



**Universidade de Brasília
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental**

**Desempenho dinâmico do projeto-tipo de
passarela proposto pelo Departamento
Nacional de Infraestrutura de Transporte
(DNIT)**

André Colares Policarpo

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

Brasília
2024

**Universidade de Brasília
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental**

**Desempenho dinâmico do projeto-tipo de
passarela proposto pelo Departamento
Nacional de Infraestrutura de Transporte
(DNIT)**

André Colares Policarpo

Dissertação 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 Mestre em Estruturas e Construção Civil

Orientadora: Prof. Dr. Graciela Nora Doz

Brasília
2024

P766d Policarpo, André Colares.
Desempenho dinâmico do projeto-tipo de passarela proposto pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (DNIT) / André Colares Policarpo; orientadora Graciela Nora Doz. -- Brasília, 2024.
91 p.

Dissertação de Mestrado (Departamento de Engenharia Civil e Ambiental) -- Universidade de Brasília, 2024.

1. Passarela de Pedestres. 2. Vibrações. 3. Desempenho Dinâmico. 4. Análise Numérica. I. Doz, Graciela Nora, orient. II. Título

**Universidade de Brasília
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental**

**Desempenho dinâmico do projeto-tipo de passarela
proposto pelo Departamento Nacional de
Infraestrutura de Transporte (DNIT)**

André Colares Policarpo

Dissertação 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 Mestre em Estruturas e Construção Civil

Trabalho aprovado. Brasília, 27 de fevereiro de 2024:

Prof. Dr. Graciela Nora Doz,
UnB/FT/ENC
Orientador

Prof. Dr. José Luis Vital de Brito,
UnB/FT/ENC
Examinador interno

Prof. Dr. Murilo Limeira da Costa Neto,
UNEMAT/FACET
Examinador externo

Brasília
2024

*Este trabalho é dedicado à minha família
que tanto me motiva a estar em constante evolução.*

Agradecimentos

Agradeço a Deus, que em sua infinita bondade me deu as ferramentas primordiais para conclusão desse trabalho.

À minha família pelo incentivo, preocupação e paciência durante toda minha jornada acadêmica.

À minha orientadora Graciela Nora Doz, por todos os ensinamentos, pela paciência e por confiar em meu trabalho, sempre se mostrando disponível e disposta à ajudar.

À todos que contribuíram de alguma modo para a construção dessa dissertação, com sugestões, revisões ou reflexões, em especial à Iviane Cunha e Santos, que assumiu um papel importante na realização dessa dissertação, e aos colegas Daniel Gomes, Samara Pereira e Thiago Moreira.

Aos meus amigos do DNIT e da ANTT, os quais sempre me incentivaram e contribuíram para realização desse trabalho.

Aos professores Guilherme Alencar e Marcos Honorato, demais professores, colegas e funcionários do PECC/FT/UNB que sempre contribuíram para meu desenvolvimento acadêmico dentro do programa.

*“A educação é a arma mais poderosa
que você pode usar para mudar o mundo.”
(Nelson Mandela)*

Resumo

Fundamentado na urbanização das regiões próximas às rodovias federais, o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (DNIT) publicou, por meio do Instituto de Pesquisa em Transportes (IPR), o álbum de projeto-tipo de passarelas mistas. A publicação IPR-748, a qual apresenta os referidos projetos, tem como objetivo agilizar a contratação e a construção dessas estruturas, trazendo uma maior segurança e conforto aos usuários das rodovias. No presente trabalho, essas estruturas serão analisadas a partir do ponto de vista dinâmico para estimativa de suas frequências naturais, bem como, das acelerações induzidas pela sua utilização. Visando a obtenção das características dinâmicas dessas passarelas, são elaborados modelos numéricos com o uso do software ANSYS para obtenção dos dados, os quais serão posteriormente confrontados com as metodologias prescritas na NBR 7187:2021 e nos demais normativos internacionais que versam sobre o assunto. O estudo em tela visa qualificar o desempenho dinâmico dessas estruturas, de modo a certificar o atendimento ao Anexo C da referida NBR e a inexistência de problemas de vibração e demais desconfortos ao usuário. Como resultado, foi observado que a passarela proposta apresenta frequência natural no espectro de frequências ressonantes e que problemas relacionados a vibração excessiva podem ocorrer para certas configurações de carregamento da estrutura.

Palavras-chave: Passarela de Pedestres. Vibrações. Desempenho Dinâmico. Análise Numérica.

Abstract

Based on the urbanization of regions close to federal highways, the National Department of Transport Infrastructure (DNIT) published, through the Transport Research Institute (IPR), the typical project album for mixed walkways. The IPR-748 publication, which presents the projects, aims to speed up the contracting and construction of these structures, bringing safety and comfort to highway users. In the present work, these structures are analyzed from a dynamic point of view to estimate their natural frequencies, as well as the accelerations induced by pedestrians. Aiming to obtain the dynamic characteristics of these walkways, numerical models are developed using the ANSYS software to obtain the data, which will later be compared with the methodologies prescribed in NBR 7187:2021 and other international regulations that version on the subject. The study in question aims to qualify the dynamic performance of these structures, to certify compliance with Annex C of the aforementioned NBR and the absence of problems with excessive vibration and other discomfort to the user. As a result, it was observed that the proposed walkway presents a natural frequency in the resonant frequency spectrum and that problems related to excessive vibration may occur for certain load configurations of the structure.

Keywords: Footbridge. Vibrations. Dynamic performance. Numerical Analyse.

Lista de figuras

Figura 2.1	Composição estrutural da Passarela de Toba Park e utilização da estrutura pela multidão	22
Figura 2.2	Composição estrutural da Passarela Pedro e Inês	22
Figura 2.3	Composição estrutural da Passarela Millennium	23
Figura 2.4	Composição estrutural da Passarela sobre a E.P.I.A	24
Figura 2.5	Composição estrutural da Passarela sobre a BR-153	25
Figura 2.6	Composição estrutural da Passarela Prato	25
Figura 2.7	Composição estrutural da Passarela do Rio de Janeiro	26
Figura 2.8	Composição estrutural da Passarela Viaducto (a) e Maldonado (b) . . .	27
Figura 2.9	Composição estrutural da Passarela San Laureano (a) e Villa Luz (b) . .	27
Figura 2.10	Representação da força vertical aplicada pelos movimentos do pedestre.	29
Figura 2.11	Representação da força transversal e longitudinal gerada pelos movimentos de um pedestre.	30
Figura 2.12	Representação do movimento do pedestre.	31
Figura 2.13	Representação de passadas consecutivas do pedestre.	31
Figura 2.14	Representação do modelo biodinâmico com um grau de liberdade. . . .	33
Figura 3.1	Fator de amplificação dinâmica.	36
Figura 3.2	Gráfico do fator Ψ para vibração vertical e longitudinal (esquerda) e transversal (direita).	42
Figura 3.3	Gráfico do fator Ψ para vibração vertical (esquerda) e lateral (direita). .	43
Figura 3.4	Acelerações limites para estado de serviço.	44
Figura 3.5	Coeficiente de forma K_{forma}	45
Figura 3.6	Fator de resposta dinâmica.	46
Figura 3.7	Curva base para aceleração vertical.	48
Figura 4.1	Modelo da tela do Simulador de Pessoas em Movimento	55
Figura 4.2	Esquema de distribuição do carregamento no tempo e espaço.	56
Figura 5.1	Concepção padrão dos projetos-tipo de passarela de pedestre.	57
Figura 5.2	Modelo de acesso composto por escada e rampa.	58
Figura 5.3	Modelo de superestrutura metálica em treliça espacial tipo Warren. . .	59
Figura 5.4	Modulações projetadas para superestrutura metálica.	60
Figura 5.5	Modelo numérico desenvolvido no ANSYS workbench.	61
Figura 5.6	Forma dos modos de vibração.	62
Figura 5.7	Frequências naturais e modos de vibração da passarela metálica.	63
Figura 5.8	Representação parcial da distribuição de pedestres individuais na passarela	66
Figura 5.9	Gráficos de aceleração vertical, no meio do vão, para o movimento de 1 pedestre.	67

Figura 5.10	Gráficos de aceleração vertical, no meio do vão, para o movimento de 1 pedestre.	68
Figura 5.11	Gráficos de aceleração vertical, no meio do vão, para o movimento de caminhada com 5 e 10 pedestres.	69
Figura 5.12	Gráficos de aceleração vertical, no meio do vão, para o movimento de corrida com 5 e 10 pedestres.	70
Figura 5.13	Gráficos de aceleração vertical, no meio do vão, para o movimento de caminhada para 40, 90 e 132 pedestres	71
Figura 5.14	Gráficos de aceleração vertical, no meio do vão, para o movimento de corrida para 40, 90 e 132 pedestres	72
Figura 5.15	Gráfico de comparação das acelerações verticais para o movimento de caminhada síncrona.	74
Figura 5.16	Gráfico de comparação das acelerações verticais para o movimento de caminhada assíncrona.	75
Figura 5.17	Gráfico de comparação das acelerações verticais para o movimento de corrida síncrona.	76
Figura 5.18	Gráfico de comparação das acelerações verticais para o movimento de corrida assíncrona.	76
Figura 5.19	Gráficos de níveis de conforto para o movimento de caminhada assíncrona.	77
Figura 5.20	Gráficos de níveis de conforto para o movimento de caminhada síncrona.	77
Figura 5.21	Gráficos de níveis de conforto para o movimento de corrida assíncrona.	78
Figura 5.22	Gráficos de níveis de conforto para o movimento de corrida síncrona. .	78
Figura 5.23	Gráfico de comparação das acelerações estimadas pela (NBR 7187, 2021).	81

Lista de tabelas

Tabela 2.1	Valores das frequências naturais das passarelas de Tunja.	28
Tabela 2.2	Picos de aceleração medidos para as passarelas de Tunja.	28
Tabela 2.3	Parâmetros médios do movimento humano.	32
Tabela 3.1	Coefficientes de Fourier e ângulos de fase	36
Tabela 3.2	Intervalo de acelerações vertical por nível de conforto.	40
Tabela 3.3	Intervalo de acelerações horizontal por nível de conforto.	40
Tabela 3.4	Intervalo de frequência verticais com risco de ressonância.	41
Tabela 3.5	Intervalo de frequência horizontais com risco de ressonância.	41
Tabela 3.6	Casso de carregamento para análise de passarela.	41
Tabela 3.7	Coefficientes numéricos para série de Fourier.	48
Tabela 3.8	Constantes para aceleração vertical.	50
Tabela 3.9	Constantes para aceleração horizontal.	50
Tabela 3.10	Nível de conforto de acelerações verticais.	50
Tabela 3.11	Nível de conforto de acelerações horizontal.	50
Tabela 5.1	Propriedades físicas dos materiais.	61
Tabela 5.2	Frequências naturais e modos de vibração.	62
Tabela 5.3	Resumo das frequências das estruturas de referência.	64
Tabela 5.4	Parâmetros de caracterização dos movimento do pedestre.	65
Tabela 5.5	Resumo dos valores de aceleração e deslocamento verticais das simulações	73
Tabela 5.6	Constantes e parâmetros para estimativa da aceleração pelo método da NBR 7187 (2021)	79
Tabela 5.7	Constantes para aceleração vertical.	80
Tabela 5.8	Constantes para estimativa da aceleração pelo método da NBR 7187 (2021) .	80
Tabela 5.9	Acelerações por densidade de pedestres pelo método da NBR 7187 (2021) .	80
Tabela 5.10	Parâmetros para estimativa da aceleração pico pelo método do CSA (2006)	82
Tabela 5.11	Parâmetros para estimativa da aceleração pico pelo método do FIB (2005)	82

Lista de abreviaturas e siglas

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials	18
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas	18
CSA	Canadian Standards Association	18
DLF	Fator de Carregamento Dinâmico	32
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte	19
E.P.I.A.	Estrada Parque de Indústria e Abastecimento	23
FIB	Fédération Internationale du Béton	18
HSI	Interação Humano-Estrutura	18
IPR	Instituto de Pesquisa em Transportes	19
ISO	International Organization for Standardization	18
MCS	Sistema de Captura de Movimento	33
NBR	Norma Brasileira	18
PSM	Simulador de Pessoas em Movimento	20
SETRA	service d'Études techniques des routes et autoroutes	18

Lista de símbolos

Símbolos romanos

a_{max}	Aceleração máxima da estrutura	45
c_i	Coefficiente de Impacto	32
C_p	Valor de amortecimento do pedestre	34
c_t	Tempo de contato do pé com a estrutura	32
$F(t)$	Força exercida pelo pedestre, em função do tempo	44
$F(t)_l$	Função de força longitudinal	42
$F(t)_t$	Função de força transversal	42
$F(t)_v$	Função de força vertical	42
F_0	Peso estático de uma pessoa	36
f_l	Frequência natural longitudinal	42
f_t	Frequência natural transversal	42
f_v	Frequência natural vertical	42
Hz	Hertz	24
i	Número que designa o harmônico	36
k_1	Constante de frequência 1, NBR	50
k_2	Constante de frequência 2, NBR	50
K_f	Contante de para aceleração, NBR	50
K_p	Coefficiente de rigidez do pedestre	34
$K_{a.95\%}$	Constante probabilística, NBR	50
k_{forma}	Coefficiente de forma	45
kg	Quilogramas	40
kN	Quilonewton	37
m	Metros	44
M_p	Massa modal do pedestre	34
N	Newtons	44
n	Números de harmônicos considerados	47
q_{fk}	Carregamento uniformemente distribuído	37
Q_{fwk}	Carregamento pontual	37
s	Segundos	44
t	Tempo	36
W	Peso próprio	49
y	Deformação estática do meio do vão	36
cm	Centímetro	28

Símbolos gregos

α	Coeficiente de Fourier	36
$\alpha_{i,h}$	Coeficiente de Fourier do i-éssimo harmônico, direção horizontal	47
$\alpha_{i,v}$	Coeficiente de Fourier do i-éssimo harmônico, direção vertical	47
Φ	Fator de ampliação dinâmica	36
φ_i	Ângulo de fase do i-éssimo harmônico	36
$\Phi_{i,h}$	Ângulo de fase do i-éssimo harmônico, direção horizontal	47
$\Phi_{i,v}$	Ângulo de fase do i-éssimo harmônico, direção vertical	47
Ψ_d	Fator de resposta dinâmica	45
Ψ_r	Fator de risco de ressonância	42
F_i	Participação do i-éssimo harmônico no resultado da carga	36

Sumário

1	Introdução	17
1.1	Relevância do tema	17
1.2	Motivação	19
1.3	Objetivos	19
1.4	Estrutura do Trabalho	20
2	Revisão Literária	21
2.1	Considerações iniciais	21
2.2	Estruturas semelhantes	23
2.3	Carregamento do Pedestre	29
3	Normativos relacionados	35
3.1	Bulletin 32 - Guidelines for the design of footbridges	35
3.2	Eurocode: Basis of structural design	37
3.3	Footbridges - Assessment of vibrations behaviour of footbridges	38
3.4	Canadian Highway Bridge Design Code	43
3.5	Bases for design of structures – Serviceability of buildings and walkways against vibrations	46
3.6	Guide specifications for design of pedestrian bridges	48
3.7	NBR 7187 - Projeto de pontes, viadutos e passarelas de concreto	49
4	Ferramenta Computacional	52
4.1	Ansys Workbench	52
4.1.1	Tipo de análise	52
4.1.2	Elementos finitos	53
4.1.3	Malha de elementos finitos	53
4.1.4	Algoritmo de integração	54
4.2	Simulador de Pessoas em Movimento - PSM	54
5	Estudo de caso	57
5.1	Álbum de projetos-tipo de passarela	57
5.1.1	Concepção estrutural	57
5.1.2	Acessos	58
5.1.3	Superestrutura	59
5.2	Modelo Numérico	60
5.2.1	Análise Modal	62
5.2.2	Análise transiente	65

6	Conclusões	84
6.1	Conclusões a respeito do comportamento estrutural	84
6.2	Conclusões a respeito das normas	85
6.3	Recomendações de pesquisas futuras	86
	Referências	88

1 Introdução

1.1 Relevância do tema

Parte integrante do sistema viário das grandes cidades, as rodovias federais têm se apresentado cada vez mais próximas dos centros urbanizados. Os trechos urbanos são pontos críticos, nos quais é possível observar a existência do conflito entre veículos e pedestres. Cada vez mais, os elementos de travessia em desnível, tais como, passarelas e passagens subterrâneas, vem ganhando importância na mitigação do problema apontado. Em comparação à implementação das passagens subterrâneas, destacam-se como vantagens para construção de passarelas os maiores níveis de higiene e segurança oferecidos aos usuários, a não interferência com equipamentos subterrâneos ou com a estrutura do pavimento e o custo inferior de implementação. (DNIT, 2020)

Tadeu *et al.* (2022) explicam, ainda, que as passarelas podem ser construídas de diferentes formas e materiais. Além de transpor as rodovias, algumas dessas estruturas podem se tornar pontos turísticos devido a sua extensão, altura, localização e concepção estrutural, promovendo aos pedestres uma grande experiência ao atravessá-la. Feng *et al.* (2019) destacam que os projetos para construção de passarelas devem ser não só econômicos e esteticamente agradáveis, mas também, funcionais e seguros para os usuários.

Dessa forma, motivado pelos princípios econômicos, as tendências estruturais apontam para a construção de passarelas de menor peso próprio com elementos mais esbeltos, segundo apresentado por Acito *et al.* (2021). Apesar do tipo de construção conferir um maior aproveitamento da capacidade estrutural dos materiais aplicados, Caetano *et al.* (2010b) observam que essas estruturas podem exibir frequências quase ressonantes, tornando-as vulneráveis à carregamentos variáveis, tal como aquele produzido por pedestres caminhando ou correndo.

A aplicação de carregamentos variáveis em estruturas podem gerar efeitos dinâmicos, como por exemplo vibrações excessivas, levando à níveis de desconforto do usuário ou até danos estruturais. Considerando a importância dessas estruturas, diversas pesquisas têm sido desenvolvidas nas últimas décadas com o objetivo de mapear os principais parâmetros relacionados ao desempenho dinâmico de passarelas.

Wei *et al.* (2022) ressaltam a importância da inclusão de dois macro tópicos na realização de estudos dinâmicos, são eles: As características estruturais da passarelas e as peculiaridades referentes ao carregamento produzido pelos movimentos humanos.

Relativo às características estruturais, é de conhecimento que os principais parâmetros dinâmicos são relacionados ao sistema construtivo e aos materiais que compõem

a passarela. O desempenho dinâmico de edificações é amplamente estudado por meio de desenvolvimentos teóricos e modelos experimentais de diferentes passarelas espalhadas pelo mundo.

Em outra direção, o modelo adotado para representar o carregamento devido à movimentação humana pode variar com base em parâmetros como velocidade de caminhada, frequência de passos, peso do pedestre e número de indivíduos realizando o movimento. Ainda, a literatura demonstra que as propriedades dinâmicas da estrutura pode variar devido à interação do pedestre com a passarela. De modo similar, a força de reação do movimento do pedestre pode variar conforme o movimento do piso da estrutura. Os comportamentos acima mencionados são conhecidos como interação humano-estrutura (HSI) (Zall *et al.*, 2017).

A combinação dos parâmetros estruturais da passarela com o tráfego e pedestres resultam na movimentação do piso da estrutura. Essa vibração é medida em termos da aceleração e permeia constantemente o objeto de pesquisas

Face ao exposto, os projetos modernos devem buscar a concepção de estrutura com os melhores parâmetros dinâmicos, considerando da maneira mais precisa a configuração estrutural da passarela e a interação dos pedestres com a estrutura. Diversos normativos e guias estabelecem orientações, metodologias e valores de referência, de modo que a estrutura projetada seja segura para o tráfego de pedestres. Pode-se destacar como principais instrumentos orientativos as normas CEB (1991), EUROCODE (2005), CSA (2006), SÉTRA (2006), ISO 10137 (2007), AASHTO (2009) e NBR 7187 (2021).

Acito *et al.* (2021) destacam que o guia francês SÉTRA (2006) é o regulamento mais completo tecnicamente para elaboração de projetos de passarelas sob carregamento de pedestres. O referido guia define uma metodologia de classificação das passarelas quanto ao tráfego esperado e o nível de conforto requerido.

No âmbito nacional, destaca-se a Norma Brasileira ABNT NBR 8800 (2008), a qual versa sobre projeto de estruturas de aço e estruturas mistas de edifícios. O referido normativo apresenta valores de referência para a frequência natural de edificações, com o objetivo de combater a vibração excessiva em pisos. O valor limite preconizado depende do tipo de utilização proposto para a estrutura.

De maneira mais recente, a Norma Brasileira ABNT NBR 7187 (2021) – Projeto de pontes, viadutos e passarelas de concreto – passou a ostentar após sua última atualização em 2021 o Anexo C, o qual trata da análise dinâmica de passarelas. O normativo citado destaca limites de aceleração aceitáveis para essas estruturas, de modo a não provocar desconforto àqueles que às utilizam.

Nesse contexto, o presente trabalho busca realizar uma análise mais detalhada do desempenho dinâmico do projeto de passarela proposto pelo DNIT (2020) por meio da elaboração de um modelo numérico da estrutura para simulação do tráfego de pedestres

em diferentes condições de carregamento. Os resultados obtidos serão confrontados com as normas vigentes, em especial a [NBR 7187 \(2021\)](#), para definição do nível de conforto proposto para a estrutura.

1.2 Motivação

O álbum de projetos-tipo de passarela para pedestres – 2ª edição foi publicado pelo Instituto de Pesquisa em Transportes (IPR) em dezembro de 2020. O referido álbum objetivou agilizar a contratação e construção dos dispositivos de passagem de pedestres em desnível, dando maior segurança e conforto aos usuários das rodovias federais. Conforme mencionado no referido álbum, os projetos elaborados por aquela autarquia consideraram os normativos vigentes à época, bem como, outras instruções internacionais.

Contudo, identificou-se que a última atualização realizada na norma brasileira de projetos de passarelas, a saber, [NBR 7187 \(2021\)](#), não havia sido publicado à época da elaboração dos projetos. Cabe ressaltar que a atualização em comento incluiu à norma citada o anexo C, onde são apresentados os critérios para cálculo da aceleração limite da estrutura de passarelas quando induzido pelo carregamento de pedestres.

1.3 Objetivos

Esta pesquisa tem por objetivo, avaliar numericamente o desempenho dinâmico da passarela padrão proposta pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (DNIT), principalmente considerando os parâmetros preconizados pela [NBR 7187 \(2021\)](#) e nos demais normativos internacionais.

Como objetivos específicos, esta pesquisa propõe:

- Obter, por meio de modelos numéricos, as frequências naturais e as características dinâmicas da estrutura analisada;
- Estimar o comportamento dinâmico das passarelas com a aplicação de carregamentos verticais que simulem o tráfego de pedestres em diferentes cenários, desejando obter as acelerações da estrutura;
- Comparar os resultados numéricos obtidos com as estimativas e limites apresentados pela [CEB \(1991\)](#), [EUROCODE \(2005\)](#), [CSA \(2006\)](#), [SÉTRA \(2006\)](#), [ISO 10137 \(2007\)](#), [AASHTO \(2009\)](#) e [NBR 7187 \(2021\)](#).
- Verificar o nível de conforto do usuário durante utilização da passarela estudada.

1.4 Estrutura do Trabalho

Com o objetivo de prover um grande apanhado sobre dinâmica de passarelas, a presente dissertação é composta por seis capítulos, como descrito a seguir.

O primeiro capítulo é referente à introdução e importância do tema, detalhando a motivação desta pesquisa e os objetivos pretendidos ao final do trabalho.

O segundo capítulo apresenta uma revisão literária sobre outros estudos dinâmicos de passarelas, os resultados obtidos e os problemas identificados tendo como objetivo delinear as linhas de atuação do presente estudo.

O terceiro capítulo versa sobre os fundamentos teóricos que embasam a realização do presente estudo. Aqui caracteriza-se os principais requisitos normativos para estimativa teórica do desempenho dinâmico da estrutura. Ainda, são apresentadas as funções que reproduzem matematicamente forças induzidas pelas pessoas durante uma caminhada ou corrida humana.

O quarto capítulo relata as ferramentas computacionais utilizadas para simulação numérica do comportamento dinâmico da passarela em análise. Na presente dissertação são utilizados os softwares ANSYS workbench e o PSM - Simulador de Pessoas em Movimento (Gomes, 2006).

O quinto capítulo apresenta o estudo de caso da passarela aprovada pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (DNIT). Além da descrição completa da estrutura analisada, são apresentados os resultados das simulações numéricas realizadas sobre o comportamento dinâmico da passarela.

O sexto e último capítulo deste trabalho apresenta as conclusões realizadas a partir dos resultados obtidos pelas simulações numéricas comparados aos limites normativos apurados na fundamentação teórica. Outrossim, são oportunamente listadas algumas sugestões para pesquisas futuras com relação ao tema desta dissertação.

2 Revisão Literária

2.1 Considerações iniciais

Motivado por aspectos econômicos ou estéticos, as passarelas vêm sendo construídas com estruturas mais esbeltas, tornando-se mais leves. Apesar de aproveitar a capacidade resistente dos materiais, essas estruturas podem apresentar maior exposição aos efeitos dinâmicos dos carregamentos variáveis, tais como os movimentos realizados pelos pedestres (Gonzaga *et al.*, 2020).

Os efeitos dinâmicos observados durante aplicação de cargas móveis podem conferir às passarelas vibrações excessivas, causando desconforto aos usuários e até danos estruturais. Nesse sentido, destacam-se os carregamentos gerados pelos movimentos de pessoas, como o caminhar, correr e pular, os quais se caracterizam pela sua periodicidade e pelas baixas frequências. Agravam-se as vibrações dinâmicas quando a frequência dos carregamentos aplicados se aproxima das frequências naturais da estrutura, ocorrendo, assim, o fenômeno de ressonância, de acordo com o exposto por Salgado *et al.* (2014). Nesse sentido, destacam-se os carregamentos gerados por movimentos de pessoas, como o caminhar, correr, pular que se caracterizam pela sua periodicidade e pelas baixas frequências.

Considerando o exposto, as passarelas sempre foram pauta de pesquisa, uma vez que elas são estruturas mais suscetíveis ao desconforto ou colapso devido ao carregamento dinâmico excessivo com frequência próxima a frequência natural da estrutura. Zivanovic *et al.* (2005) destacam o acontecimento de diversos colapsos induzidos pelo carregamento humano nas passarelas, iniciando com uma passarela de madeira colapsada no ano de 1154 e o acidente ocorrido em uma passarela de Broughton, Reino Unido no ano de 1831, onde 60 soldados trafegavam marchando sobre ela.

