



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**DARCY HANNAH FALCÃO RANGEL MOREIRA**

**ATUALIZAÇÃO DA MODELAGEM DE UMA PASSARELA DE PEDESTRES E  
AVALIAÇÃO DO SEU DESEMPENHO DINÂMICO**

João Pessoa, PB

2018

**DARCY HANNAH FALCÃO RANGEL MOREIRA**

**ATUALIZAÇÃO DA MODELAGEM DE UMA PASSARELA DE PEDESTRES E  
AVALIAÇÃO DO SEU DESEMPENHO DINÂMICO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à  
Universidade Federal da Paraíba como pré-requisito  
para obtenção do título de Bacharel em Engenharia  
Civil.

Orientador: Prof<sup>ª</sup>. Dra. Andrea Brasiliano Silva

João Pessoa, PB

2018

M838a Moreira, Darcy Hannah Falcão Rangel

Atualização da modelagem de uma passarela de pedestres e avaliação do seu desempenho dinâmico. / Darcy Hannah Falcão Rangel Moreira. – João Pessoa, 2018.

84f. il.:

Orientador: Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Andrea Brasiliano Silva

Monografia (Curso de Graduação em Engenharia Civil)  
Campus I - UFPB / Universidade Federal da Paraíba.

1. Passarela 2. Vibrações 3. Modelagem de estruturas 4.  
Método dos elementos finitos. 5. Análise de estruturas I. Título.

BS/CT/UFPB

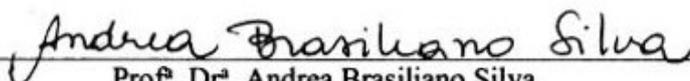
CDU: 2.ed. 624(043.2)

## FOLHA DE APROVAÇÃO

**DARCY HANNAH FALCÃO RANGEL MOREIRA**

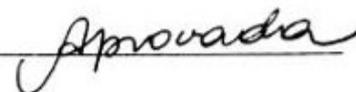
### **ATUALIZAÇÃO DA MODELAGEM DE UMA PASSARELA DE PEDESTRES E AVALIAÇÃO DO SEU DESEMPENHO DINÂMICO**

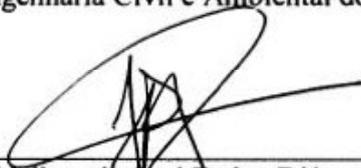
Trabalho de Conclusão de Curso em 11/06/2018 perante a seguinte Comissão Julgadora:



Profª. Drª. Andrea Brasiliano Silva

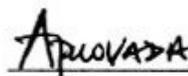
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB

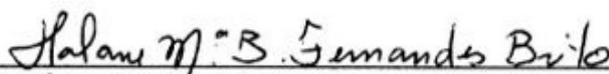




Prof. Dr. Hidelbrando José Farkat Diógenes

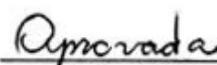
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB

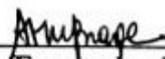




Profª. Drª. Halane Maria Braga Fernandes Brito

Departamento de Engenharia Mecânica do CT/UFPB





Profª. Ana Cláudia Fernandes Medeiros Braga

Matrícula Siape: 1668619

Coordenadora do Curso de Graduação em Engenharia Civil

*Dedico este trabalho e a conclusão desse  
curso à minha mãe, que é tudo pra mim.  
Amo você.*

## AGRADECIMENTOS

Durante os cinco anos em que cursei Engenharia Civil foram muitas batalhas e desafios que venci. Sem dúvida, a presença de algumas pessoas especiais tornaram esse fardo mais leve e com certeza foram essenciais para essa conquista. Concluindo esta etapa da minha vida, sinto-me feliz, realizada e eternamente grata.

À Deus, por proporcionar-me tantas oportunidades, por dar-me ânimo e coragem quando as situações foram tão difíceis e por colocar ao meu lado pessoas tão especiais durante essa trajetória.

À minha mãe, Ester Falcão, tão batalhadora e forte, por ser meu porto seguro e meu lar, por sempre dar tudo de si e estar comigo em todos os momentos. Por me ensinar a lutar pelos meus objetivos por mais difíceis que as situações sejam, sem você eu nunca chegaria onde cheguei. Você é a mulher em que me espelho todos os dias, que eu amo mais que tudo.

À minha família, aos meus irmãos, Cláudio Filho e Esther Hannah, pelo apoio e por estarem sempre ao meu lado em cada momento.

Ao meu namorado, Alfredo Víctor, por me fazer crescer, me guiar, me encorajar a superar meus medos e dificuldades, por nunca desistir de mim. Por estar ao meu lado sempre me dando todo o seu amor, pela paciência, por tudo que você significa pra mim.

A Marleide Albuquerque e Jerônimo Araújo, pelo cuidado como filha, por todo o suporte.

À minha orientadora, Andrea Brasiliano, por ser uma pessoa e professora excepcional, se mostrou um exemplo de profissional e mulher. Agradeço pela amizade e por todos os ensinamentos que levarei para a vida.

Aos grandes amigos que ganhei com o curso, em especial a César Rodrigues, Roberto Burity, Larissa Lima, Rhuan Vasconcelos, Guilherme Ogliari, Manuela Abath, Leandro Guedes e a todos os outros que estiveram ao meu lado em todas as madrugadas de estudo mal dormidas, dividindo cada momento difícil e compartilhando todas as conquistas. Sem vocês com certeza essa caminhada teria sido muito mais árdua e difícil.

*“[...] Não fui eu que lhe ordenei? Seja forte e corajoso! Não se apavore, nem se desanime, pois o Senhor, o seu Deus, estará com você por onde você andar.”*

(Josué 1:9)

## RESUMO

Os carregamentos em sistemas especiais, como passarelas, caracterizam-se por ter baixas frequências que podem ser próximas às frequências naturais da estrutura, gerando desconforto aos usuários e risco à segurança. A sensibilidade às vibrações em baixas frequências contribui para a necessidade de se estudar o comportamento dinâmico desses sistemas estruturais, a fim de garantir um desempenho satisfatório. Nesta linha, o trabalho consiste na atualização e análise dinâmica do modelo numérico, em elementos finitos, de uma passarela localizada na cidade de João Pessoa, utilizando simulações com alguns cenários de carregamento estimados a partir de normas com o objetivo de avaliar o desempenho estrutural dinâmico utilizando o *software* ANSYS 14.5. Para confrontar os resultados da análise no modelo, utilizaram-se os limites normativos e as frequências naturais experimentais da estrutura obtidos em testes anteriores com acelerômetros. A partir dos resultados alcançados foi possível verificar que o modelo representa bem a estrutura, apresentando frequências de vibração, nas direções vertical e lateral, próximas às identificadas experimentalmente. Quanto aos resultados das simulações, verificou-se ainda que a passarela não apresenta problemas de vibrações excessivas em nenhuma das direções estudadas para os cenários de carregamento considerados.

**PALAVRAS CHAVE:** Passarela, Vibrações, Modelagem de Estruturas, Método dos Elementos Finitos, Análise de estruturas.

## **ABSTRACT**

Loadings in special systems, such as footbridges, are characterized by low frequencies that can be close to the natural frequencies of the structure, generating discomfort and safety risk for users. Sensitivity to vibrations at low frequencies contributes to the need of studying the dynamic behavior of these structural systems in order to perform satisfactorily. The work consists of the updating and dynamic analysis of the numerical model, in finite elements, of a footbridge located in the city of João Pessoa, using simulations with some loading scenarios estimated from standards so as to evaluate the dynamic structural performance using the ANSYS 14.5 software. In order to compare the results of the analysis in the model, normative limits and the natural experimental frequencies of the structure obtained in previous tests with accelerometers were used. From the obtained results it was possible to verify that the model represents the structure well, presenting vibration frequencies in the vertical and lateral direction close to those identified experimentally. As for the simulation results, it was verified that the footbridge does not present excessive vibrations problems in any of the directions studied for the considered loading scenarios.

**KEYWORDS:** Footbridge, Vibrations, Structural Modeling, Finite Element Method, Dynamic analysis.

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Carregamento vertical típico durante uma caminhada.....	25
Figura 2 – Curva de distribuição normal das frequências de passo do caminhar de um pedestre. .....	26
Figura 3 – Diagrama de cargas nas direções vertical e horizontal durante uma caminhada. ...	26
Figura 4 – Parâmetros médios de caminhada .....	28
Figura 5 - Esquema das etapas de análise dinâmica propostas por Sétra (2006) .....	33
Figura 6 - Fator de minoração $\psi$ relativo ao Caso 1 de carregamento para ações nas direções vertical e horizontal longitudinal.....	38
Figura 7 - Fator de minoração $\psi$ relativo ao Caso 1 de carregamento para ações na direção horizontal transversal.....	38
Figura 8 - Fator de minoração $\psi$ relativo ao Caso 3 de carregamento para ações nas direções vertical e horizontal longitudinal.....	40
Figura 9 - Fator de minoração $\psi$ relativo ao Caso 3 de carregamento para ações na direção horizontal transversal.....	40
Figura 10 - Curva base de vibrações para acelerações no plano vertical. ....	44
Figura 11 - Curva base de vibrações para acelerações no plano horizontal. ....	45
Figura 12 - Aceleração de pico recomendada em vibrações devidas a atividades humanas (em % Gravidade).....	46
Figura 13 - Passarela escolhida para o estudo, localizada na Av. Pedro II, em João Pessoa – PB. .....	50
Figura 14 – Seção transversal do aparelho de apoio composto por 4 chapas de aço e borracha de Neoprene. (Dimensões em centímetros).....	51
Figura 15 – Seção transversal da viga entre os pilares e os aparelhos de apoio. (Dimensões em centímetros) .....	51
Figura 16 - Representação do elemento BEAM 188.....	52
Figura 17 - Detalhe da viga de apoio (viga I) entre o pilar e a estrutura da passarela .....	53
Figura 18 - Representação do elemento SHELL181 .....	53
Figura 19 - Discretização de parte da estrutura treliçada, por meio do elemento de viga BEAM188 e placas de coberta e piso, com o elemento de casca SHELL181 .....	54
Figura 20 - Representação do elemento SOLID 185.....	54
Figura 21 - Modelagem do pilar por meio da junção de 10 blocos sólidos inseridos no ANSYS como elemento SOLID 185 .....	55

Figura 22 - Representação do elemento COMBIN 14 .....	55
Figura 23 - Detalhe da indicação da conexão entre o ponto do pilar e o ponto da estrutura elemento de mola COMBIN14.....	56
Figura 24 – Esquema dos “passos de carga” que devem ser definidos na função de carregamento no tempo. ....	58
Figura 25 – Função determinada para o cenário 1 de carregamento na direção vertical .....	62
Figura 26 - Função determinada para o cenário 1 de carregamento na direção horizontal-longitudinal.....	62
Figura 27 - Função determinada para o cenário 1 de carregamento na direção horizontal-transversal.....	63
Figura 28 – Função de carregamento proposta pela ISO 10137 (2007) para a frequência fundamental de 1,9 Hz utilizada nos cenários 2 e 3 .....	64
Figura 29 - Representação do carregamento do tráfego de pedestres para os cenários 2 e 3...	65
Figura 30 - Placas modeladas conforme dimensões reais da passarela.....	66
Figura 31 - Placas modeladas após o refinamento. ....	66
Figura 32 - Configuração deformada da passarela correspondente ao primeiro modo de vibração lateral, em vista superior da passarela. ....	68
Figura 33 - Configuração deformada da passarela correspondente ao primeiro modo de vibração vertical, em vista frontal-superior.....	69
Figura 34 - Configuração deformada da passarela correspondente ao segundo modo de vibração vertical, em vista frontal-superior.....	70
Figura 35 - Respostas de acelerações obtidas na direção vertical no nó central referentes ao cenário 1 de carregamento.....	71
Figura 36 - Respostas de deslocamentos obtidas na direção vertical no nó central referentes ao cenário 1 de carregamento.....	71
Figura 37 - Respostas de acelerações obtidas na direção horizontal-longitudinal no nó central referentes ao cenário 1 de carregamento .....	71
Figura 38 - Respostas de deslocamentos obtidas na direção horizontal- longitudinal no nó central referentes ao cenário 1 de carregamento .....	71
Figura 39 - Respostas de acelerações obtidas na direção horizontal-transversal no nó central referentes ao cenário 1 de carregamento .....	71
Figura 40 - Respostas de deslocamentos obtidas na direção horizontal - transversal no nó central referentes ao cenário 1 de carregamento .....	71
Figura 41 – Configuração deformada da estrutura referente ao cenário 1 de carregamento....	72

Figura 42 – Respostas de acelerações obtidas na direção vertical no nó central referentes ao cenário 2 de carregamento .....	73
Figura 43 - Respostas de deslocamentos obtidas na direção vertical no nó central referentes ao cenário 2 de carregamento .....	73
Figura 44 - Respostas de acelerações obtidas na direção horizontal-longitudinal no nó central referentes ao cenário 2 de carregamento .....	73
Figura 45 - Respostas de deslocamentos obtidas na direção horizontal-longitudinal no nó central referentes ao cenário 2 de carregamento .....	73
Figura 46 - Respostas de acelerações obtidas na direção horizontal-transversal obtidas no nó central referentes ao cenário 2 de carregamento .....	73
Figura 47 - Respostas de deslocamentos obtidas na direção horizontal-longitudinal obtidas no nó central referentes ao cenário 2 de carregamento .....	73
Figura 48 - Respostas de acelerações obtidas na direção vertical no nó central referentes ao cenário 3 de carregamento .....	74
Figura 49 - Respostas de deslocamentos obtidas na direção vertical no nó central referentes ao cenário 3 de carregamento .....	74
Figura 50 - Respostas de acelerações obtidas na direção horizontal-longitudinal no nó central referentes ao cenário 3 de carregamento .....	74
Figura 51 -Respostas de deslocamentos obtidas na direção horizontal-longitudinal no nó central referentes ao cenário 3 de carregamento .....	74
Figura 52 - Respostas de acelerações obtidas na direção horizontal-transversal no nó central referentes ao cenário 3 de carregamento .....	75
Figura 53 - Respostas de deslocamentos obtidas na direção horizontal-transversal no nó central referentes ao cenário 3 de carregamento .....	75
Figura 54 - Comparação entre os limites de serviço e as frequências naturais de excitação vertical da estrutura .....	77
Figura 55 - Comparação entre os limites de serviço e as acelerações da estrutura obtidas no <i>software</i> .....	78

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Quadro resumo das estimativas para frequência de passo de alguns autores.....	26
Tabela 2 – Valores médios para os parâmetros que caracterizam a ação do pedestre .....	28
Tabela 3 - Coeficientes de Fourier nas direções vertical e transversal recomendados por alguns autores para a determinação do caminhar humano.....	30
Tabela 4 – Coeficientes numéricos utilizados no modelo de carregamento.....	32
Tabela 5 – Simplificação para os valores de amortecimento de acordo com o tipo de estrutura .....	32
Tabela 6 – Faixa de acelerações na direção vertical referentes a cada nível de conforto da passarela.....	34
Tabela 7 - Faixa de acelerações na direção vertical referentes a cada nível de conforto da passarela.....	35
Tabela 8 – Faixas de limite quanto ao risco de ressonância para as direções vertical e horizontal-longitudinal.....	35
Tabela 9 - Faixas de limite quanto ao risco de ressonância para a direção horizontal-transversal .....	36
Tabela 10 – Casos de carregamento a serem considerados em função da faixa e da classe da passarela.....	36
Tabela 11 - Densidade $d$ de pedestres para o Caso 1 de carregamento .....	37
Tabela 12 - Coeficiente de amortecimento estrutural.....	37
Tabela 13 - Funções de carregamento a serem aplicadas na superfície trafegável para o Caso 1 .....	38
Tabela 14 - Densidade $d$ de pedestres para o Caso 2 de carregamento .....	39
Tabela 15 -Funções de carregamento a serem aplicadas na superfície trafegável para o Caso 3 .....	41
Tabela 16 - Frequências críticas de acordo com a destinação de estruturas de concreto armado submetidas a vibrações pela ação de pessoas. ....	42
Tabela 17 - Valores recomendados de aceleração máxima em passarelas.....	47
Tabela 18 -Limites de alguns pesquisadores citados por Blanco <i>et al.</i> ....	47
Tabela 19 - Resumo dos critérios de aceleração máxima e frequência natural mínima.....	48
Tabela 20 - Resultados para frequência natural da passarela para os dois cenários considerados por Sétra (2006).....	60

Tabela 21 – Parâmetros adotados para as funções de carregamento nas direções vertical e horizontal para o cenário 1 .....	61
Tabela 22 – Coeficientes da série de Fourier e frequências utilizadas no cenário 2 e 3 de carregamento .....	64
Tabela 23 - Valores encontrados para as frequências naturais da passarela pelo método de tentativas e erros, variando o coeficiente de mola (k) .....	67
Tabela 24 - Comparação entre as frequências naturais extraídas do modelo numérico e as obtidas experimentalmente. ....	76
Tabela 25 - Resultados obtidos para as acelerações e deslocamentos em cada direção considerada referente aos três cenários analisados.....	78

## ÍNDICE DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÃO

$f_p$  – frequência de passo

$v_p$  – velocidade de passo

$l_p$  – comprimento de passo

$G_0$  - força estática para o peso do pedestre

$\alpha_{i,v}$  - coeficiente de Fourier na direção vertical para o  $i$ -ésimo harmônico

$t$  - tempo

$i$  - ângulo de fase do  $i$ -ésimo harmônico em relação ao primeiro;

$n$  - número de harmônicos considerados.

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

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

$\varphi_i$  – ângulo de fase do  $i$ -ésimo harmônico

$\alpha_{i,h}$ : coeficiente de Fourier na direção horizontal para o  $i$ -ésimo harmônico

$\xi$  – razão de amortecimento

$\alpha_i$  - coeficiente de Fourier para o  $i$ -ésimo harmônico

[C] – matriz de amortecimento

[K] – matriz de rigidez

[M] – matriz de massa

$\Psi$  – fator de redução

$\Psi_{r,h}$  – fator de redução para a direção horizontal

$\Psi_{r,v}$  – fator de redução para a direção vertical

$a_{m\acute{a}x}$  – aceleração máxima

$a_{hor,lim}$  – aceleração limite na direção horizontal

$a_{vert,lim}$  - aceleração limite na direção vertical

$f$  – frequência

$d_{max}$  – deslocamento máximo

$f_{crit}$  – frequência de excitação crítica

$f_0$  – frequência fundamental

$f_{0,h}$  – frequência fundamental na direção vertical

$f_{0,v}$  – frequência fundamental na direção horizontal

$f_h$  – frequência na qual a ressonância pode ocorrer, na direção horizontal

$f_v$  – frequência na qual a ressonância pode ocorrer, na direção vertical

$n_p$  – número de pedestres

$N_{eq}$ : Número equivalente de pedestres

$\ddot{u}$  – aceleração

$\dot{u}$  – velocidade

$u$  – deslocamento

S: Superfície trafegável

d: densidade de pedestres

L: Comprimento do vão livre da estrutura

$C_v$  – coeficiente de amortecimento

$k$  – constante de mola

$F(t)$  – função de carga

$F_v(t)$  – função de carga para a direção vertical

$F_h(t)$  – função de carga para a direção horizontal

$F_L(t)$  – função de carga para a direção longitudinal

$F_T(t)$  – função de carga para a direção transversal

$\Delta t$  – intervalo de tempo

s – segundos

Hz – hertz

N – Newton

m – metros

mm - milímetros

DNIT - Departamento Nacional De Infra-Estrutura De Transportes.

NBR – Norma Brasileira

AISC - *American Institute of Steel Construction*

ISO – Organização Internacional para Padronização

CEB - *Comité Euro - International du Béton*

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>19</b>
1.1	OBJETIVOS GERAIS .....	22
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>22</b>
2.1	A RELEVÂNCIA DO ESTUDO DA DINÂMICA DAS ESTRUTURAS .....	23
2.2	AÇÕES DINÂMICAS INDUZIDAS POR PEDESTRES .....	23
2.3	FREQUÊNCIA MÉDIA DE PASSO ( $F_p$ ) .....	25
2.4	COMPRIMENTO DE PASSO ( $L_p$ ) E VELOCIDADE DE PASSO( $V_p$ ) .....	27
2.5	MODELOS DE CARREGAMENTO .....	28
2.5.1	Metodologias gerais de carregamento .....	29
2.5.2	ISO 10137: 2007 – <i>Bases for design of structures – Serviceability of buildings and walkways against vibrations.</i> .....	31
2.5.3	Sétra/AFGC : 2006 – <i>Technical Guide. Footbridges. Assessment of vibrational behaviour of footbridges under pedestrian loading</i> .....	32
2.6	CONSIDERAÇÕES NORMATIVAS BRASILEIRAS .....	41
2.6.1	NBR 7188 : 2013 – Carga móvel rodoviária e de pedestres em pontes, viadutos, passarelas e outras estruturas .....	41
2.6.2	NBR 8800: 2008 - Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios .....	41
2.6.3	NBR 6118: 2014 – Projeto de estruturas de concreto simples, armado e protendido, – Procedimento .....	42
2.7	LIMITES DE SERVIÇO PARA PASSARELAS .....	43
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>49</b>
3.1	DESCRIÇÃO DO MODELO DA PASSARELA .....	50
3.2	FERRAMENTA COMPUTACIONAL .....	51
3.2.1	Construção do modelo .....	52
3.2.1.1	Elementos utilizados .....	52
3.2.2	Tipos de análise .....	56
3.2.2.1	Análise Modal – frequências e modos de vibração .....	56
3.2.2.2	Análise Transiente – acelerações e deslocamentos .....	57
3.3	CENÁRIOS DE CARREGAMENTO .....	58

3.3.1	Primeiro cenário de carregamento - guia SÉTRA (2006).....	59
3.3.2	Segundo e terceiro cenários de carregamento - ISO 10137 (2007).....	63
<b>4</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>66</b>
4.1	ATUALIZAÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL .....	66
4.2	A ANÁLISE MODAL .....	68
4.3	A ANÁLISE TRANSIENTE.....	70
4.3.1	Cenário de carregamento 1.....	70
4.3.2	Cenário de carregamento 2.....	72
4.3.3	Cenário de carregamento 3.....	74
<b>5</b>	<b>ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....</b>	<b>76</b>
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>79</b>
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>80</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Para realização de um estudo completo das ações solicitadas em estruturas na Engenharia Civil deve-se levar em consideração tanto o comportamento estático, que estuda a resposta da estrutura devido a ações permanentes e constantes no tempo, quanto o comportamento dinâmico, que são respostas que variam com o tempo. As cargas aplicadas na estrutura devido ao andar dos pedestres não possuem um comportamento estático, variando constantemente ao longo do tempo e espaço. (PEÑA, 2015)

Apesar disso, o estudo dinâmico nas estruturas antigamente era bastante desprezado em seus dimensionamentos, especialmente em passarelas, uma vez que os projetistas recorriam apenas às análises estáticas. Isto pelo fato principalmente da não existência de recursos mais modernos que pudessem calcular as respostas dinâmicas, ou da grande dificuldade em se obter os cálculos necessários para o estudo. Como resultado disso obtinham-se soluções pouco realistas e antieconômicas, o que geravam maiores custos e pouco detalhamento do seu comportamento real.

