

MONITORAÇÃO EXPERIMENTAL E MODELAGEM NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DE PASSARELAS DE PEDESTRES

EXPERIMENTAL MONITORING AND NUMERICAL MODELLING OF THE DYNAMIC BEHAVIOUR OF PEDESTRIAN FOOTBRIDGES

DEBONA, Gilvan Lunz

Doutor, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
gilvanld@ufrj.br

SILVA, José Guilherme Santos da

Doutor, Universidade do Estado do Rio de Janeiro
jgss@uerj.br

RESUMO

Este trabalho de pesquisa objetiva a monitoração experimental e modelagem numérica acerca da resposta estrutural dinâmica de passarelas de pedestres. Para tal, o modelo estrutural investigado corresponde a uma passarela de pedestres de concreto armado, simplesmente apoiada, com vão de 24,4 m. A análise modal da estrutura foi realizada por monitoramento dinâmico através de acelerômetros instalados sobre a passarela, bem como por um dispositivo de vibrometria a laser, utilizando as técnicas de aquisição SIMO e SISO, respectivamente; e, também, a partir da utilização de outro sistema para a medição de vibrações (Shaker). Em seguida, testes de vibração forçada foram realizados, com base na aquisição e avaliação das ações dinâmicas provenientes dos pedestres caminhando sobre a passarela, considerando-se diferentes frequências de passo. Além disso, um modelo numérico foi desenvolvido e calibrado, incorporando o efeito da interação dinâmica pedestre-estrutura. Finalmente, uma análise de conforto humano foi realizada sobre a passarela, mediante o emprego de recomendações e critérios de projeto descritos nos guias HIVOSS, SÉTRA e AISC.

Palavras-chave: Monitoração experimental dinâmica. Interação dinâmica pedestre-passarela. Vibrações em Passarela.

ABSTRACT

This research aims to perform an experimental and numerical assessment of the dynamic structural behaviour of pedestrian footbridges. Thus, the investigated structural model is related to a pedestrian footbridge located in the campus of the State University of Rio de Janeiro (UERJ), Rio de Janeiro/RJ, Brazil. The structural system is based on a simply supported internal reinforced concrete footbridge spanning 24.5m. The modal testing of the structure was performed by dynamic monitoring through accelerometers installed on the structure as well as by a vibrometer device based on Laser Doppler Vibrometry using the SIMO and SISO acquisition techniques, respectively; and, after that, considering another modal vibration test system (Shaker). Afterwards, forced vibration tests were performed on the structure based on the evaluation of the pedestrian's dynamic actions walking on the footbridge considering different step frequencies. In addition, a numerical model was

developed and calibrated, incorporating the effect of pedestrian-structure dynamic interaction, based on the use of biodynamic models representative of the pedestrians. Finally, a human comfort analysis was performed on the footbridge, using the recommendations and design criteria described in the HIVOSS, STRATRA and AISC guidelines.

Keywords: Pedestrian footbridges. Biodynamic models. Dynamic analysis. Human comfort.

1. INTRODUÇÃO

A análise do comportamento dinâmico de passarelas de pedestres por parte dos engenheiros civis não é uma prática regular nos escritórios de projeto de engenharia, especialmente no que diz respeito ao atendimento dos estados limite de utilização em estruturas, entretanto vários autores tem se dedicado a novas pesquisas no âmbito da questão do conforto humano em estruturas de passarela de pedestres, tais como Debona (2016), Cunha e Caetano (2006), Živanović et al. (2006) e Nimmena et al., (2014), pois tem-se notado que estas estruturas estão sendo construídas com frequências naturais na mesma faixa de frequência do caminhar humano e de seus harmônicos superiores, ocasionando facilmente um nível de frequência ressonante ao caminhar dos seres humanos e aumentando o desconforto dos pedestres. Contudo, estes modelos estruturais devem apresentar um comportamento dinâmico apropriado, livres dos riscos inerentes à presença de vibrações excessivas ou de desconforto humano.