Fujino *et al.* (1993) descrevem o monitoramento realizado na passarela de Toba Park localizada próximo a cidade de Tokyo, Japão. A passarela analisada é do tipo estaiada e possui o comprimento total de 179,00m. A estrutura fica localizada próxima a um local de grandes eventos e recebia mais de 20 mil pessoas em momentos de pico. Durante seu monitoramento, os pesquisadores observaram movimentos excessivos na direção lateral e vibrações excessivas dos estais. Apresenta-se a seguir o tipo de estrutura analisada e a densidade do tráfego de pedestres [figura 2.1](#).

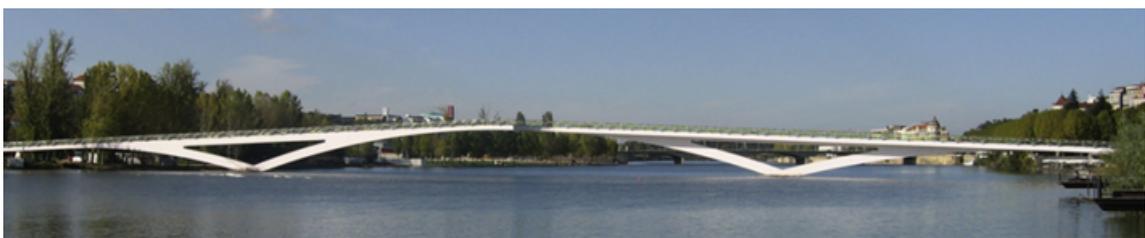
Figura 2.1 – Composição estrutural da Passarela de Toba Park e utilização da estrutura pela multidão



Fonte: (Fujino; Siringoringo, 2015)

A passarela Pedro e Inês, localizada na cidade de Coimbra, Portugal, é mais um exemplo de estrutura alvo de pesquisas devido aos desconfortos gerados pela vibração excessiva quando aplicados carregamentos dinâmicos. A estrutura possui um total de 274,50m de comprimento e um contorno em arco, cujo maior vão apresenta 110,00m. A resposta dinâmica obtida pela excitação de pedestres trafegando pela referida passarela resultou em acelerações máximas verticais de $7,67 \text{ m/s}^2$ e horizontais de $1,28 \text{ m/s}^2$. Um sistema para controle de acelerações foi implementado para evitar maiores danos a estrutura (Caetano *et al.*, 2010a). A figura 2.2 apresenta uma visão geral da estrutura destacada.

Figura 2.2 – Composição estrutural da Passarela Pedro e Inês



Fonte: (Caetano *et al.*, 2010a)

Outro caso emblemático sobre vibrações excessivas é o da Passarela Millennium, a qual enfrentou um movimento lateral demasiado devido à multidão que trafegava sobre ela. No dia de inauguração da estrutura em tela foram observados grandes deslocamentos laterais da estrutura, dificultando o tráfego de pedestres, os quais formavam uma multidão de 2 mil pessoas, em média. A estrutura apresenta três grandes vãos sobre o rio Thames (144,00m, 108,00m e 81,00m) com 4,00 de largura e o tipo estrutural está apresentado na figura 2.3.

Figura 2.3 – Composição estrutural da Passarela Millennium



Fonte: (Dallard *et al.*, 2001)

Segundo os mesmos autores, os efeitos de *lock in* foram observados durante a utilização da passarela e amplificaram a movimentação lateral (Dallard *et al.*, 2001). O fenômeno conhecido como *lock in* ocorre quando os pedestres sincronizam as passadas com o movimento da passarela, amplificando assim as vibrações.

Conhecendo o comportamento insatisfatório da estrutura, diversas pesquisas foram realizadas para identificação das características dinâmicas da passarela, quantificar as forças exercidas pelos pedestres na passarela e projetar dispositivos para controle das acelerações observadas. Após simular os efeitos dinâmicos da estrutura, recomendou-se a instalação de amortecedores viscosos e de massa sincronizada para controle das vibrações.

2.2 Estruturas semelhantes

Para os propósitos dessa dissertação, destaca-se a seguir outros estudos desenvolvidos para passarelas semelhantes àquela proposta pelo álbum de projetos-tipo (DNIT, 2020). Busca-se na literatura entender o comportamento dinâmico de passarelas cuja superestrutura é composta por treliças metálicas e piso de concreto armado.

De modo inicial, ressalta-se a passarela sobre a E.P.I.A., que é uma estrutura localizada em Brasília no trecho da BR-040 que atravessa o Setor de Indústria e Abastecimento e objeto de diversas pesquisas acadêmicas para obtenção das características dinâmicas, avaliação das vibrações induzidas e proposição de sistemas para controle de vibrações.

A estrutura mencionada dispõe de 4 trechos de travessia horizontal com comprimento variando de 31,00 a 34,00 metros e largura de 2,40m. A superestrutura é formada por uma treliça metálica de Warren com travessas e bantos retangulares de diferentes tamanhos e diagonais em perfil hexagonal. A passarela apresenta ainda uma cobertura em arco confeccionada em argamassa estrutural e o piso é formado por placas de concreto armado pré-fabricado com 2,84m de comprimento e 0,40m de largura. Um visão geral da estrutura é apresentada na [figura 2.4](#).

Figura 2.4 – Composição estrutural da Passarela sobre a E.P.I.A



Fonte: (Santos, 2009)

Uma série de modelos numéricos foram propostos para a passarela sobre a E.P.I.A, nos quais as análises modal e transiente foram realizadas para estimativa do comportamento dinâmico da estrutura. Santos (2009) propôs melhorias nos modelos de elementos finitos elaborados para a referida passarela, com o objetivo de obter resultados mais precisos a realidade. Nesse contexto, a autora avaliou a influencia dos elementos não estruturais para o comportamento dinâmico da estrutura, concluindo que a forma em que esses elementos são modelados influenciam os resultados obtidos na simulação.

Observando os possíveis problemas de vibração apresentados pela estrutura, Gomes (2006) propôs uma sistema de Amortecedores de Massa Sincronizada para controle da aceleração de trechos da passarela sobre a E.P.I.A. De acordo com as simulações realizadas pelo autor, o sistema de controle recomendado é composto por 20 amortecedores com massa de 150kg, os quais proporcionariam uma grande redução nas vibrações da estrutura.

O trabalho experimental apresentado por Doz *et al.* (2018) monitorou a movimentação da estrutura devido à excitação provocada por pedestres. O monitoramento contou com o posicionamento de acelerômetros verticais e horizontais em diferentes pontos da passarela. Os resultados obtidos apresentam a primeira frequência natural de 3,12 - 2,49 Hz (1º modo de vibração lateral) e a segunda de 3,93 - 3,55 Hz (1º modo de vibração vertical).

Pereira (2017) realizou a análise da passarela sobre a BR-153 na cidade de Goiânia com o objetivo de identificar o comportamento dinâmico da estrutura por meio de modelos numéricos e diferentes cenários de carregamento. A estrutura possui vão único com 42,50m de comprimento e 2,40m de largura.

A superestrutura da passarela é constituída por uma treliça metálica do tipo Warren com elementos tubulares de diferentes dimensões e espessuras. O piso de travessia é formado por uma laje de concreto armado e espessura média de 10cm conectada à treliça por meio de conectores de cisalhamento. A figura 2.5 apresenta o modelo estrutural analisado.

Figura 2.5 – Composição estrutural da Passarela sobre a BR-153



Fonte: (Pereira, 2017)

O modelo numérico desenvolvido contou com 5064 nós e 3775 elementos e apresentou como resultado para primeira e segunda frequências naturais 1,33 Hz e 1,88 Hz, respectivamente. O referido modelo foi, ainda, utilizado para uma análise transiente da estrutura com a aplicação de diferentes modelos de carregamento para estimativa das acelerações da estrutura estudada. Os maiores valores de aceleração encontrados variam no intervalo de 2,15 a 12,50 m/s^2 nos casos de aplicação do carregamento proposto para 10 e 30 pessoas. A autora concluiu que a passarela em tela necessita de maiores estudos, pois a estrutura é flexível e pode apresentar acelerações superiores às toleráveis pelos usuários

Wei *et al.* (2019) analisaram a passarela Prato, localizada na cidade de Prato, Itália. A referida passarela é constituída por uma treliça com 25,00m de comprimento e largura variável de 2,50m (meio do vão) a 3,60m (apoios). O piso é composto por placas de polímero reforçado com fibra com 5,00m de comprimento, 0,50m de largura e espessura de 4,00cm. As placas são fixadas à treliça, o que proporciona maior travamento da estrutura e um menor peso próprio. A figura 2.6 apresenta o modelo estrutural analisado.

Figura 2.6 – Composição estrutural da Passarela Prato



Fonte: (Wei *et al.*, 2019)

A análise modal foi realizada por meio de ensaios experimentais de vibração livre, ou seja, sem a passagem de pedestres e apenas com a excitação do vento ou do tráfego de carros abaixo da passarela. As três primeiras frequências naturais encontradas se relacionam ao modo de vibração de torção e possuem os valores de $2,05 \text{ Hz}$, $2,70 \text{ Hz}$ e $4,80 \text{ Hz}$.

Rezende *et al.* (2020) realizaram o estudo de uma passarela metálica de vão longo com relatados problemas de vibração localizada na cidade do Rio de Janeiro. A estrutura analisada é composta por uma superestrutura de treliça metálica, cujos principais elementos são formados por perfis duplo U de diferentes tamanhos. A passarela possui comprimento total de 68,60m e largura interna de 2,55m. O piso da estrutura é confeccionado em concreto pré-moldado com 7,00cm de espessura. A [figura 2.7](#) apresenta o tipo estrutural da passarela em destaque.

Figura 2.7 – Composição estrutural da Passarela do Rio de Janeiro



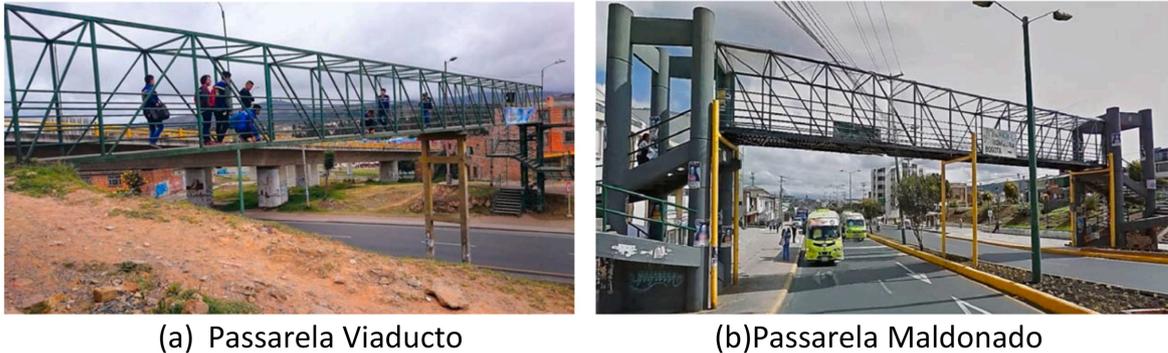
Fonte: (Rezende *et al.*, 2020)

Os autores procederam com a análise modal do modelo numérico criado para a estrutura para auferir uma estimativa das primeiras frequências naturais da estrutura. Como resultado, foram encontradas as frequências de $0,94 \text{ Hz}$ e $1,73 \text{ Hz}$ para os modos de vibração lateral e vertical, respectivamente. De modo complementar, realizaram o monitoramento da estrutura para identificação de valores mais precisos de frequência. Para tal, foram utilizados 4 acelerômetros (2 verticais e 2 transversais) distribuídos em duas linhas de análise. Como resultado os valores de $1,85 \text{ Hz}$ e $4,20 \text{ Hz}$ foram obtidos para os dois primeiros modos de vibração vertical e $1,07 \text{ Hz}$ e $2,88 \text{ Hz}$ para os primeiros modos de vibração lateral.

Rodríguez-Suesca *et al.* (2022) apresentaram uma análise numérica e experimental de oito passarelas de pedestres localizadas na cidade de Tunja, Colômbia. Entre as estruturas analisadas, importa-nos ressaltar as passarelas denominadas como Viaducto, San Laureano, Maldonado e Villa Luz. As estruturas destacadas possuem superestrutura confeccionada em treliça metálica, conforme detalhado a seguir.

As passarelas Viaducto e Maldonado são compostas por treliças metálicas com piso em concreto armado do tipo stelledeck e largura de 2,00m. As duas estruturas possuem apoio intermediário, sendo a superestrutura divididas em dois vãos com 18,20m e 17,10m (Viaducto) e 12,10m e 9,80m (Maldonado). As duas passarelas mencionadas foram construídas na década de 90 e estão apresentadas na [figura 2.8](#).

Figura 2.8 – Composição estrutural da Passarela Viaducto (a) e Maldonado (b)



Fonte: (Rodríguez-Suesca *et al.*, 2022)

De igual modo, outras duas estruturas analisadas também foram construídas com treliças metálicas de piso de concreto armado com largura de 2,00m. Entretanto as passarelas San Laureano e Villa Luz possuem vão único de travessia com 21,00m e 22,50m de comprimento, respectivamente. As estruturas foram construídas nos anos de 1987 (San Laureano) e 1997 (Villa Luz) e são apresentadas na [figura 2.9](#).

Figura 2.9 – Composição estrutural da Passarela San Laureano (a) e Villa Luz (b)



Fonte: (Rodríguez-Suesca *et al.*, 2022)

Os autores realizaram investigações numéricas e experimentais na estruturas analisadas com o objetivo de estudar a influências das degradações patológicas nas características dinâmicas. A análise modal realizada encontrou as primeiras frequências naturais no intervalo de 2,69 a 3,50 Hz para as 4 estruturas ressaltadas na presente dissertação. As principais frequências estão apresentadas na [tabela 2.1](#).

Tabela 2.1 – Valores das frequências naturais das passarelas de Tunja.

Passarela	Modo	Frequência	Tipo
Viaducto	1º	3,02	Lateral
	2º	4,92	Lateral
	3º	5,54	Lateral
Maldonado	1º	3,50	Lateral
	2º	5,10	Lateral
	3º	5,81	Sentido do eixo
San Laureano	1º	2,69	Sentido do eixo
	2º	3,75	Lateral
	3º	4,91	Vertical
Villa Luz	1º	3,37	Sentido do eixo
	2º	4,74	Lateral
	3º	5,54	Vertical

Fonte: (Rodríguez-Suesca *et al.*, 2022)

Ainda, os mesmos autores procederam à análise transiente da estrutura por meio de uma simulação numérica e através de testes experimentais nas passarelas destacadas. O carregamento aplicado a passarela durante o monitoramento foi realizado por 3 pedestres com movimentos de caminhada e corrida com frequência de passo de 2,00 e 3,33 Hz, respectivamente. O referido estudo apresenta como conclusão que as estruturas analisadas possuem sérios problemas de vibração, causando desconforto e insegurança aos usuários. Os principais valores de aceleração obtidos estão apresentados na [tabela 2.2](#) em comparação com os limites recomendados pelo guia [SÉTRA \(2006\)](#) para classificação do nível de conforto.

Tabela 2.2 – Picos de aceleração medidos para as passarelas de Tunja.

Passarela	Movimento	Aceleração vertical (m/s^2)	Nível de conforto SETRA
Viaducto	Andando	3,63	Inaceitável
	Correndo	5,58	Inaceitável
Maldonado	Andando	1,99	Mínimo
	Corredo	3,69	Inaceitável
San Laureano	Andando	2,16	Mínimo
	Corredo	4,26	Inaceitável
Villa Luz	Andando	4,95	Inaceitável
	Corredo	7,52	Inaceitável

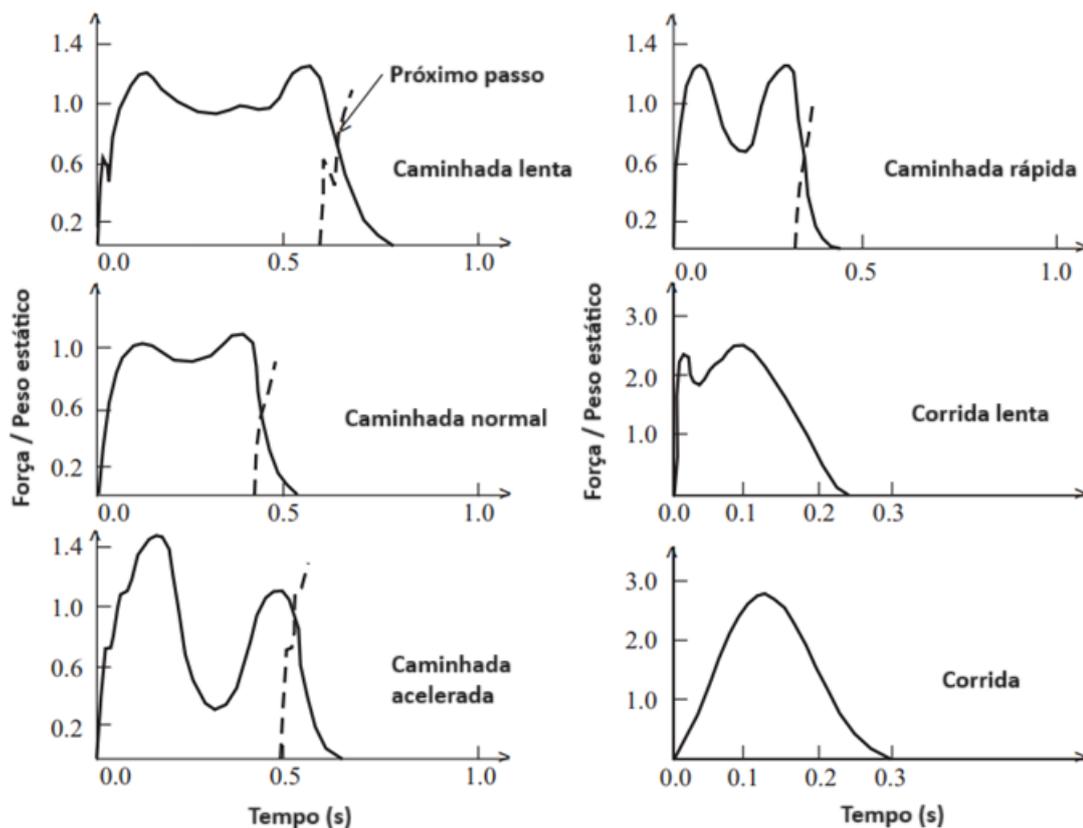
Fonte: (Rodríguez-Suesca *et al.*, 2022)

2.3 Carregamento do Pedestre

As fontes predominantes de excitação nas passarelas surgem dos vários movimentos de pedestres que trafegam pela estrutura, incluindo caminhar, correr e pular. Pesquisas revelam que um pedestre em movimento transmite uma força que varia dinamicamente ao longo do tempo e do espaço, dirigida principalmente na direção vertical. Dada a importância destas forças como carga primária das passarelas, numerosos estudos foram realizados para caracterizar esses movimentos e obter uma compreensão mais profunda da interação dinâmica entre humanos e estruturas (Zivanovic *et al.*, 2005).

Estudos abrangentes afirmam que a caminhada humana exhibe um padrão gráfico de pico duplo devido ao impacto seguido da ponta do pé e do calcanhar, caracterizado por magnitude e duração variáveis. A exibição gráfica do movimento se altera pela influência de fatores como frequência e tempo de contato do pé com a estrutura. Em valores mais altos, a representação gráfica apresenta um pico único para o movimento de corrida, no qual o pedestre realiza o contato apenas da ponta do pé com a estrutura. A [figura 2.10](#) fornece uma representação visual do comportamento de cargas aplicadas na direção vertical durante as atividades humanas de caminhada e corrida.

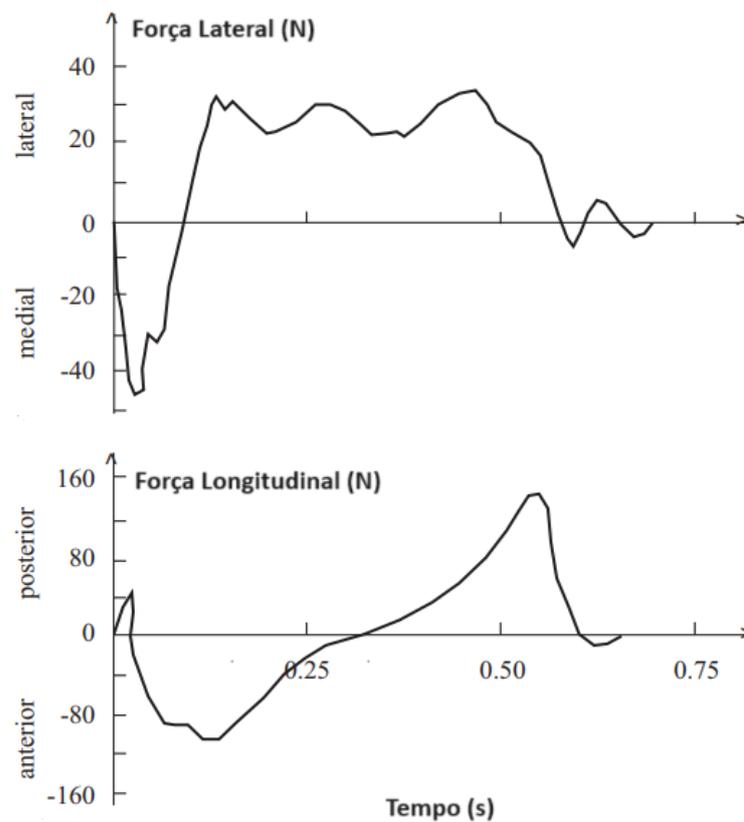
Figura 2.10 – Representação da força vertical aplicada pelos movimentos do pedestre.



Fonte: (Zivanovic *et al.*, 2005)

Apesar da força vertical possuir maior magnitude, uma série de pesquisas sobre o movimento humano foram conduzidas para validação das forças produzidas nas três direções. [Andriacchi et al. \(1977\)](#) mapearam o padrão de comportamento das forças transversais e longitudinais ([figura 2.11](#)). Eles observaram que o incremento da velocidade influencia também na magnitude do impacto e no comprimento de passo do movimento.

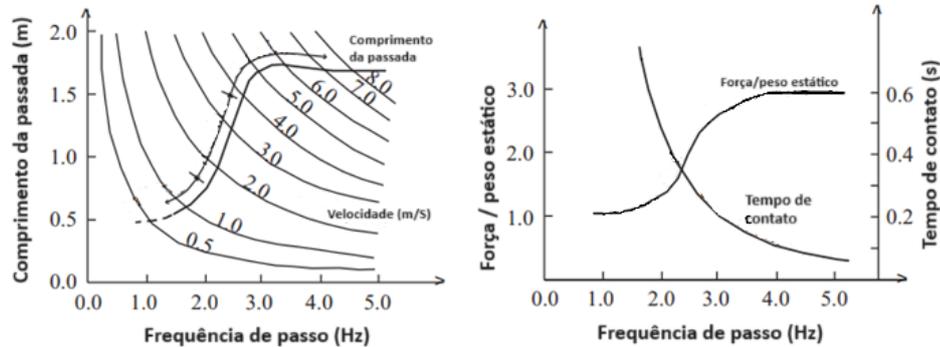
Figura 2.11 – Representação da força transversal e longitudinal gerada pelos movimentos de um pedestre.



Fonte: ([Zivanovic et al., 2005](#))

[Wheeler \(1982\)](#) apresentou uma pesquisa relevante para a área de dinâmica em passarelas. O referido autor relatou que os parâmetros críticos que influenciam esses padrões incluem peso do pedestre, comprimento da passada, tempo de contato do pé com a estrutura, velocidade de movimento e coeficiente de impacto. Relata-se que os referidos parâmetros guardam relação com a frequência de passo e podem ser inferidos a partir dos gráficos apresentados por aquele autor ([figura 2.12](#)).

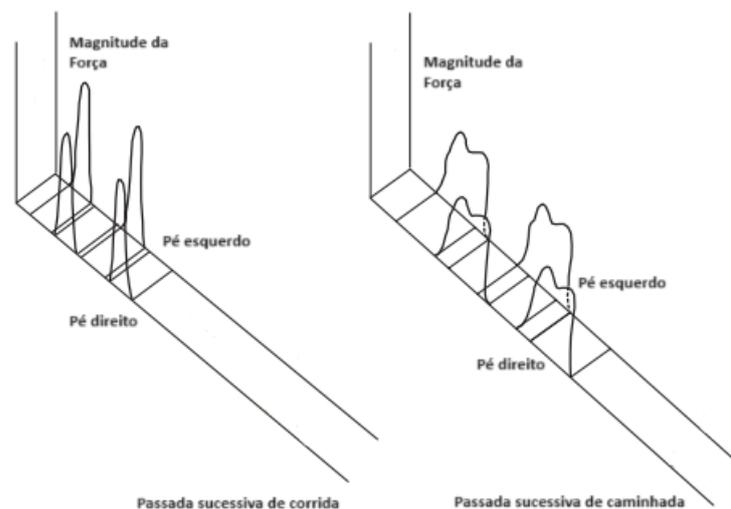
Figura 2.12 – Representação do movimento do pedestre.



Fonte: (Wheeler, 1982)

Ainda, durante pesquisa realizada para identificação do comportamento do movimento de caminhada e corrida em diferentes tipos de superfície, [Andriacchi et al. \(1970\)](#) observou que o movimento sequenciado de passos caminhando possui uma sobreposição de forçar quando os dois pés estão tocando a estrutura. Em contrapartida o movimento de corrida possui um vazio entre os picos de carga, representando o momento em que o pedestre não possui contato com a superfície. O padrão de passos sequenciados está demonstrado na [figura 2.13](#).

Figura 2.13 – Representação de passadas consecutivas do pedestre.



Fonte: (Zivanovic et al., 2005)

[Zivanovic et al. \(2005\)](#) destacam a variabilidade dos fatores que envolvem o movimento humano, podendo ser diferente de pessoa para pessoa. Embora variáveis, certos padrões-chaves podem ser identificados e utilizados para caracterizar os movimentos. A [tabela 2.3](#) apresenta valores médios para os principais fatores definidos por [Wheeler \(1982\)](#). Com os parâmetros mais relevantes do movimento definidos, fórmulas matemáticas são empregadas para calcular a magnitude do carregamento induzido pelos pedestres na estrutura.