Atualmente, o avanço tecnológico permite a construção de estruturas com maiores dimensões, menor consumo de material, melhor otimização dos custos, materiais de alta resistência, tornando-as mais flexíveis e esbeltas. Essas modificações tornam essencial o estudo dinâmico na avaliação das passarelas, visto que ocasionam menores frequências naturais de vibração, que podem se aproximar da frequência de passo humano e favorecer a chegada ao estado de ressonância.

A modelagem computacional da estrutura pode auxiliar na etapa de compreensão de seu comportamento real. No entanto, há a dificuldade de desenvolver um modelo com exatidão, visto que, especialmente em estruturas complexas como as passarelas, são feitas hipóteses no processo de modelagem, assim como a incerteza do comportamento dos materiais e das condições de contorno.

Já quanto ao acompanhamento da evolução do comportamento estrutural, a análise dinâmica é fundamental para caracterizar convenientemente alguns dos fenômenos que originam as ações dinâmicas como a ocorrência de abalos sísmicos que vêm provocando danos estruturais em edifícios, pontes, viadutos. (MENDES, 2012)

A preocupação em se estudar a capacidade vibratória de passarelas vem sendo alvo de estudos atualmente, com o aumento das vibrações provocadas principalmente por atividades humanas, consequência do aumento da flexibilidade dessas estruturas, comprometendo assim o conforto dos usuários. (PEREIRA, 2017)

Além disso, observou-se episódios de problemas vibratórios em passarelas, como a *Pont du Solférino*, em Paris, e a *Millenium Bridge*, em Londres, ambas fechadas após as inaugurações, em 1999 e 2000, respectivamente, por apresentarem elevadas vibrações quando submetidas a um grande fluxo de pedestres. Além delas, a *Changi Mezzanine Bridge* (BROWNJONH et al., 2004) em Singapura no ano de 2004, e a *M-Bridge* no Japão (NAKAMURA, 2003) também apresentaram problemas de vibrações excessivas. A ocorrência de casos como esses impulsionaram ainda mais os pesquisadores a investigar o comportamento dinâmico dessas estruturas.

Segundo Živanović (2005), desde junho de 2000 quando a *Millennium Bridge*, em Londres, foi fechada devido ao surgimento de grandes acelerações laterais, mais de 1000 artigos foram publicados relatando diversos problemas de vibrações em passarelas por todo mundo. Naquele momento, embora a *Millennium Bridge* não tivesse indicado um risco eminente de ruína, sua resposta dinâmica causava incômodo aos usuários.

Baltar (2000) realizou um estudo com o objetivo de avaliar os níveis de segurança e conforto das principais passarelas de pedestres existentes na cidade de Brasília e Pimentel (1997) analisou vibrações em passarelas devidas a carregamentos induzidos pelo homem. Durante o estudo, foram avaliadas três passarelas, sendo extraídas suas propriedades dinâmicas e seus comportamentos em serviço.

Nakamura (2003) elaborou um estudo experimental em uma passarela de pedestres localizada na cidade de *Nasu Shiobara*, no Japão. Denominada *Maple Valley Great Suspension Bridge* (ou *M-bridge*), a passarela possui um vão central com 320 m e em cada extremidade deste, um vão de 60 m. Suas vibrações laterais foram investigadas, verificando-se que a passarela vibrava na frequência do terceiro modo de flexão lateral (assimétrico) de 0,88 Hz e do quarto modo de flexão lateral (simétrico) de 1,02 Hz.

Seiler *et al.* (2003) realizou um estudo experimental e numérico sobre uma passarela de pedestres construída na cidade de *Forchheim*, na Alemanha. O comprimento total da estrutura é de 117,5 m e foi demonstrado que a estrutura era muito sensível à excitação vertical de pessoas

correndo na frequência característica do segundo modo de vibração na direção vertical, de 2,76 Hz.

Pereira (2017) confrontou com as prescrições normativas os resultados encontrados no estudo numérico via ANSYS 15 de duas passarelas com diferentes materiais e concepções estruturais, com o objetivo de verificar se apresentavam problemas de vibrações na direção vertical. Com o estudo, verificou-se que essas passarelas são flexíveis na direção vertical e conseqüentemente aptas a apresentarem acelerações que causem desconforto aos usuários.

Pelo fato das passarelas se destinarem essencialmente ao tráfego de pedestres e, eventualmente, ao de ciclistas (DNIT, 2005), e pelo fato desse carregamento ocorrer em frequências baixas, há a possibilidade deste se igualar às frequências naturais da estrutura, ocasionando o fenômeno da ressonância. Assim, as passarelas se tornam mais susceptíveis a sofrerem danos pela vibração excessiva, causando desconforto e insegurança aos usuários, fazendo-se necessário o conhecimento de suas frequências naturais de excitação, além de suas características dinâmicas, para verificação de seu comportamento, adequado ou não, quando submetida a ações de pedestres. As vibrações podem ocorrer tanto na direção vertical como na horizontal, esta última sendo transversalmente (direção lateral) ou longitudinalmente. (BACHMANN, 2002)

Quanto à forma de caracterizar o carregamento utilizado nas análises, apesar de todo o empenho em diversas conferências (*Footbridge* 2002, 2005, 2008, 2011, 2014, ocorridas respectivamente na França, Itália, Portugal, Polônia e Londres), dificuldades são encontradas na quantificação do carregamento provocado pelos pedestres, pois muitas são as variáveis envolvidas no problema. Dentre estas cabem destacar o número e localização de pessoas que podem estar ao mesmo tempo sobre a passarela; rugosidade do piso; frequência, velocidade e comprimento dos passos; o sincronismo de grupos de pedestres atravessando na passarela (“*lock in*”), que podem elevar ao máximo os efeitos de vibração, entre outros (PEREIRA, 2017). Por conseguinte, as normas trazem funções para os carregamentos muitas vezes simplificados, estatisticamente representativos do tráfego, o que leva a análise dinâmica sem a devida qualidade estrutural, resultando em dados insatisfatórios e muitas vezes gerando desconforto aos usuários.

As prescrições normativas brasileiras indicam que as passarelas devem ser projetadas evitando uma faixa crítica de frequências naturais (NBR 6118, 2014; NBR 8800, 2008), apesar de não recomendar nenhuma metodologia específica de análise dinâmica ou verificação de

conforto. Normas internacionais, além de também adotar uma faixa crítica, definem um nível máximo de aceleração, e especificam como devem ser modelados o pedestre e a estrutura. (SÉTRA, 2006; EUROCODE 5-2, 2004; EUROCODE 1, 2005; CEB, 1991; ISO 10137, 2007)

Dessa forma, se torna imprescindível a obtenção, a partir do modelo computacional, dos valores característicos das frequências naturais, tanto lateral quanto vertical, e de suas acelerações quando submetidas às ações de carregamentos induzidas por pedestres, estimadas pelas normas. Através da obtenção desses parâmetros, tem-se condições de realizar a análise dinâmica, avaliando os resultados com os métodos e limites estabelecidos nas normas em vigor, verificando sua viabilidade e segurança aos usuários.

## 1.1 OBJETIVOS GERAIS

Diante das dificuldades inerentes à realização de testes experimentais em estruturas de grande porte, pretende-se com este trabalho realizar a concepção de um modelo computacional bem calibrado, que represente adequadamente seu comportamento dinâmico. De posse deste modelo é possível a simulação de vários cenários de carregamento, determinando alguns parâmetros que, após a análise dinâmica, darão subsídios para caracterizar a estrutura como adequada ou não quanto ao desempenho e segurança estrutural.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 A RELEVÂNCIA DO ESTUDO DA DINÂMICA DAS ESTRUTURAS

De acordo com Castro (1997), mudanças na filosofia de cálculo de tensões admissíveis para estados limites e aplicações de técnicas de confiabilidade estrutural para se determinar coeficientes de segurança têm possibilitado reduções de massa na estrutura, pois permitem o uso de fatores mais adequados e seções estruturais mais bem aproveitadas, esbeltas, mais leves e menos rígidas. Somado a isso, Castro (1997) enfatiza que vem ocorrendo nos últimos anos um considerável aumento das tensões de escoamento dos aços mais usados em estruturas. Com essas alterações nos materiais dos sistemas, essas estruturas ficam mais propensas a apresentarem faixas de frequências modais próximas às das cargas dinâmicas atuantes, tais como vento, tráfego e atividades rítmicas de usuários, podendo ocorrer a ressonância.

Somado a isso, Zúñiga (2011) verificou durante a análise de alguns relatos de problemas de vibração em passarelas que estes ocorrem em diferentes sistemas estruturais e isso se deve ao desconhecimento ou não consideração dos projetistas das solicitações dinâmicas durante a elaboração dos projetos. Pereira (2017) avaliou que esses problemas podem estar relacionados tanto a integridade estrutural da passarela (em casos extremos levando ao colapso da estrutura) quanto aos níveis de conforto proporcionados aos usuários, que podem ser insatisfatórios.

Além disso, com o avanço da tecnologia, edifícios cada vez mais altos, esbeltos e flexíveis vêm sendo construídos, assim como passarelas com um maior número de vãos. Esses fatores refletem a preocupação em se estudar a capacidade vibratória desses sistemas estruturais, prevenir a possibilidade de ocorrência de fenômenos de ressonância e ocorrência de fadiga, especialmente em estruturas sujeitas a cargas cíclicas.

### 2.2 AÇÕES DINÂMICAS INDUZIDAS POR PEDESTRES

Tendo em vista o caráter dependente do tempo, as ações de carga às quais as passarelas estão submetidas são de fato dinâmicas, podendo ser classificadas como periódicas ou transientes. Uma das principais características dessas ações é sua baixa intensidade, o que faz com que, em estruturas de elevada rigidez e altas frequências naturais, essa carga dificilmente

induza níveis de vibrações significativos que ocasionem efeitos de ressonância. (SANTOS, 2011)

Apesar disso, como discutido anteriormente, o estudo dessas ações nas passarelas vêm se tornando relevante devido ao fato da flexibilidade e esbeltez dessas estruturas ter aumentado nos últimos anos. Dessa forma, com o objetivo de verificação do conforto e segurança, é necessário conhecer como se comportam os carregamentos que representam as ações dos pedestres nessas estruturas, e determinar um modelo analítico de carga que as caracterize de forma satisfatória.

A representação da carga induzida pelos pedestres nas estruturas minimiza a ação de seu real comportamento. Isso se deve ao fato de que tais cargas dependem consideravelmente de outras variáveis, como o tipo de calçado, o tipo de pavimento e o tipo de movimento induzido pelo homem, resultando em uma modelagem de força dinâmica razoavelmente complexa e de difícil interpretação (PEREIRA, 2017). Além disso, fatores como o peso do pedestres, sua forma de caminhar (que são variáveis para cada pessoa) e o fato do grau de sincronismo entre esses ser de difícil generalização, acaba tornando necessário que os modelos sejam fundamentados em conceitos estatísticos, tanto de forma isolada como em multidão.

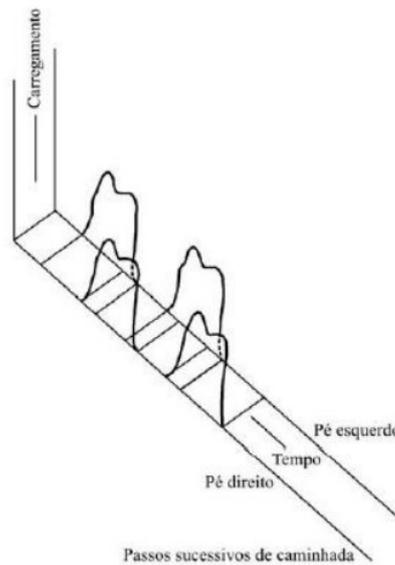
Durante o caminhar, os pedestres induzem forças nas estruturas que podem ser verticais, horizontais ou transversais. Todas dependem de parâmetros associados à frequência e comprimento de passo, como também da velocidade à caminhada. (ZÚÑIGA, 2011) De acordo com Živanović (2005) *apud* Grandić (2015) a maioria das pesquisas lida com a determinação da componente vertical, já que a sua magnitude é muito maior do que das outras duas componentes. Além disso, as forças dinâmicas causadas pela caminhada são mais investigadas, embora as passarelas possam ser expostas também a atividade de corrida.

As ações dinâmicas induzidas pelos pedestres podem ser de natureza periódica ou transiente. As cargas dinâmicas periódicas, como o caminhar e correr, são caracterizadas por excitações repetidas ao longo do tempo e as cargas dinâmicas transientes são causadas por um movimento único representado por um carregamento impulsivo sobre um determinado componente estrutural de curta duração (ZÚÑIGA, 2011).

Segundo Wheeler (1982), pode-se caracterizar o carregamento devido ao movimento de pessoas por meio da sua frequência média de passo ( $f_p$ ), velocidade de passo ( $V_p$ ), comprimento de passo ( $l_p$ ) e pela função de carregamento no tempo. Além disso, o autor sintetizou os estudos

já desenvolvidos por outros pesquisadores acerca do tema, elaborando um modelo que representa o padrão típico de forças para caminhada humana na direção vertical (Figura 1).

**Figura 1** – Carregamento vertical típico durante uma caminhada



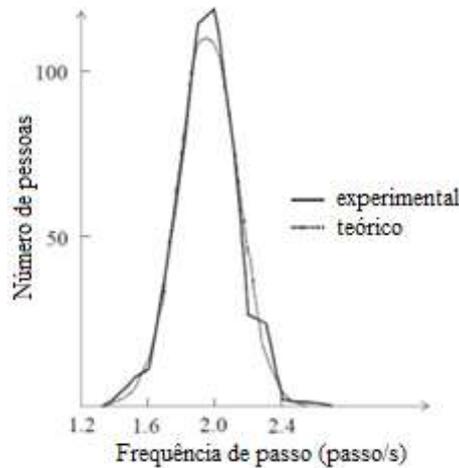
Fonte: Wheeler (1982)

### 2.3 FREQUÊNCIA MÉDIA DE PASSO ( $F_P$ )

A frequência de passo pode ser definida como o número de passos dados em um intervalo de tempo de um segundo e é considerada o principal parâmetro para a caracterização da ação do pedestre sendo usualmente expressa em Hertz (Hz). (PEREIRA, 2017)

Durante uma experiência realizada com 505 pessoas, Matsumoto (1972) estimou que a frequência do passo durante a caminhada pode variar entre 1,4 Hz e 2,4 Hz, com uma média de 1,99 Hz e desvio padrão de 0,173 Hz, de acordo a curva de distribuição normal das frequências apresentadas na Figura 2.

**Figura 2** – Curva de distribuição normal das frequências de passo do caminhar de um pedestre.

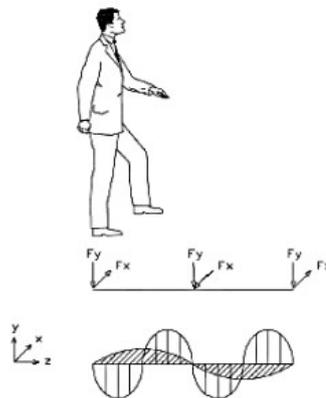


Fonte: Modificada de Matsumoto (1972)

Já de acordo com o CEB (1991), pode-se estimar que 50% das pessoas caminha com frequência de 1,9 a 2,1 Hz ou ainda que 95% das pessoas caminha com frequência entre 1,65 e 2,35 Hz.

Estima-se que a frequência de passo na direção horizontal (transversal e longitudinal), que é gerada pelo movimento periódico do corpo quando o pedestre troca de perna ao dar o passo, pode ser considerada como metade da frequência de passo na vertical, pelo fato de ter que ocorrer dois passos para que um ciclo da caminhada seja completo na direção horizontal, conforme esquematizado na Figura 3. (FERNANDES, 2007) Um resumo dos valores estimados por alguns pesquisadores pode ser visto na Tabela 1.

**Figura 3** – Diagrama de cargas nas direções vertical e horizontal durante uma caminhada.



Fonte: Fernandes (2007)

**Tabela 1** – Quadro resumo das estimativas para frequência de passo de alguns autores.

<b>Tipo de movimento</b>	<b>Ritmo</b>	<b>Bachmann (1982) (Hz)</b>	<b>Gonilha <i>et al.</i> (2013) (Hz)</b>	<b>J Strásky (2005) (Hz)</b>	<b>Wheeler (1982) (Hz)</b>	<b>Sétra (2005)</b>
<b>Caminhada</b>	Lenta	1,70	1,36± 0,10	1,4-1,7		
	Normal	2,00	1,76±0,16	1,7-2,20	1,4 - 2,4	1,6 - 2,4
	Rápida	2,30	1,81±0,13	2,20-2,4		
<b>Corrida</b>	Lenta	2,50		1,9-2,20		
	Normal	-	-	2,20-2,7	1,9 - 3,3	2,0 – 3,5
	Rápida	>3,2		2,7-3,30		

Fonte: Modificado de Pereira (2017) e Santos (2011)

#### 2.4 COMPRIMENTO DE PASSO ( $L_p$ ) E VELOCIDADE DE PASSO( $V_p$ )

O comprimento de passo é considerado como sendo a distância entre dois passos sucessivos. Este parâmetro depende muito da altura do pedestre, assim como da sua frequência de passo. Já a velocidade do movimento ( $V_p$ ) é diretamente proporcional tanto à frequência ( $f_p$ ), quanto ao comprimento do passo ( $l_p$ ), expressa pela Eq. (1).

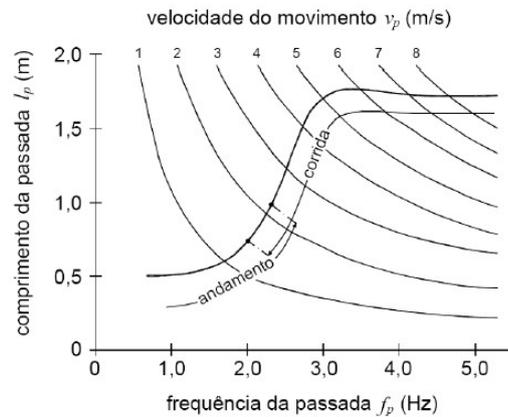
$$V_p = f_p \cdot l_p \quad (1)$$

Onde:  $V_p$ : velocidade do movimento [m/s];

$f_p$  frequência de passo [Hz];

$l_p$ : comprimento de passo [m].

No entanto, apesar da interdependência entre valores, Wheeler (1982) relacionou-os graficamente (Figura 4) e Bachmann (1987) estimou para cada tipo de ritmo de caminhada um valor médio desses parâmetros (Tabela 2).

**Figura 4** – Parâmetros médios de caminhada

Fonte: Wheeler (1982)

**Tabela 2** – Valores médios para os parâmetros que caracterizam a ação do pedestre

<b>Tipo de movimento</b>	<b>Comprimento médio de passo (m)</b>	<b>Velocidade média de passo (m/s)</b>	<b>Frequência de passo (Hz)</b>
<b>Caminhada lenta</b>	0,60	1,10	1,70
<b>Caminhada normal</b>	0,75	1,50	2,00
<b>Caminhada rápida</b>	1,00	2,20	2,30
<b>Corrida lenta</b>	1,30	3,30	2,50
<b>Corrida rápida</b>	1,75	> 5,5	> 3,2

Fonte: Bachmann (1987)

## 2.5 MODELOS DE CARREGAMENTO

Além das frequências, do comprimento e da velocidade de passo, é importante que se defina como será estimado o carregamento dinâmico que irá representar o caminhar do pedestre na estrutura.

Como visto, a verificação do comportamento dinâmico em passarelas e pontes só veio ser estudada com maior relevância recentemente nos projetos. A falta de modelos que representem os carregamentos devidos às ações dos pedestres, assim como a dispersão nos testes para identificar os parâmetros que os influenciam, refletem a grande variabilidade de métodos de verificação de segurança e conforto nas passarelas.

Dessa forma, serão apresentadas algumas metodologias de determinação de carregamento, sendo mais detalhadas as que serão utilizadas no modelo numérico via ANSYS para determinação do nível de aceleração da estrutura nos cenários analisados.

### 2.5.1 Metodologias gerais de carregamento

A função que expressa a ação do caminhar é representada por diversos autores como sendo periódica, composta por uma série de componentes senoidais, denominada série de Fourier. A função se apresenta na direção vertical como uma soma de uma parcela fixa, que corresponde ao peso do pedestre, e uma parcela periódica, representativa de uma combinação de harmônicos associados à excitação dinâmica do caminhar. Já a função na direção horizontal é dada excluindo-se a parcela fixa (estática), sendo representada apenas pela carga dinâmica. O resultado da soma das parcelas estáticas e dinâmicas são representativas da ação total da caminhada (SANTOS, 2011). A Eq. (2) representa matematicamente a ação dinâmica na direção vertical e a Eq. (3) na direção horizontal.

$$F_v(t) = G_0 + \sum_{i=1}^n G_0 \cdot \alpha_{i,v} \cdot \text{sen}(2 \cdot \pi \cdot i \cdot f_p \cdot t + \varphi_{i,v}) \quad (2)$$

$$F_h(t) = \sum_{i=1/2}^n G_0 \cdot \alpha_{i,h} \cdot \text{sen}(2 \cdot \pi \cdot i \cdot f_p \cdot t + \varphi_{i,h}) \quad (3)$$

Onde:  $G_0$ : força estática (componente vertical para o peso do pedestre, usualmente adotada como 800 N);

$\alpha_{i,v}$ : coeficiente de Fourier, ou fator dinâmico de carga (FDC) do  $i$ -ésimo harmônico, na direção vertical;

$\alpha_{i,h}$ : coeficiente de Fourier, ou fator dinâmico de carga (FDC) do  $i$ -ésimo harmônico, na direção horizontal;

$f_p$ : frequência de passo;

$t$ : tempo em segundos;

$i$ : ângulo de fase do  $i$ -ésimo harmônico em relação ao primeiro;

$n$ : número de harmônicos considerados;

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

$\varphi_{i,h}$ : ângulo de fase do  $i$ -ésimo harmônico, direção horizontal.

Em geral, retêm-se os três primeiros harmônicos da série, sendo o primeiro o mais importante na direção vertical (SANTOS, 2011). Além disso, Peña (2015) realizou testes com 5 harmônicos e concluiu que somente os três primeiros são suficientes para a análise transiente

da estrutura. Os coeficientes da série de Fourier (coeficiente dinâmico  $\alpha_i$ ) e os ângulos de fase ( $\varphi_1$ ) apresentam grande discrepância dependendo do autor a se considerar, conforme apresentado na Tabela 3.