Baseado neste conceito, algumas metodologias de projeto e critérios de conforto humano em fase de projeto foram desenvolvidas na última década como AISC (Murray et al., 2016), SÉTRA (2006) e HIVOSS (2008), entretanto ainda há uma falta de atenção em relação à avaliação e a validação experimental das características dinâmicas das estruturas (Nimmena et al., 2014). Considerando que cada passarela construída é única (Živanović et al., 2006), algumas inevitáveis incertezas são difíceis de estimar na fase de projeto, que estão diretamente relacionadas com as frequências naturais e as propriedades de amortecimento da estrutura. Portanto, a identificação modal experimental deve ser aplicada a fim de se obter uma avaliação do conforto humano mais confiável, bem como para atualizar as suas propriedades sempre que necessário (Nimmena et al., 2014).

Deste modo, o objetivo deste trabalho diz respeito à monitoração experimental e modelagem numérica da resposta estrutural dinâmica de passarelas de pedestres, com base na consideração do efeito da interação dinâmica pedestre-estrutura. Para tal, o modelo estrutural

investigado neste trabalho de pesquisa é associado a uma passarela de pedestres existente, com 24,4 metros de comprimento em concreto armado, construída nos anos setenta e localizada no campus da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Rio de Janeiro/RJ, Brasil.

Neste trabalho de pesquisa, procede-se a análise modal experimental dinâmica da estrutura, mediante o emprego de duas estratégias de monitoração: SIMO (Single Input Multiple Output) e SISO (Single Input Single Output). Deste modo, foram utilizados acelerômetros instalados sobre a passarela, com base no uso de um dispositivo para aquisição de dados, via vibrometria a laser (PDV-100: Portable Digital Vibrometer); e, também, a partir da utilização de outro sistema para a medição de vibrações (Shaker).

Após a identificação modal experimental, testes de vibração forçada foram realizados, com base aquisição e avaliação das ações dinâmicas provenientes dos pedestres caminhando sobre a passarela, considerando-se diferentes frequências de passo. Além disso, um modelo numérico foi desenvolvido e calibrado, incorporando o efeito da interação dinâmica pedestre-estrutura, com base no emprego de modelos biodinâmicos representativos dos pedestres. Finalmente, uma análise de conforto humano foi realizada sobre a passarela, mediante o emprego de recomendações e critérios de projeto descritos nos guias HIVOSS (2008), SÉTRA (2006) e AISC (Murray et al., 2016).

2. MODELO ESTRUTURAL INVESTIGADO

O modelo estrutural investigado nesta investigação está relacionado com uma passarela de pedestres existente localizado entre os blocos A e B no campus da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Rio de Janeiro/RJ, Brasil. O sistema estrutural é baseado no projeto de uma passarela de concreto armado simplesmente apoiada que mede 24,4 m, constituída por duas vigas invertidas e duas lajes de concreto, formando um sistema em U, com lajes em sanduíche, e que está sendo usada atualmente para a travessia de pedestres, de acordo com as Figs. 1 a 5. A estrutura de concreto armado apresenta uma resistência à compressão (f_{ck}) especificada de 14 MPa, módulo de elasticidade longitudinal secante (E_{cs}) igual a 17,8 GPa, massa específica (ρ_c) de 2500 kg/m³ e coeficiente de Poisson para o concreto (ν_c) igual a 0,2. A massa total da estrutura é de 66.200 kg.

Figura 1: passarela investigada: vista lateral.



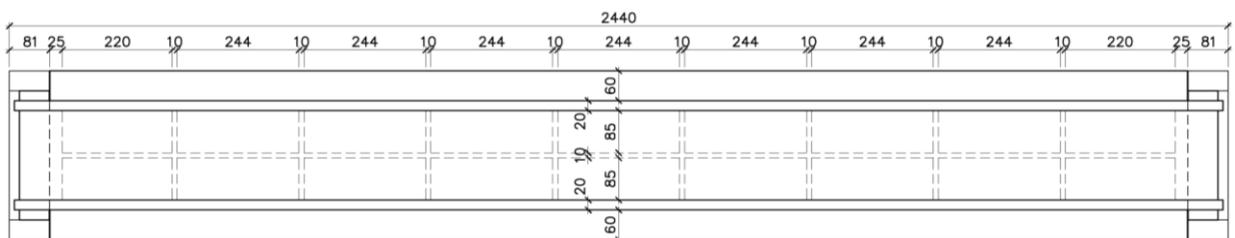
Fonte: Autor, 2019

Figura 2: passarela investigada: vista frontal.