Tabela 2.3 – Parâmetros médios do movimento humano.

Tipo de Movimento	Frequência (Hz)	Velocidade (m/s)	Comprimento de Passo	Coefficiente de Impacto
Caminhada lenta	1,70	1,10	0,60	1,10
Caminhada normal	2,00	1,50	0,75	1,20
Caminhada rápida	2,30	2,20	1,00	1,35
Corrida lenta	2,50	3,30	1,30	2,20
Corrida	3,20	5,50	1,75	2,75

Fonte: (Wheeler, 1982)

Uma vez conhecido os parâmetros que mais influenciam a movimentação humana, buscou-se criar um modelo analítico que fosse capaz de reproduzir as forças dinâmicas observadas. Zivanovic *et al.* (2005) destacam que a referida tarefa é complexa, uma vez que o movimento humano depende de diversos fatores internos e externos ao pedestre e como este interage com o ambiente a sua volta. Entretanto, modelos determinísticos no domínio do tempo ou da frequência são encontrados na literatura e utilizados para simular o tráfego de pedestres em variados tipos de passarela.

Um dos principais modelos determinísticos no domínio do tempo foi apresentado por Wheeler (1982) e é empregado para calcular a intensidade das forças verticais durante os movimentos de caminhada e corrida de pedestres. A equação (2.1) replica a função $F(t)$ proposta pelo referido autor, onde são considerados como termos da equação o peso do pedestre (G), o coeficiente de impacto (c_i) e o tempo de contato entre o pé e a estrutura (c_t)

$$F(t) = G \cdot c_i \sin\left(\frac{\pi \cdot t}{c_t}\right) \quad (2.1)$$

Outro método conhecido para determinação da força periódica do movimento humano é expressa por uma série de Fourie, onde o peso do pedestre (G) é acrescido pelo somatório de parcelas harmônicas (Zivanovic *et al.*, 2005). A equação (2.2) apresenta a fórmula matemática proposta pelo método.

$$F(t) = G \cdot \sum G \cdot \alpha_i \cdot \sin(2\pi i f t - \varphi_i); \quad (2.2)$$

A parcela harmônica, conhecida como Fator de carregamento dinâmico (Dynamic load factor - DLF) considera diferentes termos, onde:

α_i = fator dinâmico de carga (ou coeficiente de Fourier) do i -éssimo harmônico;

G = peso de uma pessoa;

f = frequência do movimento repetitivo, em Hz.

$\varphi_{i,v}$ = ângulo de fase do i -éssimo harmônico;

i = número que designa o harmônico;

t = tempo, em segundos.

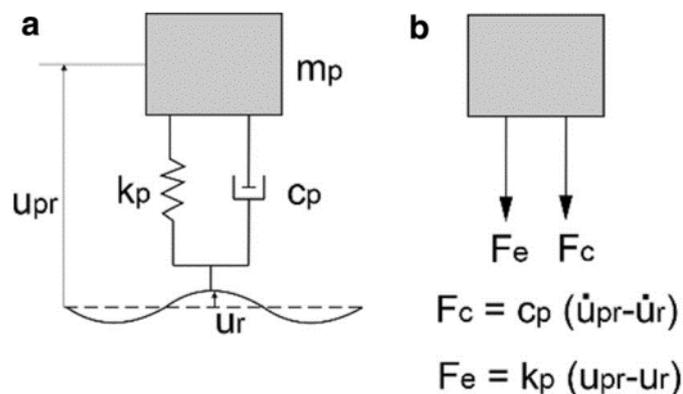
Desde sua apresentação, uma série de pesquisas são desenvolvidas para definição dos melhores coeficientes de Fourier que melhor reproduzam o carregamento relacionado ao movimento humano.

[Dang e Zivanovic \(2015\)](#) realizaram experimentos para monitoramento do movimento humano em superfície rígida para correlação dos principais parâmetros de movimento com o fator de carregamento dinâmico. Para a referida pesquisa, foi proposto um sistema de captura de movimento (Motion Capture System - MCS) composto por 12 câmeras e 34 marcas de captura em cada modelo monitorado. Os autores encontraram relações entre o DLF e a velocidade de caminhada e a frequência de passo.

De modo similar, [Ahmadi et al. \(2018\)](#) realizaram experimentos para determinar valores de referência do DLF a partir do monitoramento de movimentos feitos em superfícies rígidas e flexíveis. O propósito do trabalho é comparar os dados em diferentes superfícies e observar a influência que a vibração da estrutura faria no impacto do movimento. Os autores concluíram que a vibração da superfície flexível reduz significativamente a magnitude da força de caminhada com frequência de passo próximo da frequência de vibração.

Outra abordagem teórica que objetiva reproduzir as forças de reação provocadas pelo movimento humano consiste na elaboração de modelos biodinâmicos. Tais modelos são fundamentados na teoria dinâmica de um grau de liberdade, considerando cada pedestre como um sistema de massa-mola-amortecedor. O modelo em tela busca por meio de uma visão determinística representar de maneira mais precisa o movimento humano, considerando a interação do pedestre com a estrutura em que o mesmo trafega ([BRUNET JR. et al., 2021](#)). A [figura 2.14](#) representa a representação do modelo biodinâmico.

Figura 2.14 – Representação do modelo biodinâmico com um grau de liberdade.



Fonte: ([Varela et al., 2020](#))

Varela *et al.* (2020) conduziram um estudo experimental onde foram colocados 53 voluntários instrumentados com aceleradores junto a cintura para realizar movimentos de caminhada sobre uma plataforma igualmente monitorada. O estudo teve como objetivo definir melhores coeficientes para o modelo de carregamento biodinâmico.

Assim como o modelo dinâmico de um grau de liberdade, o carregamento biodinâmico utiliza os parâmetros de massa (M_p), amortecimento (C_p) e rigidez (K_p). Toso *et al.* (2016) utilizaram uma funções de regressão e redes neurais para correlação dos parâmetros dinâmicos com os parâmetros de massa do pedestre e frequência do movimento. Como conclusão, o autor obteve resultados adequados para as medições de aceleração com o modelo biodinâmico.

3 Normativos relacionados

A avaliação das vibrações das passarelas exige uma consideração abrangente da magnitude, frequências, direção e duração do movimento, com foco na determinação dos valores nos piores cenários. Estes valores estimados são posteriormente comparados com os limites definidos nas normas e guias existentes.

Existem uma série de normas e guias técnicos que recomendam o processo de verificação da resposta dinâmica das estruturas. Nesses documentos são apresentados intervalos de frequência crítica e limites de aceleração aceita para o tipo estrutural, com o objetivo de orientar a elaboração dos projetos de passarelas.

Pode-se mencionar como principais normativos que versam sobre o tema: [CEB \(1991\)](#), [EUROCODE \(2005\)](#), [CSA \(2006\)](#), [SÉTRA \(2006\)](#), [ISO 10137 \(2007\)](#), [AASHTO \(2009\)](#) e [NBR 7187 \(2021\)](#). Dessas, destaca-se a atualização mais recente da [NBR 7187 \(2021\)](#), na qual foi incluído o Anexo C que orienta o cálculo para estimativa da resposta dinâmica de passarelas e estabelece, ainda, os limites de aceleração a ser considerado para cada nível de conforto da estrutura. Nesse contexto, as subseções a seguir resumem os principais normativos associados à vibração de passarelas.

3.1 Bulletin 32 - Guidelines for the design of footbridges

A Federação Internacional do concreto (Fédération Internationale du Béton - fib) realiza, inicialmente, uma abordagem geral ao problema de vibrações em passarela induzidas pela frequência do movimento de pedestres. O boletim 32 ([FIB, 2005](#)) relata que as etapas principais para análise dinâmica de passarela são a elaboração de modelos numéricos, escolha de um modelo de carregamento, análise de frequências e acelerações e comparação com os valores de referência.

Inicialmente, o normativo em questão expõe os principais fundamentos que fundamentam a metodologia de cálculo da força provocada pelo movimento humano. A [equação \(3.1\)](#) que descreve o padrão de força exercida pelos os movimentos de caminhada e corrida é matematicamente descrita como uma série de Fourier, conforme apresentada abaixo.

$$F(t) = F_0 \cdot \sum F_i \cdot \sin(2\pi i f t - \varphi_i); \quad (3.1)$$

Onde:

F_0 = peso de uma pessoa, sugerido pela norma como 800N;

F_i = Participação do i -éssimo harmônico no resultado da carga;

f = frequência do movimento, em Hz .

φ_i = ângulo de fase do i -éssimo harmônico, direção vertical;

i = número que designa o harmônico;

t = tempo, em segundos.

Para utilização da metodologia acima apresentada, o referido boletim sugere para cálculo das forças verticais a aplicação dos coeficientes de fourie e os ângulos de fase definidos por [Bachmann e Ammann \(1987\)](#). Para o presente estudo, replicamos na [tabela 3.1](#) aqueles relacionados a frequência de 2,00 e 2,40 Hz .

Tabela 3.1 – Coeficientes de Fourier e ângulos de fase

Atividade	Frequência (Hz)	Coeficientes de Fourier e ângulo de fase					
		α_1	φ_1	α_2	φ_2	α_3	φ_3
Vertical	2,0	0,4		0,1	$\frac{\pi}{2}$	0,1	$\frac{\pi}{2}$
	2,4	0,5					

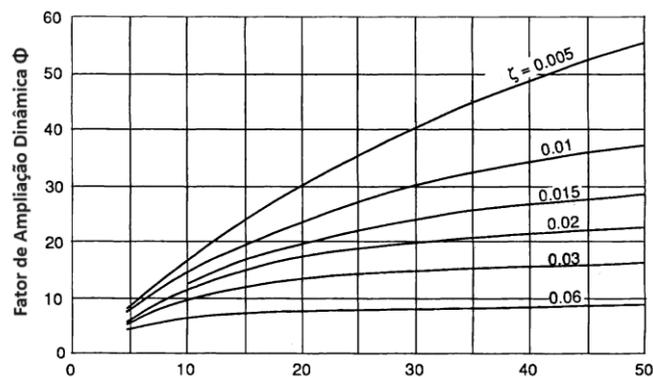
Fonte: (FIB, 2005)

De modo complementar, o boletim apresenta uma metodologia de cálculo para estimativa da aceleração da estrutura, na qual são considerados a frequência natural (f), a deformação estática do meio do vão (y), o coeficiente de Fourier (α_i) referente ao movimento analisado e o fator de ampliação dinâmica (Φ).

$$a_{max} = 4\pi^2 f^2 y \alpha \Phi . \quad (3.2)$$

O fator de ampliação dinâmica (Φ) proposto pela referida federação pode ser extraído do gráfico apresentado na [figura 3.1](#), o qual depende do número de passos dado pelo pedestre para atravessar a passarela e do coeficiente de amortecimento da estrutura.

Figura 3.1 – Fator de ampliação dinâmica.



Fonte: (FIB, 2005)

Objetivando evitar o desconforto dos usuários, o normativo sugere que os valores toleráveis, bem como, a reação humana a essas vibrações sejam sempre consideradas pelos projetistas de passarelas. É relatado, ainda, que a percepção da vibração é subjetiva e depende de condições físicas e psicológicas do pedestre, além de sofrer influencia de parâmetros da estrutura, tais como, frequência, aceleração e tempo de exposição.

O guia apresenta inicialmente um compilado dos critérios de conforto apresentados por outros normativos internacionais. É ressaltado que de forma geral são estipulados faixas de frequência natural para serem evitadas ou limites de aceleração da estrutura.

Entretanto, a FIB apresenta uma nova metodologia composta por duas equações, nas quais são possíveis relacionar os parâmetros de frequência natural (em Hz), aceleração (em m/s^2), velocidade (em m/s) e deslocamento velocidade (em m). O guia aponta que o limite de aceleração baseado no deslocamento pode ser interessante para as estruturas onde a amplitude do movimento da estrutura pode apresentar mais desconforto que a aceleração. A seguir são replicadas as equações do método proposto pela FIB (equação (3.3) e equação (3.4)).

$$a_{max} = (2.\pi.f)^2.\text{deslocamento}; \quad (3.3)$$

$$a_{max} = (2.\pi.f).\text{velocidade}; \quad (3.4)$$

3.2 Eurocode: Basis of structural design

No âmbito do código europeu em pauta (EUROCODE 1, 2003) são especificados os carregamentos de análise para passarelas de pedestres. De modo complementar, os limites máximos de serviço aceitos para a estrutura são complementados pelo EUROCODE (2005), especificamente no item A2.4.3.2.

Inicialmente, fica estabelecido para as análises a aplicação de um carregamento uniformemente distribuído (q_{fk}) no valor recomendado entre 2,50 e 5,00 kN/m^2 nos locais de maior influência longitudinal e transversal, visando reproduzir a condição mais desfavorável de carregamento. O valor aplicado à força especificada pode ser definido por meio da equação (3.5).

$$q_{fk} = 2 + \frac{120}{L + 30} \quad (3.5)$$

O carregamento uniformemente distribuído (q_{fk}) proposto pela norma em pauta é função do comprimento total da estrutura (L), em metros. Adicionalmente, são definidas cargas pontuais (Q_{fwk}) no valor recomendado de 10 kN para reprodução de efeitos locais na estrutura. No mesmo sentido, é prescrito a aplicação de forças pontuais horizontais, cuja magnitude recomendada é de 0,10% da carga uniformemente distribuída (q_{fk}).

O normativo destaca ainda que o modelo de carga descrito deve ser utilizado para análise dos estados de limite de serviço e último. Reporta ainda que no âmbito do estado limite de serviço deve-se atentar para as diversas origens das vibrações em passarelas, podendo ser pelo tráfego de pedestres, vento, etc.

Outro ponto de atenção ressaltado pelo [EUROCODE 1 \(2003\)](#) é a importância das frequências naturais da estrutura para a análise de vibrações, sempre observando as situações em que a frequência do carregamento é igual à da estrutura. Ainda, a depender da área do tabuleiro da passarela, o normativo recomenda considerar o tráfego de grupos de 8 a 15 pessoas visando conhecer o comportamento da estrutura. Outrossim, inclui-se em análises mais aprofundadas a necessidade de considerar o tráfego de maiores grupos de pessoas, tais como em eventos ou festividades ocasionais.

O código em pauta rememora que o tipo de força exercida pelos pedestres depende da localidade da passarela, bem como, das características dos usuários. De maneira generalizada, o normativo apresenta as frequências características dos movimentos humanos no intervalo entre 1,00 e 3,00 *Hz* para movimentos verticais e entre 0,50 e 1,50 *Hz* para movimentos horizontais.

Cabe aqui destacar que quando a frequência do movimento é próxima à frequência natural da estrutura ocorre o fenômeno de ressonância, o qual amplifica as acelerações da estrutura e cuja ocorrência deve ser evitado. Por esse motivo, o [EUROCODE \(2005\)](#) determina a análise detalhada de todas as estruturas cuja primeira frequência correspondente a um modo de flexão vertical seja menor que 5,00 *Hz* e 2,50 *Hz* quando se trate de um modo de flexão horizontal.

Por fim, ficam estabelecidos no [EUROCODE \(2005\)](#) os limites de vibração aceitos pelo estado limite de serviço. Os valores considerados máximos aceitáveis estão elencados a seguir:

- 0.7 m/s^2 para vibrações na direção vertical;
- 0.2 m/s^2 para vibrações na direção horizontal;
- 0.4 m/s^2 para situações de multidão.

3.3 Footbridges - Assessment of vibrations behaviour of footbridges

O capítulo 4 do [SÉTRA \(2006\)](#) trata da metodologia de realização da análise dinâmica em passarelas. A metodologia expressa tem como objetivo minimizar os riscos de ressonância da estrutura, considerando os casos de carregamento propostos. Outrossim, estabelece limites de aceleração aceitáveis para o conforto do usuário, conforme detalhado nos itens a seguir.

Em resumo, a metodologia se inicia com a classificação da passarela conforme o nível

de tráfego previsto. O guia determina 4 classes de passarelas, conforme descrito a seguir:

- Classe I: Passarelas localizadas em trechos urbanos com alta densidade populacional. Entende-se que as passarelas dessa classe estão submetidas ao trânsito pesado de pedestres;
- Classe II: Passarela localizada em trecho urbano submetida, ocasionalmente, ao carregamento total de sua área;
- Classe III: Passarela utilizada, eventualmente, por grandes grupos, mas sem atingir sua capacidade máxima;
- Classe IV: Passarela construída para conexão de cidades distantes, raramente utilizada.

A respeito da classificação apresentada, cabe aqui destacar que a escolha deve ser feita pelo projetista da estrutura com base no local de construção previsto que apresentaria o pior cenário dinâmico. Ainda, o guia abre espaço para que as estruturas sejam rotuladas em classes maiores para conferir a estas menores níveis de vibração. Por fim, define-se que as passarelas classificadas no nível IV não necessitam de verificações dinâmicas adicionais.

Uma vez definida a classe da estrutura, deve-se reconhecer o nível de conforto a ser esperado pelos pedestres durante a travessia. Destaca-se que o conceito de conforto é subjetivo e depende de cada indivíduo experienciando as vibrações e deslocamentos da estrutura. O conforto a ser aplicado depende do trânsito de pedestres estimado, o nível de importância da passarela e da sensibilidade dos pedestres que à utilizarão.

Para o nível de conforto, o guia técnico da [SÉTRA \(2006\)](#) apresenta os seguintes níveis.

- Conforto Máximo: A vibração da estrutura é imperceptível pelos pedestres;
- Conforto Médio: A vibração da estrutura é pouco percebida pelos usuários;
- Conforto Mínimo: A vibração da estrutura é altamente percebida, mas não impõe desconforto ao usuário;

Ressalta-se que o nível de conforto é definido pela aceleração da estrutura, tendo o referido guia delimitado as faixas de aceleração para cada nível apresentado. Os valores de referência devem ser calculados para cada estrutura com a aplicação de diferentes hipóteses de carregamento. A [tabela 3.2](#) e [tabela 3.3](#), a seguir, mostram os intervalos de valores definidos para as acelerações verticais e horizontais, respectivamente, e os níveis de conforto esperados.

Tabela 3.2 – Intervalo de acelerações vertical por nível de conforto.

	Nível de conforto	Aceleração (m/s^2)
Intervalo 1	Máximo	Abaixo 0,50
Intervalo 2	Médio	0,50 a 1,00
Intervalo 3	Mínimo	1,00 a 2,50
Intervalo 4	Inaceitável	Acima de 2,50

Fonte: (SÉTRA, 2006)

Tabela 3.3 – Intervalo de acelerações horizontal por nível de conforto.

	Nível de conforto	Aceleração (m/s^2)
Intervalo 1	Máximo	Abaixo 0,10
Intervalo 2	Médio	0,10 a 0,30
Intervalo 3	Mínimo	0,30 a 0,80
Intervalo 4	Inaceitável	Acima de 0,80

Fonte: (SÉTRA, 2006)

Ainda nesse contexto, ressalta-se a possibilidade de ocorrência do fenômeno conhecido como *lock-in*. Esse fenômeno ocorre quando uma multidão aleatória de pedestres sincroniza, gradualmente, a frequência de seus movimentos com a frequência natural da estrutura. Essa sincronização forçada amplia a magnitude das acelerações e vibrações da passarela. O guia técnico citado recomenda a manutenção da aceleração horizontal em no máximo $0,10 m/s^2$, de modo a evitar o fenômeno de *lock-in*.

Intervalos das Frequências - Risco de ressonância

Para as estruturas consideradas nas classes I, II e III, deve-se determinar a frequência natural de vibração nas três direções principais, a saber, vertical, horizontal transversal e horizontal longitudinal. Ainda, é esperado a análise das frequências em duas diferentes situações de massa, sendo elas: passarela totalmente vazia e passarela totalmente carregada com aplicação de uma massa de $70 kg$ por metro quadrado.

O cálculo das frequências naturais é importante para conhecer o risco que a estrutura possui para entrar em ressonância. Face ao exposto, o normativo em tela define quatro faixas de frequências nas três direções detalhas acima, nas quais classificam-se o risco de ressonância da estrutura com o caminhar dos pedestres. Os valores estabelecidos pelo guia e a graduação do risco são apresentados na [tabela 3.4](#) e [tabela 3.5](#).

Tabela 3.4 – Intervalo de frequência verticais com risco de ressonância.

	Risco de ressonância	Frequência (Hz)
Intervalo 1	Alto	1,70 a 2,10
Intervalo 2	Médio	1,00 a 1,70 e 2,10 a 2,60
Intervalo 3	Baixo	2,60 a 5,00
Intervalo 4	Ausente	Abaixo de 1,00 ou acima de 5,00

Fonte: (SÉTRA, 2006)

Tabela 3.5 – Intervalo de frequência horizontais com risco de ressonância.

	Risco de ressonância	Frequência (Hz)
Intervalo 1	Alto	0,50 a 1,10
Intervalo 2	Médio	0,30 a 0,50 e 1,10 a 1,30
Intervalo 3	Baixo	1,30 a 2,50
Intervalo 4	Ausente	Abaixo de 0,30 ou acima de 2,50

Fonte: (SÉTRA, 2006)

Ademais, o guia orienta à realização de análises detalhadas com a simulação de um carregamento variável na estrutura projetada. O carregamento simulado é definido em 3 formas distintas para aplicação no modelo. Cada caso de carregamento está relacionado com a faixa de frequência natural da estrutura e com a classificação quanto ao fluxo de pedestres, conforme [tabela 3.6](#).

Tabela 3.6 – Caso de carregamento para análise de passarela.

Tráfego	Classe	Intervalo de frequência		
		1	2	3
Espaçado	III	Caso 1	-	-
Denso	II		Caso 1	Caso 3
Muito denso	I	Caso 2	Caso 2	Caso 3

Fonte: (SÉTRA, 2006)

A análise dinâmica complementar deve possibilitar o cálculo das acelerações da estrutura, para que seja conhecido o nível de conforto gerado aos pedestres. O guia define três hipóteses de carregamento a ser aplicado à estrutura, os quais serão detalhados a seguir.

Caso de carregamento

Inicialmente, o [SÉTRA \(2006\)](#) estipula os carregamentos a serem aplicados para que seja reproduzido os efeitos de poucos ou muitos pedestres utilizando a passarela. A seguir, detalham-se os casos de carregamento definidos pelo guia.

Caso 1: Multidão espaçada ou densa

Recomenda-se utilizar o caso 1 nas passarelas definidas como classe II ou III, onde a densidade de pedestres esperada é de 0,80 e 0,50 *pedestres/m²*, respectivamente. Considerando as principais direções analisadas, a saber vertical, transversal e longitudinal, o guia define a equação (3.6), a equação (3.8) e a equação (3.7), as quais governam o comportamento do carregamento em tela.

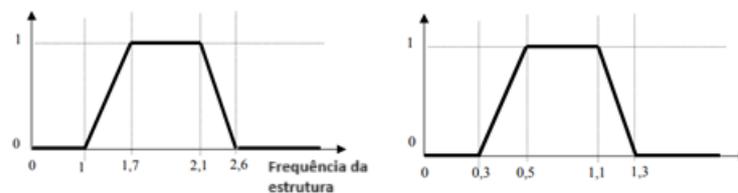
$$F(t)_v = d.(280N). \cos(2\pi f_v t). 10,8. \left(\frac{\xi}{n_p}\right)^{\frac{1}{2}}. \Psi_r \quad (3.6)$$

$$F(t)_l = d.(140N). \cos(2\pi f_l t). 10,8. \left(\frac{\xi}{n_p}\right)^{\frac{1}{2}}. \Psi_r \quad (3.7)$$

$$F(t)_t = d.(35N). \cos(2\pi f_t t). 10,8. \left(\frac{\xi}{n_p}\right)^{\frac{1}{2}}. \Psi_r \quad (3.8)$$

Destaca-se a utilização do fator Ψ , o qual reflete no carregamento o risco de ressonância observado para a estrutura e é definido pelo gráfico apresentado na figura 3.2. O fator citado varia de 0 a 1, sendo seu valor relacionado à frequência natural da estrutura, conforme definido no guia. Os demais parâmetros da equação estão relacionados à configuração da estrutura, tal como, razão de amortecimento (ξ), número de pedestres efetivo (n_p), frequência calculada para a direção (f) e densidade de pedestres definida (d).

Figura 3.2 – Gráfico do fator Ψ para vibração vertical e longitudinal (esquerda) e transversal (direita).



Fonte: (SÉTRA, 2006)

Ademais, o guia técnico recomenda que o carregamento deve ser aplicado em toda a área da estrutura, selecionando sempre a direção mais desfavorável para a análise. Ressalta-se, também, que as equações propostas não consideram o carregamento estático provocado pelo pedestre durante a travessia. Contudo, para a análise dinâmica em tela, deverá ser considerada a massa do pedestre na matriz de massa da passarela.

Caso 2 – Multidão muito densa

O caso 2 de carregamento é sugerido para as passarelas da classe I, onde a densidade de pedestres esperada é de 1 pedestre/m². Considerando as principais direções analisadas, o guia define a equação (3.9), a equação (3.11) e a equação (3.10).

$$F(t)_v = 1,0.(280N). \cos (2\pi f_v t).10,8.\left(\frac{\xi}{n_p}\right)^{\frac{1}{2}}.\Psi \quad (3.9)$$

$$F(t)_l = 1,0.(140N). \cos (2\pi f_l t).10,8.\left(\frac{\xi}{n_p}\right)^{\frac{1}{2}}.\Psi \quad (3.10)$$

$$F(t)_t = 1,0.(35N). \cos (2\pi f_t t).10,8.\left(\frac{\xi}{n_p}\right)^{\frac{1}{2}}.\Psi \quad (3.11)$$

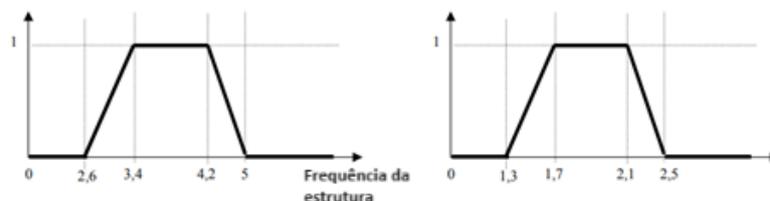
Observa-se a aplicação do fator Ψ , cujo valor é definido gráfico da [figura 3.2](#). Ainda, as outras variáveis da equação estão relacionadas à configuração da estrutura, tal como, número de pedestres efetivo (n_p) e frequência calculada para a direção analisada (f).