**Tabela 3** - Coeficientes de Fourier nas direções vertical e transversal recomendados por alguns autores para a determinação do caminhar humano

Autor	Direção	Coeficientes de Fourier	Ângulos de fase	Observações
CEB (1991)	Vertical	$\alpha_1 = 0,4$ ou $0,5 / \alpha_2 = 0,1 /$ $\alpha_3 = 0,1$	$\varphi_1 = 0 ; \varphi_2 = \pi/2$ ; $\varphi_3 = \pi/2$	$f_p = 2-2,4$ Hz/ $f_p = 2$ Hz/ $f_p = 2$ Hz
	Vertical	$\alpha_1 = 0,4$ ou $0,5 / \alpha_2 = 0,1 /$ $\alpha_3 = 0,1$	$\varphi_1 = 0 ; \varphi_2 = \pi/2$ ; $\varphi_3 = \pi/2$	$f_p = 2$ Hz $f_p = 2,4$ Hz
Bachmann (1987)	Vertical	$\alpha_1 = 0,4$ ou $0,5 / \alpha_2 = 0,1 /$ $\alpha_3 = 0,1$	$\varphi_1 = 0 ; \varphi_2 = \pi/2$ ; $\varphi_3 = \pi/2$	$f_p = 2$ Hz $f_p = 2,4$ Hz
	Transversal	$\alpha_{1/2} = 0,1$ $\alpha_{3/2} = 0,1$	-	$f_p = 2$ Hz
Blanchard (1997)	Vertical	$\alpha_1 = 0,257$	-	Valores menores para $f_p$ entre 4 e 5 Hz
Pernica (1990)	Vertical	$\alpha_1 = 0,43 f_p - 0,38$ $\alpha_2 = 0,15 f_p - 0,125$ $\alpha_3 = 0,1$	-	$1,5 < f_p < 2,5$ Hz
Synpex (2006)	Vertical	$\alpha_1 = 0,0115 f_p^2 + 0,2803 f_p - 0,2902$ $\alpha_2 = 0,0669 f_p^2 + 0,1067 f_p - 0,0417$ $\alpha_3 = 0,0247 f_p^2 + 0,1149 f_p - 0,1518$	$\varphi_1 = 0; \varphi_2 = -99,76$ $f_p^2 + 478,92 f_p - 387,8$ $\varphi_3 = -150,88 f_p^3 + 819,65 f_p^2 - 1431,35 f_p + 811,93$ $\varphi_3 = 813,12 f_p^3 + 5357,6 f_p^2 + 11726 f_p + 8505,9$	$f_p < 2$ Hz
	Transversal	$\alpha = 0,38$	-	-

Um outro tipo de representação é adotada pela norma britânica BS5400 (1980), em que a aceleração máxima vertical deve ser calculada assumindo que a ação dinâmica de um pedestre é representada por uma carga  $F$  senoidal ressonante (Eq. (4)), movendo-se através do vão principal da estrutura com uma velocidade ( $V_p$ ) constante (Eq. (5)):

$$F(t) = 180 \sin 2.\pi.f_o.t \quad (4)$$

$$V_p = 0,9 f_o \quad (5)$$

Onde: F(t): Função representativa da ação dinâmica do pedestre na estrutura [N]

t : tempo [s];

$V_p$ : Velocidade do pedestre no vão principal da estrutura [m/s<sup>2</sup>]

$f_o$  : frequência fundamental da estrutura [Hz].

### 2.5.2 ISO 10137: 2007 – *Bases for design of structures – Serviceability of buildings and walkways against vibrations.*

A Organização Internacional para Padronização ISO 10137, 2007 fornece informações e parâmetros que permitem o cálculo das respostas dinâmicas em passarelas. Essa norma recomenda tanto metodologias de cálculo, relacionadas ao estado limite de serviços nas vibrações até os critérios de conforto que podem ser adotados, no que diz respeito às acelerações máximas permitidas.

De acordo com a Organização, existem três parâmetros chaves a ser considerados para as vibrações no estado limite de serviço: a origem das forças vibratórias, o caminho que deve percorrer e o receptor de vibração. Deve-se definir o critério de limite de serviço que deverá ser utilizado em função do nível de vibração esperado de forma a não provocar vibrações excessivas que causem desconforto aos usuários.

De acordo com a ISO 10137 (2007), deve-se analisar o comportamento dinâmico quanto às verificações de conforto nos seguintes cenários de carregamento:

- para um pedestre parado no meio do vão, enquanto outro caminha ao longo da passarela;
- para um fluxo médio de pedestres caminhando sobre a passarela;
- para um grande fluxo de pedestres caminhando sobre a passarela, acima do fluxo normal esperado;
- para o caso excepcional de eventos festivos e/ou coreográficos.

A norma definiu que as ações de um ou mais pedestres podem ser representadas como forças variantes no tempo, pois se modificam no tempo e no espaço ao longo da estrutura e podem expressas por equações matemáticas através de Séries de Fourier, conforme Eq. (2) e

Eq. (3) descritas anteriormente. Os coeficientes da série adotados pela norma estão apresentados na Tabela 4.

**Tabela 4** – Coeficientes numéricos utilizados no modelo de carregamento

	Número do Harmônico (i)	Faixa de frequência de passo (Hz)	Coeficiente numérico para a direção vertical ( $\alpha_{iv}$ )	Coeficiente numérico para a direção horizontal ( $\alpha_{ih}$ )
<b>Caminhar</b>	1	1,2 - 2,4	0,37 (f-1,0)	
	2	2,4 - 4,8	0,1	
	3	3,6 - 7,2	0,06	0,1
	4	4,8 - 9,6	0,06	
	5	6,0 - 12,0	0,06	
<b>Correr</b>	1	2,0 - 4,0	1,4	
	2	4,0 - 8,0	0,4	0,2
	3	6,0 - 12,0	0,1	

Fonte: ISO 10137 (2007)

Com relação aos ângulos de fase, pode-se utilizar o valor de 90° para contribuições harmônicas abaixo da ressonância. Na ausência de valores mais precisos, podem-se utilizar os valores de amortecimento de vibrações verticais dados na Tabela 5.

**Tabela 5** – Simplificação para os valores de amortecimento de acordo com o tipo de estrutura

Tipo de Estrutura	Razão de Amortecimento ( $\xi$ )
<b>Aço com piso em epóxi</b>	0,5
<b>Mista (aço e concreto)</b>	0,6
<b>Concreto Armado ou Protendido</b>	0,8

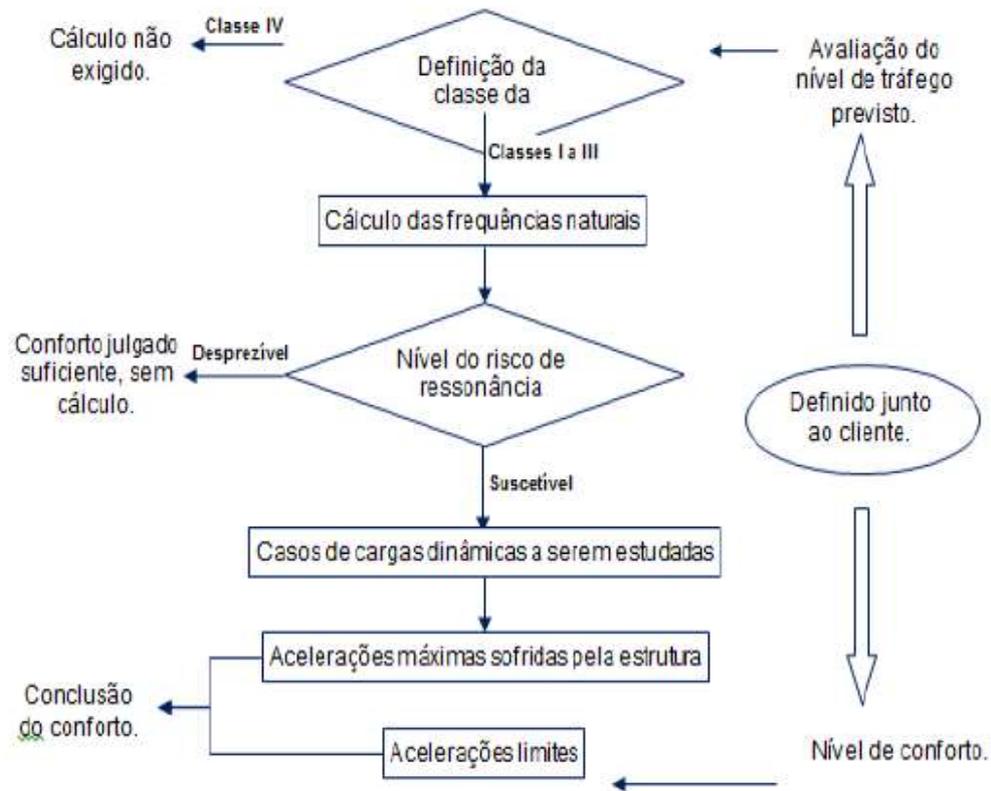
Fonte: ISO 10137: 2007

### 2.5.3 Séttra/AFGC : 2006 – *Technical Guide. Footbridges. Assessment of vibrational behaviour of footbridges under pedestrian loading*

O órgão francês Séttra publicou em 2006 o guia prático *Footbridges: Assessment of vibrational behaviour of footbridges under pedestrian loading*, propondo um método de análise dinâmica em passarelas de acordo com o tráfego ao qual está submetida.

A análise é composta de algumas etapas, de acordo com o esquema apresentado na Figura 5:

**Figura 5** - Esquema das etapas de análise dinâmica propostas por Sétra (2006)



Fonte: Peña (2015)

### **Etapa 1: Definição da classe da passarela**

A primeira etapa para iniciar a análise é definir em qual classe a passarela em estudo se enquadra, baseada no tráfego (nível de utilização) e no local onde ela está construída.

São classificadas em:

**Classe I:** Passarelas caracterizadas por um uso frequente de intenso volume de tráfego de pedestres, ligando áreas urbanas, como por exemplo: nas proximidades de estações ferroviárias ou de metrô, terminais rodoviários, estádios de futebol, áreas de festividades e manifestações culturais e zonas turísticas.

**Classe II:** Passarelas caracterizadas por se localizarem em áreas urbanas, podendo ocasionalmente serem preenchidas em toda a sua área trafegável, sujeitas a elevado fluxo de pedestres.

**Classe III:** Passarelas caracterizadas pelo uso padrão, ocasionalmente atravessadas por um grande grupo de pedestres, mas que nunca serão carregadas ao longo de toda área trafegável.

**Classe IV:** Passarelas caracterizadas por serem raramente utilizadas, ligando áreas com baixa densidade populacional, normalmente utilizadas para assegurar o trajeto de pedestres sobre rodovias, pistas expressas, ferrovias, etc.

Caso a passarela seja classificada como Classe IV, pode-se dispensar a verificação quanto ao comportamento dinâmico. No caso de passarelas mais esbeltas, é conveniente assegurar ao menos a Classe III, visto que podem apresentar altas acelerações, mesmo nos casos em que não haja ressonância.

### **Etapa 2: Determinação do nível de conforto e aceleração limite**

Para se determinar o nível de conforto da estrutura, deve-se atentar a sensibilidade e características do tipo de pedestre que irá utilizar a passarela, assim como o nível de importância da estrutura. Os níveis de conforto propostos por Sétra (2006) são:

**Conforto Máximo:** As acelerações da estrutura são praticamente imperceptíveis para os usuários.

**Conforto Médio:** As acelerações da estrutura pouco perceptíveis para os usuários.

**Conforto Mínimo:** As acelerações da estrutura são perceptíveis aos usuários, no entanto o critério de conforto ainda é atendido. Sua adoção deve somente ocorrer em casos de carregamentos na estrutura que venha raramente se suceder.

Para classificar a passarela, o Guia estabelece uma faixa de acelerações limites para cada nível de conforto, tanto na direção vertical (Tabela 6) quanto na direção horizontal (Tabela 7). Para a condição de grande desconforto ao pedestre, o pior caso foi classificado como inaceitável.

**Tabela 6** – Faixa de acelerações na direção vertical referentes a cada nível de conforto da passarela

Aceleração vertical (m/s <sup>2</sup> )	0	0,5	1	2,5
Nível 1	MÁXIMO			
Nível 2		MÉDIO		
Nível 3			MÍNIMO	
Nível 4				INACEITÁVEL

Fonte: Sétra (2006)

**Tabela 7** - Faixa de acelerações na direção vertical referentes a cada nível de conforto da passarela

<b>Aceleração horizontal (m/s<sup>2</sup>)</b>	<b>0,1</b>	<b>0,15</b>	<b>0,3</b>	<b>0,8</b>
Nível 1	MÁXIMO			
Nível 2		MÉDIO		
Nível 3			MÍNIMO	
Nível 4				INACEITÁVEL

Fonte: Modificada de Sétra (2006)

Para evitar o efeito *lock-in* de sincronização lateral, deve-se limitar a aceleração na direção lateral em 0,1 m/s<sup>2</sup> para qualquer caso de carregamento em estudo.

### **Etapa 3: Determinação das frequências naturais da passarela e necessidade de cálculo dinâmico**

As frequências naturais devem ser calculadas para passarelas de Classe de I a III, considerando os modelos de carregamento propostos pelo Guia *Sétra*:

1. Passarela vazia
2. Passarela carregada ao longo de sua área com um carregamento de 70 kg/m<sup>2</sup>, que corresponde a 1 pedestre por m<sup>2</sup>.

A partir das frequências obtidas para esses cenários e de acordo com o risco da ressonância, as passarelas são classificadas em quatro Faixas:

**Faixa 1** – máximo risco de ressonância;

**Faixa 2** – médio risco de ressonância;

**Faixa 3** – baixo risco de ressonância;

**Faixa 4** – risco desprezível (não há necessidade de análise dinâmica)

Os valores limites para cada direção estão indicados nas Tabelas 8 e 9.

**Tabela 8** – Faixas de limite quanto ao risco de ressonância para as direções vertical e horizontal-longitudinal

<b>Frequência (Hz)</b>	<b>0</b>	<b>1,0</b>	<b>1,7</b>	<b>2,1</b>	<b>2,6</b>	<b>5</b>
Faixa 1			MÁXIMO			
Faixa 2		MÉDIO		MÉDIO		
Faixa 3					MÍNIMO	
Faixa 4	DESPREZÍVEL					DESPREZÍVEL

Fonte: Sétra (2006)

**Tabela 9** - Faixas de limite quanto ao risco de ressonância para a direção horizontal-transversal

Frequência (Hz)	0	0,3	0,5	1,1	1,3	2,5
Faixa 1			MÁXIMO			
Faixa 2		MÉDIO		MÉDIO		
Faixa 3					MÍNIMO	
Faixa 4	DESPREZÍVEL					DESPREZÍVEL

Fonte: Séttra (2006)

Para verificação de dispensa de análise dinâmica, deve-se classificar a passarela dentre três casos, que a caracteriza quanto à densidade de pedestres, baseada na faixa e classe anteriormente estabelecidas (Tabela 10).

**Caso 1:** Tráfego de pedestres esparsos a denso

**Caso 2:** Tráfego de pedestres muito denso

**Caso 3:** Consideração dos efeitos de segundo harmônico de carga.

**Tabela 10** – Casos de carregamento a serem considerados em função da faixa e da classe da passarela

Classificação da passarela	Risco de Ressonância		
	Faixa 1	Faixa 2	Faixa 3
Classe I	Caso 2	Caso 2	Caso 3
Classe II	Caso 1	Caso 1	Caso 3
Classe III	Caso 1	Dispensa de análise dinâmica	Dispensa de análise dinâmica

Fonte: Séttra (2006)

#### **Etapa 4: Cálculo da aceleração máxima atuante**

Para o cálculo da aceleração máxima atuante, deve-se impor um carregamento harmônico em toda superfície trafegável da passarela, a levar em consideração o segundo harmônico se tiver sido classificada como Caso 3.

**Caso 1:** Aplicável às classes II e III, considerando as seguintes densidades de pedestres, conforme Tabela 11.

**Tabela 11** - Densidade d de pedestres para o Caso 1 de carregamento

<b>Classe da passarela</b>	<b>Densidade (d) de pedestres (pedestre/m<sup>2</sup>)</b>
<b>Classe II</b>	0,8
<b>Classe III</b>	0,5

Fonte: Séttra (2006)

Como a densidade (d) de pedestres irá ser uniformemente distribuída na superfície (S) do piso da passarela, tem-se:

$$n_p = S \cdot d \quad (6)$$

Onde:  $n_p$ : número de pedestres na passarela

S: Superfície trafegável [m<sup>2</sup>]

d: densidade de pedestres [pedestres/m<sup>2</sup>]

Já o número equivalente de pedestres ( $N_{eq}$ ) considerados para a passarela com a mesma frequência de passo e em fase fica determinado conforme Eq. (7):

$$N_{eq} = 10,8 \cdot \sqrt{\xi \cdot n_p} \quad (7)$$

Onde:  $N_{eq}$ : Número equivalente de pedestres

$\xi$ : razão de amortecimento estrutural

$n_p$ : número de pedestres na passarela

Para a razão de amortecimento ( $\xi$ ), o Guia recomenda a utilização dos valores da Tabela 12, a depender do material do qual a passarela é composta.

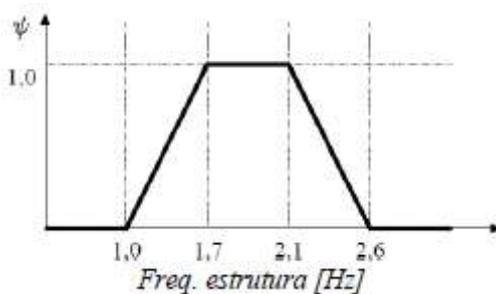
Tabela 12 - Coeficiente de amortecimento estrutural

Tipo de estrutura	Coeficiente de amortecimento crítico
Concreto armado	1,30%
Concreto protendido	1%
Aço	0,40%
Mista (concreto e aço)	0,60%
Madeira	1%

Fonte: Sétra (2006)

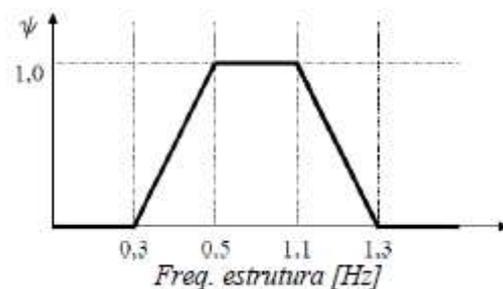
Outro parâmetro caracterizador da função de carga é o fator de minoração  $\psi$ , que leva em consideração o risco da frequência natural se igualar com a média da frequência de passo dos pedestres (estimado pelo Guia entre 1,7 e 2,1 Hz, para ações verticais e 0,5 e 1,1 Hz, para ações horizontais), ou seja, a probabilidade de ocorrer o fenômeno da ressonância. Os valores de  $\psi$  podem ser determinados através das Figuras 6 e 7, para as direções vertical e horizontal, respectivamente.

**Figura 6** - Fator de minoração  $\psi$  relativo ao Caso 1 de carregamento para ações nas direções vertical e horizontal longitudinal



Fonte: Sétra (2006)

**Figura 7** - Fator de minoração  $\psi$  relativo ao Caso 1 de carregamento para ações na direção horizontal transversal



Fonte: Sétra (2006)

Para os casos em que o fator de minoração  $\psi$  for nulo, o Guia recomenda que sejam considerados os efeitos do segundo harmônico para caminhada dos pedestres.

Após a consideração dos parâmetros, as funções de carga dinâmica por unidade de área para cada direção estão apresentadas resumidamente na Tabela 13.

**Tabela 13** - Funções de carregamento a serem aplicadas na superfície trafegável para o Caso 1

Direção	Carga (N/m <sup>2</sup> )
Vertical	$F(t)_V = d \cdot 280 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_V \cdot t) \cdot \frac{N_{eq}}{n_p} \cdot \psi_v$
Longitudinal	$F(t)_L = d \cdot 140 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_L \cdot t) \cdot \frac{N_{eq}}{n_p} \cdot \psi_h$
Transversal	$F(t)_T = d \cdot 35 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_T \cdot t) \cdot \frac{N_{eq}}{n_p} \cdot \psi_h$

Fonte: Séttra (2006)

O sentido de aplicação do carregamento deve ser igual ao do deslocamento do modo de vibração a ser estudado. Além disso, algumas considerações devem ser tomadas:

1. As cargas não devem ser aplicadas simultaneamente na estrutura. Deve-se observar a possibilidade de ocorrer ressonância com a aplicação das cargas referentes a cada direção, podendo ajustar a frequência de carga a depender da frequência natural considerada.
2. A massa dos  $n$  pedestres deve ser incorporada a massa total da passarela, pois os carregamentos não consideram a parte estática da ação dos pedestres, já que não há influência no resultado da aceleração.
3. As cargas devem ser mantidas até que a máxima aceleração de ressonância seja encontrada, já que o número equivalente de pedestres corresponde a um pequeno número fictício de pedestres em ressonância com a estrutura.

**Caso 2:** Aplicável apenas para a classe I, considerando a seguinte densidade de pedestres (Tabela 14), que transitará sobre toda a superfície trafegável, obedecendo a Eq. (8) da mesma forma que o caso 1.

**Tabela 14** - Densidade  $d$  de pedestres para o Caso 2 de carregamento

Classe da passarela	Densidade (d) de pedestres (pedestre/m <sup>2</sup> )
Classe I	1

Fonte: Séttra (2006)

Já com relação ao número equivalente de pedestres, considerados agora com fases randômicas, com a mesma frequência de passo, conforme Eq. (8):

$$N_{eq} = 1,85 \cdot \sqrt{n_p} \quad (8)$$

O fator de minoração  $\psi$  continuará obedecendo aos mesmos valores do caso 1, estabelecidos nas Figuras 6 e 7.

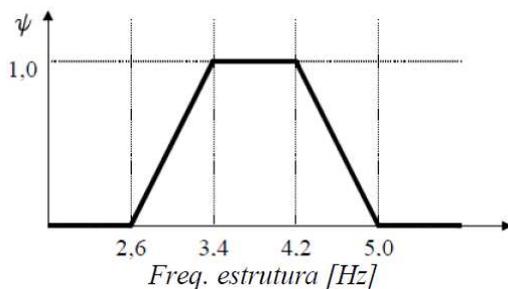
Dessa forma, para o Caso 2, serão obedecidas as mesmas funções apresentadas anteriormente (Tabela 13), considerando o mesmo sentido de aplicação (igual ao do deslocamento do modo de vibração a ser estudado) e considerações feitas para o Caso 1 (as cargas não devem ser aplicadas simultaneamente, a massa dos pedestres incorporadas na massa da passarela e manutenção das cargas até que a máxima aceleração de ressonância seja encontrada).

**Caso 3:** Aplicável apenas às classes I e II, considerando os efeitos do segundo harmônico das forças geradas pelos pedestres caminhando, similarmente aos casos 1 e 2, o que corresponde em média, ao dobro da frequência do primeiro harmônico.

Os parâmetros de densidade e número equivalente de pedestres continuam os mesmos citados anteriormente, sendo o caso 1 referente à classe II e o caso 2 referente à classe I.

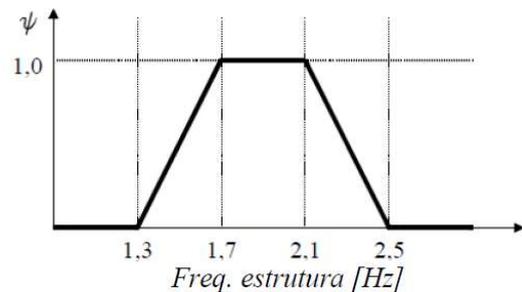
Já o fator de minoração  $\psi$  será obtido para este caso através das Figuras 8 e 9.

**Figura 8** - Fator de minoração  $\psi$  relativo ao Caso 3 de carregamento para ações nas direções vertical e horizontal longitudinal



Fonte: Sétra (2006)

**Figura 9** - Fator de minoração  $\psi$  relativo ao Caso 3 de carregamento para ações na direção horizontal transversal



Fonte: Sétra (2006)

As funções de carregamento dinâmico por unidade de área trafegável e para cada direção estão apresentadas na Tabela 15, sofrendo uma redução na força exercida por um único pedestre.