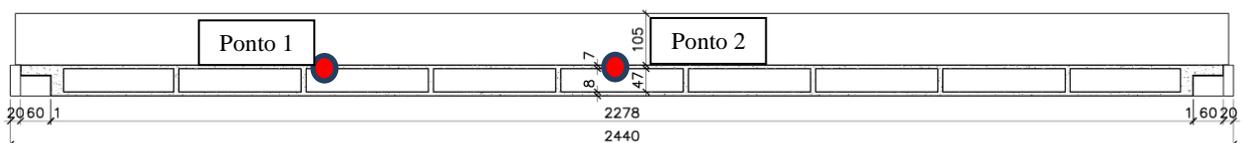
Fonte: Autor, 2019

Figura 3: projeto estrutural: planta baixa [dimensões em (cm)].



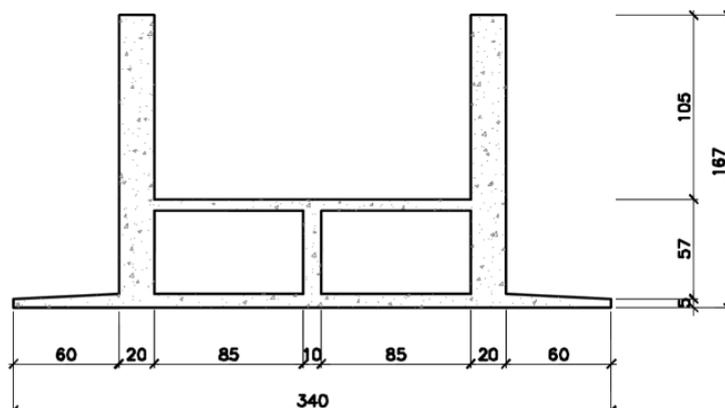
Fonte: Autor, 2019

Figura 4: projeto estrutural: corte longitudinal típico [dimensões em (cm)].



Fonte: Autor, 2019

Figura 5: projeto estrutural: corte transversal típico [dimensões em (cm)].