Caso 3 – Efeito do segundo harmônico de multidão

O 3º caso de carregamento deve ser aplicado às classes I e II de passarela, nas quais são esperadas densidades de 1,0 e 0,8 *pedestres/m²*, respectivamente. Nessa situação, deve-se considerar apenas o segundo harmônico da tensão causada pelos pedestres, o qual é o dobro da frequência do primeiro harmônico, aproximadamente.

A multidão proposta no presente caso de carregamento é composta por indivíduos que exercem força igual à 70 N na vertical, 7 N na transversal e 35N longitudinalmente. Ainda, utiliza-se o fator Ψ , apresentado na [figura 3.3](#), para ponderar as imprecisões entre as frequências do carregamento e as frequências naturais da estrutura.

Figura 3.3 – Gráfico do fator Ψ para vibração vertical (esquerda) e lateral (direita).



Fonte: (SÉTRA, 2006)

3.4 Canadian Highway Bridge Design Code

O código canadense para projeto de pontes rodoviárias (CSA, 2006) versa no item C3.4.4. sobre os limites de serviço de pontes e passarelas. Inicialmente, destaca que as passarelas são estruturas com baixos valores de amortecimento e que podem apresentar vibrações significativas perante o tráfego de pedestres. Ainda, recomenda que as passarelas que possuem frequências naturais abaixo de 4,00 Hz devem ser analisadas com maior cautela, devido à proximidade dessas frequências com as do caminhar. De igual modo,

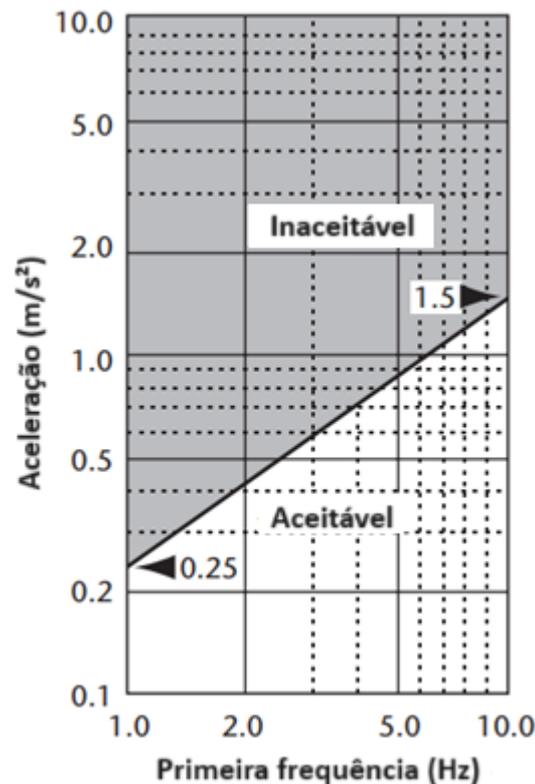
sugere análises mais detalhadas nos casos em que a posição da passarela promova tráfego intenso de pedestres caminhando ou correndo.

Para análise das vibrações induzidas na estrutura, o normativo em pauta prescreve a utilização de um comprimento de passo de 0,90 metros ou outro comprimento que proporcione uma velocidade de pelo menos 2,50 m/s com a frequência do movimento próxima à primeira frequência natural da estrutura. O parâmetro de frequência (f) adotado a partir das indicações acima para o movimento do pedestre deve ser aplicado na função de carregamento ($F(t)$) apresentada na equação (3.12).

$$F(t) = 180 \sin(2\pi ft); \quad (3.12)$$

Considerando a aplicação de carga acima relatada, o código indica que um único pedestre com força estática de 700 N não deve induzir uma aceleração maior que os limites apresentados no ábaco, o qual estabelece as condições aceitáveis e inaceitáveis em função da primeira frequência natural da estrutura e das acelerações encontradas (figura 3.4).

Figura 3.4 – Acelerações limites para estado de serviço.



Fonte: (CSA, 2006)

Em outra direção, o normativo em destaque apresenta uma formulação simplificada para estimativa da aceleração de passarelas com um, dois ou três vãos. Essa estimativa é

indicada pelo código para as estruturas quando não é realizado a análise dinâmica acima mencionada. A aceleração máxima (a_{max}) pode ser calculada pela equação (3.13):

$$a_{max} = 4\pi^2 f^2 y k_{forma} \Psi; \quad (3.13)$$

Na formulação acima são considerados a primeira frequência natural da estrutura (f), a deflexão máxima (y) da passarela devido à aplicação de uma força estática de 700 N, o coeficiente de forma (k_{forma}) e o fator de resposta dinâmica (Ψ_d).

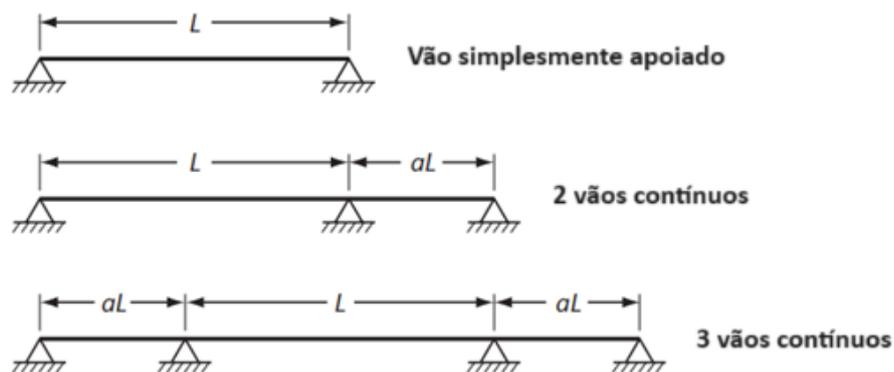
Para a definição do coeficiente de forma (k_{forma}) são apresentadas configurações de vãos tabelados e relacionadas aos respectivos valores de K_{forma} . A figura 3.5 apresenta os formatos considerados e os valores correspondentes.

Figura 3.5 – Coeficiente de forma K_{forma} .

Fator a - Vãos laterais	2 vãos contínuos	3 vãos contínuos
1.0	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

Notes:

- (1) As configurações são apresentadas abaixo
- (2) $K = 1,00$ para vão simples



Fonte: (CSA, 2006)

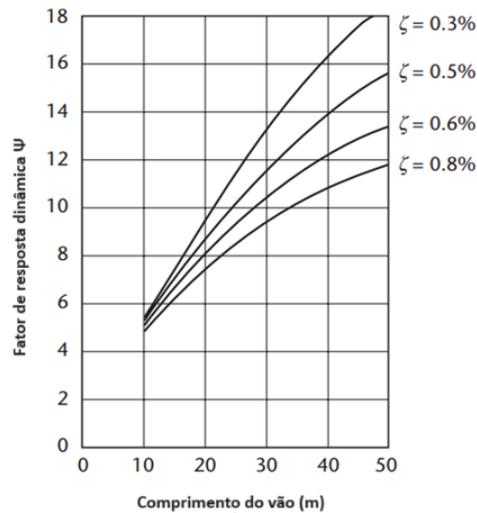
Ainda, o fator de resposta dinâmica (Ψ) é definido de acordo com a relação de amortecimento previsto para a estrutura analisada. Não havendo maiores informações sobre a relação de amortecimento, o código recomenda a adoção dos seguintes valores em relação ao sistema construtivo da estrutura:

- Superestrutura metálica com pavimento asfáltico: 0,50%;
- Superestrutura mista aço-concreto: 0,60%;

- Superestrutura de concreto armado ou protendido: 0,80%;

Uma vez definidos o comprimento total da estrutura e o coeficiente de amortecimento, o fator de resposta dinâmica pode ser definido com a utilização do gráfico a seguir (figura 3.6).

Figura 3.6 – Fator de resposta dinâmica.



Fonte: (CSA, 2006)

Por fim, a norma indica a adoção de um fator de redução de 70% da aceleração calculada para as estruturas cuja primeira frequência natural é igual ou maior que 5,00 Hz. Ademais, destaca que os casos em que são apresentados riscos de vibração excessiva ou onde os critérios normativos exigirem uma estrutura economicamente inviável deve ser considerar a utilização de atenuadores dinâmicos que aumentem o coeficiente de amortecimento da passarela.

3.5 Bases for design of structures – Serviceability of buildings and walkways against vibrations

A ISO 10137 (2007) descreve as condições para análise e avaliação de prédios e passarelas submetidas a vibrações. Destaca, inicialmente, que a análise de vibrações em estruturas deve ser realizada considerando, de modo geral, as características da fonte de vibração, o meio pelo qual a vibração é propagada e as pessoas ou objetos que interagem com a estrutura vibrando, definido pela norma como “receptores” da vibração.

Ademais, é ressaltado que as passarelas estão, primordialmente, expostas às forças dos pedestres ligadas ao caminhar, correr e/ou pular. Entretanto essas estruturas também são vulneráveis aos fenômenos da natureza, tais como ventos, terremotos e outros, os quais podem produzir efeitos vibratórios.

Ainda, a norma assume que as forças produzidas pelos pedestres dependem das

características físicas deles e do movimento, seja caminhada ou corrida. Um comportamento aproximado dessa força na direção vertical e horizontal pode ser expresso por uma série de Fourier no domínio da frequência, conforme equações abaixo

$$F(t)_v = G.(1 + \sum \alpha_{i,v}. \sin (2\pi ft - \varphi_{i,v})) \quad (3.14)$$

$$F(t)_h = G.(1 + \sum \alpha_{i,h}. \sin (2\pi ft - \varphi_{i,h})) \quad (3.15)$$

Onde:

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

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

G = peso de uma pessoa;

f = frequência do movimento repetitivo (que para a direção horizontal é metade do valor da direção vertical), em Hz.

$\varphi_{i,v}$ = ângulo de fase do i-éssimo harmônico, direção vertical;

$\varphi_{i,h}$ = ângulo de fase do i-éssimo harmônico, direção horizontal;

i = número que designa o harmônico;

t = tempo, em segundos.

O normativo traz ainda os coeficientes numéricos para utilização nos harmônicos da serie de Fourier proposta. Destaca-se que os maiores números harmônicos geralmente possuem menor representatividade na composição da força do movimento humano. A [tabela 3.7](#) apresenta os coeficientes definidos pela [ISO 10137 \(2007\)](#).

Seguindo as recomendações do presente normativo, é necessário a análise das vibrações horizontais para as passarelas cuja primeira frequência horizontal é menor que 1,30 Hz. Para a análise dinâmica de passarelas, recomenda-se que seja selecionado o cenário de carregamento que mais se adéqua à estrutura durante sua vida útil, considerando:

- Uma pessoa atravessando a passarela e outra (recebedor) parada no meio do vão;
- A travessia de um grupo de pedestres entre 8 e 15 pessoas;
- A ocorrência de grande fluxo de pedestres (mais que 15 pessoas);
- Situações festivas ou eventos relevantes.

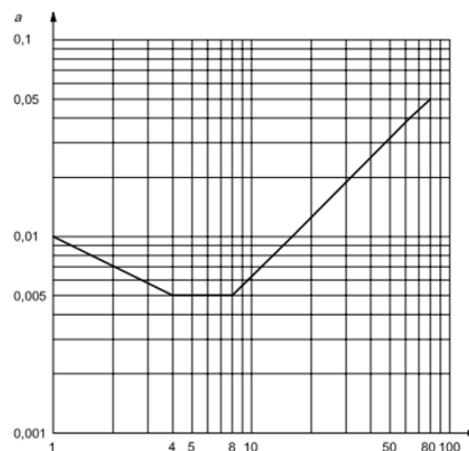
A [ISO 10137 \(2007\)](#) estabelece curvas base de aceleração relacionadas à frequência natural da estrutura. Assim, indica que as acelerações verticais e horizontais não podem exceder 60 vezes a aceleração encontrada para a curva base respectiva a cada movimento. Abaixo é apresentada a curvas base referênte a aceleração vertical ([figura 3.7](#)).

Tabela 3.7 – Coeficientes numéricos para série de Fourier.

Atividade	Número do Harmônico	Intervalo de Frequência (Hz)	Coeficiente Vertical	Coeficiente Horizontal
Caminhada	1º	1,2 a 2,4	$0,37(f - 1,0)$	0,1
	2º	2,4 a 4,8	0,10	
	3º	3,6 a 7,2	0,06	
	4º	4,8 a 9,6	0,06	
	5º	6,0 a 12,0	0,06	
Corrida	1º	2,0 a 4,0	1,40	0,2
	2º	4,0 a 8,0	0,40	
	3º	6,0 a 12,0	0,10	

Fonte: (ISO 10137, 2007)

Figura 3.7 – Curva base para aceleração vertical.



Fonte: (ISO 10137, 2007)

3.6 Guide specifications for design of pedestrian bridges

O guia de especificações para projeto de passarela elaborado pela [AASHTO \(2009\)](#) apresenta orientações para verificação do desempenho dinâmico das passarelas e regras que garantem a estabilidade e o conforto da estrutura. De modo inicial, é proposto pela referida associação a aplicação de um carregamento estático de 90 psf ($4,31 \text{ kN/m}^2$) com o objetivo de simular o carregamento dos pedestres na estrutura. Ainda, o referido guia dispensa a análise de carregamento dinâmico com a aplicação da carga estática acima detalhada.

Referente aos requisitos dinâmicos, o normativo define que as estruturas devem possuir frequências naturais verticais acima de $3,00 \text{ Hz}$ e horizontais acima de $1,30 \text{ Hz}$. As estruturas que não cumprem esses requisitos devem ser objeto de uma análise da performance dinâmica, na qual devem ser considerados:

- A frequência e magnitude do movimento do pedestre;
- A sincronização e os efeitos de multidão;
- Uma estimativa precisa da taxa de amortecimento da passarela;
- Os limites de aceleração e velocidade.

Outrossim, a referida norma apresenta uma formulação simplificada (Eq. 3.16 e Eq. 3.17), onde são relacionados a frequência natural vertical (f_v) e o peso próprio da estrutura (W). A equação em questão objetiva estimar o peso necessário para que a primeira frequência vertical da estrutura projetada cumpra o limite de 3,00 Hz. Cabe destacar que para utilização da equação proposta é necessário a utilização da unidade *kip* para o peso próprio da estrutura.

$$f_v \geq 2,86 \ln \left(\frac{180}{W} \right) . \quad (3.16)$$

$$W \leq 180e^{-0,35f_v} . \quad (3.17)$$

3.7 NBR 7187 - Projeto de pontes, viadutos e passarelas de concreto

No âmbito nacional, a **NBR 7187 (2021)** trouxe em sua última atualização o anexo C, o qual trata da análise dinâmica de passarelas. Ele traz critérios para calcular e verificar a aceleração vertical e horizontal da estrutura, definindo ainda, limites para classificação do nível de conforto do usuário. A seguir, será apresentado a metodologia apresentada pela norma.

A resposta da estrutura deve ser estimada com base no caminhar dos pedestres sobre a plataforma. Para isso, a norma em tela recomenda a adoção do peso médio de cada pedestre sendo 75 kg. Ainda, fazem parte das equações apresentadas os parâmetros característicos da estrutura e do carregamento, como por exemplo, o parâmetro de amortecimento (ξ), a frequência própria da estrutura (f), a massa modal (M_i) e o número de pessoas na passarela ($d.L.b$). Considerando o exposto, a aceleração é calculada pela equação (3.18), equação (3.19) e equação (3.20).

$$a_{max} = k_{a,95\%} \cdot \frac{d.L.b}{M_i} \cdot \sqrt{C \cdot k_f^2 \cdot K_1 \cdot \xi^{k_2}} . \quad (3.18)$$

$$k_1 = a_1 \cdot f^2 + a_2 \cdot f + a_3 . \quad (3.19)$$

$$k_2 = b_1 \cdot f^2 + b_2 \cdot f + b_3 . \quad (3.20)$$

Cabe ressaltar que as demais incógnitas da equação (C , K_f , $K_{a,95\%}$, k_1 e k_2) são valores tabelados pela própria norma e obtidas por meio da [tabela 3.8](#) e [tabela 3.9](#).

Tabela 3.8 – Constantes para aceleração vertical.

$d (P/m^2)$	$K_f (kN)$	C	a_1	a_2	a_3	b_1	b_2	b_3	$k_{a,95\%}$
$\leq 0,5$	$1,2010^{-2}$	2,95	-0,07	0,60	0,075	0,003	-0,040	-1,000	3,92
1,0	$7,00.10^{-3}$	3,70	-0,07	0,56	0,084	0,004	-0,045	-1,000	3,80
1,5	$3,34.10^{-3}$	5,10	-0,08	0,50	0,085	0,005	-0,060	-1,005	3,74

Fonte: (NBR 7187, 2021)

Tabela 3.9 – Constantes para aceleração horizontal.

$d (P/m^2)$	$K_f (kN)$	C	a_1	a_2	a_3	b_1	b_2	b_3	$k_{a,95\%}$
$\leq 0,5$		6,80	-0,08	0,50	0,085	0,005	-0,060	-1,005	3,77
1,0	$2,85.10^{-4}$	7,90	-0,08	0,44	0,096	0,007	-0,071	-1,000	3,73
1,5		12,60	-0,07	0,31	0,120	0,009	-0,094	-1,020	3,63

Fonte: (NBR 7187, 2021)

Ainda, a NBR 7187 indica níveis de conforto que se relacionam com intervalos de acelerações da estrutura induzidas pela pelo movimento humano. Os valores de referências estão apresentados na [tabela 3.10](#) e [tabela 3.11](#).

Tabela 3.10 – Nível de conforto de acelerações verticais.

	Nível de conforto	Aceleração (m/s^2)
Intervalo 1	Máximo	Abaixo de 0,50
Intervalo 2	Médio	0,50 a 1,00
Intervalo 3	Mínimo	1,00 a 2,50
Intervalo 4	Inaceitável	Acima de 2,50

Fonte: (NBR 7187, 2021)

Tabela 3.11 – Nível de conforto de acelerações horizontal.

	Nível de conforto	Aceleração (m/s^2)
Intervalo 1	Máximo	Abaixo de 0,10
Intervalo 2	Médio	0,10 a 0,30
Intervalo 3	Mínimo	0,30 a 0,80
Intervalo 4	Inaceitável	Acima de 0,80

Fonte: (NBR 7187, 2021)

O nível de conforto que se espera da estrutura deve ser definido pelo projetista e guarda relação com o tipo de passarela projetada. A referida norma traz uma referência de sensibilidade para cada nível de conforto proposto, conforme apresentado a seguir:

- Conforto Máximo: A vibração da estrutura é imperceptível pelos pedestres;
- Conforto Médio: A vibração da estrutura é pouco percebida pelos usuários;
- Conforto Mínimo: A vibração da estrutura é altamente percebida, mas não impõe desconforto ao usuário;
- Conforto inaceitável: Aceleração perceptíveis e não toleráveis.

4 Ferramenta Computacional

Para resolução dos mais diversos problemas de engenharia, utiliza-se softwares de elementos finitos que simulam e analisam as estruturas modeladas, buscando estimar o comportamento delas perante as mais diversas situações. Dentre os softwares disponíveis, foram utilizados no presente trabalho o ANSYS Workbench e o Simulador de Pessoas em Movimento (PSM).

4.1 Ansys Workbench

Amplamente utilizado na engenharia, o Método dos Elementos Finitos (MEF) é uma metodologia de análise para estimativa do comportamento das peças de uma estrutura, a partir da subdivisão de estruturas robustas em elementos finitos de menor complexidade. Cada elemento finito tem sua área de contribuição definida e são interconectados por meios dos pontos nodais. O comportamento final da peça é obtido a partir da soma das contribuições calculadas para cada um desses elementos em cada ponto da estrutura.

O ANSYS workbench é um software de modelagem de elementos finitos desenvolvido para resolução de uma diversidade de problemas mecânicos. Sua capacidade abrange análises estáticas e dinâmicas, estruturais (lineares e não lineares), transferência de calor, problemas fluidodinâmicos, além de incluir tratamento de problemas nas áreas de acústica e eletromagnetismo. Em geral, a utilização do programa pode ser dividida em três passos gerais, conforme descritos a seguir (Nakasone *et al.*, 2006).

A etapa de pré-processamento inicia a análise do método dos elementos finitos. Nele são definidos os principais pontos do problema, como por exemplo a geometria da estrutura, as propriedades dos materiais, a configuração da malha e os pontos de interesse da análise.

Em seguida, na etapa de solução são definidos os principais carregamentos e condições de contorno do problema. A partir do tipo de análise realizada, o programa realiza a resolução de uma série de equações para indicar o comportamento da estrutura modelada.

Por fim, os resultados da análise são extraídos na etapa de pós-processamento. Os resultados podem mostrar comportamentos importantes da estrutura, tais como, deslocamentos, acelerações, temperaturas, deformações e tensões, a depender do tipo de análise realizada.

4.1.1 Tipo de análise

O software ANSYS realiza sete diferentes tipos de análise estática e dinâmica, das quais importa ao presente trabalho destacar a análise estática, análise modal, análise transiente.

A análise estática é utilizada para estimativa dos valores de deslocamento, tensão e

outras grandezas físicas submetendo a estrutura a um carregamento fixo e pré-determinado. Por outro lado, a análise modal se destina a estimar as frequências naturais da estrutura simulada e os principais modos de vibração esperados. No mesmo sentido, a análise dinâmica transiente apresenta o comportamento da estrutura a um carregamento variável no tempo.

4.1.2 Elementos finitos

Assim como no trabalho realizado por [Pereira \(2017\)](#), para modelagem de passarelas, utiliza-se três elementos finitos, a saber, BEAM188, SHELL181 e MASS21.

Inicialmente, destaca-se elemento BEAM188, o qual possui geometria linear e é formado por 2 (dois) nós. Cada nó desse elemento possui 6 (seis) graus de liberdade, sendo eles translações e rotações nas direções x, y e z. Os efeitos de deformação por cisalhamento são considerados, conforme a Teoria de Timoshenko. Sua utilização é recomendada para elementos lineares, tais como as vigas da treliça warren da presente passarela.

O elemento SHELL181 é um elemento de casca, o qual é aplicado para simulação das peças cuja aplicação do carregamento é perpendicular ao plano. É formado por 4 (quatro) nós com 6 (seis) graus de liberdade cada um. No modelo proposto nesse trabalho, o elemento SHELL181 é aplicado em todo o tabuleiro da passarela simulando o comportamento da laje de concreto e steel deck.

Por fim, o elemento finito MASS21 é utilizado para simular objetos sem função estrutural que contribuem para a massa total da estrutura e para o momento de inércia na translação e na rotação da estrutura. É aplicado para simulação dos corrimões, do guarda corpo existente na estrutura e, quando necessário, a presença de pedestres no tabuleiro.

4.1.3 Malha de elementos finitos

A malha de elementos finitos é definida pela quantidade ótima de elementos que fornecem os resultados mais precisos possíveis com o menor custo computacional. Ao passo em que se aumenta ou diminui a quantidade de elementos da malha, é possível perceber e entender a sensibilidade da resposta em relação a quantidade de elementos. Para ser considerada uma malha satisfatória, espera-se que os resultados obtidos convirjam para aqueles esperados. Desse modo, a malha de elementos finitos utilizada no presente modelo foi definida após diversos testes de convergência.

Para o teste de convergência inicial, optou-se por utilizar a análise estática do software Ansys com a aplicação da aceleração da gravidade no modelo desenvolvido para a passarela, uma vez que a referida análise é a mais simplificada e de rápida resolução. Como resultado da análise estática, foram observados os valores de deslocamento total para diferentes distribuições de malha e quantidades de elementos.

Posteriormente, realizou-se o teste de convergência com a utilização da análise modal da estrutura. Justifica-se a utilização da análise modal, uma vez que o resultado obtido na

referida análise é parâmetro de extrema importância para os objetivos desse trabalho. Desse modo, nova análise de convergência foi realizada para obter maior precisão dos valores das primeiras frequências naturais com o menor custo computacional.

4.1.4 Algoritmo de integração

A análise dinâmica de estrutura é realizada a partir da resolução de um sistema global de equações diferenciais de segunda ordem de equilíbrio, conforme [equação \(4.1\)](#):

$$[M](t).\ddot{u}(t) + [C](t).\dot{u}(t) + [K](t).u(t) = F(t) \quad (4.1)$$

Quando tratamos de análise transiente, a resposta da estrutura pode ser definida no domínio da frequência ou do tempo, de acordo com a informação requerida. Os métodos de superposição modal e integração direta são os meios utilizados para análise da resposta estrutural no domínio do tempo. No presente trabalho, optou-se por utilizar o método de integração direta, uma vez que esse é menos restritivo. Entre os procedimentos de integração, utiliza-se aqueles mais estáveis, tal como, a Integração de Newmark.

Para utilização do método descritos, sabe-se que é importante a definição do intervalo de tempo para integração das equações de movimento. O valor a ser escolhido deve se manter dentro de um intervalo ótimo, de modo que não haja prejuízo à solução encontrada e, de modo semelhante à convergência da malha, utilize o menor custo computacional.

4.2 Simulador de Pessoas em Movimento - PSM

O programa de simulação de pessoas em movimento foi desenvolvido inicialmente por [Estefani \(2000\)](#) e aprimorado por [Gomes \(2006\)](#) para simulação do tráfego de pedestres em uma estrutura. O software em tela realiza os cálculos dos esforços produzidos pelo movimento humano de caminhada e corrida e distribui as forças atuantes nos nós do modelo numérico.

Entende-se que a tabela de cargas fornecidas pelo software representa as forças induzidas pelo tráfego de pedestre em uma superfície. Assim, considerando a validação do programa em outras pesquisas, tal como aquela desenvolvida por [Gomes \(2006\)](#), optou-se pela utilização do presente software neste trabalho.

O programa apresenta uma janela interativa para inclusão das principais informações referentes à estrutura, ao movimento humano a ser simulado e à simulação a ser realizada. O modelo da tela interativa esta apresentado na [figura 4.1](#)

```

C:\Users\andre\OneDrive\Doc x + v
Forma a ser escrita: no1 (enter),no2(enter),...
1
Qual o comprimento dos vaos? (em metros)
2,50
Qual o tamanho medio do passo? (em metros)
0,75
Qual o tempo de contato de cada pe com o solo?
1
Qual a velocidade do passo? (m/s)
1
Qual o intervalo de tempo que se deve
realizar as medicoes da forca? (s)
1
Qual a o forca estatica exercida
por cada individuo?
700,0
Qual o coeficiente de impacto?
1,1
Que tipo de analise deseja fazer?
"1" - Pessoas no mesmo sentido
"2" - Pessoas em sentidos opostos
1
Quantos individuos farao o movimento?
10
Qual o tempo de defasagem entre eles?
1
Qual o tempo total em que se realizara
medicoes?