**Tabela 15** -Funções de carregamento a serem aplicadas na superfície trafegável para o Caso 3

<b>Direção</b>	<b>Carga (N/m<sup>2</sup>)</b>
<b>Vertical</b>	$F(t)_V = d \cdot 70 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_v \cdot t) \cdot \frac{N_{eq}}{n} \cdot \psi$
<b>Longitudinal</b>	$F(t)_L = d \cdot 35 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_h \cdot t) \cdot \frac{N_{eq}}{n} \cdot \psi$
<b>Transversal</b>	$F(t)_T = d \cdot 7 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_h \cdot t) \cdot \frac{N_{eq}}{n} \cdot \psi$

Fonte: Sétra (2006)

## 2.6 CONSIDERAÇÕES NORMATIVAS BRASILEIRAS

### 2.6.1 NBR 7188 : 2013 – Carga móvel rodoviária e de pedestres em pontes, viadutos, passarelas e outras estruturas.

A norma brasileira NBR 7188: 2013 apresenta pouco conteúdo no que se refere à análise dinâmica de passarelas. A consideração feita é que quando se tratar de passarelas especiais (esbeltas, leves, sensíveis ao vento e à ação dinâmica de pedestres em estruturas de aço, mistas, pênseis ou estaiadas), deve-se ter a comprovação da estabilidade global, além da verificação dos elementos estruturais através de modelos dinâmicos e resistência a fadiga.

Nenhum método de verificação ou proposta de cálculo que preveja limites quanto às vibrações é citado, ficando a cargo do projetista escolher dentre as normas internacionais àquela que melhor se adequar à verificação do comportamento dinâmico e limites de aceleração.

### 2.6.2 NBR 8800: 2008 - Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios

A NBR 8800 (2008) estabelece orientações a respeito de projeto e execução estruturas de aço em geral. Apesar de não mencionar informações a respeito de passarelas, o seu anexo M traz a probabilidade da ocorrência de vibrações que causem desconforto em estruturas com pisos de grandes vãos e amortecimento reduzido, que podem ser considerados em passarelas. A norma recomenda que deve-se analisar dinamicamente esses casos levando em conta:

a) as características e a natureza das ações dinâmicas, como por exemplo, as decorrentes do caminhar das pessoas e de atividades rítmicas;

- b) os limites para conforto humano dependendo do uso e ocupação das áreas do piso.
- c) a frequência natural da estrutura do piso;
- d) a razão de amortecimento modal;
- e) os pesos efetivos do piso.

Apesar de mencionar que deve ser feita a análise dinâmica, a norma também não apresenta nenhuma metodologia de cálculo para estimar os carregamentos, nem nenhum limite a ser obedecido, deixando a avaliação a cargo do projetista.

### 2.6.3 NBR 6118: 2014 – Projeto de estruturas de concreto simples, armado e protendido, – Procedimento.

Com relação às propriedades dinâmicas das estruturas de concreto, de acordo com a norma brasileira NBR 6118:2014, as ações dinâmicas às quais as estruturas de concreto estão propensas podem provocar os estados limites de serviço e estados limites últimos por vibração excessiva ou por fadiga dos materiais, e sua análise é feita no regime linear nas estruturas mais usuais.

A análise é feita determinando uma frequência crítica ( $f_{crit}$ ), que depende da destinação da utilização da estrutura, conforme Tabela 16.

**Tabela 16** - Frequências críticas de acordo com a destinação de estruturas de concreto armado submetidas a vibrações pela ação de pessoas.

<b>Destinação da edificação</b>	<b><math>f_{crit}</math> (Hz)</b>
Ginásio de esportes	<b>8</b>
Salas de dança ou de concerto sem cadeiras fixas	<b>7</b>
Escritórios	<b>3-4</b>
Salas de concerto com cadeiras fixas	<b>3,4</b>
Passarela de pedestres ou ciclistas	<b>1,6-4,5</b>

Fonte: NBR 6118 (2014)

A frequência crítica deve ser comparada com a frequência natural da estrutura, de forma a afastá-las o máximo possível, de acordo com a Eq. (9).

$$f_0 = 1,2 \cdot f_{\text{crit}} \quad (9)$$

Onde:  $f_0$ : frequência natural da estrutura [Hz]

$f_{\text{crit}}$ : frequência crítica, em função da destinação da edificação [Hz]

Convém ressaltar que apesar da referida norma se aplicar apenas a estruturas de concreto armado, são aplicadas em passarelas mistas (composta de aço e concreto armado), já que não há outras recomendações normativas brasileiras a respeito desse tipo de estrutura.

Enquanto não houver norma que especifique como deve ser a avaliação dinâmica nesses tipos de estruturas, nos casos em que as recomendações referidas não puderem ser atendidas, devem ser feitos estudos com normas internacionais, de forma a tornar a análise dinâmica mais aprimorada.

## 2.7 LIMITES DE SERVIÇO PARA PASSARELAS

Alguns limites de serviço foram determinados por algumas normas e autores, em função do tipo de passarela e de suas frequências naturais de excitação. O parâmetro dinâmico usual na medição do conforto humano para determinar a capacidade de utilização das passarelas foi a aceleração máxima.

É importante ressaltar que há diferenças entre as formas de comparação dos limites aceitos com relação aos níveis de vibrações aceitáveis em virtude da grande diferença entre os resultados dos testes realizados entre os pesquisadores e pela variação da tolerância às vibrações das pessoas na comparação entre as normas, guias e recomendações sobre os limites de aceitabilidade dos níveis de vibrações relacionados ao conforto humano, bem como pela forma de se obter a aceleração.

A seguir será feito uma síntese das recomendações existentes atualmente em algumas normas e em trabalhos de alguns autores quanto aos limites máximos para as acelerações e deslocamentos das estruturas, permitindo a comparação e avaliação imediata com os resultados obtidos da simulação.

O CEB (1991) estima o limite de frequências naturais de passarelas, em Hertz, a depender do tipo de passarela, conforme Eq. (10), (11) e (12) e o limite de aceleração, conforme Eq. (13).

$$f = 39.L^{-0,77} \text{ (Passarelas de concreto)} \quad (10)$$

$$f = 35.L^{-0,73} \text{ (Passarelas de aço)} \quad (11)$$

$$f = 42.L^{-0,84} \text{ (Passarelas mistas)} \quad (12)$$

Onde:  $f$ : frequência natural da passarela [Hz]

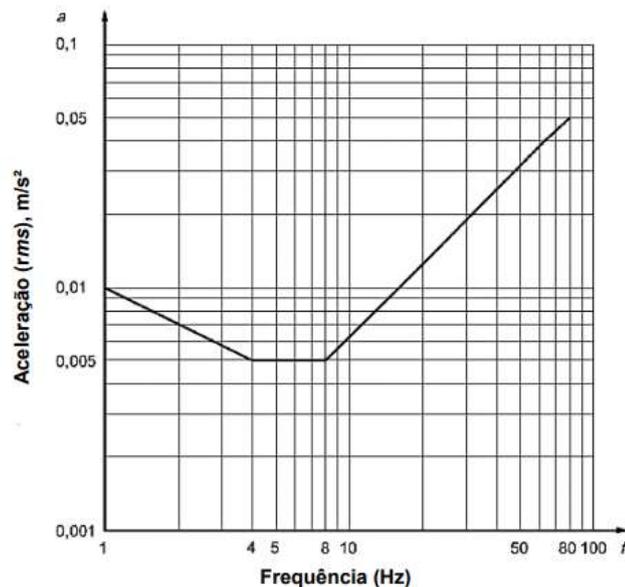
$L$ : Comprimento do vão livre da estrutura [m]

$$a_{\text{máx}} \leq 0,5 \text{ m/s}^2 \quad (13)$$

Onde:  $a_{\text{máx}}$ : aceleração máxima da passarela [ $\text{m/s}^2$ ]

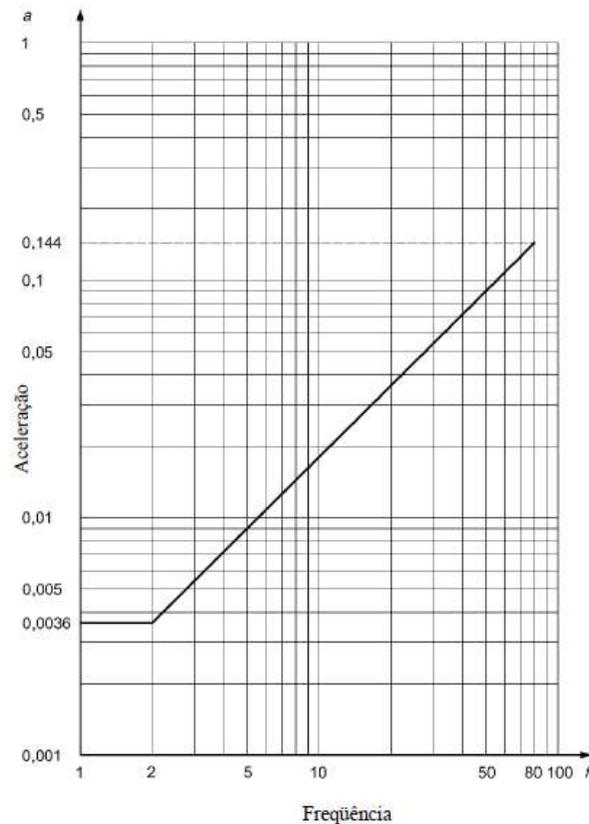
De acordo com a norma ISO 10137 (2007), após a análise dinâmica, o nível de vibrações na direção vertical e horizontal, em termos de aceleração ( $\text{m/s}^2$ ), não deve ultrapassar os obtidos nas curvas das Figuras 10 e 11. Estes valores devem ser majorados em 60 vezes, com exceção da situação em que uma ou mais pessoas estiveram parados na passarela, em que deve ser utilizado o fator de majoração de 30 vezes, já que conforme Dang e Zivanovic (2015), o usuário da passarela é mais sensível às vibrações quando parado.

**Figura 10** - Curva base de vibrações para acelerações no plano vertical.



Fonte: ISO 10137 (2007)

**Figura 11** - Curva base de vibrações para acelerações no plano horizontal.



Fonte: ISO 10137 (2007)

De acordo com a norma BS 5400 (1972), para valores de frequências naturais da estrutura acima de 5 Hz, a verificação relativa ao estado limite de vibração em condições de serviço é dispensada. Assim, para o valor limite da aceleração vertical em estruturas cuja frequência fundamental seja inferior a 5 Hz, a aceleração vertical máxima em qualquer parte da passarela deverá ser limitada a:

$$a_{\text{máx}} = 0,5 \cdot \sqrt{f_0} \quad (14)$$

Onde:  $a_{\text{máx}}$ : aceleração máxima [m/s<sup>2</sup>];

$f_0$ : valor da frequência natural do primeiro modo vertical da estrutura [Hz]

Os valores aceitáveis para acelerações máximas em qualquer parte do piso para vibrações nas direções vertical e horizontal, de acordo com o EUROCODE 1 (2005), devem ser calculados de acordo com as Eq. (15) e (16), respectivamente.

$$0,5 \cdot \sqrt{f_v} \text{ ou } 0,7 \quad (15)$$

$$0,14 \cdot \sqrt{f_h} \text{ ou } 0,15 \quad (16)$$

Onde:  $f_v$ : Frequência no qual a ressonância pode ocorrer, direção vertical. [Hz].

$f_h$ : Frequência no qual a ressonância pode ocorrer, direção horizontal [Hz].

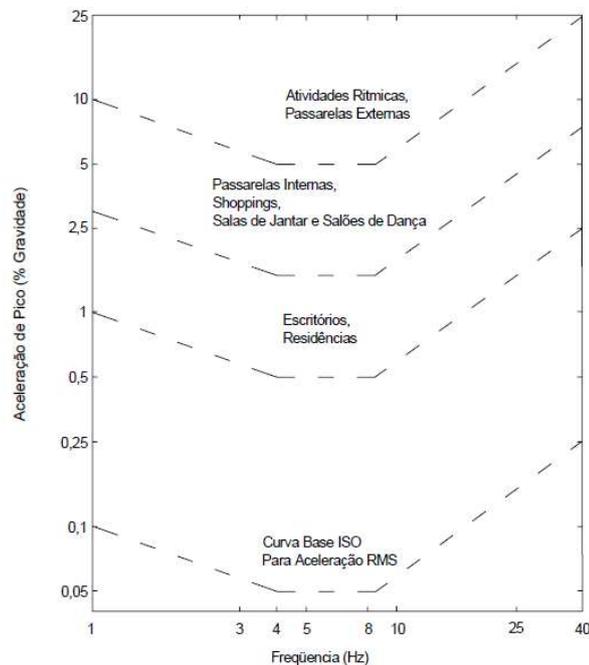
Ainda de acordo com o EUROCODE 1 (2005), para que nenhuma verificação adicional seja necessária, as frequências fundamentais para as direções vertical e horizontal da plataforma devem ser:

$$f_{o,h} > 2,5 \text{ Hz (para a direção vertical)} \quad (17)$$

$$f_{o,v} > 5,0 \text{ Hz (para a direção horizontal)} \quad (18)$$

Analisando os critérios de aceitação para o conforto humano do Guia de projeto “*Floor Vibrations Due to Human Activity*”, desenvolvido pelo AISC - *American Institute of Steel Construction*, os valores para a aceleração limite são os considerados pela norma *International Standard Organization*, ISO 2631-2, 2003. Assim, de acordo com a Figura 12, o valor recomendado para acelerações limites em passarelas externas não deve ser superior a 5% da aceleração da gravidade (o que corresponde a aproximadamente  $0,49 \text{ m/s}^2$ ).

**Figura 12** - Aceleração de pico recomendada em vibrações devidas a atividades humanas (em % Gravidade)



Fonte: ISO 2631-2 (2003)

De acordo com a EUROCODE 5 – Parte 2 (2004) quanto aos critérios de serviço de vibrações máximas aceitáveis, a norma dispensa a verificação do comportamento dinâmico conforme os mesmos critérios adotados no EUROCODE 1 (2005), de acordo com as Eq. (17)

e (18). Caso esses critérios não sejam atendidos, a análise do comportamento dinâmico deve ser realizada e as respostas dadas pela estrutura devem respeitar os limites de aceleração de acordo com a Tabela 17.

**Tabela 17** - Valores recomendados de aceleração máxima em passarelas

<b>Aceleração máxima (m/s<sup>2</sup>)</b>	<b>Direção da vibração</b>
<b>0,7</b>	Vertical
<b>0,2</b>	Horizontal, em uso normal
<b>0,4</b>	Horizontal, em situação de multidão

Fonte: EUROCODE (2005)

Zivanovic *et al.* (2005) e Blanco *et al.* (2005) citam alguns critérios de limites de aceleração e frequências propostas por pesquisadores e normas (Tabela 18).

**Tabela 18** -Limites de alguns pesquisadores citados por Blanco *et al.*

<b>Autor do critério</b>	<b>Limites</b>
<b><i>Ontario Bridge Code (1983)</i></b>	$a_{\text{vert,lim}} \leq 0,25 \cdot f_0^{0,18}$
<b>Hugo Bachmann (2002)</b>	$a_{\text{vert,lim}} \leq 0,5$
<b><i>Hong Kong Structures Design Manual for Highways and Railways (2002)</i></b>	$a_{\text{hor,lim}} \leq 0,15$

Fonte: Modificada de Zivanovic *et al.* (2005) e Blanco *et al.* (2005)

Com relação às normas brasileiras, a NBR 7188 (2013) que trata de cargas móveis de pedestres em pontes, passarelas e outras estruturas prevê que deve ser verificado a estabilidade global da estrutura e da verificação em diversos elementos estruturais do desempenho dinâmico, mas não recomenda nenhuma metodologia ou cálculo para verificação de segurança ou níveis de conforto.

Da mesma forma, a NBR 8800 (2008), que se refere ao projeto a temperatura ambiente das estruturas de aço e das estruturas mistas de aço e concreto de edificações também não propõe nenhum método que determine o limite a respeito das vibrações nas passarelas.

A Tabela 19 apresenta um resumo dos critérios de limite de frequência natural e acelerações máximas conforme as normas já citadas, permitindo avaliar o desempenho dinâmico da passarela estudada.

**Tabela 19** - Resumo dos critérios de aceleração máxima e frequência natural mínima.

<b>Norma/Autor</b>	<b>Frequência natural vertical (Hz)</b>	<b>Frequência natural transversal (Hz)</b>	<b>Aceleração vertical (m/s<sup>2</sup>)</b>	<b>Aceleração transversal/longitudinal (m/s<sup>2</sup>)</b>
	$\geq 39.L^{0,77}$ (concreto)			
<b>CEB (1991)</b>	$\geq 35.L^{-0,73}$ (aço)	-	$\leq 0,5$	-
	$\geq 42.L^{-0,84}$ (mistas)			
<b>ISO 10137 (2007)</b>	-	-	0,3 – 0,6	$\leq 0,216$ (*)
<b>BS 5400-2(2006)</b>	$\geq 5$	-	$\leq 0,5.\sqrt{f_{ov}}$	
<b>EUROCODE 1 (2005)</b>	$> 5,0$	$> 2,5$	$0,5.\sqrt{f_{ov}}$ ou 0,7	$0,14.\sqrt{f_{0h}}$ ou 0,15
<b>AISC / ISO 2631-2 (2003)</b>	$> 5,0$	-	$\leq 0,49$	-
<b>EUROCODE 5/2 (2004)</b>	$> 5,0$	$> 2,5$	$\leq 0,7$	$\leq 0,2$ (**) $\leq 0,4$ (***)
<b>Ontario Bridge Code (1983)</b>	-	-	$\leq 0,25.f_0^{0,18}$	-
<b>Hugo Bachmann (2002)</b>	-	-	$\leq 0,5$	-
<b>NBR 6118 : 2014</b>	$1,2.f_{crit}$			

(\*) Valor para a frequência de 2Hz

(\*\*) Uso normal

(\*\*\*) Casos de multidão

### 3 METODOLOGIA

A proposta deste trabalho é de realizar a atualização de um modelo numérico computacional já elaborado da passarela de pedestres sobre a Avenida Pedro II em João Pessoa, PB, de forma a torná-lo mais realístico. Para isso, objetiva-se o refinamento dos elementos próximos aos locais em análise e calibração de alguns fatores que influenciem diretamente suas características dinâmicas, de forma a confrontar as frequências naturais extraídas do *software* com as encontradas em dados experimentais obtidos anteriormente, os quais foram obtidos por meio de testes com acelerômetro na própria passarela, para então representar a estrutura real de forma satisfatória e realística.

A partir do modelo atualizado, é possível fazer a avaliação de seu comportamento dinâmico estrutural através da realização da análise modal e transiente via Método dos Elementos Finitos por meio do programa de análise estrutural ANSYS 14.5. Essas análises têm como finalidade extrair os principais parâmetros dinâmicos da estrutura, como as frequências naturais de vibração lateral e vertical e suas respostas de aceleração e deslocamentos devidas à imposição de alguns cenários de carregamentos variantes no tempo, de acordo com funções de cargas pré-determinadas à luz das normas em vigor.

De posse das acelerações e deslocamentos encontrados na análise transiente, pretende-se também fazer um comparativo desses valores com os limites estabelecidos nas principais normas analisadas, a fim de investigar se a estrutura necessita de um melhoramento estrutural, de modo que apresente níveis baixos de vibração e aceleração e um desempenho satisfatório quanto ao conforto e segurança dos usuários.

Para confrontar os resultados da análise modal no modelo numérico utilizaram-se as frequências naturais experimentais da estrutura obtidos em testes anteriores na passarela com acelerômetros. Com o objetivo de avaliar os resultados da análise transiente, pretende-se realizar uma revisão bibliográfica dos principais critérios definidos em normas e recomendações técnicas a respeito da análise do comportamento dinâmico em passarelas (com relação a frequências naturais limites, acelerações máximas), contribuindo para o esclarecimento abrangente dos limites e critérios mais significativos a serem abordados no trabalho para a resposta das passarelas quando submetidas a ações de pedestres.

### 3.1 DESCRIÇÃO DO MODELO DA PASSARELA

O sistema estrutural escolhido para a realização do estudo se encontra localizado na Av. Pedro II, em João Pessoa-PB, conforme Figura 13.

**Figura 13** - Passarela escolhida para o estudo, localizada na Av. Pedro II, em João Pessoa – PB.



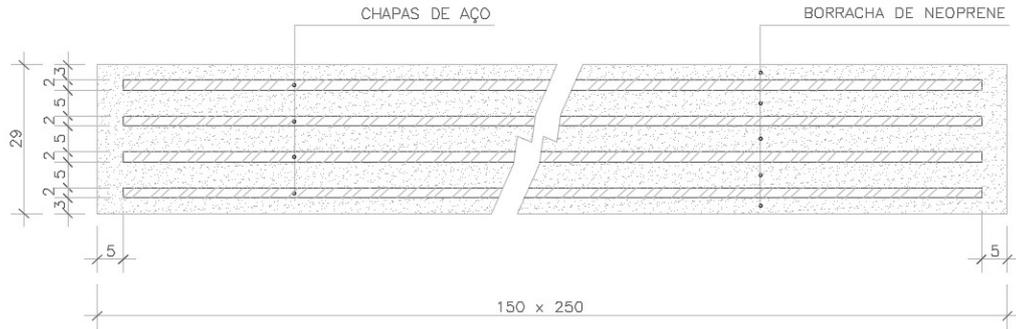
Fonte: Google Earth - Mapas. Disponível em: <<https://www.google.com.br/maps/@-7.1350009,-34.8566252,77a,20y,242.12h,65.04t/data=!3m1!1e3>> Acesso em 10 Maio 2018

Esse modelo consiste em uma passarela mista composta de tabuleiro e cobertura de concreto armado apoiado lateralmente em duas vigas treliçadas metálicas. É um sistema estrutural que aparenta ser robusto com relação à vibração induzida por pedestres e vem sendo bastante utilizado na transposição de vias urbanas em algumas cidades do Nordeste, como Recife, João Pessoa e Salvador.

As vigas treliçadas metálicas têm como função principal transferir as cargas aplicadas no tabuleiro para os apoios, formando um sistema misto de interação e se apoiam em quatro pilares, de oito que sustentam a estrutura, por meio de uma borracha de Neoprene e quatro chapas de aço. A Figura 14 apresenta o detalhe desta peça com as dimensões em milímetros.

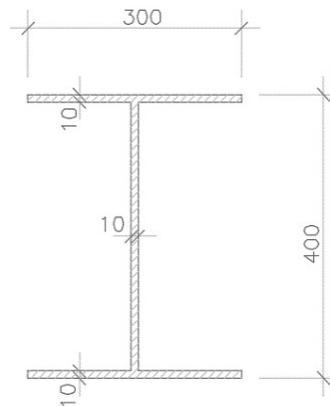
Já nos outros quatro pilares, além do aparelho de apoio de borracha e aço, há uma viga de seção I, conforme Figura 15. As características geométricas e dos materiais utilizadas foram baseadas no projeto da estrutura, obtido junto à empresa que realizou o projeto.