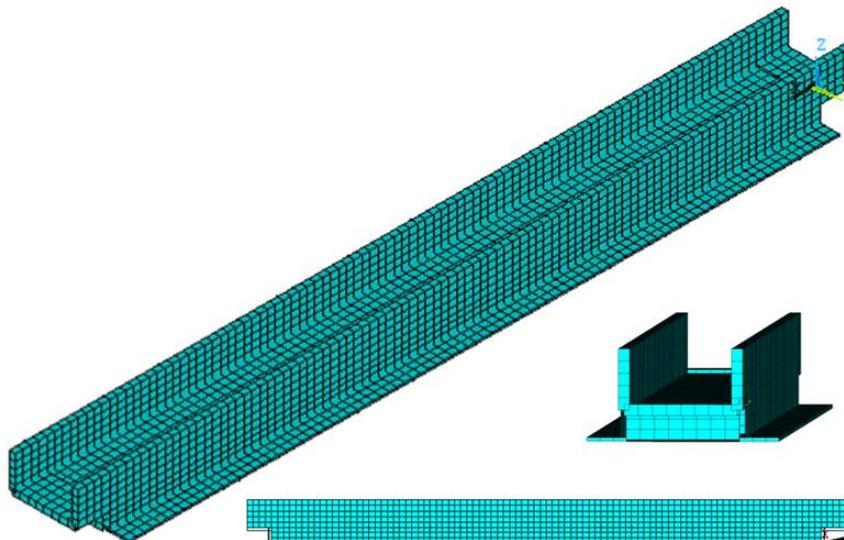


Fonte: Autor, 2019

3. MODELO EM ELEMENTOS FINITOS

No modelo numérico desenvolvido neste estudo são empregadas técnicas usuais de discretização, via utilização do Método dos Elementos Finitos (MEF), por meio do emprego do programa computacional ANSYS (ANSYS, 2010). Neste modelo numérico-computacional, todas as seções de concreto armado foram simuladas por meio de elementos finitos de casca SHELL63 (ANSYS, 2010), gerando um número total de 4101 nós, 4074 elementos finitos SHELL63 (ANSYS, 2010) e 23364 graus de liberdade, conforme ilustrado na Fig. 6. Cabe ressaltar que a presente investigação considera que os materiais (concreto e aço) apresentam um comportamento tipicamente linear elástico.

Figura 6: passarela investigada: vista lateral.



Fonte: Autor, 2019

4. IDENTIFICAÇÃO MODAL EXPERIMENTAL

A análise modal experimental da passarela feita mediante monitoração dinâmica, “in loco”, por meio da instalação de acelerômetros na estrutura ligados a um sistema de aquisição de dados ADS-2002 e por um sistema de vibrometria a laser Polytec PDV-100, com o auxílio de um martelo de impacto Dytran, um sistema especial de vibração (Shaker) e carregamentos de seres humanos. Nesse sentido, foram utilizadas duas técnicas de ensaio comumente empregadas em estruturas civis de médio porte (Brandt, 2011; Cunha e Caetano, 2006): SIMO (Single Input Multiple Output: única entrada e várias saídas) e SISO (Single Input Single Output: uma entrada e uma saída).

Em relação à técnica SIMO, uma força de excitação é aplicada num ponto da estrutura (entrada) e as respostas dinâmicas (saídas) são obtidas simultaneamente em vários pontos da mesma. No que diz respeito à técnica SISO, a força é aplicada e a resposta da estrutura é obtida, individualmente, em cada ponto da estrutura, tanto a partir do deslocamento da força (entrada) quanto do sensor de medição (saída) pela estrutura. Ressalta-se que uma das vantagens da técnica SIMO sobre a SISO está no fato de que é possível realizar um menor número de ensaios, uma vez a resposta dinâmica de vários pontos podem ser obtidas de uma só vez. A partir da medição do sinal de entrada e de saída, podem-se obter as funções de resposta em frequência (FRF) de cada ponto, representando a relação entre o sinal de saída (aceleração) sobre o sinal de entrada (força) de cada ponto da estrutura.

O primeiro ensaio experimental de vibração livre (Ensaio I) foi realizado de tal forma que a estrutura foi excitada através do impacto de uma pessoa de 95 kg pulando sobre o centro da passarela (Ponto 2: ver Fig. 4) a uma altura de 0,5 m. O método utilizado foi o de entrada única e de saída múltipla (SIMO). Os resultados da análise de vibração livre foram obtidos por meio de dois acelerômetros resistivos Kyowa localizados sobre as seções estruturais da passarela denominadas de Pontos 1 e 2 (ver Fig. 4), localizados, respectivamente, a 1/4 e 1/2 do vão, ligados a um sistema de aquisição de dados ADS-2002 fabricado pela empresa LYNX Tecnologia Eletrônica, de acordo com a Fig. 7. Este sistema, através da placa condicionadora e controladora, relaciona o sinal de variação elétrica em valor de engenharia (deformação específica, aceleração e força), controlado por um computador.

Figura 7: Ensaio 1: sistema de aquisição ADS 2002 conectado a acelerômetros.