```

Figura 4.1 – Modelo da tela do Simulador de Pessoas em Movimento

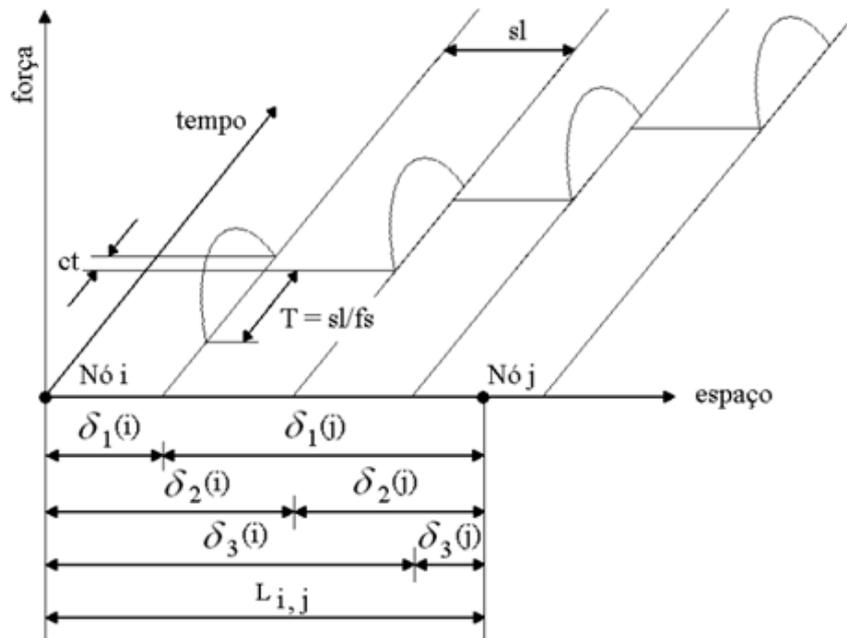
Inicialmente, são inseridas as informações referentes à estrutura. Considerando que o programa foi elaborado para simulação de cargas de pedestres em modelos de elementos finitos, importa ao programa conhecer a quantidade e identificação dos principais nós do tabuleiro da passarela e o espaçamento, em metros, entre eles. A configuração da estrutura é relevante para o processo de espacialização das forças relativas ao movimento dos pedestres.

Em seguida, são inseridos os parâmetros relativos ao movimento humano a ser simulado, a saber, tamanho da passada, tempo de contato do pé com o solo, velocidade do passo, força estática do individuo e coeficiente de impacto. Os valores definidos são utilizados para cálculo da magnitude da força relativa ao movimento humano variando no tempo. Para tal operação, utiliza-se a metodologia proposta por [Wheeler \(1982\)](#) (equação (4.2)) e descrita no [capítulo 2](#) dessa dissertação.

$$F(t) = G \cdot c_i \sin\left(\frac{\pi x t}{c_t}\right) \quad (4.2)$$

A [figura 4.2](#) apresenta a variação da magnitude da força do movimento (eixo z) no espaço, conforme o comprimento de passada (sl), e no tempo, segundo o período (T) e o tempo de contato com o solo (ct). Após definidas as forças verticais referente ao movimento dos pedestres simulados, o programa realiza a distribuição das forças nos nós do modelo de elementos finitos elaborado para a estrutura.

Figura 4.2 – Esquema de distribuição do carregamento no tempo e espaço.



Fonte: (Gomes, 2006)

Ainda, o deslocamento do pedestre pela passarela é simulado pela distribuição das forças do movimento pelos nós adjacentes da estrutura, apresentados genericamente na figura 4.2 como nó i e nó j. A força gerada pelo movimento dos pedestres, quando aplicada entre dois nós da estrutura, é ponderada de acordo com a distância do nó ao ponto de aplicação da carga (δ) e a distância entre os nós adjacentes ($L_{i,j}$) à carga aplicada. Para esse propósito, o programa utiliza a equação (4.3) e equação (4.4) para distribuição dos esforços pelos nós da estrutura.

$$F_i(t) = \frac{F(t) \cdot \delta_j}{L_{i,j}} \quad (4.3)$$

$$F_j(t) = \frac{F(t) \cdot \delta_i}{L_{i,j}} \quad (4.4)$$

Por fim, destaca-se que o programa é capaz de simular várias quantidades de pedestres caminhando ou correndo no mesmo sentido ou em sentidos opostos com diferentes intervalos de defasagem entre eles. Para isso, também são definidos pelo usuário os parâmetros relativos ao tipo e duração do movimento a ser simulado. Nesse rol de variáveis estão: o tempo de análise total, o tempo de intervalo entre as medições das forças, a quantidade de pedestres, o tempo de defasagem entre os pedestres e a direção da movimentação desses pedestres.

5 Estudo de caso

5.1 Álbum de projetos-tipo de passarela

De acordo com o Manual de Projetos de Obras de Arte Especiais (DNER, 1996), as passarelas são classificadas como Obras de Arte Especiais (OAEs) destinadas à separação do tráfego de pedestres e veículos. Destaca-se, ainda, que o DNIT possui sob seus cuidados um patrimônio composto por diferentes passarelas construídas ao longo de décadas.

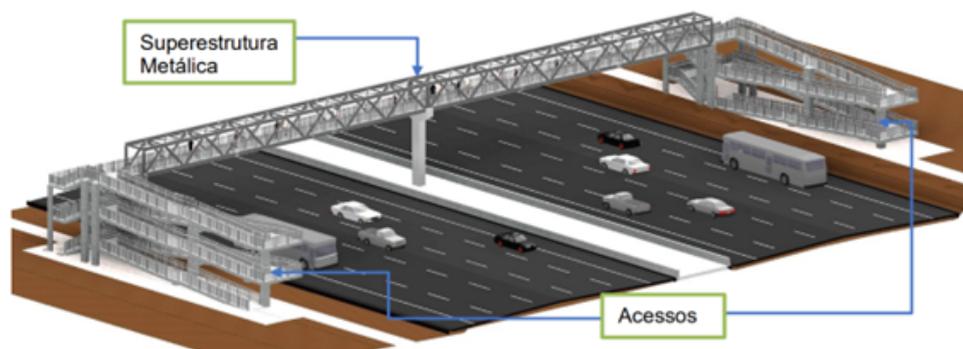
Devido à escassez de diretrizes ou instruções publicadas à época, essas estruturas apresentam diferentes métodos construtivos e são confeccionadas dos mais diferentes materiais, dificultando, por vezes, os serviços de manutenção e a garantia de durabilidade dessas construções.

Nesse contexto, o Instituto de Pesquisa em Transportes (IPR) objetivou complementar as referências existentes sobre projeto e construção de passarelas por meio da publicação 748 – Álbum de Projetos-Tipo de Passarela de Pedestres. O mesmo departamento buscou, ainda, padronizar um modelo de estrutura a ser utilizada nas rodovias federais, de modo que facilitasse a contratação e construção desses elementos (DNIT, 2020).

5.1.1 Concepção estrutural

O álbum de projetos em tela é formado pela junção de dois principais componentes, a saber, acesso e superestrutura. Os acessos são compostos por escadas e rampas que permitem a entrada do pedestre na plataforma de travessia. Ainda, a superestrutura metálica constitui o tabuleiro da passarela, complementado pelos dispositivos de segurança, os quais oferecem aos usuários uma passagem segura para o outro lado da rodovia. Apresenta-se um modelo tipo da estrutura na [figura 5.1](#).

Figura 5.1 – Concepção padrão dos projetos-tipo de passarela de pedestre.



Fonte: (DNIT, 2020)

Para construção dos acessos, são apresentadas 7 (sete) diferentes opções a depender da altura necessária para garantir o gabarito mínimo de tráfego dos veículos. As configurações de altura dos acessos são denominadas pelo sufixo numérico que indica a altura, em centímetros. De modo semelhante, a superestrutura metálica exibe 5 (cinco) diferentes opções, sendo elas diferenciadas pelo comprimento de travessia.

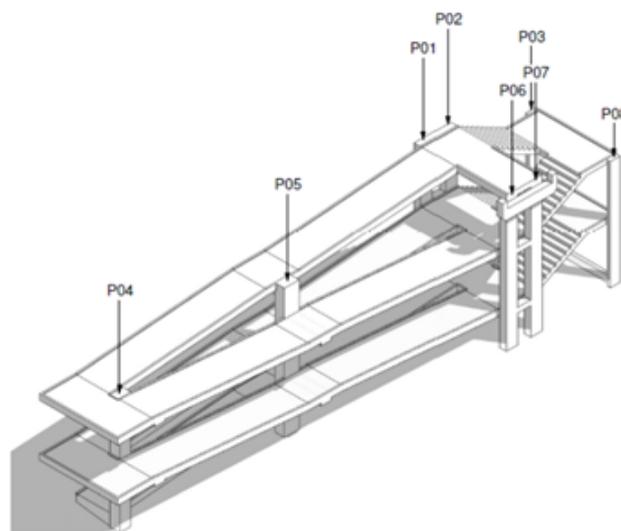
Os demais elementos de ligação desses componentes são padronizados de modo a permitir qualquer combinação de altura e comprimento, atendendo, assim, a qualquer tipo de rodovia, relevo e gabaritos vertical e horizontal (DNIT, 2020).

5.1.2 Acessos

O elemento de acesso tem como objetivo prover aos pedestres os meios de entrada ao tabuleiro da passarela. Para isso, são oferecidos dois tipos de acessos, a saber, escada e rampa. Para dimensionamento desse elemento foi considerado os dispositivos da NBR 9050 (2015), a qual versa sobre os requisitos de acessibilidade a edificações, mobiliários, espaços e equipamentos urbanos.

As escadas são dispostas em acréscimos de 80 centímetros, sendo compostas por 5 ou 10 degraus com espelho de 0,16 metros de altura. A largura de trânsito é de 2,50 metros e o comprimento de cada degrau é de 0,31 metros. Por outro lado, as rampas possuem comprimento, em planta, de 9,60 metros e patamares intermediários de 2,00 metros. A configuração descrita proporciona uma inclinação longitudinal de 1/12 (8,33) para esses elementos. Cabe destacar que todas as estruturas de acesso são circundadas por guarda corpos para garantir a segurança dos pedestres. Um exemplo de acesso completo está apresentado na figura 5.2.

Figura 5.2 – Modelo de acesso composto por escada e rampa.



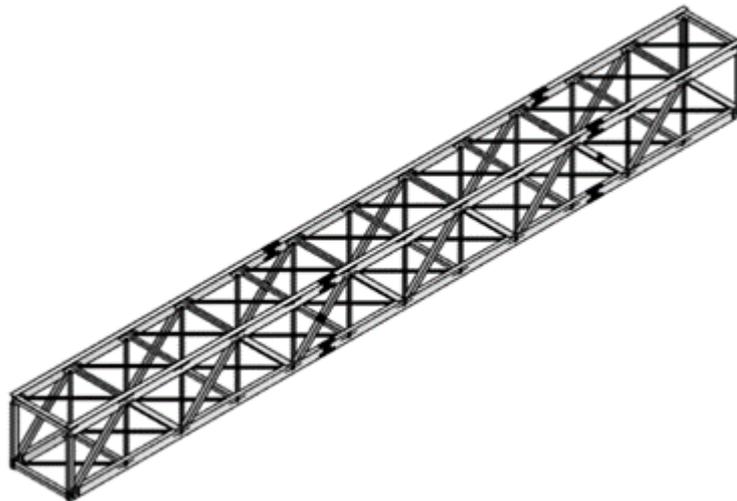
Fonte: (DNIT, 2020)

O módulo de acesso é fornecido nas configurações de altura, variando de 3,20 a 8,00 metros. Cada módulos é denominado de acordo com a altura total em centímetros, a saber, A800, A720, A640, A560, A480, A400 e A320. Todos os elementos projetados para o acesso são confeccionados de concreto armado, com barras de aço CA-50 e concreto com resistência característica à compressão de 30 MPa.

5.1.3 Superestrutura

A plataforma de travessia projetada para a passarela estudada é formada por uma treliça espacial metálica do tipo Warren, cujo comprimento padrão do módulo em formato retangular é de 5,00 metros. A seção transversal possui largura de 2,50 metros e altura de 2,50 metros para comportar o fluxo de pedestres. O tabuleiro da passarela é apoiado diretamente nos aparelhos de apoio de neoprene posicionados na viga console da estrutura de acesso ou em pilares intermediários, permitindo o trabalho independente da superestrutura em relação aos demais elementos. A [figura 5.3](#) apresenta um modelo da superestrutura proposta.

Figura 5.3 – Modelo de superestrutura metálica em treliça espacial tipo Warren.



Fonte: (DNIT, 2020)

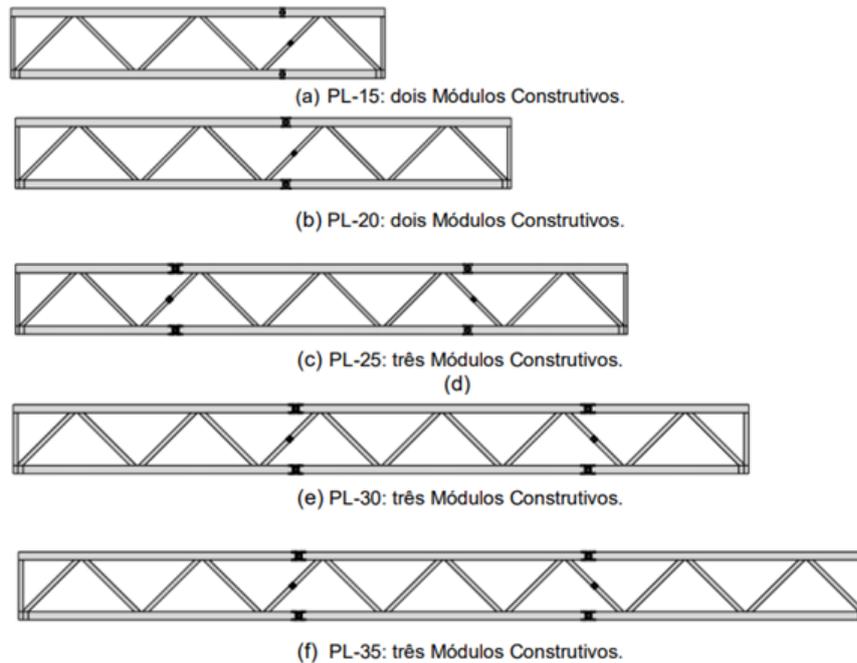
A laje que forma o tabuleiro da passarela é confeccionada por meio do sistema de steeldeck, na qual são postas formas metálicas posteriormente incorporadas na laje de concreto executado. Ainda, faz parte do tabuleiro os guias de balizamento e os guarda-corpos metálicos por todo o perímetro de travessia, conforme exposto no álbum de projetos-tipo e exigido pelo item 6.6.3 da [NBR 9050 \(2015\)](#).

A superestrutura metálica padrão pode ser executada nas configurações de 15, 20, 25, 30 e 35 metros, de acordo com a necessidade da rodovia a ser transposta. Para comprimentos superiores a 35,00m, é possível combinar diferentes comprimentos de plataformas, por meio da construção de um pilar de apoio central, no qual se apoiam o módulos da superestrutura.

Objetivando a facilidade para montagem dessas estruturas, optou-se pela utilização de treliças metálicas com comprimentos de até 12,00 m no total, cujos perfis transversais, longitudinais e peças acessórias são unidos por meio de soldas especificamente projetadas. A opção pela utilização de perfis soldados se justifica pela praticidade desse modelo, uma vez que os módulos metálicos podem ser executados em indústria própria, de modo a garantir um maior controle de qualidade.

Outrossim, para cada configuração de comprimento deverá existir pelo menos 1 emenda entre módulos, a qual será feita por meio da conexão parafusada apresentada no projeto. Esse tipo de conexão se mostra mais eficiente para montagem da superestrutura em campo, que deverá ser preparada, parafusada e, posteriormente, içada até sua posição final. A [figura 5.4](#) apresenta as configurações de superestrutura apresentadas pelo álbum.

Figura 5.4 – Modulações projetadas para superestrutura metálica.



Fonte: (DNIT, 2020)

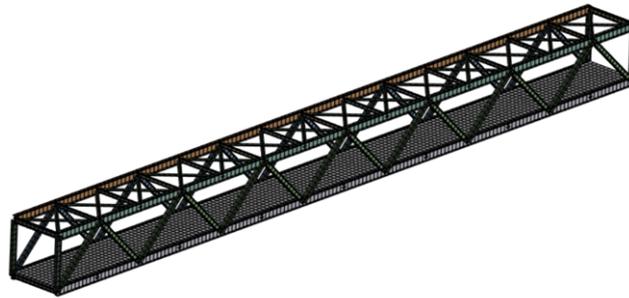
5.2 Modelo Numérico

Como relatado no [capítulo 4](#) dessa dissertação, o modelo numérico da passarela foi desenvolvido no software ANSYS workbench para realização das análises modal e transiente, de modo a simular a utilização da estrutura proposta nos mais diversos casos.

Para a presente análise, observou-se os elementos que compõe a passarela para identificar os elementos mais suscetíveis aos efeitos dinâmicos induzidos pelo carregamento proposto. Na estrutura de acesso, destaca-se os elementos que compõe a rampa, a qual apresenta vão livre de 9,60m, são confeccionados em concreto armado e possuem grande

robustez. Na superestrutura foi identificada o maior vão livre da passarela, chegando à 35,00m na configuração de maior tamanho. Desse modo, optou-se pela modelagem da superestrutura de maior comprimento, entendendo que esta apresentará os piores cenários de flexibilidade e aceleração. O modelo de elementos finitos é apresentado na [figura 5.5](#).

Figura 5.5 – Modelo numérico desenvolvido no ANSYS workbench.



Fonte: Autor

A superestrutura possui em sua confecção dois principais materiais, a saber o aço estrutural dos elementos da treliça e o concreto armado do tabuleiro. As principais características físicas adotadas para os referidos materiais são apresentadas na [tabela 5.1](#)

Tabela 5.1 – Propriedades físicas dos materiais.

Propriedades	Material	
	Concreto	Aço estrutural
Massa Específica (kg/m^3)	2.500,00	7.850,00
Modulo de Elasticidade (N/m^2)	$1,94 \times 10^{10}$	$2,05 \times 10^{11}$
Coefficiente de Poisson	0,20	0,30

Fonte: Autor

Na modelagem das peças metálicas que compõe a treliça, como as diagonais, banzos e travessas foram utilizados o elemento de barra BEAM188 . O piso do tabuleiro foi considerado como elemento de placa SHELL181. O guarda-corpo da estrutura foi modelado como elementos de massa MASS21 distribuída nas laterais do piso.

O projeto padrão prevê a construção da superestrutura da passarela apoiada sobre aparelhos de apoio de neoprene. Para replicar essa condição, foi considerada a condição simplesmente apoiada complementado por uma poio elástico em cada extremidade das longarinas. Os parâmetros de elasticidade do apoio foram definidos com o objetivo de eliminar os movimentos de corpo rígido da estrutura, cuja ocorrência não refletiria a realidade da estrutura.

Findado a modelagem geométrica, realizou-se os testes de convergência para definição da malha de elementos finitos. Nos testes de convergência de malha realizados com a

utilização da análise estática e modal foi descoberto que os modelos com malhas mais refinadas (mais de 4000 elementos) resultavam em pequenas alterações do resultado final, na ordem da quarta casa decimal.

Assim, observou-se que a quantidade ótima de elementos pairava na faixa aproximada de 4000 elementos, cuja configuração do tamanho médio dos elementos é de 0,23 metros. A partir dessa configuração o modelo foi elaborado com 3833 elementos e 5984 nós. Entende-se que a malha proposta é a mais adequada para obtenção de resultados precisos com o menor custo computacional.

5.2.1 Análise Modal

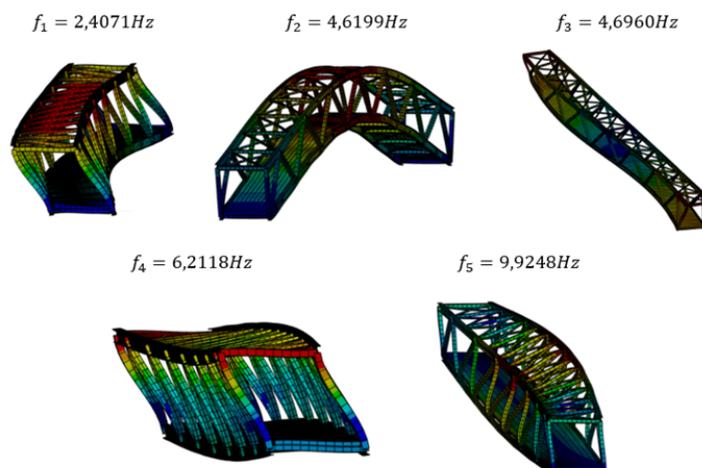
Utilizando o modelo da passarela padrão no programa ANSYS, foi realizada uma análise modal para determinar as principais frequências naturais e os respectivos modos de vibração para a passarela analisada. A primeira frequência obtida para a estrutura estudada tem um valor de 2,4071 Hz. As primeiras cinco frequências naturais e os modos de vibração são apresentados na [tabela 5.2](#) e [figura 5.6](#).

Tabela 5.2 – Frequências naturais e modos de vibração.

	Frequência (Hz)	Modo de Vibração
1º	2,4071	1º modo lateral com torção
2º	4,6199	1º modo vertical
3º	4,6960	2º modo lateral com torção
4º	6,2118	1º modo torsional
5º	9,9248	2º modo torsional

Fonte: Autor

Figura 5.6 – Forma dos modos de vibração.

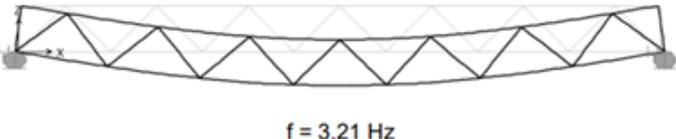
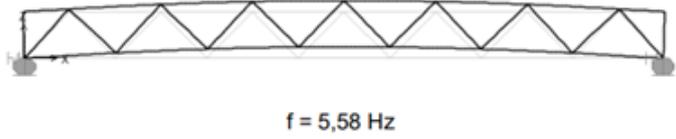


Fonte: Autor

Neste contexto, é fundamental ressaltar que o projeto padrão analisado ainda não foi utilizado para a construção de passarelas no Brasil, tornando os levantamentos de campo para calibração do modelo um desafio. Portanto, a literatura foi consultada na busca de estudos relacionados a passarelas com tamanho e configuração estrutural semelhantes para comparar valores de frequência.

De maneira preliminar, cabe ressaltar a análise dinâmica apresentada pelo próprio álbum de passarelas objeto desse estudo. Como apresentado na [figura 5.7](#), a análise realizada pelo (DNIT, 2020) encontrou duas frequências naturais, sendo essas nos valores de 3,21Hz e 5,58Hz.

Figura 5.7 – Frequências naturais e modos de vibração da passarela metálica.

Tipo	Vista em Elevação	Seção Transversal
Flexão Vertical		
Flexão Transversal		

Fonte: (DNIT, 2020)

Ainda, é importante notar que a [AASHTO \(2009\)](#) fornece uma fórmula para estimar o valor vertical mínimo da frequência necessária para conforto dinâmico. Esta fórmula relaciona a primeira frequência ao peso total da estrutura. Dado que a estrutura analisada tem um peso próprio aproximado de 42,00 tons (92,60 kips), a frequência mínima aceita para a passarela estudada é calculada em 1,90 Hz usando a [equação \(5.1\)](#).

$$f_v \geq 2,86 \ln \left(\frac{180}{92,60} \right) \geq 1,90 \text{ Hz} \quad (5.1)$$

Conforme indicado no [capítulo 2](#), a pesquisa realizada considera passarelas mistas com comprimentos que variam de 20 a 60 metros, cuja superestrutura é composta por treliça metálica. Inferiu-se que essas estruturas apresentam uma primeira frequência natural no intervalo de 1,00 a 3,50 Hz, conforme observado na Passarela sobre o E.P.I.A ([Gomes, 2006](#); [Santos, 2009](#); [Doz et al., 2018](#)), Passarela sobre a BR-153 ([Pereira, 2017](#)), Ponte Prato ([Wei et al., 2019](#)), Passarela metálica de vão longo ([Rezende et al., 2020](#)), Passarela San Laureano, Passarela Viaducto, Passarela Maldonado e Passarela Villa Luz ([Rodríguez-Suesca et al., 2022](#)). Os valores obtidos para as frequências naturais do modelo desenvolvido se assemelham

muito aos encontrados na literatura, reforçando a coerência dos valores encontrados pelo modelo numérico, conforme apresentado na [tabela 5.3](#).

Tabela 5.3 – Resumo das frequências das estruturas de referência.

Nome da estrutura	Primeira Frequência (Hz)	Comprimento (m)
Passarelas E.P.I.A	3,12 - 2,49	34,11
Passarela sobre a BR-153	1,33	45,30
Ponte Prato	2,05	25,00
Passarela metálica de vão longo	1,85	68,50
San Laureano	2,69	25,00
Viaducto	3,02	35,30
Maldonado	3,50	27,30
Villa Luz	3,37	26,50
Valor médio	2,93	
Projeto padrão	2,41	35,00

Fonte: Autor

Face aos valores de frequência encontrados para o projeto padrão, prossegue-se com a comparação desses as prescrições normativas apontadas no [capítulo 3](#) dessa dissertação. Inicialmente, frisa-se os limites de frequência trazidos pela [AASHTO \(2009\)](#). A referida associação recomenda aprofundar as análises caso a frequência natural do modo vertical seja menor que $3,00\text{Hz}$. A [ISO 10137, 2007](#) limita as frequências naturais do modo lateral em $1,30\text{Hz}$. De acordo com os dois normativos acima mencionados, a estrutura proposta pelo DNIT cumpre os requisitos dinâmicos e não necessita de maiores análises nesse sentido.

Entretanto, observa-se que os dois valores de frequências naturais encontrados pelo modelo numérico são abaixo de $5,00\text{Hz}$ no modo vertical e $2,50\text{Hz}$ no modo lateral. Desse modo, o [EUROCODE \(2005\)](#) recomenda a realização de maiores simulações para garantir os limites de aceleração e o conforto do pedestre. De igual modo, o Código canadense ([CSA, 2006](#)) sugere a realização de análises mais detalhadas sempre que a passarela apresentar frequências abaixo de $4,00\text{Hz}$.