**Figura 14** – Seção transversal do aparelho de apoio composto por 4 chapas de aço e borracha de Neoprene. (Dimensões em milímetros)



Fonte: Projeto executivo da passarela

**Figura 15** – Seção transversal da viga entre os pilares e os aparelhos de apoio. (Dimensões em milímetros)



Fonte: Projeto executivo da passarela

### 3.2 FERRAMENTA COMPUTACIONAL

Para a discretização do modelo computacional tridimensional da passarela e realização das análises dinâmicas necessárias para o estudo, foi utilizado o programa de análise estrutural ANSYS 14.5. O modelo foi desenvolvido em etapa anterior, durante vigência do projeto de iniciação científica da autora deste trabalho, e foi composto por vigas, tabuleiros, pilares e aparelhos de apoio conforme os tipos de elementos disponíveis no *software*, respeitando suas geometrias e propriedades. Neste trabalho, foram realizadas algumas mudanças quanto ao refinamento do modelo, de forma a trazer uma maior precisão aos resultados.

O *software* ANSYS se baseia principalmente no método dos elementos finitos, em que o domínio de integração é dividido em sub-regiões, ou elementos finitos, que por discretizar o modelo em partes menores, torna as análises mais precisas, além de permitir a utilização de

vários tipos de materiais com inclusão de não-linearidades, diferentes tipos de carregamentos e condições de contorno.

### 3.2.1 Construção do modelo

Para iniciar a modelagem da estrutura, entra-se na área *Pre-processor*, em que deverá ser determinado: o tipo de elemento a ser utilizado (viga, placa, sólido), as propriedades mecânicas e geométricas do material (elásticas, físicas, área, inércia da seção, etc.), e a inserção dos nós e barras que compõem cada elemento. Neste trabalho, optou-se por utilizar a malha manual, inserindo-se os nós individualmente e gerando-se a malha.

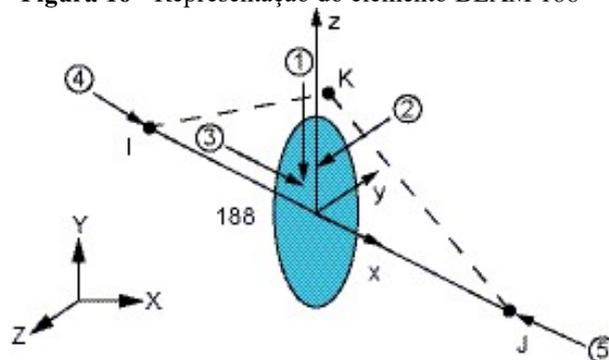
A seguir, gera-se o modelo numérico e pode-se iniciar a análise desejada na área *Solution*, determinando qual o tipo de análise a ser efetuada (estática, modal, harmônica, dinâmica transiente, espectral ou flambagem), com a aplicação das forças atuantes na estrutura e imposição das condições de contorno (condições de apoio). Por fim, inicia-se a terceira etapa, na área *Post-Processor*, em que há a listagem, impressão e visualização dos resultados.

#### 3.2.1.1 Elementos utilizados

Para a estrutura, foram considerados quatro tipos de elementos para descrever cada componente da passarela.

As barras treliçadas de aço da passarela foram representadas por elementos finitos de viga tridimensionais BEAM188. Esse elemento é baseado na teoria de vigas de *Timoshenko*, que considera os efeitos de cisalhamento e rotação. É definido por meio de 2 nós (I, J) e possui 6 graus de liberdade em cada nó. A Figura 16 representa o elemento utilizado.

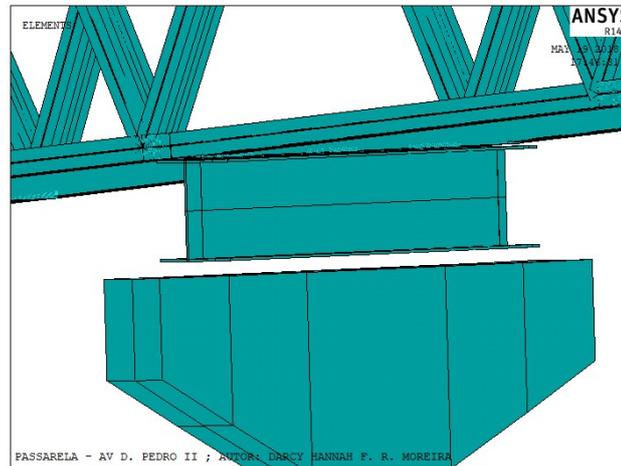
**Figura 16** - Representação do elemento BEAM 188



Fonte: ANSYS 14.5

As vigas de apoio entre os aparelhos de Neoprene e alguns pilares também foram representados por esse elemento. Porém, foram utilizadas as características geométricas da seção I, conforme informações de projeto (Figura 17).

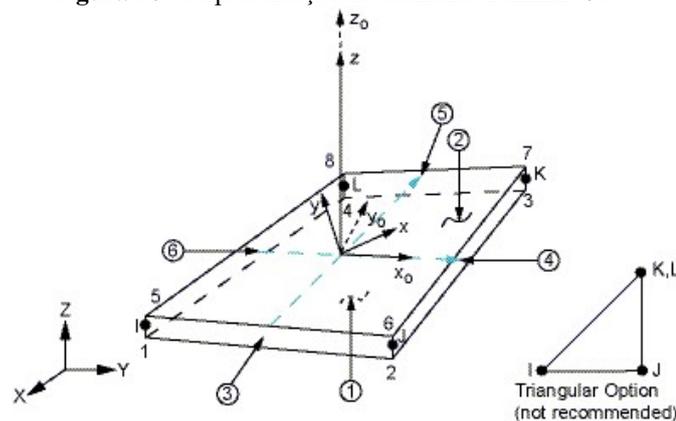
**Figura 17** - Detalhe da viga de apoio (viga I) entre o pilar e a estrutura da passarela



Fonte: ANSYS 14.5

A laje e a cobertura de concreto foram simuladas por meio de elementos de casca SHELL181. É um elemento composto por quatro nós (I, J, K, L) com seis graus de liberdade em cada nó, cuja espessura deve ser informada, sendo sua formulação baseada em uma tensão logarítmica. A representação deste elemento está indicada na Figura 18.

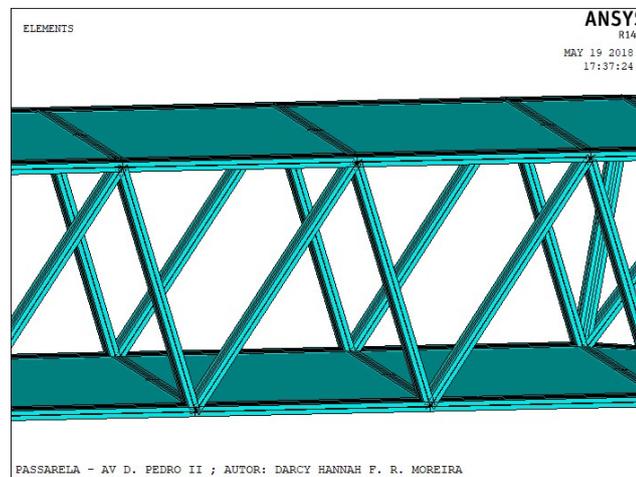
**Figura 18** - Representação do elemento SHELL181



Fonte: ANSYS 14.5

Na Figura 19 é apresentado o detalhe da modelagem das vigas e das placas de concreto por meio dos elementos SHELL181 e BEAM188.

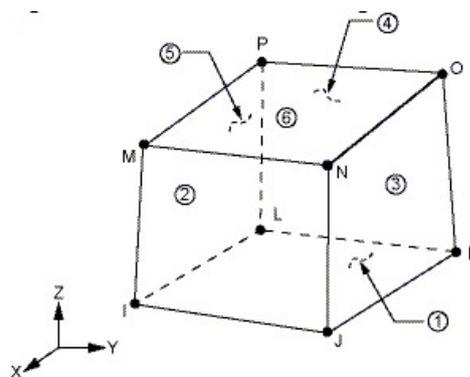
**Figura 19** - Discretização de parte da estrutura treliçada, por meio do elemento de viga BEAM188 e placas de cobertura e piso, com o elemento de casca SHELL181



Fonte: ANSYS 14.5

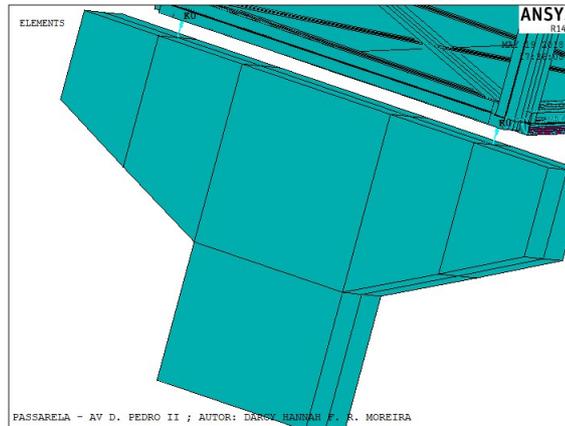
Para a criação dos pilares, em virtude da variação da seção transversal, que não era uniforme, ficou inviável a utilização do elemento de superfície SHELL 181. Dessa forma, utilizou-se o elemento finito SOLID 185, que representa a modelagem em 3 dimensões de estruturas sólidas, bastante conveniente na representação do pilar. O elemento é definido por 8 nós (I, J, K, L, M, O, P, Q) com 3 graus de liberdade por nó e possui plasticidade, fluência e grandes capacidades de deformação. A representação desse elemento está esquematizada na Figura 20 e o detalhe da modelagem do pilar por meio desse elemento está apresentado na Figura 21.

**Figura 20** - Representação do elemento SOLID 185



Fonte: ANSYS 14.5

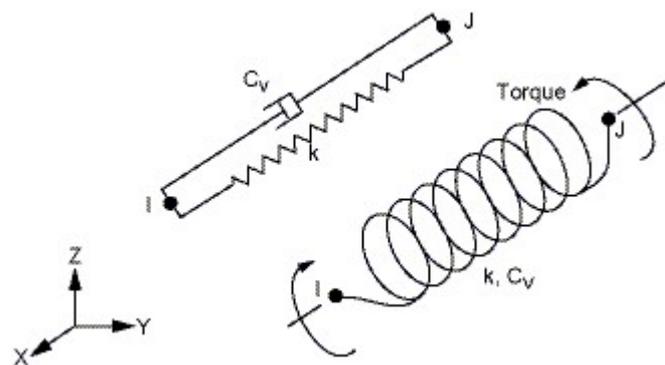
**Figura 21** - Modelagem do pilar por meio da junção de 10 blocos sólidos inseridos no ANSYS como elemento SOLID 185



Fonte: ANSYS 14.5

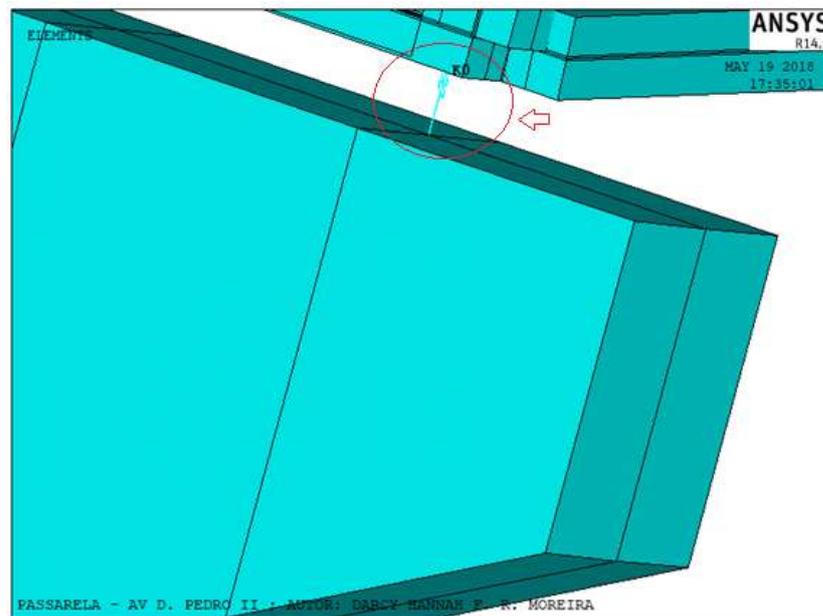
Para a simulação da semirrigidez das ligações laje-coluna e laje-viga de Neoprene foi empregado o elemento COMBIN14. Esse elemento funciona como uma mola-amortecedor uniaxial, com capacidade de torção em aplicações para 3 dimensões e é definido por 2 nós que irão delimitar a mola, uma constante de mola ( $k$ ) a definir e coeficiente de amortecimento ( $C_v$ ). O esquema do elemento e detalhe da modelagem estão representados nas Figuras 22 e 23, respectivamente

**Figura 22** - Representação do elemento COMBIN 14



Fonte: ANSYS 14.5

**Figura 23** - Detalhe da indicação da conexão entre o ponto do pilar e o ponto da estrutura elemento de mola COMBIN14.



Fonte: ANSYS 14.5

### 3.2.2 Tipos de análise

O *software* ANSYS 14.5 disponibiliza seis tipos de análises: estática, modal, harmônica, dinâmica transiente, espectral e flambagem. Neste trabalho, foram realizadas no modelo da passarela as análises modal e dinâmica transiente.

#### 3.2.2.1 Análise Modal – frequências e modos de vibração

Durante a análise modal, são determinadas as características dinâmicas da estrutura (frequências naturais e os modos de vibrações). Os modos de vibrações são configurações do sistema segundo o qual este pode oscilar, mantendo-se constante a relação entre os deslocamentos dos diversos pontos da estrutura. (CLOUGH E PENZIEN, 1993) Estes são parâmetros essenciais em um projeto de estruturas submetidos a carregamentos dinâmicos, pois permitem avaliar se a estrutura está segura em relação a vibrações excessivas, tanto a nível de conforto dos usuários, quando analisada o estado limite de serviço, quanto ao perigo de colapso, no caso da avaliação do estado limite último. Além disso, as respostas modais também podem servir para uma análise dinâmica mais detalhada, de forma a entender como a estrutura responde quando os modos são excitados.

Devido à natureza das análises modais, no ANSYS esse tipo de análise é sempre linear. Dessa forma, todas as não-linearidades (plasticidades, grandes deformações e hiperelasticidades, por exemplo) são excluídas, mesmo se estiverem sido impostas.

Cada valor de frequência gerada corresponde a um modo de vibração da estrutura, e para cada modo, pode-se gerar no *software* a estrutura deformada, de forma a identificar qual harmônico cada modo está relacionado.

### 3.2.2.2 Análise Transiente – acelerações e deslocamentos

A análise dinâmica transiente é uma técnica utilizada para determinar a resposta dinâmica de uma estrutura sob ação de carregamento modificado em função do tempo (cargas móveis). Através desta análise, podem-se determinar os deslocamentos, tensões, deformações e acelerações dependentes do tempo de acordo com a variação da carga móvel ao qual foi submetida a estrutura. Esta análise pode ser linear ou não-linear, diferentemente da análise modal. Optou-se por utilizar a análise linear nesse trabalho, já que a análise modal também foi feita dessa forma.

A equação básica do movimento resolvida pelo *software* durante a análise transiente é:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + K\{u\} = \{F(t)\} \quad (19)$$

Onde: [M]: Matriz de massa

[C]: Matriz de amortecimento

[K]: Matriz de rigidez

{ $\ddot{u}$ }: vetor aceleração nodal

{ $\dot{u}$ }: vetor velocidade nodal

{u}: vetor deslocamento nodal

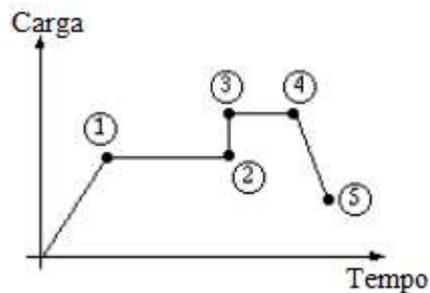
{F(t)}: vetor de carregamento

O *software* ANSYS utiliza o método de integração de tempo de *Newmark* para resolver as equações em pontos sucessivos de tempo. Além disso, essa análise dispõe de três métodos de resolução: *full*, *reduced* e *superposition mode*. Para realizar as análises nesse trabalho, foi

utilizado o “*full method*”, que calcula um sistema de matrizes completo (sem redução), de forma a permitir todos os tipos de não-linearidades. Apesar de não incluí-las na análise, esse método foi utilizado por ser mais simples de usar e por aceitar todos os tipos de carregamento.

Antes de inserir as funções de carregamento (que foram definidas baseadas nas normas de apoio utilizadas), foi feita a divisão dessas funções em “passos”, em que cada ponto da curva correspondeu a um “passo de carga”. A Figura 24 exemplifica como essa divisão foi feita: cada número (1, 2, 3, 4, 5) corresponde a um par ordenado (tempo, carga) que deve ser definido para a função.

**Figura 24** – Esquema dos “passos de carga” que devem ser definidos na função de carregamento no tempo.



Fonte: ANSYS 14.5

Após a definição da função, aplica-se o carregamento em cada nó (foram escolhidos os nós centrais longitudinais) e é feita a análise, podendo-se extrair as acelerações e os deslocamentos nos nós desejados.

### 3.3 CENÁRIOS DE CARREGAMENTO

Para os três cenários de carregamento considerados, o caminhar do pedestre na estrutura foi simulado no trecho do vão central da passarela, que totaliza 26,42 metros, por ser o maior vão e por apresentar respostas mais significativas em termos de vibração.

Com a finalidade de simular o estado de ressonância, levou-se em consideração o primeiro modo de vibração vertical, com frequência natural de 5,77 Hz, estimando a frequência de passo em 1,9 Hz, que de acordo com Bachmann (1987) corresponde a uma caminhada de lenta a normal. Dessa forma, a ressonância iria se estabelecer no terceiro harmônico da função do carregamento (5,7 Hz), já que segundo Zúñiga (2011), a ressonância poderá ocorrer se qualquer frequência associada com as forças de carregamento periódicas se igualar com a frequência natural de um determinado modo de vibração.

Os cenários escolhidos para determinação das respostas de aceleração da estrutura foram os propostos por SÉTRA (2006) e pela ISO 10137 (2007).

### **3.3.1 Primeiro cenário de carregamento - guia SÉTRA (2006)**

O primeiro cenário de carregamento foi estimado pelo guia SÉTRA (2006). A carga deste modelo foi aplicada durante 20 segundos sobre toda a superfície trafegável, nas três direções propostas pelo Guia (vertical, horizontal-longitudinal e horizontal-transversal), sem variação espacial no decorrer do tempo, afim de simular várias pessoas caminhando juntas, correspondendo ao efeito de multidão. Como sugerido, cada carga correspondente à sua respectiva direção (Tabela 13) foi aplicada individualmente, sem superposição de efeitos. A escolha desse cenário se deu pela recomendação da ISO 1037 (2005) em estimar um grande fluxo de pedestres caminhando sobre a passarela, acima do fluxo normal esperado.

O tempo de 20 segundos foi estimado levando em consideração a frequência de passo para caminhada normal atribuída (1,9 Hz) e o tempo de travessia no comprimento total da passarela, que também leva em conta a velocidade média em caminhada normal do pedestre de 1,5 m/s, segundo Bachmann (1987).

Por meio da sequência de classificações propostas foi obtida a função para carregamento para toda a área trafegável da estrutura, detalhada a seguir.

#### **Etapa 1 – Determinação da classe da passarela**

Por estar localizada na Av. Pedro II, uma via com intenso tráfego de automóveis e ônibus, próxima ao centro da cidade, a passarela foi classificada como sendo da **Classe III** - Passarelas de uso padrão, ocasionalmente atravessadas por grupos grandes de pessoas, mas que nunca chegarão a preencher toda sua superfície;

#### **Etapa 2 - Determinação do nível de conforto e aceleração limite**

Como nesta etapa da metodologia ainda não foram realizadas as análises para determinação das acelerações máximas da estrutura, optou-se por fazer a classificação quanto às condições de serviço ao final do estudo, através das Tabelas 6 e 7, após a imposição do carregamento. Porém, para dar prosseguimento às etapas, considerou-se inicialmente que a

passarela pertencia à faixa mais restritiva de risco, a Faixa 1 (máximo risco de ressonância), já que ainda não foram obtidos os resultados de acelerações para essa classificação.

### **Etapa 3 - Determinação da frequência natural e Verificação da necessidade de cálculo dinâmico**

De acordo com o Guia Sétra (2006), foram analisados os primeiros modos de frequência natural (vertical e lateral) para os dois casos de carregamento: passarela vazia e carregada em toda área trafegável com 1 pedestres por  $m^2$  ( $70 N/m^2$ ), obtendo as respostas descritas na Tabela 20.

**Tabela 20** - Resultados para frequência natural da passarela para os dois cenários considerados por Sétra (2006)

<b>Modo de vibração</b>	<b>Frequência natural (Hz)</b>	
	Passarela vazia	Passarela carregada (1 ped./ $m^2$ )
<b>Primeiro modo de vibração horizontal</b>	3,63	3,62
<b>Primeiro modo de vibração vertical</b>	5,77	5,41

Conclui-se com os resultados das frequências e considerando a Faixa 1 (máximo risco de ressonância) que a passarela possui risco desprezível de ressonância para as duas situações (vazia e carregada) e para as duas direções de carregamento (horizontal e vertical), conforme classificação das Tabelas 8 e 9.

Porém, apesar do Guia Sétra (2006) considerar um risco desprezível para a faixa em que se encontravam as frequências da passarela, a frequência natural pode ser excitada pelo segundo harmônico da carga, o que não exclui a verificação do comportamento dinâmico da estrutura.

Assim, verificando para a Faixa 1 e tendo sido classificada como Classe III, têm-se o caso 1 de carregamento, que corresponde a densidade de pedestres de  $0,5$  pedestres/ $m^2$ , conforme Tabela 10 de classificação.

#### Etapa 4 – Cálculo da aceleração máxima atuante

Para o caso 1 a ser imposto em toda superfície trafegável, os riscos de ressonância obtidos através das Figuras 6 e 7 foram nulos para as duas direções (horizontal e vertical), avaliados pelos fatores de redução  $\Psi$ . Este fator de redução revela a probabilidade da frequência natural da estrutura se igualar com a frequência de excitação do passo. Pelo fato da passarela possuir frequência natural vertical de 5,77 Hz, muito acima da faixa de frequência do passo, que varia entre 1,7 e 3,2 Hz (Bachmann,1987), seria pouco provável ocorrer a ressonância. Apesar disso, para que se possa realmente avaliar se a estrutura está dentro dos critérios de segurança e conforto, será feita a consideração do segundo harmônico da frequência vertical e horizontal para a análise, assim como recomendado pela norma.

Dessa forma, foram adotadas as frequências de passo do segundo harmônico de 4,8 Hz, para a direção vertical, e 2,4 para a direção horizontal, de forma a tornar o valor mais próximo da frequência natural. Para obtenção do fator de minoração ( $\Psi$ ) nesta situação, utilizou-se as Figuras 8 e 9, que são referentes ao segundo harmônico de carga. Os parâmetros adotados para as funções estão apresentados na Tabela 21.