Fonte: Autor, 2019

Em seguida, foi realizado o segundo teste (Ensaio II), com entrada de dados única e de saída única (SISO) combinando o vibrômetro a laser Polytec PDV-100 a um martelo de impacto Dytran, como mostrado nas Figs. 8 e 9, respectivamente. O funcionamento básico da metodologia de vibrometria a laser está relacionado a um feixe de laser focado sobre a estrutura ensaiada de modo que a velocidade do movimento relativo entre o sistema e o equipamento possa ser medida através do efeito Doppler, ou seja, a partir da variação da frequência assim como do comprimento de onda do feixe de luz incidido e refletido sobre a estrutura. (Prislan, 2008).

Figura 8: Ensaio 2: vibrômetro a laser Polytec (Portable Digital Vibrometer: PDV-100).



Fonte: Autor, 2019

Figura 9: Ensaio 2: martelo de impacto.



Fonte: Autor, 2019

Baseado nos ensaios anteriores, um terceiro teste experimental (Ensaio III) foi realizado utilizando-se um excitador Shaker S 51140-M (ver Fig. 10), um amplificador de potência BAA 1000 (ver Fig. 10) e um Sistema de Vibrometria à Laser PDV 100 (Vibromêtro Digital Portátil) da Polytec (Fig. 8). Um aplicativo (SGenerator), instalado em um iPad A1459, com faixa de frequência de 1 Hz a 20.000 Hz, foi utilizado para gerar os sinais de excitação de entrada (ondas quadradas) e acoplado ao amplificador de potência (BAA 1000) e ao excitador de vibração (Shaker), que combinados com um dispositivo de vibrometria a laser (PDV-100), viabilizaram a obtenção das velocidades no domínio do tempo e as respostas FFT do sistema.

Figura 10: Ensaio 3: shaker (TIRAvib – S 51140-M) e amplificador de potência BAA 1000.



Fonte: Autor, 2019

A FFT (Fast Fourier Transform: Transformada Rápida de Fourier) correspondente às respostas de saída associada aos três acelerômetros utilizados na análise modal experimental da passarela no Ensaio I é apresentada nas Figs. 11 e 12 (utilizando-se o sistema de aquisição de dados ADS-2002). É importante ressaltar que uma vez que a carga de impacto do pulso não foi mensurada neste ensaio, não foi possível obter-se a FRF de cada ponto para este ensaio. Entretanto, as frequências naturais da passarela são igualmente identificadas através da FFT da resposta dinâmica referentes às seções estruturais investigadas.

Figura 11: Ensaio 1: espectro de resposta da vibração da estrutura no Ponto 1 (1/4 do vão).