Ainda, o guia publicado pelo [SÉTRA \(2006\)](#) dispõe de intervalos de frequência onde entende-se que há risco de ressonância durante aplicação do carregamento humano. Para a passarela em estudo, as frequências encontradas estão na faixa de baixo risco de ressonância. Mesmo assim, o guia recomenda a realização de simulações de carregamento quando a passarela de baixo risco de ressonância é classificada com alta probabilidade de possuir tráfego denso de pedestres.

5.2.2 Análise transiente

A análise dinâmica transiente demonstra o comportamento da estrutura sob a condição de carregamento variável no tempo. Para analisar diversas condições de uso da estrutura, a análise transiente foi empregada com objetivo de simular diferentes números de pedestres circulando pela passarela, reproduzindo os parâmetros de caminhada e corrida.

O modelo de carregamento prescrito por Wheeler (1982) foi utilizado para calcular as forças atuantes na passarela devido ao movimento dos pedestres. O método considera vários parâmetros conforme apresentado na equação (5.2).

$$F(t) = G.c_i \sin\left(\frac{\pi x t}{c_t}\right) \quad (5.2)$$

Para definição do peso médio dos pedestres a literatura e diversas normas sugerem valores variando entre 700N a 800N. Dentre as referências utilizadas, destaca-se a prescrição da NBR 7187 (2021) que relata uma metodologia considerando o peso do pedestre como 750N. Considerando a importância do normativo para a pesquisa em tela, este estudo adota o peso sugerido pela referida norma para as simulações realizadas.

Adicionalmente, seguindo as definições propostas por Wheeler (1982), foram adotados para o movimento de caminhada os valores de frequência (2,00Hz) e comprimento de passo (0,75m). O tempo adotado de contato do pé do pedestre com a estrutura de 0,55 segundos é compatível com o movimento de caminhada. Para corrida é definida uma frequência de 2,50Hz com comprimento de passo de 1,30m e tempo de contato do pé de 0,35s. Da mesma referência, extraiu-se os coeficientes de impacto para os movimentos de caminhada e corrida, sendo adotados os valores de 1,20 e 2,20, respectivamente, segundo apurado na tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Parâmetros de caracterização dos movimento do pedestre.

Parâmetro	Notação	Tipo de Movimento	
		Caminhada	Corrida
Frequência (Hz)	f	2,00	2,50
Tempo de contato pé-estrutura (s)	c_t	0,55	0,35
Comprimento de passo (m)	c_{passo}	0,75	1,30
Coefficiente de impacto	c_i	1,20	2,20
Peso do pedestre (N)	G	750,00	

Fonte: Autor

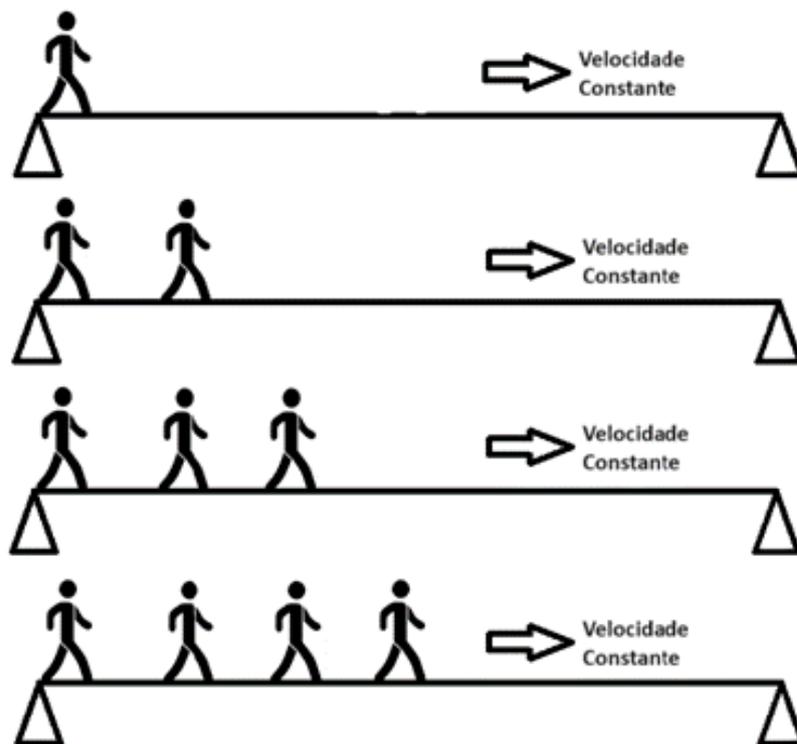
Relativo à quantidade de pedestres simulados, utiliza-se como referência inicial as densidades de pedestres dispostas na NBR 7187 (2021), a saber 0,50, 1,00 e 1,50 pedestres/m². Outrossim, ressalta-se que algumas das normas descritas neste artigo recomendam uma

análise detalhada utilizando grupos de 8 a 15 pessoas e, se necessário, a ocorrência de eventos especiais (EUROCODE, 2005; ISO 10137, 2007).

Dessa forma, é proposta a simulação da passagem de 1, 5, 10, 40, 90 e 132 pessoas, com o objetivo de atender aos cenários sugeridos nos normativos e situações prováveis de uso da estrutura. O carregamento foi configurado para simulação de movimentos síncronos, todos os pedestres em fase, e assíncronos. A distribuição dos pedestres na passarela foi realizada de duas formas, a saber pedestres individuais e pedestres em grupo simulados conforme descrito a seguir.

A configuração de pedestres individuais foi desenvolvida para simulação dos casos de 1, 5 e 10 pedestres trafegando sobre a estrutura. Estes realizam o movimento de caminhada ou corrida no eixo longitudinal da passarela e em fila com espaçamento pré-determinado. O tempo total de análise abrange a entrada do primeiro pedestre até a saída do último pedestre. A figura 5.8 apresenta uma representação parcial da distribuição de pedestres individuais.

Figura 5.8 – Representação parcial da distribuição de pedestres individuais na passarela



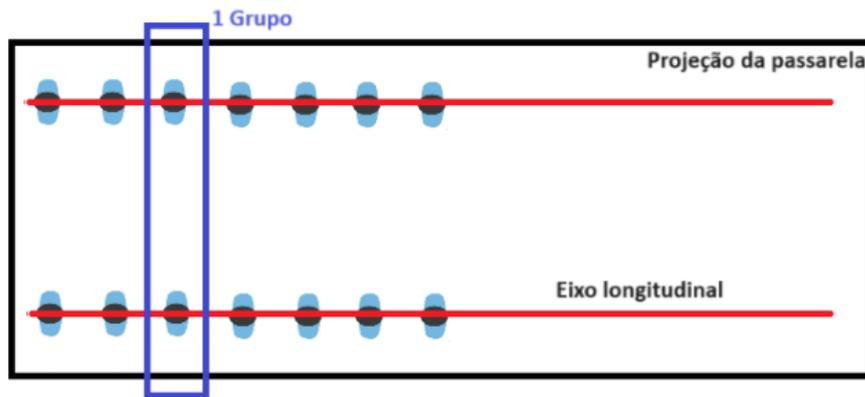
Fonte: Autor

As simulações com 40, 90 e 132 pessoas são realizadas com a distribuição de grupos de pedestres. A distribuição de pedestres foi pensada para que em algum momento da simulação todos os pedestres estivessem atuando na estrutura ao mesmo tempo. Em contrapartida foram avaliados cenários de grupos e espaçamentos onde os pedestres ocupassem a maior parte do tabuleiro possível, tentando evitar aglomerações fisicamente impossíveis.

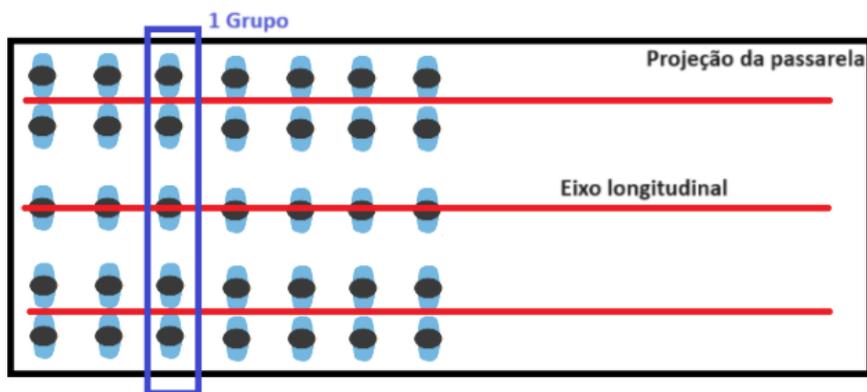
Para o movimento de caminhada foram definidas as seguintes distribuições: 20 grupos de 2 pessoas (40 pedestres), 18 grupos de 5 pessoas (90 pedestres) e 22 grupos de 6 pessoas (132 pedestres). Os grupos de pedestres foram distribuídos em 2 ou 3 eixos longitudinais, sendo alocadas 1 ou 2 pessoas por eixo. A [figura 5.9](#) apresenta uma representação parcial dos eixos e dos grupos em planta.

Figura 5.9 – Gráficos de aceleração vertical, no meio do vão, para o movimento de 1 pedestre.

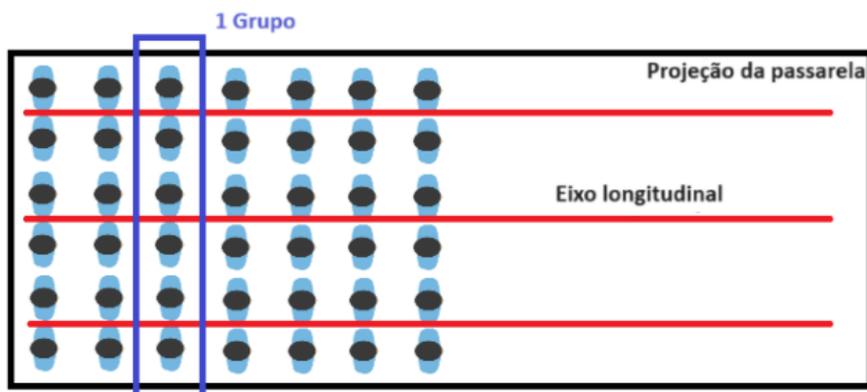
(a) Distribuição em 2 eixos para grupo de 2 pedestres.



(b) Distribuição em 3 eixos para grupo de 5 pedestres.



(c) Distribuição em 3 eixos para grupo de 6 pedestres.



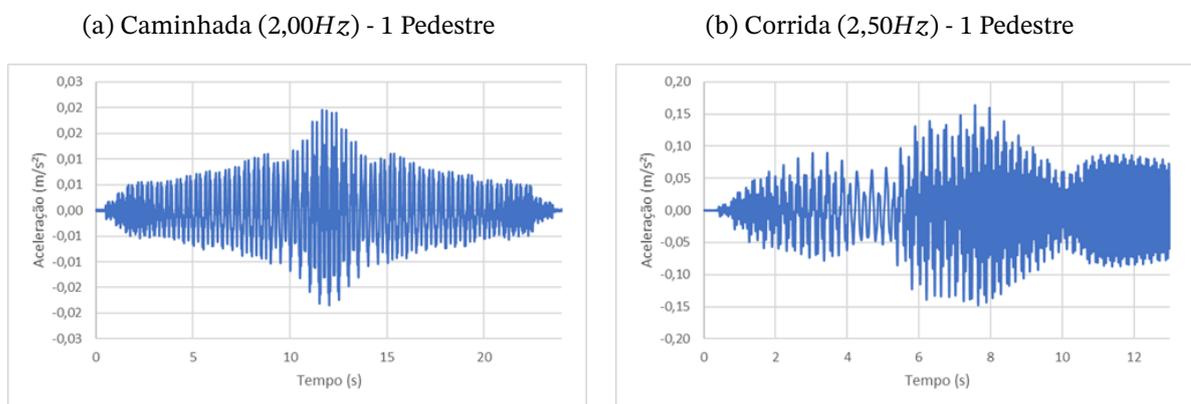
Para o movimento de corrida a distribuição dos pedestres foi modificada devido ao comprimento de passo maior (1,30 m). Para garantir a atuação de todos os pedestres ao mesmo tempo na estrutura, foram configurados a distribuição de 10 grupos de 4 pessoas (40 pedestres), 15 grupos de 6 pessoas (90 pedestres) e 11 grupos de 12 pessoas (132 pedestres).

Cabe destacar que a defasagem entre os pedestres (início do carregamento), seja individual ou em grupo, foi definida pelo tempo dos ciclos de passada (frequência de passo). Para os movimentos de caminhada (2,00 Hz) e corrida (2,50 Hz) síncrona a defasagem adotada entre os pedestres individuais foi de 1,0 e 0,8 segundos, respectivamente. Os valores de defasagem adotados permitem a atuação simultânea do pico dos carregamentos, o que simula a sincronia dos pedestres.

Em contrapartida, para os movimentos assíncronos foram adotados para os movimentos de caminhada (2,00 Hz) e corrida (2,50 Hz) o tempo de defasagem de 1,1 e 0,9 segundos, respectivamente. Desse modo os picos de carga de cada pedestres são aplicados na estrutura em diferentes momentos, o que simula a assincronia do movimento.

A resposta dinâmica da passarela é analisada em termos de aceleração da estrutura no ponto central do vão, onde se espera ocorrer os maiores valores. De modo inicial, realizou-se as simulações para passagem de 1 pedestre em movimento de caminhada e corrida. Os resultados de aceleração obtidos na simulação descrita são apresentadas na [figura 5.10](#).

Figura 5.10 – Gráficos de aceleração vertical, no meio do vão, para o movimento de 1 pedestre.



Fonte: Autor

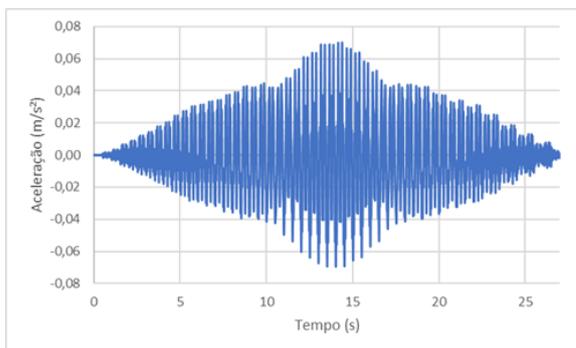
Observa-se que a aceleração encontrada para um pedestre caminhando pela passarela em análise é de $0,0196 \text{ m/s}^2$, enquanto o mesmo pedestre em movimento de corrida provoca uma aceleração de $0,1640 \text{ m/s}^2$ na estrutura. Como esperado, o movimento de corrida ocasiona maiores acelerações à estrutura, uma vez que o impacto aplicado no tabuleiro da passarela pelo pedestre durante a passada do movimento de corrida é maior.

Outras simulações foram realizadas com o objetivo de seguir as recomendações expressas por alguns dos normativos destacados nesse trabalho. De modo inicial, efetuou-se

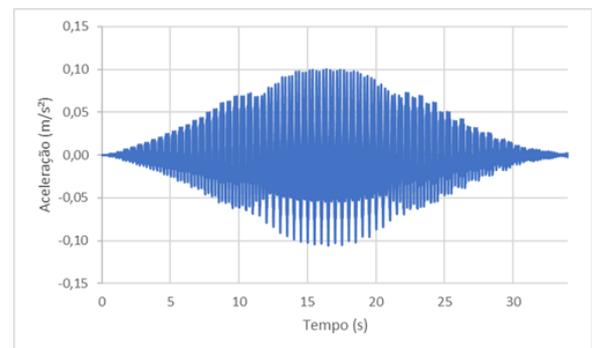
a simulação de 5 e 10 pedestres trafegando pela passarela. A escolha da quantidade de pedestres teve como objetivo emular situações possíveis para a passarela estudada e seguiu a orientação do [EUROCODE \(2005\)](#) e da [ISO 10137 \(2007\)](#), os quais recomendam a simulação de 8 a 15 pedestres utilizando a estrutura. Os resultados para caminhada ([figura 5.11](#)) e corrida ([figura 5.12](#)), síncrona e assíncrona, são apresentados abaixo.

Figura 5.11 – Gráficos de aceleração vertical, no meio do vão, para o movimento de caminhada com 5 e 10 pedestres.

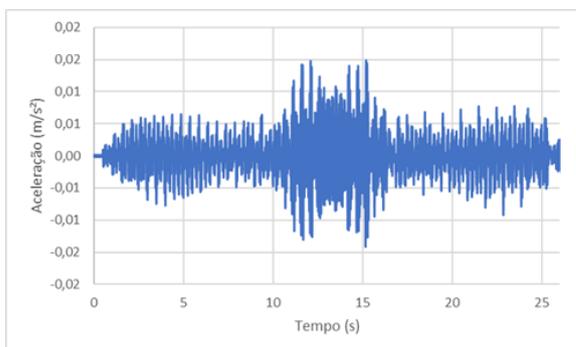
(a) Caminhada (2,00Hz) - 5 Pedestre Síncronos



(b) Caminhada (2,00Hz) - 10 Pedestre Síncronos



(c) Caminhada (2,00Hz) - 5 Pedestre Assíncronos



(d) Caminhada (2,00Hz) - 10 Pedestre Assíncronos

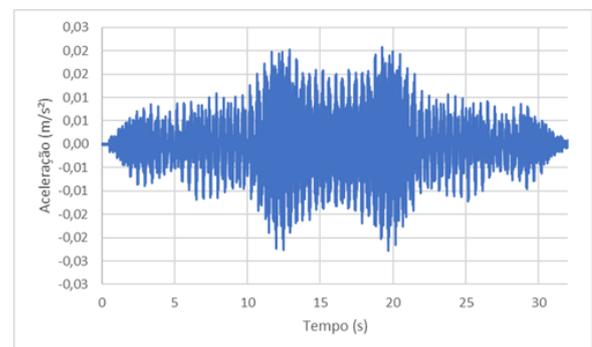
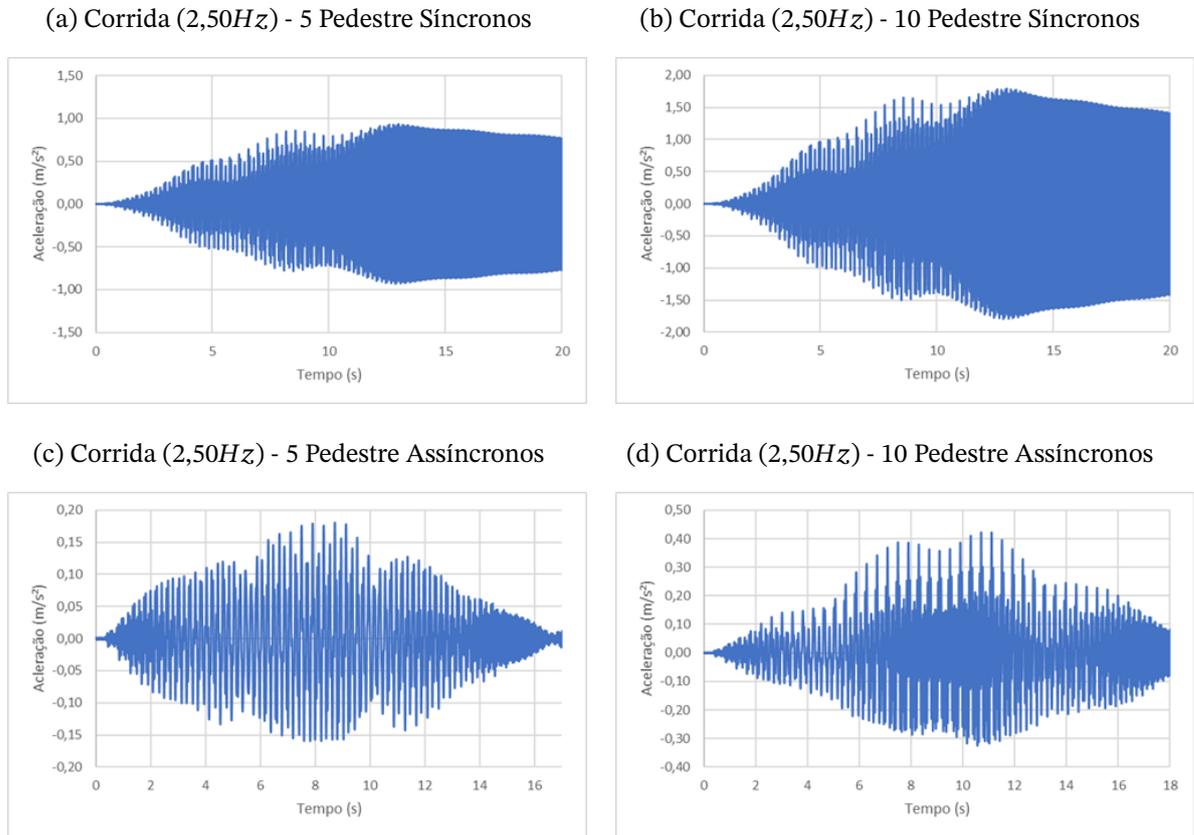


Figura 5.12 – Gráficos de aceleração vertical, no meio do vão, para o movimento de corrida com 5 e 10 pedestres.



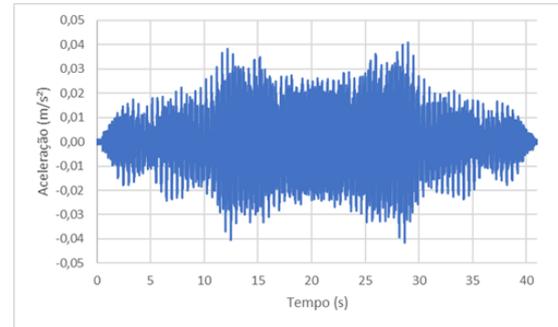
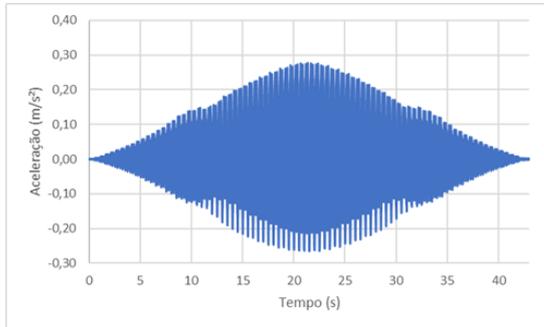
Fonte: Autor

Os resultados obtidos mostram que as acelerações do movimento de pedestres em fase são maiores que do movimento aleatório. Essa diferença era esperada devido ao somatório dos picos de força do movimento síncrono resultarem em um carregamento aplicado maior que do movimento assíncrono. É possível constatar que o cenário com 5 pedestres impõe uma aceleração de $0,0149m/s^2$ a $0,9321m/s^2$, a depender do movimento e da sincronização proposta. Para 10 pedestres a variação de aceleração é de $0,1004m/s^2$ a $1,8914m/s^2$. Cabe aqui destacar também o padrão de ressonância apresentados pelos movimentos de corrida síncronos, uma vez que esse movimento possui frequência muito próxima a frequência natural da estrutura.

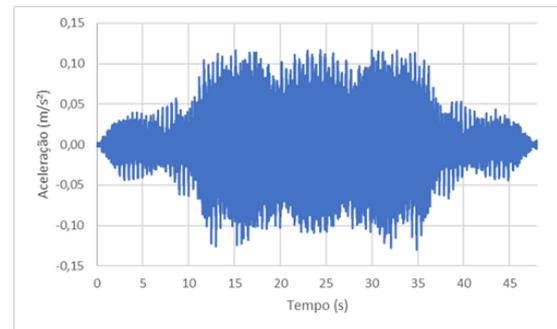
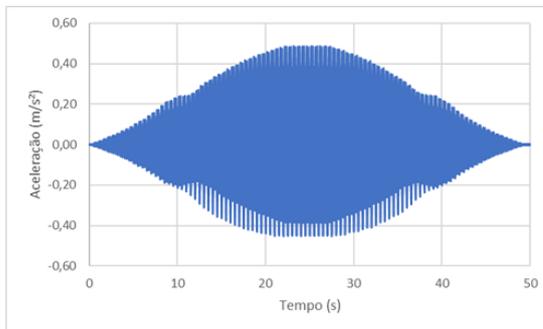
Em sequência, foram realizadas as simulações referentes às densidades apresentadas pela NBR 7187 (2021), a saber 0,5, 1,0 e 1,5 pedestres/ m^2 . Com esse objetivo foram procedidas as simulações com 40, 90 e 132 pedestres. Os resultados são apresentados na figura 5.13 e figura 5.14.

