequência natural vertical e horizontal maiores que 3,0 Hz e 1,3 Hz, respectivamente, estão dispensadas das verificações de acelerações. Nota-se que a passarela estudada atende a esses critérios, portanto faz-se dispensável essa análise.

A seguir, apresentam-se os resultados encontrados em cada uma das normativas estudadas.

Tabela 22 - Resumo das análises realizadas para a passarela 2

Norma	Atende critérios?	Comentários
NBR 7188	Não se aplica	Trata de critérios de dimensionamento.
NBR 8800	Sim	
NBR 6118	Não se aplica	Essa normativa trata de estruturas em concreto, não sendo o caso da presente estrutura.
BS 5400	Sim	
CEB 1991	Não se aplica	
ONT 1991	Não	Acelerações resultantes da direção longitudinal e transversal não atendem aos limites.
EUROCODE 5	Não se aplica	
EUROCODE 1	Sim	
AFGC 2006	Não	Acelerações resultantes da direção longitudinal indicam que a estrutura deveria ser redimensionada.
ISO 10137	Não se aplica	
AASHTO	Sim	

Destaca-se que a análise está bastante simplificada, visto que outros movimentos e cenários deveriam ter sido avaliados também, tais como correr e pular com uma ou mais pessoas. Portanto, a conformidade da estrutura necessitaria de mais avaliações.

7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Após todos os estudos feitos na realização desse trabalho, foi possível notar a diversidade de passarelas presentes no mundo. Essa variedade está relacionada principalmente com a diversidade de materiais (aço, concreto, mistas, madeira), a arquitetura e os diversos sistemas estruturais utilizados (treliças, arcos, vigas, pênseis e estaiadas).

Toda essa diversidade complica a análise, visto que cada estrutura apresenta características diferentes. Além disso, os carregamentos gerados pela ação dos pedestres são difíceis de serem representados. Alguns modelos matemáticos foram propostos na tentativa de representar esses carregamentos.

Também, foi possível observar que as normativas brasileiras tratam o tema de forma superficial, trazendo alguns valores de referência para frequências e deslocamentos, porém sem abordar metodologias de análises dinâmicas nas passarelas.

Já os códigos internacionais apresentam análises mais aprofundadas, apesar de a maioria deles ter mais de uma década de existência. O código francês, um dos mais recentes dentre os estudados, apresenta um progresso muito grande por trazer recomendações para a etapa de projeto.

Em relação às estruturas estudadas, a passarela 1 apresentou frequências abaixo das recomendadas na maioria das normativas. Portanto, necessitaria de redimensionamento, como por exemplo, aumento da rigidez ou do peso próprio da estrutura. Caso fosse uma estrutura já construída, necessitaria de soluções para melhorar o comportamento dinâmico, como por exemplo inserção de amortecedores. Trata-se de uma solução difícil e com custo considerável.

A segunda passarela apresentou resultados melhores que a primeira, porém continuou sendo reprovada nos códigos canadenses, europeu e francês. Vale ressaltar que essa estrutura necessitaria de uma análise a partir de carregamentos oriundos de outros movimentos além dos estudados de forma a identificar se haveria problemas nessas situações.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATIONS OFFICIALS (2009). LRFD Guide Specification for the Design of Pedestrian Bridges.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2008). NBR 8800: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2013). NBR 7188: Carga móvel rodoviária e de pedestres em pontes, viadutos, passarelas e outras estruturas.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2014). NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto.

BACHMANN, H.; AMMANN, W. (1987). Vibrations in structures induced by man and machines, 3ª Edição, IABSE, AIPC e IVBH, Zurich, Switzerland.

BARROS, T.P. (2009) Análise Dinâmica em Passarela Sujeita à Movimentação Humana. Trabalho de diplomação (Graduação em Engenharia Civil). Departamento de Engenharia Civil, Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 60 f.