**Tabela 21** – Parâmetros adotados para as funções de carregamento nas direções vertical e horizontal para o cenário 1

<b>Classe III - Caso 1</b>
<b>Densidade (d) = 0,5 pedestres/m</b>
<b>Área trafegável (S): 26,424 x 2,1 = 55,49 m<sup>2</sup></b>
<b>Frequência de passo vertical no segundo hamônico (f<sub>pv</sub>)= 4,8Hz</b>
<b>Frequência de passo horizontal no segundo hamônico (f<sub>ph</sub>)= 2,4 Hz</b>
<b>Número de pedestres (N<sub>p</sub>)= S x d = 28 pedestres</b>
<b>Coefficiente de amortecimento (ξ)=1,3 (Concreto Armado)</b>
<b>Número equivalente de pedestres (N<sub>eq</sub>)=10,8.√(ξ.n<sub>p</sub>) = 3,895</b>
<b>Fator de minoração vertical (Ψ<sub>v</sub>) = 0,2</b>
<b>Fator de minoração horizontal (Ψ<sub>h</sub>) = 0,2</b>

Dessa forma, substituindo os parâmetros nas funções da Tabela 13, ficaram definidas as funções de carregamento referentes ao Caso 1. As Eq. (20), (21) e (22) se referem às cargas nas

direção vertical, horizontal-longitudinal e horizontal-transversal, respectivamente. As Figuras 25, 26 e 27 representam os gráficos dessas funções, para dois períodos consecutivos.

$$F(t)_v = 140 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot 4,8t) \cdot \frac{(3,895)}{28} \cdot 0,2$$

$$F(t)_v = 4,2845 \cdot \cos(30,16 \cdot t) \quad (20)$$

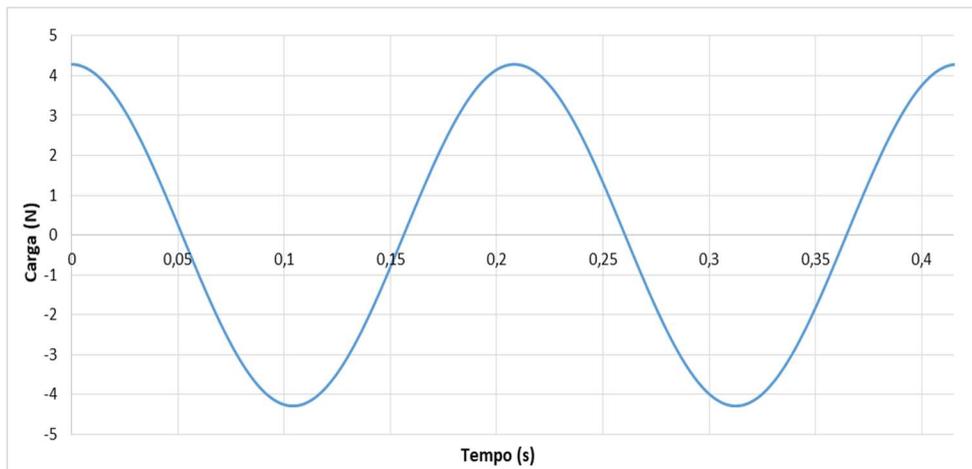
$$F(t)_v = 70 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot 2,4t) \cdot \frac{(3,895)}{28} \cdot 0,2$$

$$F(t)_L = 1,947 \cdot \cos(15,08 \cdot t) \quad (21)$$

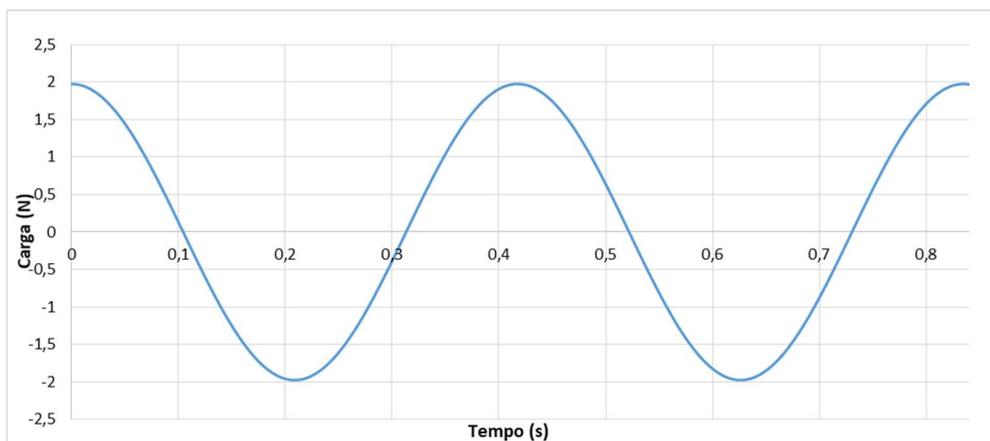
$$F(t)_v = 3,5 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot 2,4t) \cdot \frac{(3,895)}{28} \cdot 0,2$$

$$F(t)_T = 0,494 \cdot \cos(30,16 \cdot t) \quad (22)$$

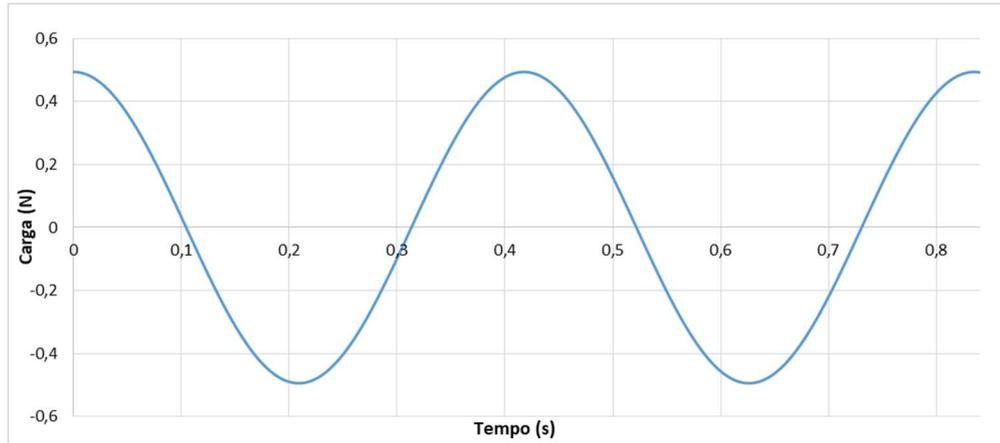
**Figura 25** – Função determinada para o cenário 1 de carregamento na direção vertical



**Figura 26** - Função determinada para o cenário 1 de carregamento na direção horizontal-longitudinal



**Figura 27** - Função determinada para o cenário 1 de carregamento na direção horizontal-transversal



### 3.3.2 Segundo e terceiro cenários de carregamento - ISO 10137 (2007)

Para o segundo e terceiro cenários de carregamento, as ações de pedestres foram representadas através de séries de Fourier propostas pela ISO 10137 (2007), conforme Eq. (2), considerando os três primeiros harmônicos da série.

A carga foi aplicada ao longo do vão, variando espacial e temporalmente, conforme se idealiza a caminhada de um pedestre. O modelo foi aplicado no segundo cenário simulando o caminhar de 1 pedestre e no terceiro cenário estimando 3 pedestres lado a lado trafegando sobre todo o vão central, movendo-se lado a lado ao longo da passarela. Segundo Peña (2015), este representa o pior caso de carregamento a ser analisado, tal como o mais suscetível de ocorrer em uma estrutura destinada a receber pedestres.

Foram adotados os seguintes parâmetros para as equações:

- Coeficientes de Fourier e ângulos de fase conforme Tabela 22, baseadas nas prescrições da ISO 10137 (2007);

- Frequência de passo ( $f_p$ ) de 1,9 Hz estimando uma caminhada de lenta a normal, conforme recomendado por Bachmann (1987) e estabelecendo o estado de ressonância no terceiro harmônico (5,7Hz);

- Peso do pedestre: 800 N;

- Tempo total de travessia: 17,78 segundos, estimado para a travessia completa dos pedestres pelo vão central da passarela em função da frequência de passo adotada (1,9 Hz) e a velocidade de passo (1,5 m/s) conforme Bachmann (1987).

**Tabela 22** – Coeficientes da série de Fourier e frequências utilizadas no cenário 2 e 3 de carregamento

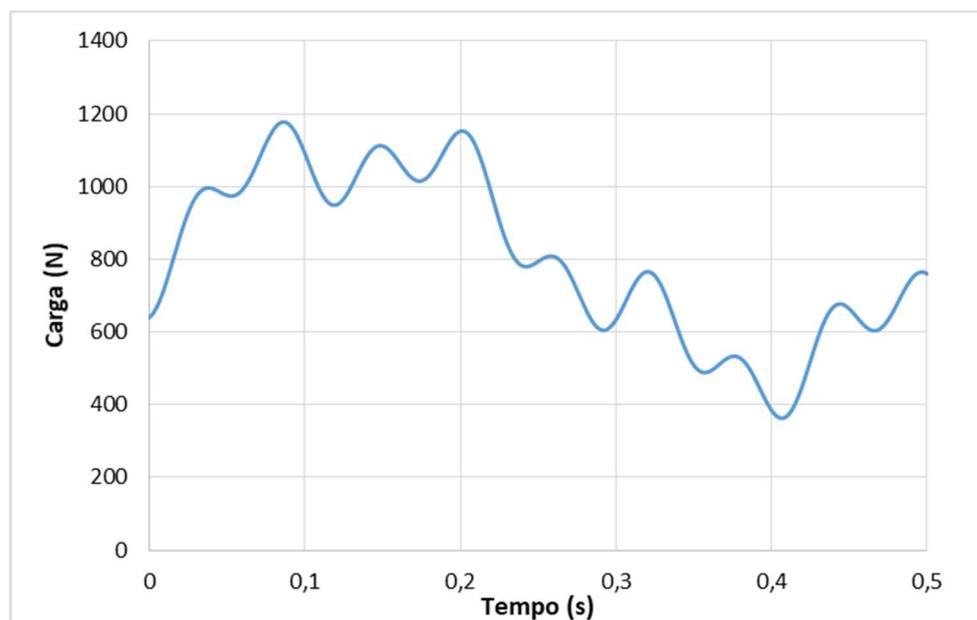
Atividade	Número do harmônico (i)	Faixa de frequência de passo (Hz)	Coefficiente numérico para a direção vertical ( $\alpha_{iv}$ )	Ângulos de fase ( $\varphi_i$ )
<b>Caminhar (Lento a normal)</b>	1	1,9	0,33	$\varphi_1 = 0$
	2	3,8	0,1	$\varphi_2 = \pi/2$
	3	5,7	0,06	$\varphi_3 = \pi/2$

Fonte: ISO 10137 (2007)

A função de carga utilizada está apresentada na Eq. (23) e o gráfico representativo do carregamento para um período está indicado na Figura 28.

$$F(t) = 700 \cdot (1 + (0,33 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 1,9 \cdot t)) + (0,1 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 3,8 \cdot t - \pi/2)) + (0,06 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 5,7 \cdot t - \pi/2))) \quad (23)$$

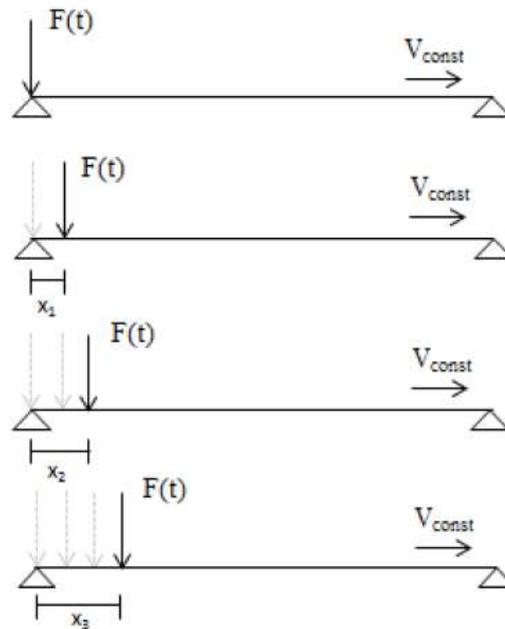
**Figura 28** – Função de carregamento proposta pela ISO 10137 (2007) para a frequência fundamental de 1,9 Hz utilizada nos cenários 2 e 3



Nota-se pela figura que há dois picos de força correspondentes ao contato do calcanhar e a ponta do pé no chão e que eles geram um carregamento aproximadamente 50% maior que o de uma pessoa parada. Este fato comprova que o efeito de uma pessoa caminhando é muito maior que o de uma pessoa parada, sendo a ação de caminhar apresentando um fator de 1,5 maior, conforme observado por Barros (2009).

Durante o procedimento de aplicação das cargas foi aplicado um carregamento  $F(t)$  na estrutura com uma velocidade constante, variando no tempo e no espaço, conforme Pereira (2017) idealizou. A medida que os pedestres vão caminhando ao longo da passarela, diversas cargas vão sendo aplicadas e desaplicadas, até que os mesmos terminem o trajeto. A representação desse procedimento está indicada na Figura 29.

**Figura 29** - Representação do carregamento do tráfego de pedestres para os cenários 2 e 3



Fonte: Pereira (2017)

Dessa forma, após aplicar os modelos descritos, podem-se extrair os resultados de aceleração e deslocamentos na passarela através do ANSYS.

## 4 RESULTADOS

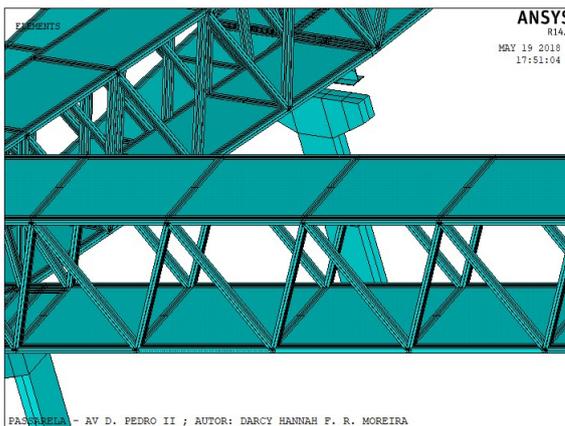
### 4.1 ATUALIZAÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL

A atualização do modelo computacional será composta por duas etapas: o refinamento do modelo, com aumento do nível de detalhamento da área estudada, e a calibração do coeficiente de mola que compõe o aparelho de apoio entre o vão e os pilares da passarela.

Com o modelo elaborado pela autora em etapa anterior a este trabalho, optou-se por realizar o refinamento do vão central, pois é neste que serão realizadas as análises modal e transiente.

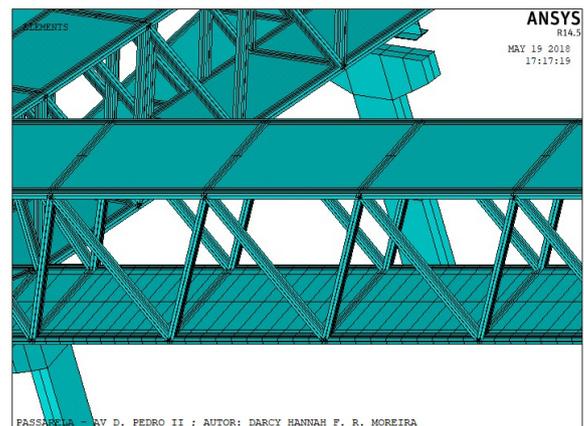
O tabuleiro central era composto de placas delimitadas conforme dimensão real da estrutura, como mostrado na Figura 30. Dessa forma, como não havia um número de subdivisões que pudesse trazer resultados precisos, optou-se pela subdivisão de cada placa de concreto em 20 partes menores, conforme Figura 31. Assim, foram gerados mais nós e, conseqüentemente, aumentou-se o nível de detalhamento da malha que compõe o tabuleiro inferior, que proporcionará resultados mais precisos, conforme método dos elementos finitos.

**Figura 30** - Placas modeladas conforme dimensões reais da passarela.



Fonte: ANSYS 14.5

**Figura 31** - Placas modeladas após o refinamento.



Fonte: ANSYS 14.5

Durante a calibração do modelo, optou-se por modificar o coeficiente de mola ( $k$ ), característica intrínseca ao elemento COMBIN14, conforme descrito anteriormente. Como outras características da estrutura já eram fixas e especificadas no projeto executivo da passarela, como as propriedades geométricas das placas de cobertura e tabuleiro, da parte

treliçada, assim como as propriedades do aço e do concreto, esse coeficiente foi o fator considerado para realizar a calibração. Outra justificativa dessa escolha foi a aproximação considerada para o aparelho de apoio de Neoprene como um elemento de mola, de forma que foram feitas aproximações para seu coeficiente.

Assim, foi-se modificando o valor do coeficiente de mola translacional na direção vertical pelo método da tentativa e erro até que a estrutura apresentasse uma melhor correlação entre as frequências naturais verticais, que eram extraídas pelo ANSYS, e as obtidas em testes experimentais anteriores. Notou-se que a frequência natural na direção lateral já estava correlacionada com a experimental, o que justifica a escolha da alteração do coeficiente de mola apenas na direção vertical, de forma a não alterar a frequência na direção já ajustada.

Iniciou-se o método de tentativas e erros pelo valor de  $10^{10}$  N/m para o coeficiente de mola. Como os resultados foram muito superiores aos experimentais, decidiu-se diminuir esse valor, de forma a reduzir a rigidez e permitir mais mobilidade ao tabuleiro, o que diminui os valores das frequências. O valor encontrado para o coeficiente de mola que tornaram as frequências mais próximas durante o processo de calibração foi de  $4,4 \times 10^7$  N/m. Os valores encontrados estão apresentados na Tabela 23.

**Tabela 23** - Valores encontrados para as frequências naturais da passarela pelo método de tentativas e erros, variando o coeficiente de mola (k)

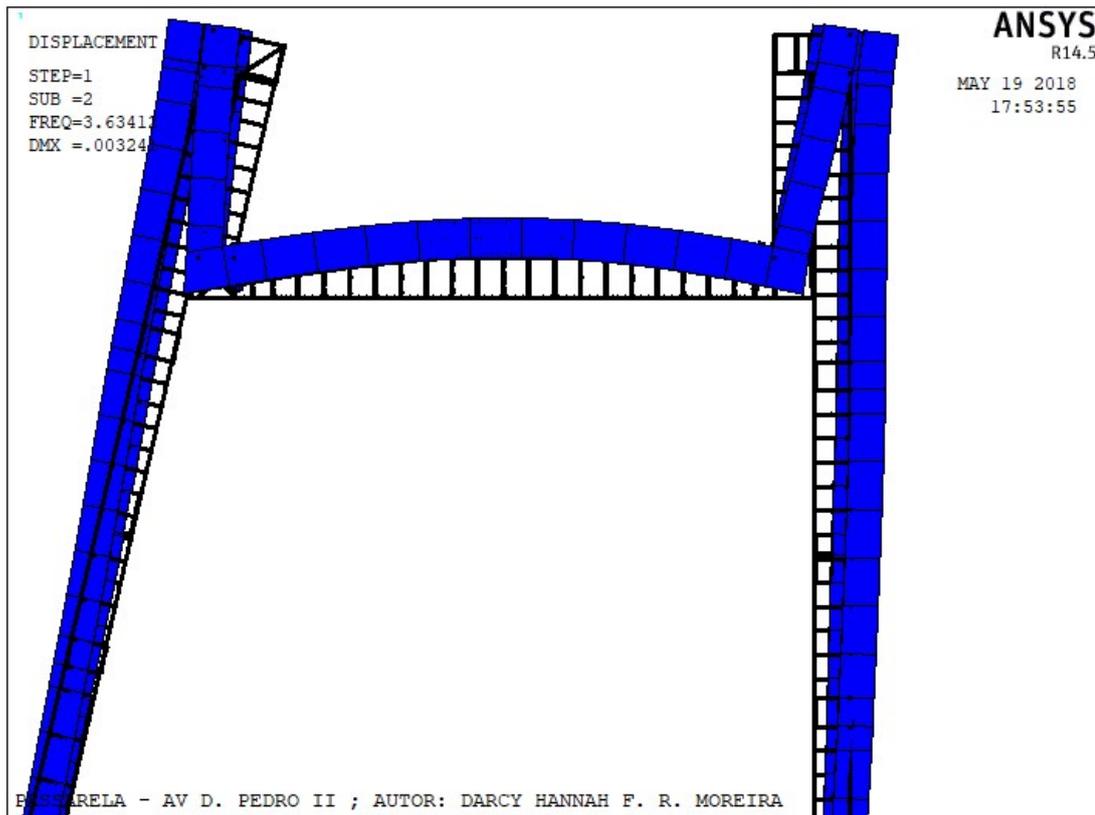
Modo de vibração	Frequência natural numérica – ANSYS (Hz)						Frequência natural experimental (Hz)
	k(N/m) = $10^{10}$	k(N/m) = $10^6$	k(N/m) = $10^8$	k(N/m) = $10^7$	k(N/m) = $5 \times 10^7$	k(N/m) = $4,4 \times 10^7$	
<b>Primeiro modo de vibração lateral</b>	3,691	3,753	3,667	3,471	3,639	3,634	<b>3,69</b>
<b>Primeiro modo de vibração vertical</b>	7,851	4,742	6,591	5,997	5,900	5,772	<b>5,77</b>
<b>Segundo modo de vibração vertical</b>	19,44	8,959	14,784	12,03	13,495	13,39	<b>13,76</b>

## 4.2 A ANÁLISE MODAL

Nesta etapa, foram extraídos o primeiro modo de vibração lateral e os dois primeiros modos de vibração vertical, após os refinamentos no modelo e sua calibração.

A partir da configuração deformada do modelo (Figura 32), obtida durante o processamento do segundo modo de vibração numérico (*sub 2*) fornecida pelo *software*, é possível observar que o vão central da passarela sofre um deslocamento lateral na direção transversal, enquanto as rampas laterais apenas acompanham o deslocamento do vão. Dessa forma, pode-se concluir que este modo numérico fornecido pelo modelo corresponde ao primeiro modo lateral puro de vibração identificado experimentalmente e possui frequência de 3,63 Hz.

**Figura 32** - Configuração deformada da passarela correspondente ao primeiro modo de vibração lateral, em vista superior da passarela.