Figura 5.13 – Gráficos de aceleração vertical, no meio do vão, para o movimento de caminhada para 40, 90 e 132 pedestres

(a) Caminhada (2,00Hz) - 40 Pedestre Síncronos (b) Caminhada (2,00Hz) - 40 Pedestre Assíncronos



(c) Caminhada (2,00Hz) - 90 Pedestre Síncronos (d) Caminhada (2,00Hz) - 90 Pedestre Assíncronos



(e) Caminhada (2,00Hz) - 132 Pedestre Síncronos (f) Caminhada (2,00Hz) - 132 Pedestre Assíncronos

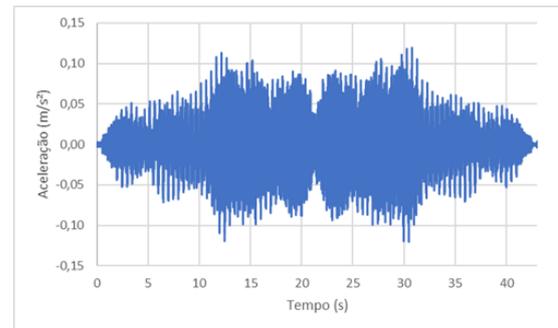
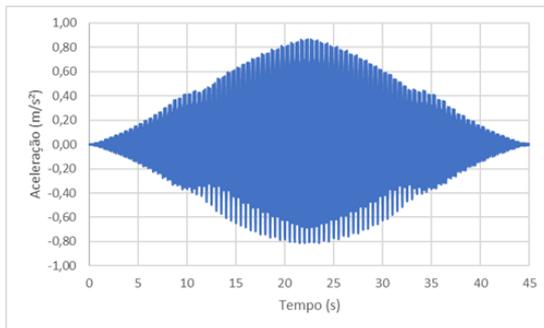
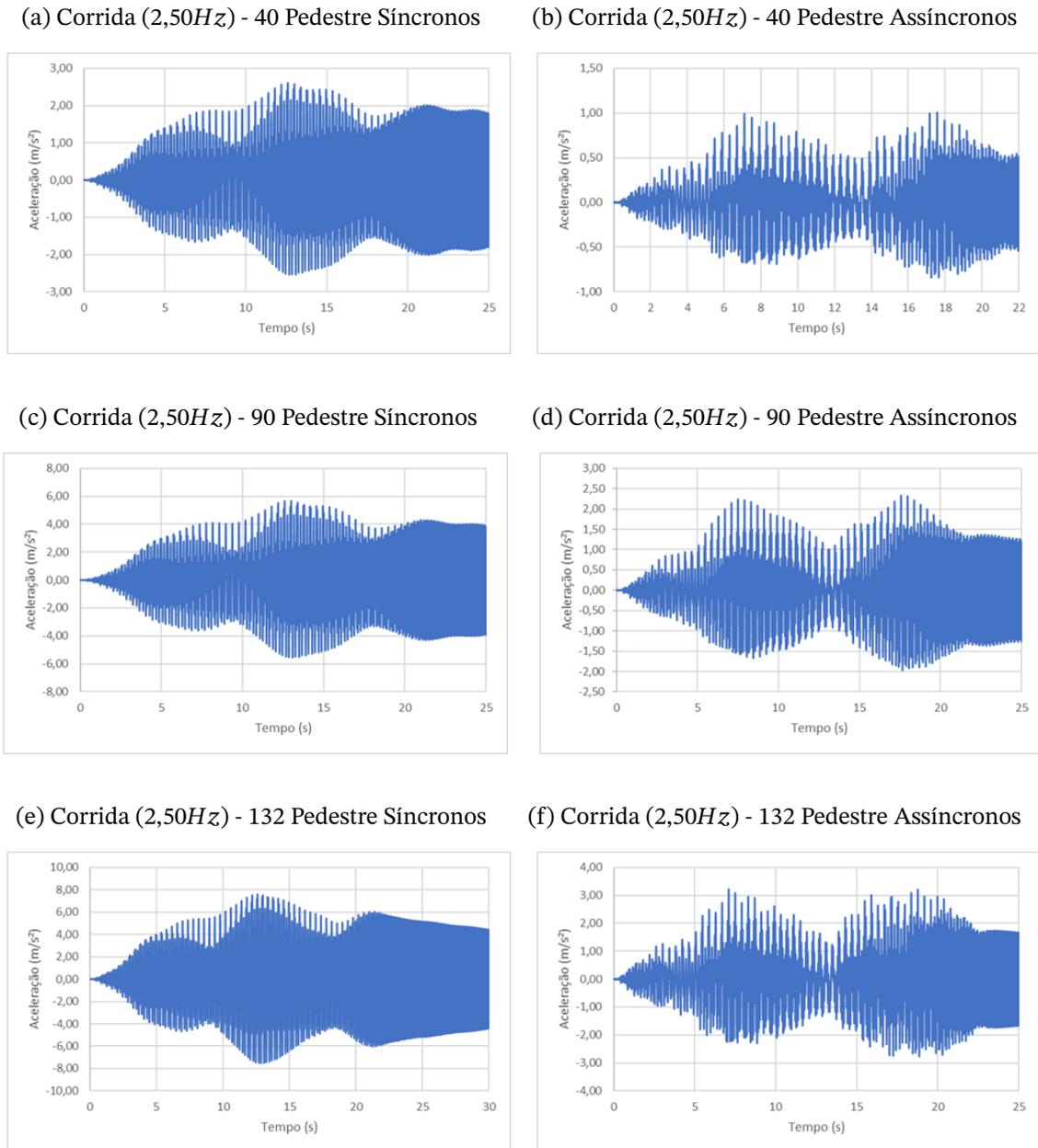


Figura 5.14 – Gráficos de aceleração vertical, no meio do vão, para o movimento de corrida para 40, 90 e 132 pedestres



Nota-se que as acelerações encontrada para as densidades prescritas na [NBR 7187 \(2021\)](#) são elevadas para os movimentos de corrida síncrona, variando no intervalo de $2,6099 m/s^2$ a $7,5957 m/s^2$. Igualmente, os movimentos de corrida assíncrona apresentam acelerações de magnitude considerável, variando no intervalo de $1,0079m/s^2$ a $3,2230m/s^2$. Outrossim, observa-se os padrões de ressonância para os movimentos de corrida, conforme esperado. Para os movimentos de caminhada, são estimados valores de aceleração no intervalo de $0,2774m/s^2$ a $0,8662m/s^2$ para movimentos síncronos e de $0,0409m/s^2$ a $0,1195m/s^2$ para movimentos assíncronos.

Além das acelerações estimadas pelas simulações, levantou-se o deslocamento má-

ximo no meio do vão sofrido pelo tabuleiro da passarela durante o tráfego de pedestres em todos as distribuições descritas acima. Nesse contexto, são apresentados na [tabela 5.5](#) os valores de aceleração e deslocamento encontrados para cada simulação realizada.

Tabela 5.5 – Resumo dos valores de aceleração e deslocamento verticais das simulações

Tipo de Movimento	Nº de Pedestres	Aceleração (m/s^2)	Deslocamento (mm)
Caminhada	1	0,0196	-0,07
Caminhada	Síncrona	5	0,0701
Caminhada	Síncrona	10	0,1004
Caminhada	Síncrona	40	0,2774
Caminhada	Síncrona	90	0,4868
Caminhada	Síncrona	132	0,8662
Caminhada	Assíncrona	5	0,0149
Caminhada	Assíncrona	10	0,0208
Caminhada	Assíncrona	40	0,0409
Caminhada	Assíncrona	90	0,1167
Caminhada	Assíncrona	132	0,1195
Corrida	1	0,1640	-0,19
Corrida	Síncrona	5	0,9321
Corrida	Síncrona	10	1,8914
Corrida	Síncrona	40	2,6099
Corrida	Síncrona	90	5,6687
Corrida	Síncrona	132	7,5957
Corrida	Assíncrona	5	0,1807
Corrida	Assíncrona	10	0,4223
Corrida	Assíncrona	40	1,0079
Corrida	Assíncrona	90	2,3288
Corrida	Assíncrona	132	3,2230

Fonte: Autor

Em posse das estimativas de aceleração da estrutura para diferentes configurações de carga, busca-se apresentar os limites de aceleração definidos nos normativos descritos nesse trabalho. O limites impostos pelos normativos são valores de referência para manutenção do conforto do pedestre, subentendendo que as estruturas que apresentam acelerações acima dos valores limites geram desconforto ao usuário.

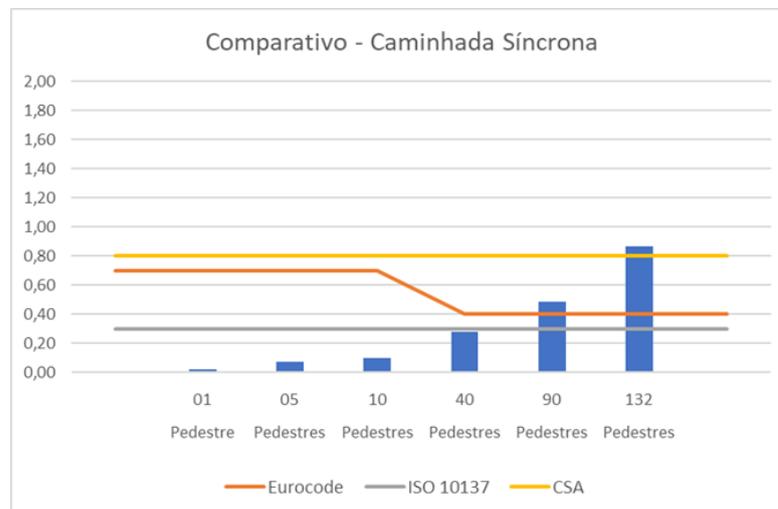
De modo inicial, destaca-se o limite de aceleração prescrito pelo (EUROCODE, 2005) igual a $0,70m/s^2$ para acelerações verticais e $0,40m/s^2$ para situações de multidão. Para os propósitos dessa pesquisa, considera-se as simulações de 40, 90 e 132 pedestres como situações de multidão, uma vez que o normativo em pauta não detalha os critérios considerados.

Outro normativo que dispõe de uma metodologia para estabelecer o limite de aceleração aceita para a estrutura é o Código Canadense (CSA, 2006). O referido código apresenta a figura 3.4 como orientador para definição do limite, o qual se relaciona diretamente com a frequência natural da estrutura. Considerando que a primeira frequência vertical encontrada para passarela analisada é igual a $4,6199\text{Hz}$, pode-se inferir do gráfico que a aceleração aceita é de aproximadamente $0,80\text{m/s}^2$.

Em metodologia análoga, a ISO 10137 (2007) estabelece os limites de aceleração vertical a partir da curva base, apresentada nesse trabalho na figura 3.7. O gráfico citado apresenta um coeficiente base relacionado à frequência natural da estrutura, o qual define a aceleração limite. O normativo em tela orienta que a aceleração da estrutura não deve ser superior a 60 vezes o coeficiente base. Para o caso específico da passarela analisada, o fator base encontrado é de 0,005, o que totaliza uma aceleração limite de $0,30\text{m/s}^2$.

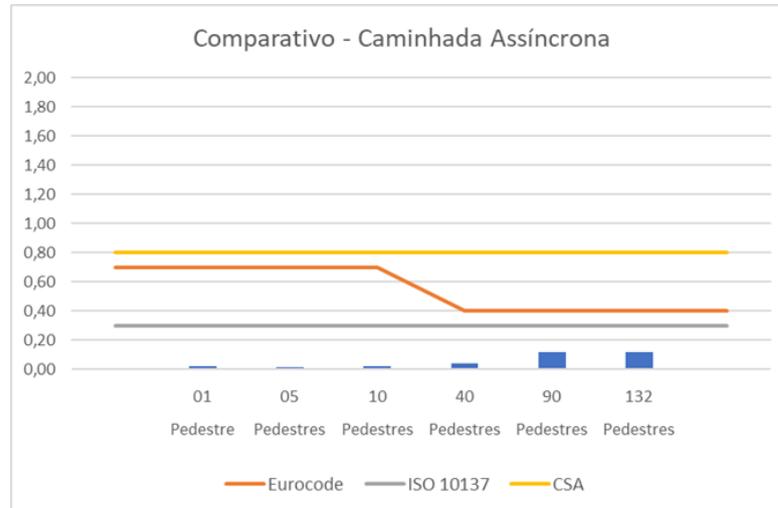
Estabelecidos os principais limites de aceleração definidos nos normativos estudados, passa-se para a comparação desses com os resultados das simulações realizadas. Inicialmente, serão comparados os valores de aceleração encontrados para os movimentos de caminhada síncrona e assíncrona. Os comparativos estão apresentados na figura 5.15 e figura 5.16.

Figura 5.15 – Gráfico de comparação das acelerações verticais para o movimento de caminhada síncrona.



Fonte: Autor

Figura 5.16 – Gráfico de comparação das acelerações verticais para o movimento de caminhada assíncrona.

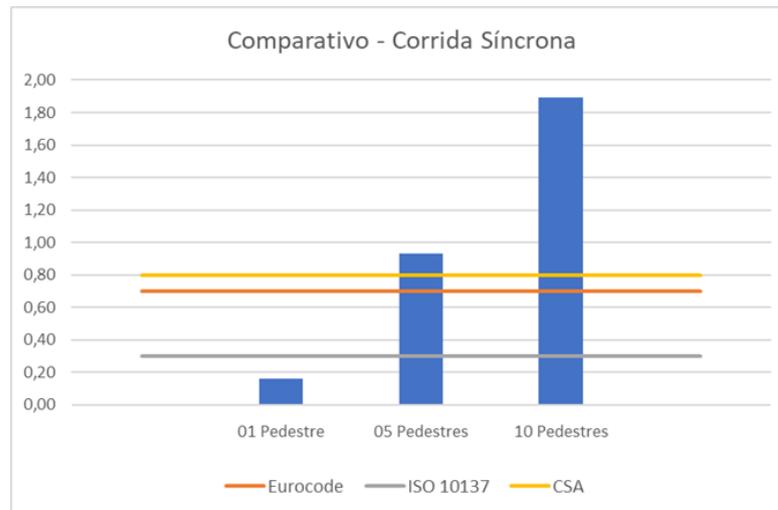


Fonte: Autor

Pode-se concluir que os valores de aceleração obtidos para o movimento de caminhada assíncrona estão completamente atendendo os limites normativos. Os valores de aceleração relativos à caminhada síncrona de 90 pedestres é maior que os limites impostos pelo [EUROCODE \(2005\)](#) e [ISO 10137 \(2007\)](#). Por sua vez, todos os limites apresentados são superados pela aceleração referente ao movimento de caminhada síncrona de 132 pedestres.

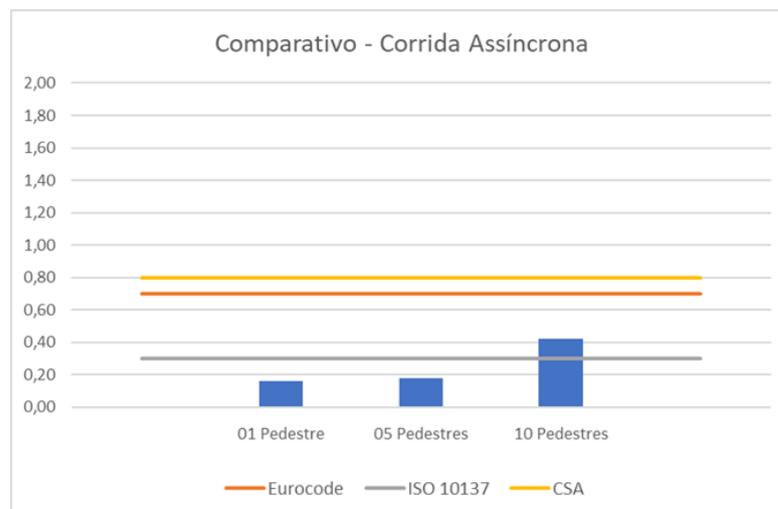
Para as acelerações relacionadas ao movimento de corrida, cabe observar que os movimentos realizados pelos grupos de multidão (40, 90 e 132 pedestres) possuem altos valores, bem acima dos limites descritos pelas principais normas. Considerando essa discrepância, a apresentação gráfica de comparação fica distorcida para os propósitos desse trabalho. Isso exposto, apresenta-se na [figura 5.17](#) e [figura 5.18](#) o comparativo das acelerações relativas aos movimentos de corrida síncrona e assíncrona de 1, 5 e 10 pedestres.

Figura 5.17 – Gráfico de comparação das acelerações verticais para o movimento de corrida síncrona.



Fonte: Autor

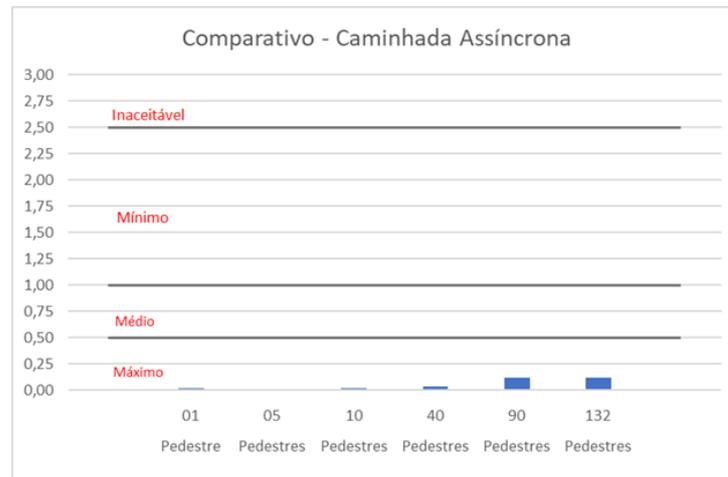
Figura 5.18 – Gráfico de comparação das acelerações verticais para o movimento de corrida assíncrona.



Fonte: Autor

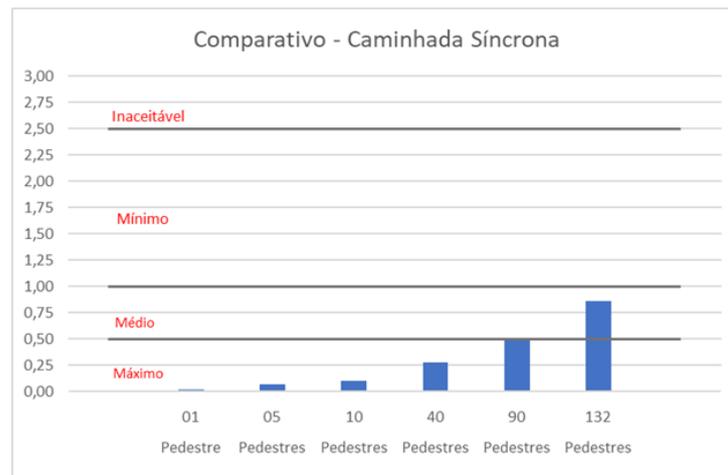
Além dos limites impostos pelas normas descritas, a (NBR 7187, 2021) e o (SÉTRA, 2006) definem níveis de conforto para a estrutura analisada. Essas referências estabelecem 4 níveis de conforto, sendo eles máximo (abaixo de $0,50 \text{ m/s}^2$), médio ($0,50 \text{ m/s}^2$ a $1,00 \text{ m/s}^2$), mínimo ($1,00 \text{ m/s}^2$ a $2,50 \text{ m/s}^2$) e inaceitável (acima de $2,50 \text{ m/s}^2$). A seguir, apresentam-se os gráficos de comparação das acelerações estimadas para o movimento de caminhada síncrona e assíncrona com os níveis de conforto estipulados (figura 5.19 e figura 5.20)

Figura 5.19 – Gráficos de níveis de conforto para o movimento de caminhada assíncrona.



Fonte: Autor

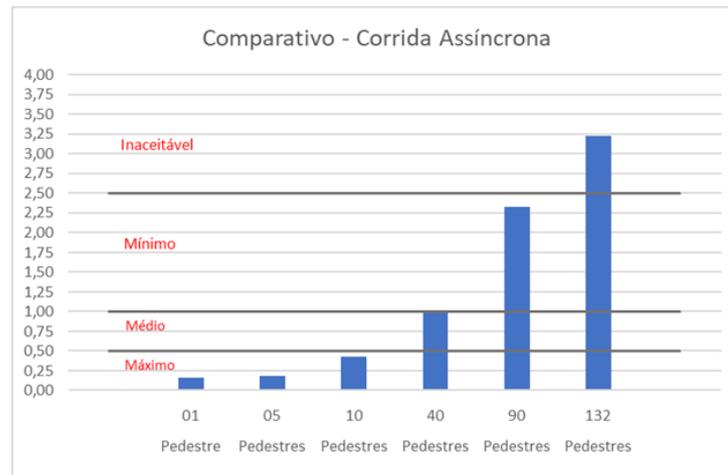
Figura 5.20 – Gráficos de níveis de conforto para o movimento de caminhada síncrona.



Fonte: Autor

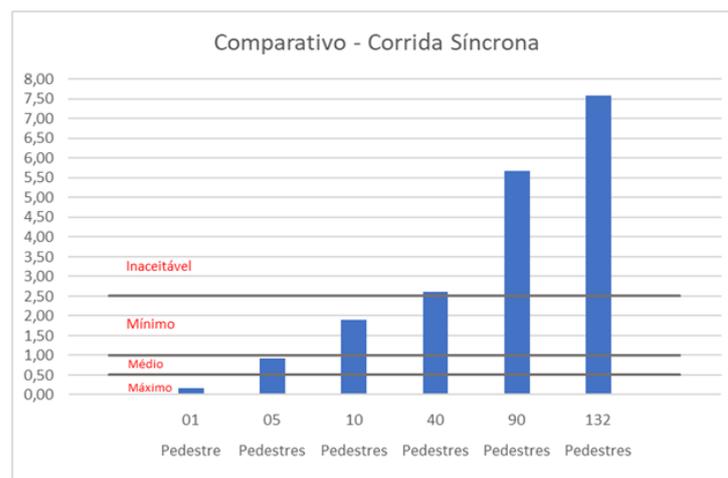
De modo semelhante, demonstra-se na [figura 5.21](#) e [figura 5.22](#) os níveis de conforto esperados perante às acelerações estimadas para o movimento de corrida.

Figura 5.21 – Gráficos de níveis de conforto para o movimento de corrida assíncrona.



Fonte: Autor

Figura 5.22 – Gráficos de níveis de conforto para o movimento de corrida síncrona.



Fonte: Autor

Para o nível de conforto máximo foram encontrados os movimentos de caminhada assíncrona. Também estão no nível de conforto máximo as acelerações relativas à caminhada síncrona, com exceção da distribuição com 132 pedestres, a qual apresenta nível de conforto médio. Para as acelerações relativas ao movimento de corrida, nota-se que todas as acelerações relativas a distribuição de 40, 90 e 132 pedestres possuem conforto mínimo ou inaceitável para esses normativos.

Além dos limites e níveis de conforto, destaca-se as formulas empíricas apresentadas pelos normativos para estimativa da aceleração máximo das estruturas. Dos normativos considerados, a (NBR 7187, 2021), a (CSA, 2006) e o (FIB, 2005) recomendam métodos para estimativa da aceleração.

Para estimativa das acelerações máxima vertical e horizontal da estrutura com a utilização da (NBR 7187, 2021), faz-se necessário a definição dos parâmetros estruturais e

das constantes tabeladas presentes na norma de referência. Ainda, o normativo relata que para o cálculo das acelerações é considerado que a massa média de cada pedestre é de 75 kg, com desvio padrão de 13 kg.

Inicialmente, estipula-se a densidade de pessoas que trafegam na passarela com o objetivo de definir as constantes a e b (tabela 3.8), as quais serão posteriormente utilizadas no cálculo das variáveis k_1 (equação (5.3)) e k_2 (equação (5.4)).

$$k_1 = a_1 \cdot f^2 + a_2 \cdot f + a_3. \quad (5.3)$$

$$k_2 = b_1 \cdot f^2 + b_2 \cdot f + b_3. \quad (5.4)$$

Definidos os valores acima detalhados e acrescido da frequência natural (4,6199Hz) encontrada na análise modal, aplica-se a equação de cálculo dos fatores k_1 e k_2 . As constantes e os valores resultantes são apresentados na tabela 5.6.

Tabela 5.6 – Constantes e parâmetros para estimativa da aceleração pelo método da NBR 7187 (2021).

d (P/m^2)	a_1	a_2	a_3	b_1	b_2	b_3	k_1	k_2
0,50	-0,07	0,60	0,075	0,003	-0,040	-1,000	1,3529	-1,1208
1,0	-0,07	0,56	0,084	0,004	-0,045	-1,000	1,1771	-1,1225
1,5	-0,08	0,50	0,085	0,005	-0,060	-1,005	0,6875	-1,1754

Fonte: (NBR 7187, 2021)

Outra variável importante para a aplicação da fórmula é a taxa de amortecimento da estrutura. Cabe aqui lembrar que a taxa de amortecimento se relaciona com a amplitude dos movimentos vibratórios e dos detalhes construtivos que podem dissipar as energias cinéticas da vibração. Cabe aqui destacar que para correta estimativa da taxa de amortecimento da estrutura, faz-se necessário a realização de instrumentação da passarela para monitoramento do comportamento dinâmico da estrutura construída. No presente estudo, utiliza-se a taxa de amortecimento estimada em 0,60%, para aplicação da metodologia de estimativa de acelerações da NBR 7187:2021.

Na definição da massa modal, buscou-se analisar informações do modelo numérico elaborado, com o objetivo de atender aos requisitos da norma. Obteve-se a massa total da estrutura em 42.037,00 kg e, por consequência, uma massa por metro linear de 1.201,06 kg/m. O valor de massa modal aplicados à equação é de 21.018,50 kg para estimativa da aceleração vertical.

A partir da densidade de pessoas, define-se ainda as variáveis tabeladas C , K_f , $K_{a.95\%}$. Na tabela 5.7 são apresentados os valores possíveis para as referidas variáveis.

Tabela 5.7 – Constantes para aceleração vertical.

$d (P/m^2)$	$K_f (kN)$	C	a_1	a_2	a_3	b_1	b_2	b_3	$k_{a,95\%}$
$\leq 0,5$	$1,20 \cdot 10^{-2}$	2,95	-0,07	0,60	0,075	0,003	-0,040	-1,000	3,92
1,0	$7,00 \cdot 10^{-3}$	3,70	-0,07	0,56	0,084	0,004	-0,045	-1,000	3,80
1,5	$3,34 \cdot 10^{-3}$	5,10	-0,08	0,50	0,085	0,005	-0,060	-1,005	3,74

Fonte: (NBR 7187, 2021)

Cabe aqui destacar que, conforme exposto na referida norma, o parâmetro K_f possui como unidade o kN . Entretanto, estudando as demais unidades das variáveis utilizadas, nota-se que para que o resultado da equação proposta seja dado em m/s^2 é necessário a aplicação do parâmetro K_f em $kg \cdot m/s^2$, o que equivale à unidade N . Dessa forma, observa-se que os valores tabelados para a variável K_f foram convertidos de kN para N e aplicados na metodologia proposta pela NBR 7187 (2021) para estimativa das acelerações máximas. Os valores utilizados são demonstrados na tabela 5.8.

Tabela 5.8 – Constantes para estimativa da aceleração pelo método da NBR 7187 (2021).