BLEKHERMAN, N.A. (2005). Swaying of Pedestrian Bridges. In: Journal of Bridge Engineering, 10:142-150.

BRITISH STANDARDS ASSOCIATION (2006). BS 5400: Steel, concrete and composite bridges – Part 2: Specification for loads.

BROWNJOHN J., PAVIC A., OMENZETTER P. (2004). A spectral density approach for modelling continuous vertical forces on pedestrian structures due to walking, Canadian Journal of Civil Engineering 31, pp. 65-77.

CEB (1991). Vibration problems in structures – Practical Guidelines, Bullitin nº 209.

CLOUGH, Ray W.; PENZIEN, Joseph. (2003) Dynamics of structures. 3. ed. Califórnia.

DALLARD, P.; FITZPATRICK, A. I.; FLINT, A.; LE BOURVA, S.; LOW, A.; SMITH, R. M. R.; WILLFORD, M. (2001) The London Millennium Footbridge. The Structural Engineer, Vol. 79/Nº22.

EUROCODE 1 (2003). Actions on Structures – Part 2: Traffic Loads on Bridges.

EUROCODE 5 (2004). Design of Timber Structures – Part 1-2: Bridges.

FIALHO, A.P.F. (2004). Passarelas Urbanas em estrutura de aço, Departamento de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, MG, 118p.

GOMES, D.H.M. (2006). Controle da Resposta Dinâmica de uma Passarela de Pedestres da Cidade de Brasília com a Utilização de Amortecedores de Massa Sintonizados, Publicação: E.DM-008A/06, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, xxi, 174p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (2007). ISO 10137: Bases for Design of Structures – Serviceability of buildings and walkways against vibrations.

MENDOZA, M. A.; GOMEZ, R.; ARROYO, G. M.; ESCOBAR, J. A.; FLORES R. (2017). Evaluation of the experimental and analytical dynamic response of pedestrian bridges. In: Footbridge 2017 Berlin - Tell A Story: Conference Proceedings 6-8.9.2017 TU-Berlin.

MEYER, K. F. (1996) Estruturas Metálicas: Passarelas e Pontes para dutos. KM Engenharia, Belo Horizonte.

NIMMEN, K.V.; LOMBAERT, G.; DE ROECK, G; BROECK, V. D. (2017). The impact of vertical human-structure interaction on the response of footbridges to pedestrian excitation. In: Journal of Sound and Vibration, 402, 104-121.

ONT (1991). Ontario Highway Bridge Design Code.

QUEIROZ, M. M. (2014). Técnicas de análise dinâmica de passarelas. Dissertação de Mestrado em Projeto de Estruturas. Programa de Projeto de Estruturas, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

PEREIRA., S.P. (2017). Desempenho Dinâmico de Sistemas Estruturais de Passarelas. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Publicação MTARH.DM-17A/17, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 130p.

PIMENTA, H.J.L. (2008). Modelação de Ações Dinâmicas e Efeitos de Sincronização em Pontes Pedonais. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra, PT, 162p.

SAP2000. Integrated Software for Structural Analysis & Design, V12. Computers and Structures, Inc., California, U.S.A, 2007.

SETAREH, M. (2017). Study of the group effects on the vibration serviceability of slender footbridges. In: Footbridge 2017 Berlin - Tell A Story: Conference Proceedings 6-8.9.2017 TU-Berlin.

SÉTRA/AFCG (2006). Footbridges – Assesment of vibrational behavior of footbridges under pedestrian loading – Practical Guidelines, France.

STRAP, ATIR, Engineering Software Development LTD, Israel, 2014.

ZIVANOVIC, S.; PAVIC, A.; REYNOLDS, P. (2005). Vibration serviceability of footbridge under human-induced excitation: A literature review. In: Journal of Sound and Vibration, Vol. 279, No. 1-2, pp. 1-74.

ZOLTOWSKI, K. (2008). Pedestrian on footbridges, vertical loads and response. In: Footbridge 2008. Porto, Portugal.