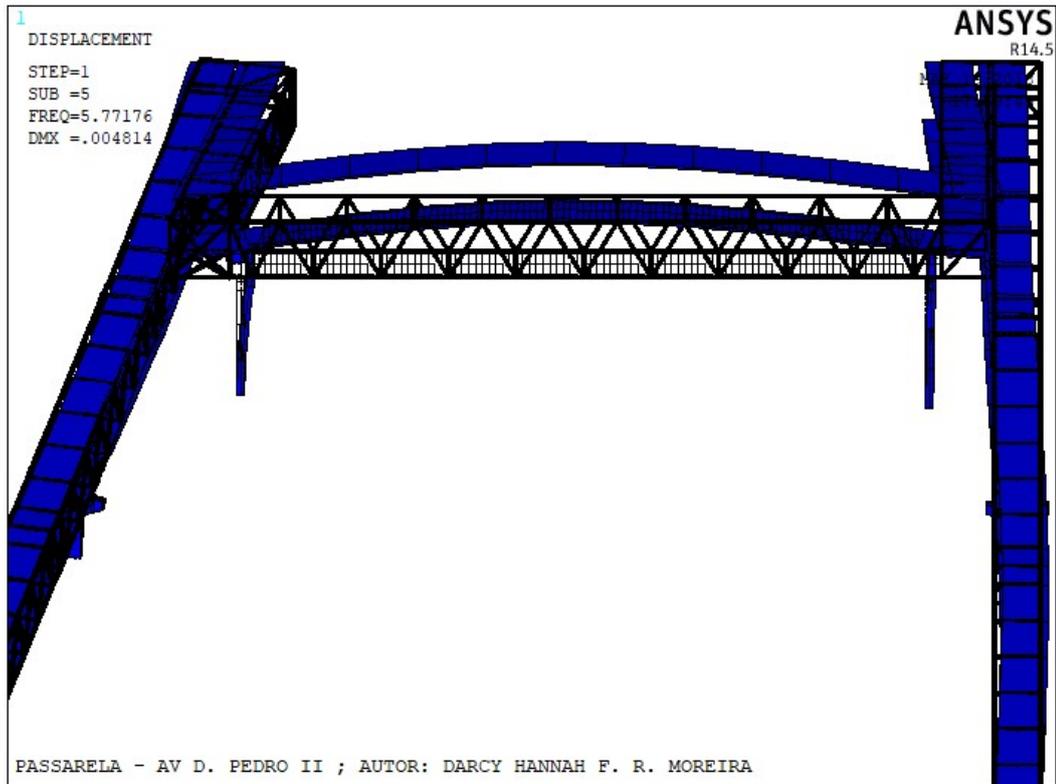


Fonte: ANSYS 14.5

Já a configuração deformada apresentada no quinto modo (*sub 5*) do modelo (Figura 33) foi a primeira a apresentar elevada mobilização vertical apenas do vão central, sem torção nas rampas laterais, o que reflete a correspondência ao primeiro modo de vibração vertical

medido experimentalmente. Para este modo, a frequência natural obtida no modelo numérico coincidiu com a medida experimentalmente de 5,77 Hz.

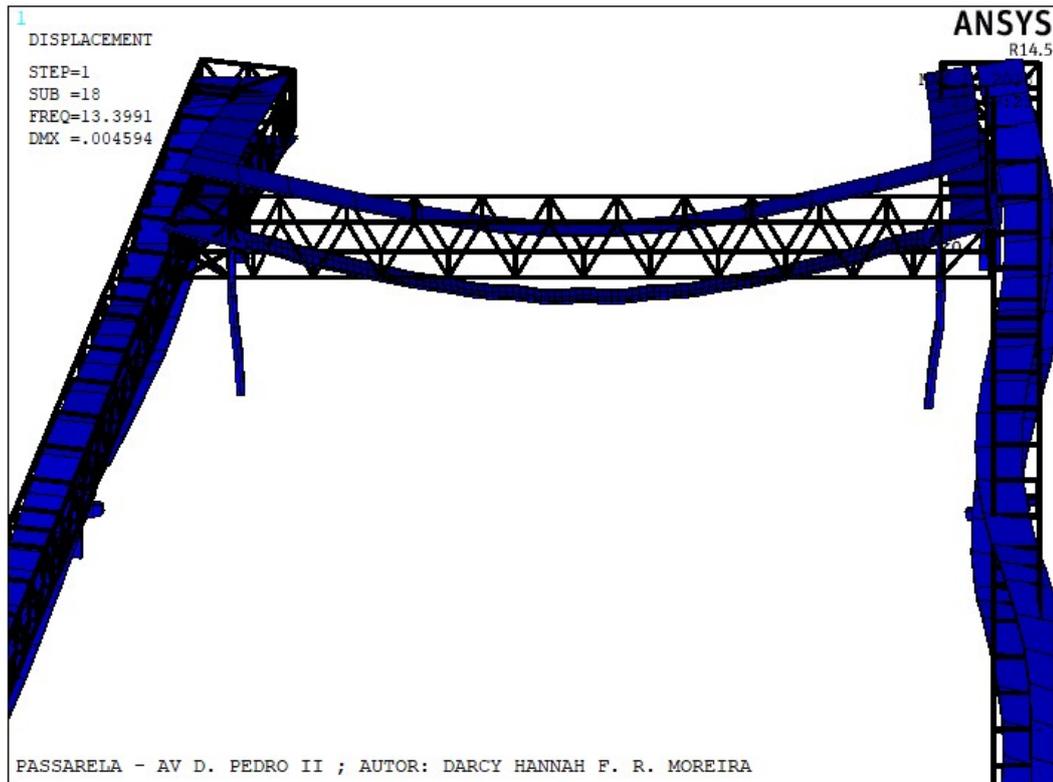
**Figura 33** - Configuração deformada da passarela correspondente ao primeiro modo de vibração vertical, em vista frontal-superior.



Fonte: ANSYS 14.5

A segunda mobilização vertical do vão central ocorreu durante o processamento do décimo modo de vibração do modelo numérico (*sub 10*), que possuiu configuração deformada conforme Figura 34. Além da mobilização do vão central na direção vertical houve também presença de torção nas rampas laterais, conforme observado nos testes experimentais anteriores da passarela, confirmando que este corresponde ao segundo modo de vibração vertical da estrutura, com frequência de 13,39 Hz.

**Figura 34** - Configuração deformada da passarela correspondente ao segundo modo de vibração vertical, em vista frontal-superior.



Fonte: ANSYS 14.5

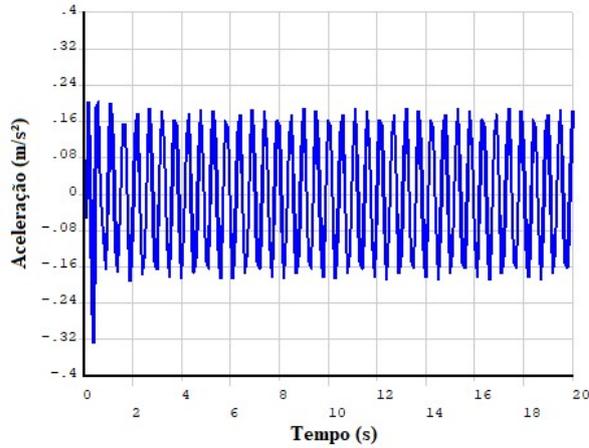
### 4.3 A ANÁLISE TRANSIENTE

Para obter os resultados quanto aos valores máximos de deslocamento e acelerações na estrutura, adotou-se um intervalo de tempo para a integração das equações de movimento igual a  $10^{-3}$  segundos ( $\Delta t = 0,001$  segundos). Este valor corresponderá ao passo de tempo adotado no método de integração de *Newmark* aplicado pelo *software* para a resolução das equações de movimento.

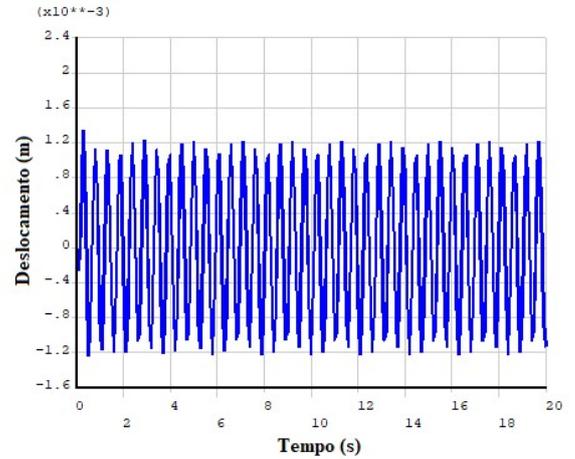
#### 4.3.1 Cenário de carregamento 1

Para o primeiro cenário de carregamento, utilizando as funções propostas pelo Guia Sétra (2006) para cada direção individualmente, foram obtidos no ANSYS 14.5 as seguintes respostas de acelerações (Figuras 35, 37 e 39) e deslocamentos (Figuras 36, 38 e 40) referentes ao nó central da passarela para as direções vertical, horizontal-longitudinal e horizontal-transversal, respectivamente.

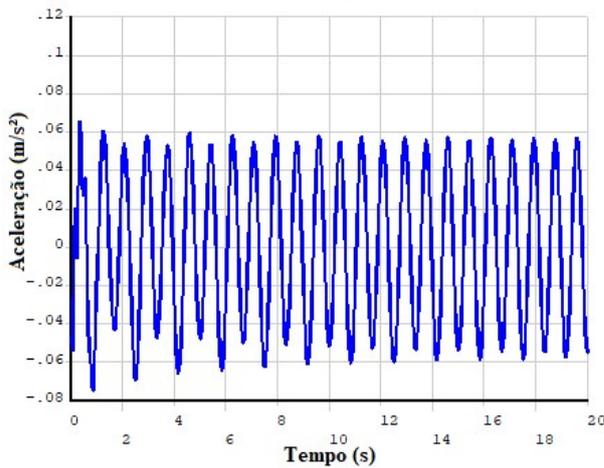
**Figura 35** - Respostas de acelerações obtidas na direção vertical no nó central referentes ao cenário 1 de carregamento



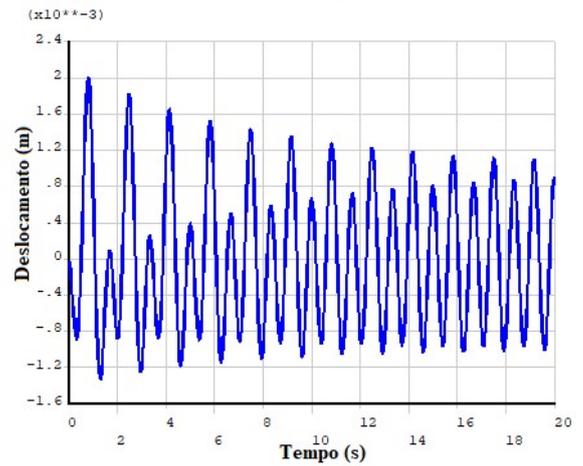
**Figura 36** - Respostas de deslocamentos obtidas na direção vertical no nó central referentes ao cenário 1 de carregamento



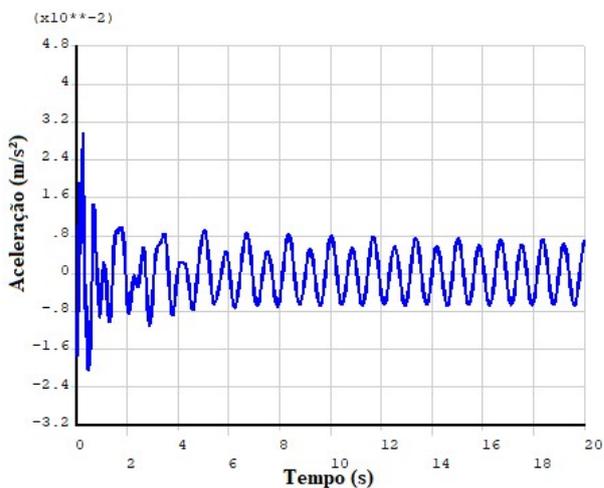
**Figura 37** - Respostas de acelerações obtidas na direção horizontal-longitudinal no nó central referentes ao cenário 1 de carregamento



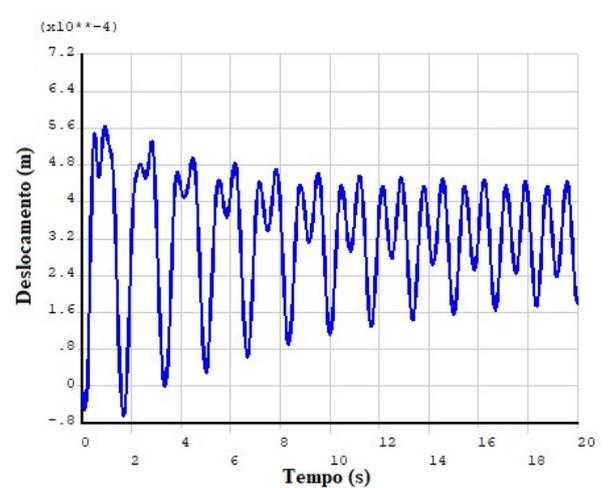
**Figura 38** - Respostas de deslocamentos obtidas na direção horizontal-longitudinal no nó central referentes ao cenário 1 de carregamento



**Figura 39** - Respostas de acelerações obtidas na direção horizontal-transversal no nó central referentes ao cenário 1 de carregamento

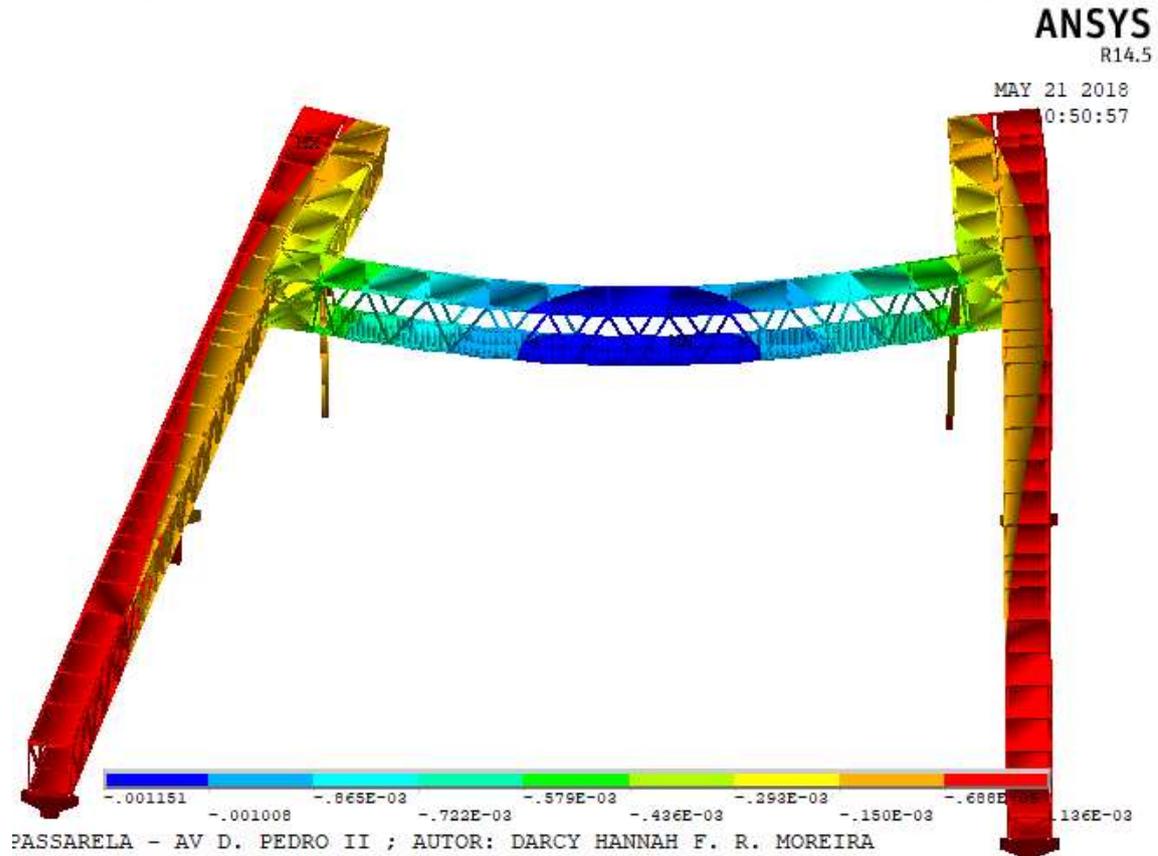


**Figura 40** - Respostas de deslocamentos obtidas na direção horizontal-transversal no nó central referentes ao cenário 1 de carregamento



Pôde-se gerar também a configuração deformada da estrutura, de forma a visualizar os nós que mais sofreram deslocamentos (destacados em azul escuro) durante a aplicação do carregamento, ilustrados da Figura 41. É importante ressaltar que a configuração encontra-se fora de escala, de modo a melhor visualização dos resultados de deslocamento, visto que são muito pequenos quando comparados as dimensões da estrutura (da ordem de  $10^{-3}$  metros).

**Figura 41** – Configuração deformada da estrutura referente ao cenário 1 de carregamento

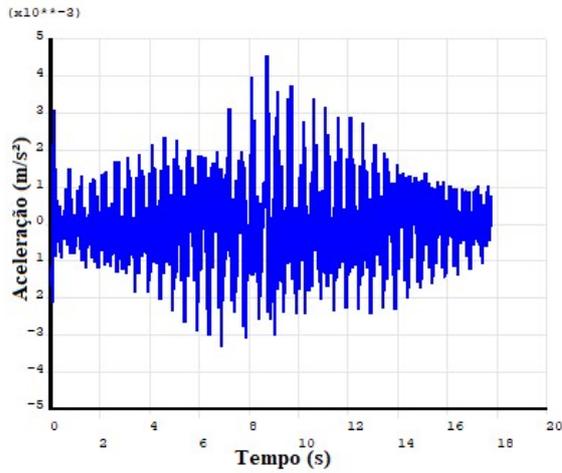


Fonte: ANSYS 14.5

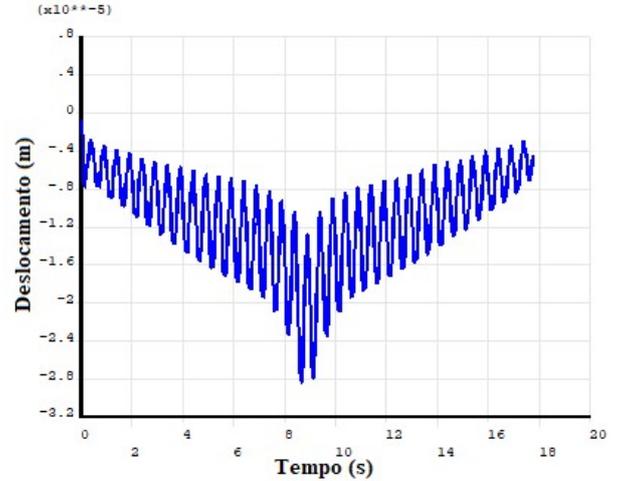
#### 4.3.2 Cenário de carregamento 2

Para o segundo cenário de carregamento, simulando o caminhar de 1 pedestre, conforme metodologia proposta pela ISO 10347 (2007), as respostas de aceleração (Figuras 42, 44 e 46) e deslocamentos (Figuras 43, 45 e 47) encontradas no ANSYS 14.5 foram extraídos do nó central da passarela, sendo o mais vulnerável por estar no meio do vão.

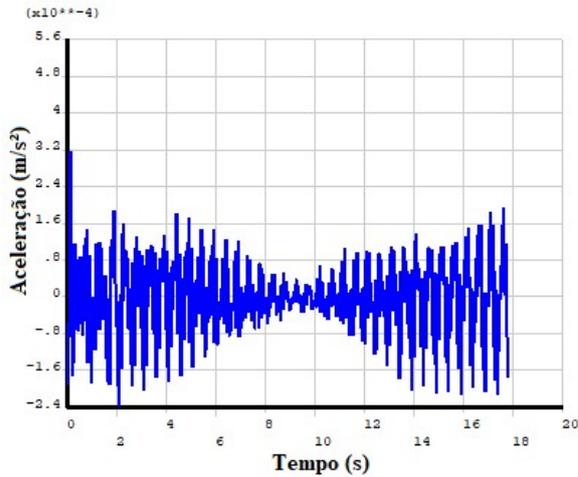
**Figura 42** – Respostas de acelerações obtidas na direção vertical no nó central referentes ao cenário 2 de carregamento



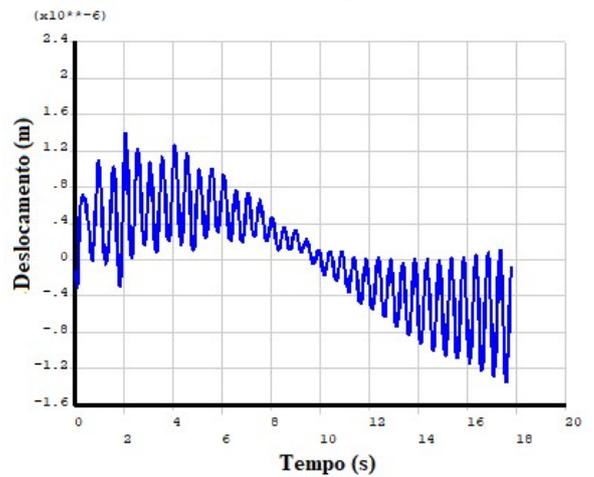
**Figura 43** - Respostas de deslocamentos obtidas na direção vertical no nó central referentes ao cenário 2 de carregamento



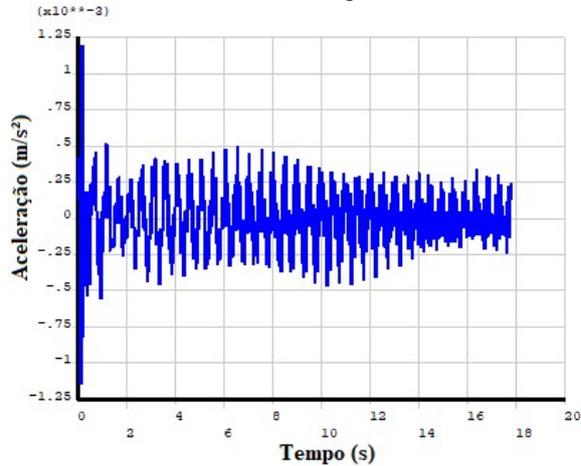
**Figura 44** - Respostas de acelerações obtidas na direção horizontal-longitudinal no nó central referentes ao cenário 2 de carregamento



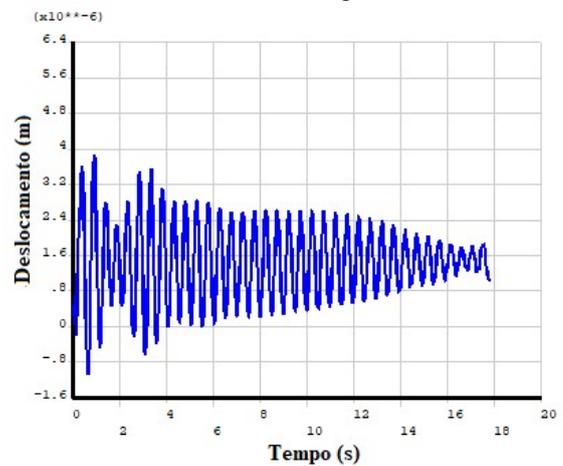
**Figura 45** - Respostas de deslocamentos obtidas na direção horizontal-longitudinal no nó central referentes ao cenário 2 de carregamento



**Figura 46** - Respostas de acelerações obtidas na direção horizontal-transversal obtidas no nó central referentes ao cenário 2 de carregamento



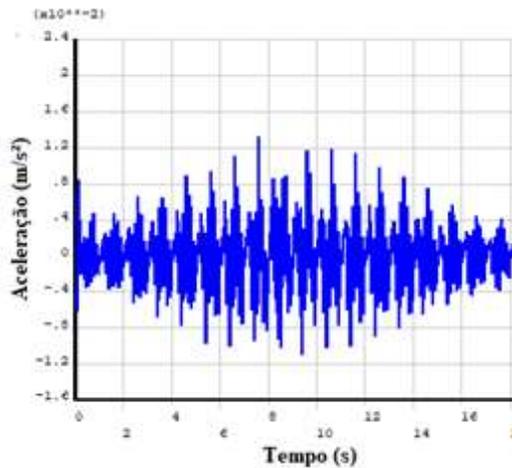
**Figura 47** - Respostas de deslocamentos obtidas na direção horizontal-longitudinal obtidas no nó central referentes ao cenário 2 de carregamento



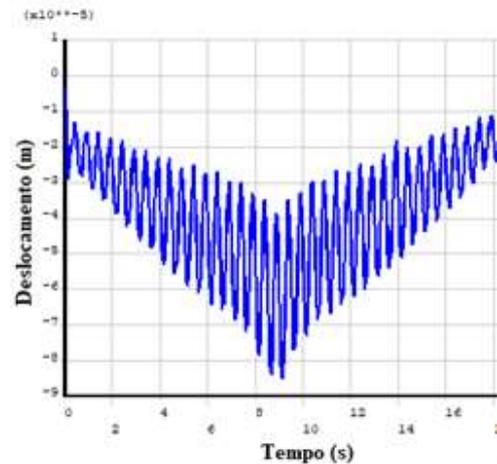
### 4.3.3 Cenário de carregamento 3

Para o terceiro cenário de carregamento, admitindo o caminhar de 3 pedestres movendo-se lado a lado ao longo do vão, as respostas de aceleração (Figuras 48, 50 e 52) e deslocamentos (Figuras 49, 51 e 53) são referentes ao nó central da passarela para as direções vertical, lateral longitudinal e lateral-transversal.