$d (P/m^2)$	$k_f (N)$	C	$K_{a,95\%}$
0,50	12,00	2,95	3,92
1,00	7,00	3,70	3,80
1,50	3,34	3,74	3,74

Fonte: (NBR 7187, 2021)

A equação (3.18) considera todos os parâmetros acima apresentados e objetiva estimar a aceleração máxima vertical da estrutura analisada. Destaca-se que a aceleração encontrada deve ser confrontada com as faixas de nível de conforto também definidas na NBR 7187 (2021) para verificar se o projeto observa o conforto mínimo requerido pelos usuários. A partir da aplicação direta da equação (5.5) com os dados acima relatados, encontra-se os valores de aceleração conforme descritos na tabela 5.9.

$$a_{max} = k_{a,95\%} \cdot \frac{d \cdot L \cdot b}{M_i} \cdot \sqrt{C \cdot k_f^2 \cdot K_1 \cdot \xi^{k_2}} \quad (5.5)$$

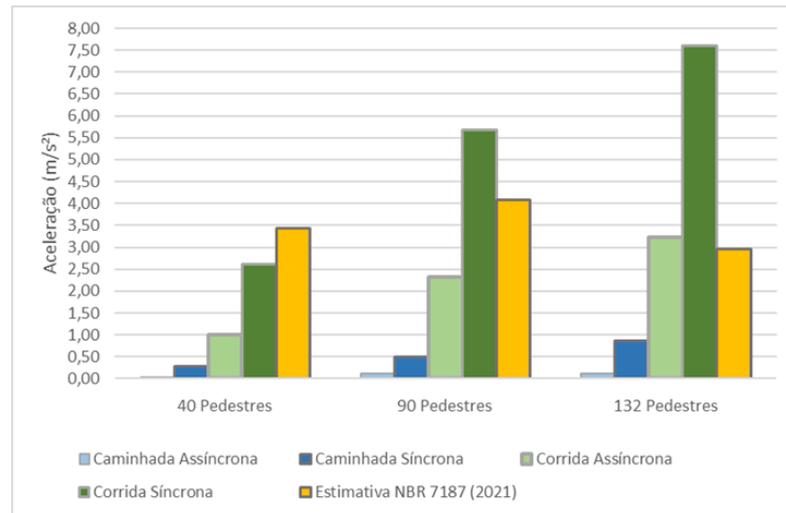
Tabela 5.9 – Acelerações por densidade de pedestres pelo método da NBR 7187 (2021).

$d (P/m^2)$	Aceleração (m/s^2)
0,50	3,4393
1,00	4,0816
1,50	2,9539

Fonte: (NBR 7187, 2021)

Obtendo as acelerações estimadas pela (NBR 7187, 2021), pode-se fazer a comparação com as acelerações obtidas pelas simulações realizadas no modelo numérico. A figura 5.23 mostra os valores de aceleração resultante dos movimentos de caminhada e corrida síncrono e assíncrono comparados com as estimativas encontradas para as três densidades de pedestres proposta.

Figura 5.23 – Gráfico de comparação das acelerações estimadas pela (NBR 7187, 2021).



Fonte: Autor

Outrossim, o CSA (2006) apresenta outra formulação empírica para estimativa das acelerações de pico em passarelas. A equação (5.6) considera frequência fundamental da estrutura (f), a deflexão máxima (y) da passarela devido à aplicação de uma força estática de 700 N, o coeficiente de forma (k_{forma}) e o fator de resposta dinâmica (ψ).

$$a_{max} = 4\pi^2 f^2 y k_{forma} \Psi; \quad (5.6)$$

De modo inicial, o fator de forma é definido conforme figura 3.5. A estrutura em análise dispõe de um único vão, sendo o recomendado a utilização do fator k_{forma} igual a 1,00. De modo semelhante, o fator de resposta dinâmica é definido pelo gráfico da figura 3.6. Para definição do referido fator, cabe rememorar os valores relativos à taxa de amortecimento e comprimento de vão, a saber 0,06% e 35,00m, respectivamente. A partir desses características é possível definir o fator ψ em 11,00.

Por fim, recorre-se ao modelo numérico para estimativa da deflexão máxima causada pela carga estática de 700N. Para auferir o maior valor possível, a carga é aplicada no centro do vão da estrutura e esta apresenta uma deflexão de $6,64 \times 10^{-5}$. A tabela 5.10 sintetiza os valores adotados para os parâmetros da equação e apresenta o valor contabilizado de aceleração pico estimado para a estrutura.

De modo parecido, o FIB (2005) apresenta uma formulação empírica fundamentada

Tabela 5.10 – Parâmetros para estimativa da aceleração pico pelo método do CSA (2006)

Parâmetro	Valor
f	4,6199Hz
k_{forma}	1,00
ψ	11,00
y	$6,64 \times 10^{-5}$
a_{max}	$0,5988 m/s^2$

Fonte: Autor

naquela apresentada pelo antigo código de Ontário (CSA, 2006). A equação (5.7) considera a frequência fundamental da estrutura (f), a deflexão máxima (y) da passarela, o coeficiente de Fourier (α) relativo ao movimento estimado e o fator de ampliação dinâmica (Φ).

$$a_{max} = 4\pi^2 f^2 y \alpha \Phi . \quad (5.7)$$

O fator de ampliação dinâmica é encontrado por meio dos parâmetros de taxa de amortecimento (0,06%) e número de passadas (46 para caminhada e 27 para corrida). Os referidos valores são aplicados ao gráfico da figura 3.1, onde é possível inferir o valor de 9,00 para o fator Φ . Ainda, o valor de deflexão máxima a ser aplicado na presente metodologia é o mesmo auferido pelo modelo numérico após aplicação da carga de 700N, a saber $6,64 \times 10^{-5}$.

O diferencial dessa metodologia é a aplicação do coeficiente de Fourier na equação de estimativa de aceleração máxima. Os coeficientes foram definidos no mesmo normativo e para aplicação da metodologia é utilizado o valor de 0,4 para o movimento de caminhada (2,00 Hz) e 0,5 para o movimento de corrida (2,50 Hz), conforme mostra a tabela 3.1. Os valores adotados e as acelerações de pico encontradas estão apresentadas na tabela 5.11

Tabela 5.11 – Parâmetros para estimativa da aceleração pico pelo método do FIB (2005)

Parâmetro	Valor
f	4,6199Hz
$\Phi_{caminhada}$	9,00
$\Phi_{corrida}$	9,00
y	$6,64 \times 10^{-5}$
$\alpha_{caminhada}$	0,4
$\alpha_{corrida}$	0,5
$a_{caminhada}$	$0,0424 m/s^2$
$a_{corrida}$	$0,0530 m/s^2$

Fonte: Autor

As estimativas de aceleração pico de caminhada realizadas por meio da metodologia do FIB (2005), a saber $0,0424 m/s^2$, é maior que os resultados obtidos para as simulações

numéricas de pequenos grupos de pedestres (1, 5 e 10 pedestres) em movimento assíncrono de caminhada. Ainda, a aceleração de $0,0530 \text{ m/s}^2$ estimada para o movimento de corrida se aproxima ao resultado obtido de um único pedestre trafegando pela estrutura para o mesmo movimento.

O valor de aceleração de $0,5988 \text{ m/s}^2$, estimado pelo método do [CSA \(2006\)](#), está acima de quase todas as acelerações relativas aos cenários de caminhada, exceto o movimento síncrono de 132 pedestres, e das distribuições de pequenos grupos (1, 5 e 10 pedestres) para o movimento de corrida assíncrona. Cabe aqui destacar que ambos os normativos em análise não especificam o tipo de distribuição de pedestre e, no caso da [CSA \(2006\)](#), nem o tipo de movimento equivalente para as acelerações pico estimadas.

6 Conclusões

Este trabalho buscou estudar o comportamento dinâmico dos projetos padrão de passarelas apresentados do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes do Brasil (DNIT). A pesquisa realizada pretende contribuir com a qualidade dos projetos apresentados, analisando o conforto e a segurança da passarela estudada.

Utilizando o modelo numérico desenvolvido, as simulações da passarela e os normativos estudados foi possível chegar a algumas conclusões detalhadas nas próximas seções.

6.1 Conclusões a respeito do comportamento estrutural

Para as conclusões relativas às características dinâmicas da estrutura, o modelo numérico foi fonte de valores estimados e possíveis comportamentos estruturais. Detalha-se a seguir os achados relativos às frequências naturais e acelerações.

Inicialmente, percebe-se que a primeira frequência natural obtida (2,41 *Hz*) a partir do modelo numérico se aproxima da estimativa encontrada por meio da metodologia da [AASHTO \(2009\)](#) (1,90 *Hz*). Outrossim, observa-se que a frequência encontrada para a passarela padrão e próxima à média das frequências obtidas em trabalhos realizados com estruturas semelhantes (2,93 *Hz*). Conclui-se que a lista de valores descritos validam as respostas estimadas pelo modelo numérico elaborado no presente trabalho.

Atenta-se para o fato de que as duas primeiras frequências naturais obtidas estão abaixo de 5,00 *Hz*, indicando que a passarela necessita de uma análise mais detalhada conforme prescrição do [EUROCODE \(2005\)](#) e [CSA \(2006\)](#). No mesmo sentido, a primeira frequência natural apresentada pela estrutura está dentro da faixa de baixo risco de ressonância, definida pela ([SÉTRA, 2006](#)), conforme especificado na [tabela 3.4](#) e [tabela 3.5](#). O cenário descrito reforça a necessidade de realizar maiores estudos relativos à estrutura e a possibilidade da existência de vibrações excessivas e desconforto do usuário durante o uso a passarela.

Em relação à aceleração, observa-se que os valores encontrados quando a passarela é excitada pelas forças induzidas pelo movimento de caminhada assíncrona e síncrona de até 40 pedestres são inferiores aos limites estabelecidos nas normas apresentada nessa dissertação ([figura 5.15](#) e [figura 5.16](#)) e indicam nível de conforto máximo. O valor de aceleração obtido a partir da caminhada síncrona de 90 e 132 pedestres, apesar de exceder o limite imposto por algumas das normas apresentadas, ainda representam o nível de conforto médio, segundo o padrão orientativo da [NBR 7187 \(2021\)](#) e do [SÉTRA \(2006\)](#) ([figura 5.19](#) e [figura 5.20](#)).

Por outro lado, as acelerações obtidas ao submeter a estrutura ao tráfego de pedestres correndo levam a concluir que o movimento pode causar grande desconforto aos usuários

da passarela, pois ultrapassam os limites estabelecidos pelas normas na maioria das configurações de distribuição dos pedestres. Apenas os movimentos de 1 e 5 pedestres correndo assíncronos atendem a todos os limites estipulados nas normas.

Para uma melhor análise dos valores, apresenta-se a [figura 5.21](#) e [figura 5.22](#), nas quais são mostrados os níveis de conforto relativo aos movimento de corrida. Nota-se, inicialmente, que as configurações de 132 pedestres assíncronos e 40, 90 e 132 pedestres síncronos levam a acelerações que correspondem à faixa de conforto inaceitável para os padrões da [NBR 7187 \(2021\)](#) e do [SÉTRA \(2006\)](#). Ainda, encontram-se no intervalo de conforto mínimo as acelerações induzidas pelas distribuições de 10 pedestres síncronos e 40 e 90 pedestres assíncronos.

Outrossim, os padrões gráfico dos resultados mostram a ocorrência do fenômeno de ressonância na passarela nos casos de carga do movimento de corrida síncrona. O fenômeno descrito era esperado, uma vez que a frequência de excitação do movimento ($2,50 \text{ Hz}$) está muito próxima da primeira frequência natural da estrutura ($2,41 \text{ Hz}$). A ocorrência descrita atua amplificando os valores de aceleração para o movimento de corrida.

Considerando as elevadas acelerações obtidas pelo modelo numérico para o movimento de corrida e a possível ocorrência do fenômeno de ressonância, recomenda-se maiores estudos para confirmação dos problemas de vibração estimados por esse trabalho. Recorda-se que acelerações excessivas em estruturas devem ser evitadas ou, em casos mais específicos, controlados por meio de dispositivos amortecedores, uma vez que esses episódios causam desconforto aos usuários da passarela.

6.2 Conclusões a respeito das normas

Para o presente trabalho foram estudados normativos e guias, a saber [FIB \(2005\)](#), [EUROCODE \(2005\)](#), [CSA \(2006\)](#), [SÉTRA \(2006\)](#), [ISO 10137 \(2007\)](#), [AASHTO \(2009\)](#) e [NBR 7187 \(2021\)](#), os quais versam em parte sobre a análise dinâmica de passarelas e os principais requisitos de conforto do usuário. A seguir apresenta-se um resumo sobre as orientações trazidas nesses normativos.

O [FIB \(2005\)](#) apresentou o Bulletin 32, onde ficam registradas diversas formulas matemáticas para estimativa das acelerações pico e do modelo de carga de pedestres. Relata-se que no presente estudo, a estimativa de aceleração apresentou resultados próximos quando comparado aquele obtido pelo modelo numérico.

O [EUROCODE \(2005\)](#) propõe modelos de carga pontual e distribuída para simulação de pedestres trafegando na estrutura. Referente às características dinâmicas da estrutura o normativo recomenda maiores investigações para estruturas cuja primeira frequência vertical seja menor que $5,00 \text{ Hz}$ e horizontal menor que $2,50 \text{ Hz}$. Para as acelerações, o normativo propões limites máximos, além dos quais podem causar desconforto do usuário.

O [CSA \(2006\)](#) dispõe de formulas para estimativa do carregamento de pedestres na estrutura e das acelerações máximas sofridas pela passarela. Outrossim, são impostos limites aceitáveis de aceleração relacionados à frequência natural da estrutura, conforme gráfico disponível na norma. Nota-se que o normativo em tela apresentou os maiores limites de aceleração para a passarela estudada.

Considerado um dos guias mais completos sobre passarelas, o guia [SÉTRA \(2006\)](#) apresenta uma metodologia inovadora para classificação e análise de passarelas de pedestres. O guia define uma série de orientações que balizam a escolha do modelo de carga e a profundidade de análise requerida para cada passarela baseada no valor de frequência natural. O guia recomenda ainda faixas de aceleração que se relacionam à níveis de conforto, oferecendo uma metodologia mais próxima da realidade.

A [ISO 10137 \(2007\)](#) apresenta uma metodologia pra estimativa do carregamento humano por meio de uma série de Fourier. Ainda, são determinado limites de aceleração vertical e horizontal baseado na frequência natural da estrutura, diferente dos demais normativos estudados. Frisa-se que a metodologia que define os limites de aceleração propuseram os valores mais conservadores para o estudo de caso dessa dissertação.

A [AASHTO \(2009\)](#) traz uma visão menos conservadora sobre o item em tela, recomendando proceder maiores investigações para os casos de frequências naturais verticais abaixo de $3,00 \text{ Hz}$ e horizontais abaixo de $1,30 \text{ Hz}$. Ainda, o referido normativo apresenta uma formulação para estimativa da frequência natural a partir do peso total da estrutura.

A norma foco desta pesquisa e, conseqüentemente, a mais detalhada é a [NBR 7187 \(2021\)](#). Ela apresenta uma expressão matemática para estimativa da aceleração máxima da estrutura, na qual são consideradas uma série de parâmetros estruturais e constantes tabeladas. Conforme relatos feitos nesse trabalho, sugere-se que a metodologia apresentada seja revista para adequação dos parâmetros, de modo que os resultados apresentados sejam mais coerentes a realidade da estrutura.

6.3 Recomendações de pesquisas futuras

A presente dissertação é produto inicial de uma linha de pesquisa sobre o projeto-padrão de passarelas proposto pelo DNIT. O trabalho pode ser continuado com os seguintes tópicos relacionados:

- Aplicar excitações horizontais para análise do comportamento dos deslocamentos e acelerações laterais da estrutura;
- Realizar o estudo e aplicação de outros modelos de carregamento na passarela estudada;
- Confecção de protótipos experimentais ou modelos em escala para aferição de dados em laboratório;

- Elaborar modelo numérico das estruturas de acesso e analisar a influencia desses no desempenho dinâmico do conjunto da passarela;
- Após construção da passarela, realizar monitoramentos na estrutura real para calibrar o modelo numérico e obter resultados mais precisos.
- Proceder com pesquisas de campo para identificar a sensibilidade dos usuários à movimentação da estrutura e sua percepção de segurança e conforto;
- Caso confirmado os problemas relacionados à vibração, estudar dispositivos para atenuar as acelerações da estrutura.

Referências

- AASHTO. **LRFD Guide Specification for the Design of Pedestrian Bridges**. [S.l.], 2009. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC. Citado nas pp. 18, 19, 35, 48, 63, 64, 84, 85 e 86.
- ACITO, M.; MASTRANGELO, R.; MAGRINELLI, E.; SIMONCELLI, M. Design strategies of vibration mitigation systems for an existing suspended footbridge. **Engineering Structures**, v. 249, 2021. Citado nas pp. 17 e 18.
- AHMADI, E.; CAPRANI, C.; ZIVANOVIC, S.; HEIDARPOUR, A. Vertical ground reaction forces on rigid and vibrating surfaces for vibration serviceability assessment of structures. **Engineering Structures**, v. 172, p. 723–738, 2018. Citado na p. 33.
- ANDRIACCHI, T.; OGLE, J.; GALANTE, J. Ground loading from footsteps. **Journal of the Acoustic Society of America**, v. 48, n. 5, p. 1288–1292, 1970. Citado na p. 31.
- ANDRIACCHI, T.; OGLE, J.; GALANTE, J. Walking speed as a basis for normal and abnormal gait measurements. **Journal of Biomechanics**, v. 10, n. 4, p. 261–268, 1977. Citado na p. 30.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800**: Projetos de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, 2008. 163 p. Citado na p. 18.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9050**: Acessibilidade a edificações, mobiliário, espaços e equipamentos urbanos. Rio de Janeiro, 2015. 163 p. Citado nas pp. 58 e 59.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7187**: Projeto de pontes, viadutos e passarelas de concreto. Rio de Janeiro, 2021. 82 p. Citado nas pp. 10, 11, 18, 19, 35, 49, 50, 65, 70, 72, 76, 78, 79, 80, 81, 84, 85 e 86.
- BACHMANN, H.; AMMANN, W. Vibrations in structures induced by man and machines. **Structural Engineering**, v. 2, 1987. Citado na p. 36.
- BRUNET JR., O.; REZENDE, F. A.; CARVALHO, E. M. L.; VARELA W. D. PEREIRA, A. M. B. Probabilistic vibration performance assessment of a long-span steel footbridge. **Journal of Performance of Constructed Facilities**, v. 36, n. 1, 2021. Citado na p. 33.
- CAETANO, E.; CUNHA, A.; MAGALHÃES, F.; MOUTINHO, C. Studies for controlling human-induced vibration of the pedro e inês footbridge, portugal. part 1: Assessment of dynamic behaviour. **Engineering Structures**, v. 32, p. 1069–1081, 2010a. Citado na p. 22.

- CAETANO, E.; CUNHA, A.; MOUTINHO, C. Vandal loads and induced vibrations on a footbridge. **Journal of Bridge Engineering**, v. 3, p. 71–76, 2010b. Citado na p. 17.
- CEB. **Bulletin D'information N° 209 - Vibration Problems in Structures**. [S.l.], 1991. Comite Euro-International du Beton, Vienne, Austria. Citado nas pp. 18, 19 e 35.
- CSA. **Canadian Highway Bridge Design Code**. [S.l.], 2006. Canadian Standards Association, Ontario, Canada. Citado nas pp. 11, 18, 19, 35, 43, 44, 45, 46, 64, 74, 78, 81, 82, 83, 84, 85 e 86.
- DALLARD, P.; FITZPATRICK, A. J.; FLINT, A.; BOURVA, S. L.; LOW, A.; SIMITH, R. M. R.; WILLFORD, M. The london millennium footbridge. **The Structural Engineer**, v. 79, n. 22, 2001. Citado na p. 23.
- DANG, H. V.; ZIVANOVIC, S. Experimental characterisation of walking locomotion on rigid level surfaces using motion capture system. **Engineering Structures**, v. 91, p. 141–154, 2015. Citado na p. 33.
- DNER. **Manual de Projetos de Obras de Arte Especiais**. [S.l.], 1996. National Department of Roads and Highways, Brasília, Brazil. Citado na p. 57.
- DNIT. **Álbum de Projetos-Tipo de Passarelas de Pedestres**. – 2. ed. [S.l.], 2020. National Departamento of Transportation Infrastructure, Brasília, Brazil. Citado nas pp. 17, 18, 23, 57, 58, 59, 60 e 63.
- DOZ, G. N.; BRITO, J. L. V.; BRASILIANO, A. Numerical and experimental assessment of a typical brazilian footbridge. **IBRACON Structures and Materials Journal**, v. 11, n. 5, p. 1025–1035, October 2018. Citado nas pp. 24 e 63.
- ESTEFANI, C. Estudo das características dinâmicas de estruturas típicas da cidade de Brasília. **Relatório Final de Iniciação Científica, PIBIC – CNPq**, 2000. Citado na p. 54.
- EUROCODE. **Basis of structural design**. [S.l.], 2005. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium. Citado nas pp. 18, 19, 35, 37, 38, 64, 66, 69, 73, 75, 84 e 85.
- EUROCODE 1. **Actions on structures - Part 2: Traffic loads on bridges**. [S.l.], 2003. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium. Citado nas pp. 37 e 38.
- FENG, P.; WANG, Z.; JIN, F.; ZHU, S. Vibration serviceability assessment of pedestrian bridges based on comfort level. **Journal of Performance of Constructed Facilities**, v. 33, n. 5, 2019. Citado na p. 17.
- FIB. **Bulletin 32 - Guidelines for the design of footbridges**. [S.l.], 2005. Fédération Internationale du Béton, Lausanne, Suíça. Citado nas pp. 11, 35, 36, 78, 81, 82 e 85.
- FUJINO, Y.; PACHECO, B. M.; NAKAMURA, S. I.; WARNITCHAI, P. Synchronization of human walking observed during lateral vibration of a congested pedestrian bridge.

- Earthquake Engineering and Structural Dynamics**, v. 22, n. 9, p. 741–758, 1993. Citado na p. 21.
- FUJINO, Y.; SIRINGORINGO, D. M. A conceptual review of pedestrian-induced lateral vibration and crowd synchronization problem on footbridges. **Journal of Bridge Engineering**, 2015. Citado na p. 22.
- GOMES, D. H. M. Controle da resposta dinâmica de uma passarela da cidade de Brasília com a utilização de amortecedores de massa sintonizados. **Dissertação de Mestrado**, Publicação E.DM-008A/06, p. 174, 2006. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF. Citado nas pp. 20, 24, 54, 56 e 63.
- GONZAGA, I. B. N.; PFEIL, M. S.; VARELA, W. D. Interação dinâmica pedestre - estrutura de passarela submetida ao tráfego de multidão. *In*: XII BRAZILIAN CONFERENCE OF BRIDGES AND STRUCTURES. [S.l.], 2020. (in Portuguese). Citado na p. 21.
- ISO 10137. **Bases for design of structures — Serviceability of buildings and walkways against vibrations**. Geneva, Switzerland, 2007. Citado nas pp. 18, 19, 35, 46, 47, 48, 64, 66, 69, 74, 75, 85 e 86.
- NAKASONE, Y.; STOLARSKI, T.; YOSHIMOTO, S. **Engineering Analysis with ANSYS Software**. [S.l.]: Elsevier, 2006. Citado na p. 52.
- PEREIRA, S. P. Desempenho dinâmico de sistemas estruturais de passarelas. **Dissertação de Mestrado**, Publicação MTARH.DM-17A/17, p. 130, 2017. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF. Citado nas pp. 24, 25, 53 e 63.
- REZENDE, F. A.; VARELA, W. D.; CARVALHO, E. M. L.; PEREIRA, A. M. B. Vibration performance assessment of a long-span steel footbridge. **Structures and Buildings**, v. 175, n. 6, p. 500–512, 2020. Citado nas pp. 26 e 63.
- RODRÍGUEZ-SUESCA, A. E.; GUTIÉRREZ-JUNCO, O. J.; HERNÁNDEZ-MONTES, E. Vibration performance assessment of deteriorating footbridges: A study of tunja's public footbridges. **Engineering Structures**, v. 256, 2022. Citado nas pp. 26, 27, 28 e 63.
- SALGADO, R.; BRANCO, J. M.; CRUZ, P. J. S.; AYALA, G. Serviceability assessment of the gois footbridge using vibration monitoring. **Case Studies in Nondestructive Testing and Evaluation**, v. 2, p. 71–76, 2014. Citado na p. 21.
- SANTOS, I. C. Atualização do modelo numérico em elementos finitos de uma passarela de pedestres com base em dados experimentais. **Dissertação de Mestrado**, Publicação E.DM-010A/09, p. 136, 2009. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF. Citado nas pp. 24 e 63.
- SÉTRA. **Footbridges – Assesment of vibrational behavior of footbridges under pedestrian loading – Practical Guidelines**. [S.l.], 2006. Technical Department for

-
- Transport, Roads and Bridges Engineering and Road Safety, French. Citado nas pp. [18](#), [19](#), [28](#), [35](#), [38](#), [39](#), [40](#), [41](#), [42](#), [43](#), [64](#), [76](#), [84](#), [85](#) e [86](#).
- TADEU, A.; ROMERO, A.; BANDEIRA, F.; PEDRO, F.; DIAS, S.; SERRA, M.; BRETT, M.; GALVIN, P. Theoretical and experimental analysis of the quasi-static and dynamic behaviour of the world's longest suspension footbridge in 2020. **Engineering Structures**, v. 253, 2022. Citado na p. [17](#).
- TOSO, M. A.; GOMES, H. M.; SILVA, F. T.; PIMENTEL, R. L. Experimentally fitted biodynamic models for pedestrian–structure interaction in walking situations. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 723, p. 590–606, 2016. Citado na p. [34](#).
- VARELA, W. D.; PFEIL, M. S.; COSTA, N. P. A. Experimental investigation on human walking loading parameters and biodynamic model. **Journal of Vibration Engineering & Technologies**, v. 8, p. 883–892, 2020. Citado nas pp. [33](#) e [34](#).
- WEI, X.; LIU, J.; BI, S. Uncertainty quantification and propagation of crowd behaviour effects on pedestrian-induced vibrations of footbridges. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 167, 2022. Citado na p. [17](#).
- WEI, X.; RUSSELL, J.; ZIVANOVIC, S.; MOTTRAM, J. T. Measured dynamic properties for frp footbridges and their critical comparison against structures made of conventional construction materials. **Composite Structures**, v. 223, 2019. Citado nas pp. [25](#) e [63](#).
- WHEELER, J. E. Prediction and control of pedestrian induced vibration in footbridges. **Journal of the Structural Division**, v. 108, n. 9, p. 2045–2065, 1982. Citado nas pp. [30](#), [31](#), [32](#), [55](#) e [65](#).
- ZALL, E.; ANDERSSON, A.; ULKER-KAUSTELL, M.; KAROUMI, R. An efficient approach for considering the effect of human-structure interaction on footbridges. **Procedia Engineering**, v. 199, p. 2913–2918, 2017. Citado na p. [18](#).
- ZIVANOVIC, S.; PAVIC, A.; REYNOLDS, P. Vibration serviceability of footbridges under human-induced excitation: a literature review. **Journal of Sound and Vibration**, v. 279, p. 1–74, 2005. Citado nas pp. [21](#), [29](#), [30](#), [31](#) e [32](#).