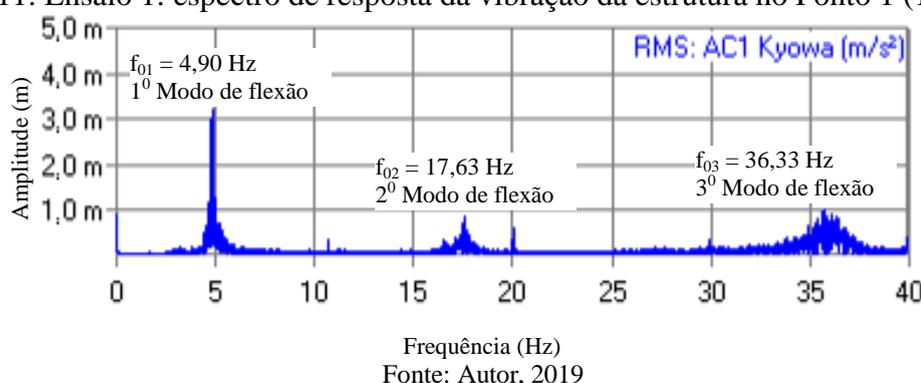
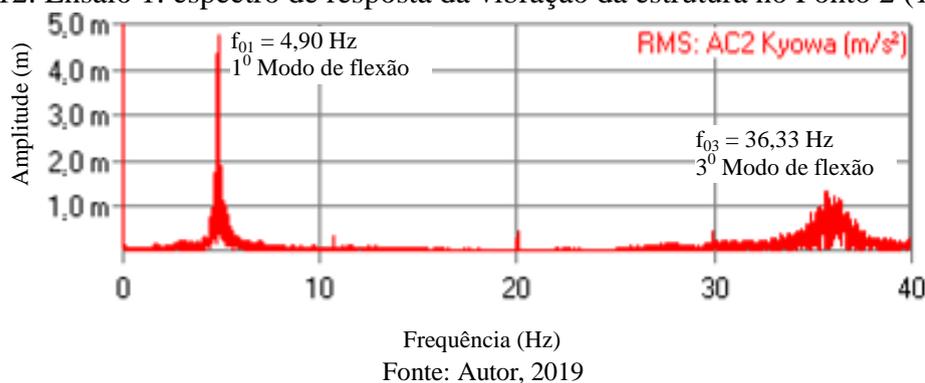
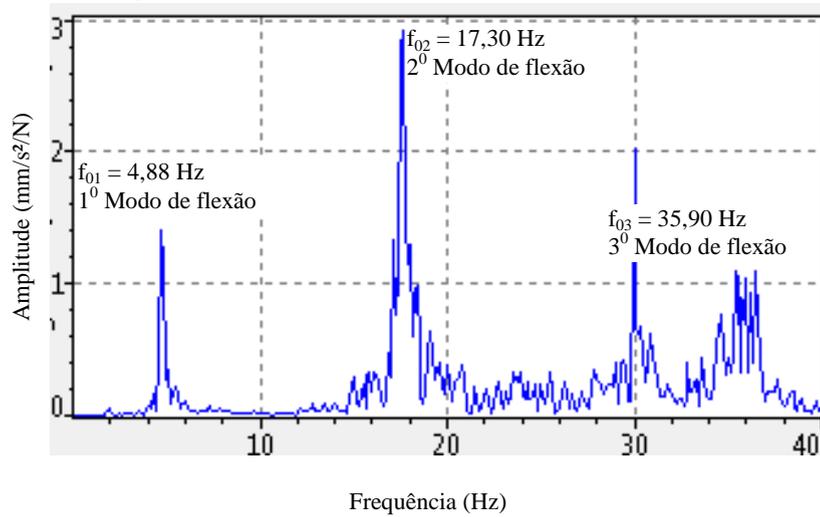


Figura 12: Ensaio 1: espectro de resposta da vibração da estrutura no Ponto 2 (1/2 do vão).



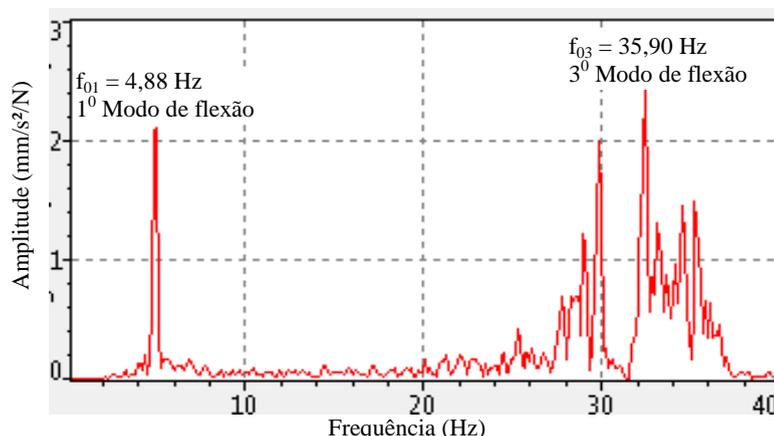
Em seguida, as Figs. 13 e 14 apresentam as respostas FRF do sistema de vibrometria a laser (PDV-100) devido ao impacto do martelo Dytran sobre a estrutura de concreto (Ensaio II). Vale ressaltar, ainda, que o valor da força de impacto introduzida pelo martelo sobre a passarela é mensurado através de um sensor de força localizado na “cabeça” do martelo, portanto, sendo possível a obtenção das FRFs. Na sequência do texto, as FFTs obtidas no Ensaio III, utilizando-se o Shaker, são apresentadas nas Figs. 15 e 16.