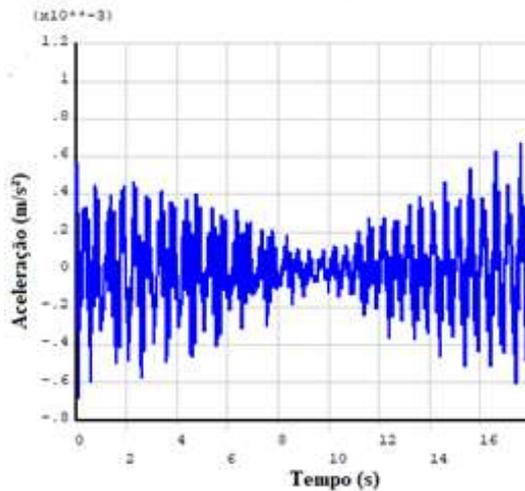
**Figura 48** - Respostas de acelerações obtidas na direção vertical no nó central referentes ao cenário 3 de carregamento



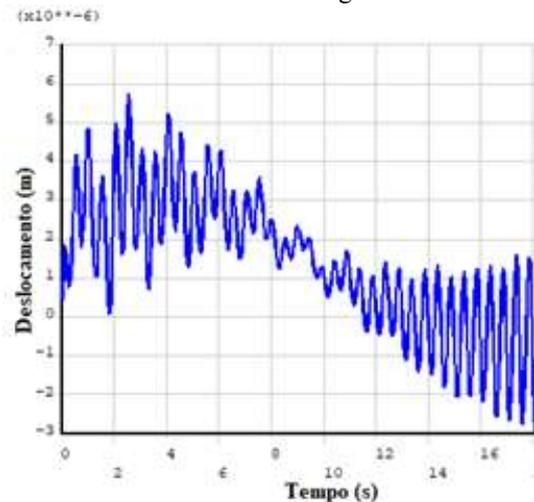
**Figura 49** - Respostas de deslocamentos obtidas na direção vertical no nó central referentes ao cenário 3 de carregamento



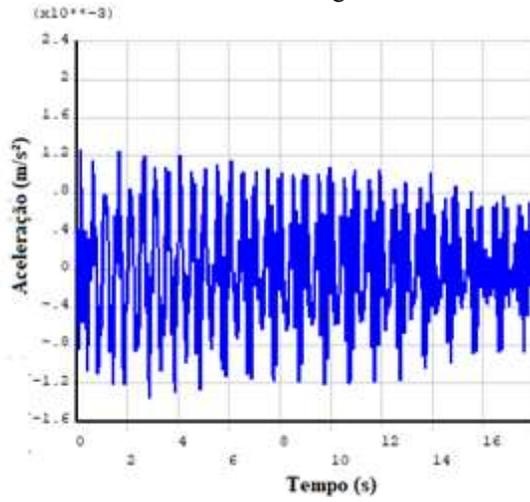
**Figura 50** - Respostas de acelerações obtidas na direção horizontal-longitudinal no nó central referentes ao cenário 3 de carregamento



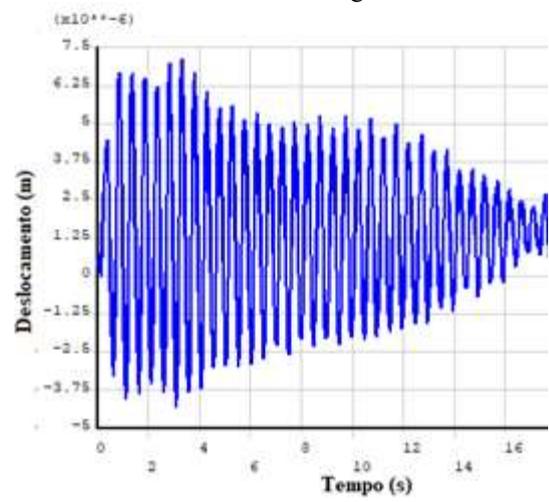
**Figura 51** - Respostas de deslocamentos obtidas na direção horizontal-longitudinal no nó central referentes ao cenário 3 de carregamento



**Figura 52** - Respostas de acelerações obtidas na direção horizontal-transversal no nó central referentes ao cenário 3 de carregamento



**Figura 53** - Respostas de deslocamentos obtidas na direção horizontal-transversal no nó central referentes ao cenário 3 de carregamento



## 5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Com a otimização da modelagem numérica, foi possível identificar que tanto o modelo quanto a calibração foram realizados de forma bastante satisfatória devido à grande aproximação entre os valores dos primeiros modos de frequências naturais lateral e vertical extraídos no *software* com os obtidos experimentalmente em testes com acelerômetros realizados em etapa anterior a este trabalho, conforme resultados apresentados na Tabela 24.

**Tabela 24** - Comparação entre as frequências naturais extraídas do modelo numérico e as obtidas experimentalmente.

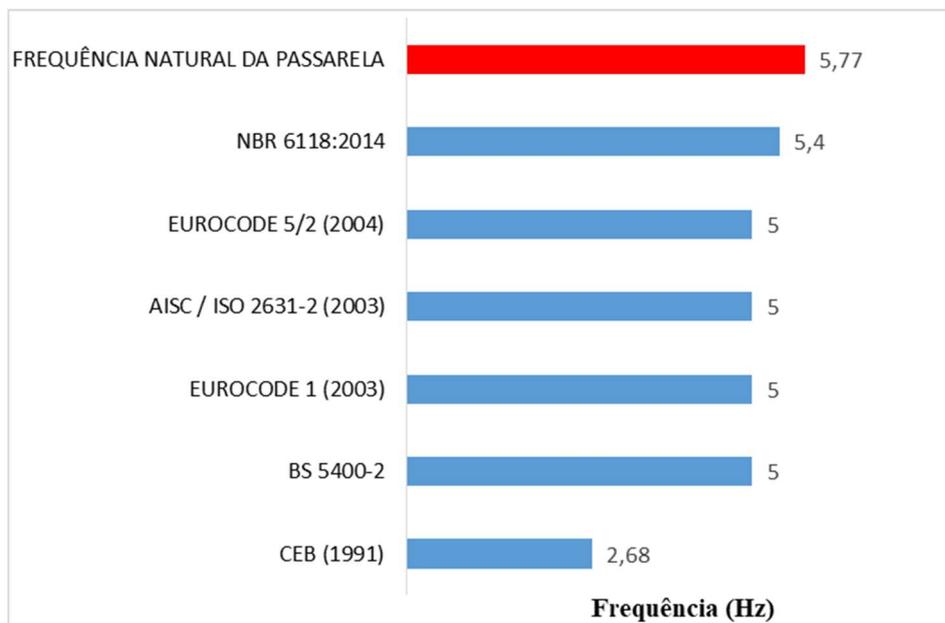
<b>Frequências naturais</b>	<b>Modelo inicial sem calibração (Hz)</b>	<b>Modelo calibrado (Hz)</b>	<b>Experimentais (Hz)</b>
<b>1º Modo lateral</b>	3,69	3,63	3,69
<b>1º Modo vertical</b>	7,85	5,77	5,77
<b>2º Modo Vertical</b>	19,44	13,39	13,76

Antes do ajuste e atualização no modelo, a análise modal numérica forneceu frequências de 3,69 Hz, 7,85 Hz e 18,44 Hz para o primeiro modo de vibração lateral e os dois primeiros modos de vibração vertical, respectivamente. Valores estes mais distantes daqueles medidos experimentalmente, principalmente para o primeiro e segundo modos verticais.

O melhoramento do modelo com relação às propriedades dinâmicas foi possível após o ajuste de alguns fatores preponderantes em sua rigidez, como a constante de mola translacional na direção vertical do elemento utilizado para descrever o aparelho de apoio entre a passarela e o pilar, que teve seu valor final ajustado em  $4,4 \times 10^7$  N/m. Dessa forma, pôde-se aprimorar e compatibilizar o modelo com a estrutura real, no âmbito de vibrações em que a mesma está submetida, aproximando o comportamento do modelo numérico aos dados modais experimentais. Não há expectativa que o modelo represente corretamente todos os modos da estrutura. Logo, foram levados em consideração apenas o primeiro modo de vibração horizontal e os dois primeiros modos de vibração vertical, que são os mais importantes para efeito de análise de comportamento vibratório.

Com relação à etapa da análise modal, os resultados obtidos mostram que a passarela atende aos critérios relativos à frequência natural mínima na direção vertical, conforme Figura 54. Na direção horizontal, a passarela apresentou frequência no primeiro modo de vibração de 3,63 Hz, também superior ao mínimo estabelecido na EUROCODE 1 (2005) e EUROCODE 5/2(2004) de 2,5 Hz. Dentre as normas analisadas, essas foram as únicas que mencionaram valores para a frequência horizontal.

**Figura 54** - Comparação entre os limites de serviço e as frequências naturais de excitação vertical da estrutura



Com relação à etapa da análise transiente, os resultados mais significativos de acelerações ocorreram no cenário de carregamento 1, quando a estrutura foi submetida à carga de multidão, apresentando aceleração máxima na direção vertical de 0,327 m/s<sup>2</sup>. Além disso, é possível verificar que a passarela apresentou níveis mais elevados de aceleração para a direção vertical, conforme resultados da Tabela 25, o que reflete que as vibrações mais perceptíveis estão presentes nessa direção.

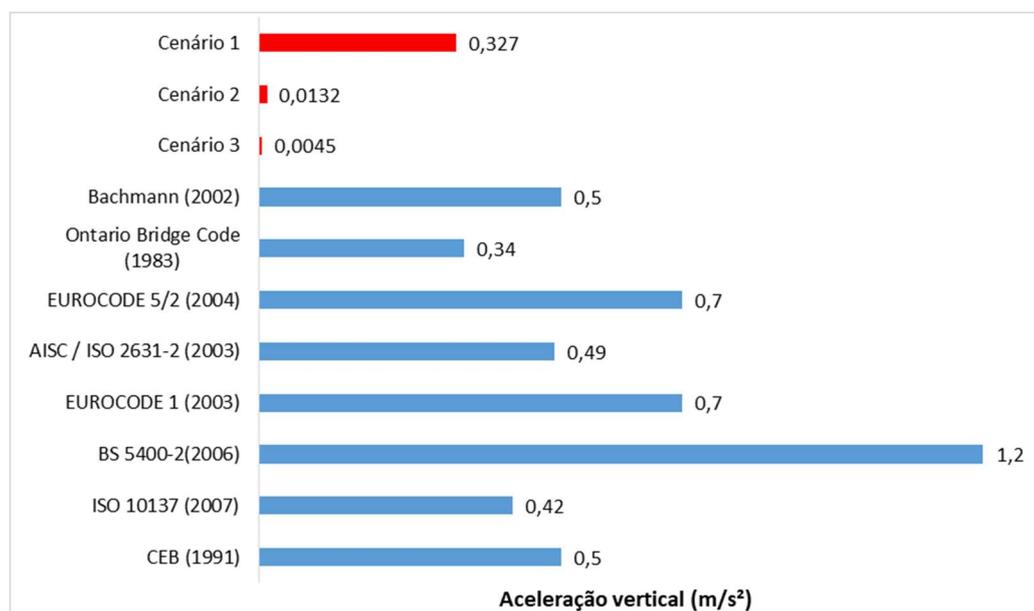
De acordo com as respostas de acelerações obtidas no cenário 1 de carregamento completou-se o estudo analítico proposto pelo guia Sétra (2006), com a determinação do nível de conforto da passarela. Assim, analisando as Tabelas 6 e 7, viu-se que a passarela se enquadrava no nível 1 para as duas direções de carregamento, representando as condições de conforto máximo para o pedestre.

**Tabela 25** - Resultados obtidos para as acelerações e deslocamentos em cada direção considerada referente aos três cenários analisados

Parâmetro	Direção	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
<b>Aceleração máxima (m/s<sup>2</sup>)</b>	Vertical	0,327	$4,5 \cdot 10^{-3}$	$1,32 \cdot 10^{-2}$
	Longitudinal	$7,5 \cdot 10^{-2}$	$3,2 \cdot 10^{-4}$	$6,7 \cdot 10^{-4}$
	Transversal	$2,96 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$1,26 \cdot 10^{-3}$
<b>Deslocamento máximo (mm)</b>	Vertical	1,345	$2,87 \cdot 10^{-2}$	$8,9 \cdot 10^{-2}$
	Longitudinal	2,00	$3,85 \cdot 10^{-3}$	$2,96 \cdot 10^{-3}$
	Transversal	0,56	$1,39 \cdot 10^{-3}$	$4,29 \cdot 10^{-3}$

Comparando os resultados com as normas analisadas e guias de projetos, as acelerações verticais obtidas se enquadraram aos limites estabelecidos em todos os cenários de carregamento. O cenário de carregamento 1 foi o mais expressivo em termos de valores de aceleração, e apesar de se tratar de um cenário pouco provável, visto que a passarela usualmente não apresenta carregamentos de multidão, a aceleração obtida de  $0,327 \text{ m/s}^2$  esteve em consonância com os limites analisados. Da mesma forma, os cenários 2 e 3 não apresentaram acelerações significativas que possam causar desconforto ou comprometa a segurança dos usuários, pois seus valores foram muito inferiores aos limite, conforme Figura 55.

**Figura 55** - Comparação entre os limites de serviço e as acelerações da estrutura obtidas no *software*



## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi abordado o melhoramento do modelo de uma passarela, do ponto de vista dinâmico, e a análise de seu comportamento dinâmico frente à recomendação de diversas normas revisadas. Foi possível mostrar a importância do estudo dinâmico, visto que estão se utilizando cada vez mais estruturas esbeltas e com grandes dimensões, fato que antes era dispensado. Foi realizada também uma revisão dentre as principais normas, guias técnicos e propostas de autores, que se mostraram bastante discrepantes, refletindo que ainda não houve avanço sobre o tema, principalmente a nível nacional (nenhuma norma brasileira possuía uma metodologia de análise dinâmica em passarelas). Além disso, com a revisão bibliográfica pôde-se adquirir o conhecimento necessário para compreender e interpretar os resultados de forma satisfatória.

O modelo da passarela localizada em João Pessoa desenvolvido no *software* ANSYS 14.5 se mostrou bastante representativo e realístico após sua atualização, aproximando os valores de frequências naturais e modos de vibração numéricos (extraídos do programa) às obtidas experimentalmente em testes com acelerômetros. Dessa forma, obteve-se um modelo bastante realístico, representando bem a estrutura real, tornando possível a sua utilização para realização de investigação futura, como por exemplo avaliar quais elementos da estrutura contribuem efetivamente para deixá-la mais robusta do ponto de vista de apresentar baixo nível de vibração.

Com a obtenção dos parâmetros modais, modos de vibração e respostas de aceleração e deslocamento durante a análise dinâmica, a passarela estudada mostrou ter um funcionamento satisfatório quanto ao conforto e segurança dos usuários. Os baixos níveis de vibração e aceleração apresentados atenderam aos critérios estabelecidos nas normas avaliadas, mesmo quando submetidas a situações extremas e pouco prováveis, como o carregamento simulando multidão, através do cenário 1. Foram encontrados resultados bastante elevados para as frequências naturais, tanto na direção vertical (5,77 Hz) quanto na horizontal (3,63 Hz), superiores aos valores críticos de perigo de ressonância, que correspondem aos valores abaixo de 5 Hz para a direção vertical e 2,5 Hz para a direção horizontal, conforme sugerido na literatura. Este fato corrobora sua rigidez, por se tratar de uma estrutura pesada, devido a composição de seus materiais, como a cobertura composta de concreto, que a torna robusta, apresentando conforto e segurança para os usuários.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BACHMANN, H. & AMMANN, W. (1987). *Vibrations is structures induced by man and machines*. IABSE Structural Engineering Document 3E, International Association for Bridges and Structural Engineering.

BACHMANN, H. (2002). *Lively Footbridges – a Real Challenge*. Footbridge 2002 – Design and Dynamic Behavior of Footbridges. Paris.

BALTAR, A. C. U. C. V. (2000). **Vibrações induzidas por atividades humanas em passarelas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Brasília, Brasília.

BARROS, T.P. (2009). **Análise Dinâmica em passarela sujeita à movimentação humana**. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

BLANCHARD, J.; DAVIES, B.; SMITH, J. (1997). *Design criteria and analysis for dynamic loading of footbridges*. 1997. Proceedings of the DOE and DOT TRRL Symposium on Dynamic Behavior of Bridges, Crowthorne, UK, pp. 90-106.

BLANCO M.C., BOUILLARD PH., BODARWÉ E., NEY L. (2005). *Structural Dynamic Design of a Footbridge under Pedestrian Loading*. 9º SAMTECH Users Conference.

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

BROWNJOHN, J.; FOK, P.; ROCHIE, M.; OMENZETTER, P. (2004). *Long Span Steel Pedestrian Bridge at Singapore Change Airport – Part 1: Prediction of Vibration Serviceability Problems*. *The Structural Engineer*.

BS5400, B. S. I. (1980) *Part 10-Code of practice for Fatigue*. British Standards Institution.

CASTRO, L. A. (1997). **Análise da segurança no projeto de estrutura: Método dos estados limites**. 1997. Universidade Federal de São Carlos. São Paulo, p. 134.

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

CLOUGH, R. W., & PENZIEN, J. (2003). *Dynamics of structures*. *Civil Engineering* (p. 752).

DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. (2005). **Manual rodoviário de conservação, monitoramento e controle ambientais**. 2. ed. Rio de Janeiro.

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

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

FERNANDES, H. (2007). **Comportamento dinâmico de passarelas modeladas como vigas sujeitas a vibrações na direção vertical induzidas por pedestres**. Tese submetida ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa–PB.

ISO 2631–2. 2003. *Mechanical vibration and shock-Evaluation of human exposure to whole-body vibration-Part 2: Vibration in buildings (1 to 80 Hz)*.

ISO 10137. (2007). *Bases for Design of Structures – Serviceability of buildings and walkways against vibrations*.

GONILHA, J.A., CORREIA, J.R. e BRANCO, F.A. (2013). *Dynamic response under pedestrian load of a GFRP-SFRSCC hybrid footbridge prototype: Experimental tests and numerical simulation*. In: *Journal of Composite Structures*.

GOOGLE MAPS. (2018) **Mapa da passarela na Avenida D. Pedro II**. Disponível em: <<https://www.google.com.br/maps/@-7.1350009,-34.8566252,77a,20y,242.12h,65.04t/data=!3m1!1e3>> Acesso em Maio/2018

GRANDIC, I.S. (2015). *Serviceability verification of pedestrian bridges under pedestrian loading*. In: *Tehnicki Vjesnik*, 22,2:527-537.

MENDES, Joesley Pereira. (2014). **Análise dinâmica e controle de vibrações de passarelas de pedestres submetidas ao caminhar humano**. Dissertação (Mestrado). Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.

MENDES, Paulo. (2012). **Dinâmica das Estruturas**. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa – Área Departamental de Engenharia Civil.

MURRAY, T. M., ALLEN, D. E., & UNGAR, E. E. (2003). *Design Guide 11, Floor Vibrations Due to Human Activities*. American Institute of Steel Construction (AISC).

NAKAMURA, S. (2003). *Field Measurements of Lateral Vibration on a Pedestrian Suspension Bridge*. 2003. *The Structural Engineer*, 81 (22), p. 22-26.

NBR, ABNT. 7188 (2013). **Carga móvel rodoviária e de pedestres em pontes, viadutos, passarelas e outras estruturas**. Rio de Janeiro.

NBR, ABNT. 8800 (2008). **Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios**. Rio de Janeiro.

NBR, ABNT. 6118 (2014). **Projeto de Estruturas de Concreto - Procedimento**. Rio de Janeiro.

OHBD, ONTARIO HIGHWAY BRIDGE. (1983). *Design Code (1991) and Commentary, Ministry of Transportation and Communication, Highway Engineering Division*. Toronto.

PEÑA, Williams Dias Lozada. (2015). **Modelagem do caminhar humano e avaliação do conforto humano de passarelas de pedestres**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, PGECIV, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ, Rio de Janeiro/RJ, Brasil.

PEREIRA, Samara Pimentel. (2017). **Desempenho dinâmico de sistemas estruturais de passarelas**. Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

PERNICA, G. (1990). *Dynamic Load Factors for Pedestrian Movements and Rhythmic Exercises*. 1990. *Canadian Acoustics*, pp. 18, 2, 3-18

PIMENTEL, R. L. (1997). *Vibrational Performance of Pedestrian Bridges Due to Human-Induced Loads*. PhD Thesis, University of Sheffield, UK.

SANTOS, Clarissa Maciel. (2011). **Avaliação do Comportamento Dinâmico de uma Passarela Submetida a Carregamentos Induzidos por Pedestres**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

SEILER, C.; Occhiuzzi, A.; SPIZZUOCO, M.; Serino, G. (2003). *Dynamical Stress Analysis Due to Moving Loads on Footbridges*. XXXII Convegno Nazionale dell'Associazione Ite Sollecitazioni, Salerno, Set.

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

SYNPEX. (2006). *Advanced Load Model for Synchronous Pedestrian Excitation of Footbridges*. Design Guidelines and Recommendations, 2nd Draft.

MATSUMOTO, Y.; SATO, S.; NISHIOKA, T.; SHIOJIRI, H. (1972). *A study on design of pedestrian over-bridges*. Transactions of JSCE 4 , p. 50–51.

WHEELER, J. E. (1982). *Prediction and Control of Pedestrian – Induced Vibration in Footbridges, Proceedings of the ASCE*. In: *Journal of Structural Division*.

YOUNG, P. (2001). *Improved floor vibration prediction methodologies*. In *ARUP vibration seminar* (Vol. 4).

ZIVANOVIC, S.; PAVIC, A.; REYNOLDS, P. (2005). *Dynamic Analysis of Lively Footbridge under Everyday Pedestrian Traffic*. *EURODYN 2005: The Sixth European Conference on Structural Dynamics, Paris*.

DANG, H.V. e ZIVANOVIC, S. 2015. *Experimental characterization of walking locomotion on rigid level surfaces using motion capture system*. *Engineering Structures*, Vol. 91.

ZÚÑIGA, Eduardo Villarroel. (2011). **Análise da resposta dinâmica experimental de uma passarela tubular mista, aço-concreto, submetida ao caminhar humano**. Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.