Figura 13: Ensaio 2: FRF no Ponto 1 (1/4 do vão).



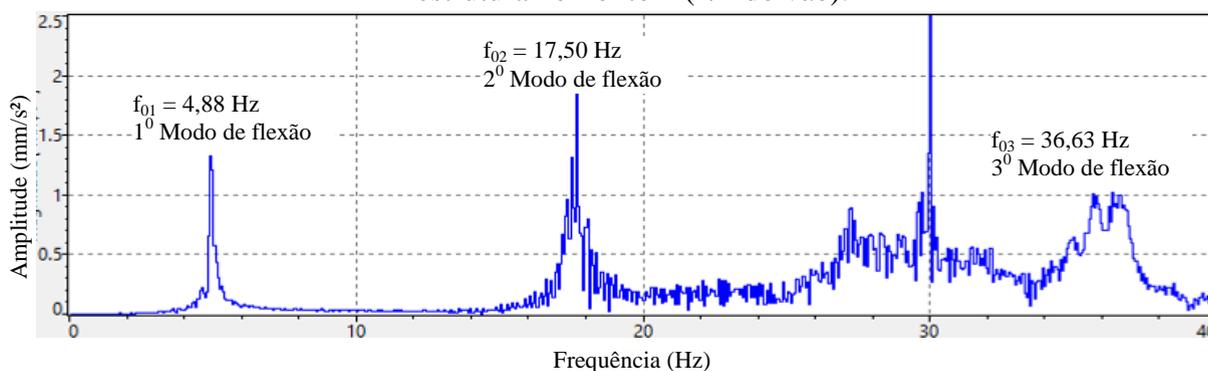
Fonte: Autor, 2019

Figura 14: Ensaio 2: FRF no Ponto 2 (1/2 do vão).



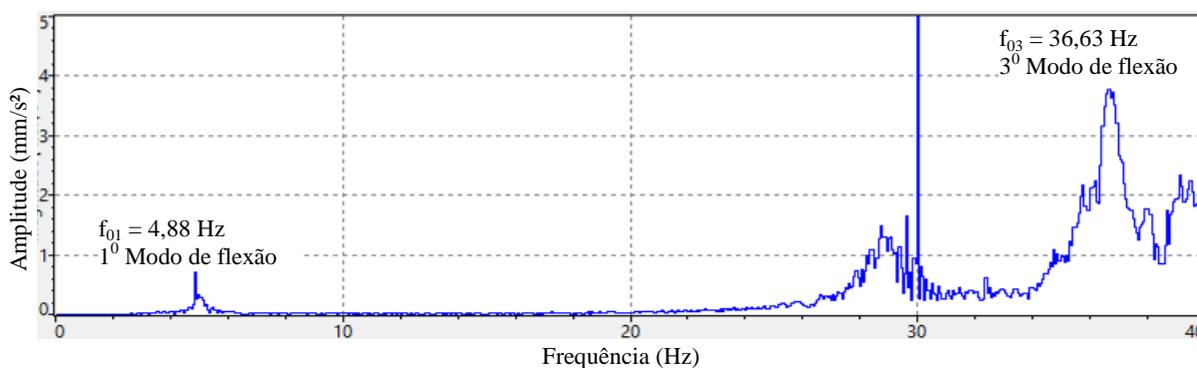
Fonte: Autor, 2019

Figura 15: Ensaio 3: Espectro de resposta da vibração da estrutura no Ponto 1 (1/4 do vão).



Fonte: Autor, 2019

Figura 16: Ensaio 3: Espectro de resposta da vibração da estrutura no Ponto 2 (1/2 do vão).



Fonte: Autor, 2019

Analisando-se os resultados apresentados nas Figs. 11 a 16 verificam-se que é possível identificar os três picos principais de frequência, correspondentes aos três modos verticais de vibração da estrutura. Observa-se que o segundo modo de vibração não se manifesta nas leituras observadas nas Figs. 12, 14 e 16, devido ao espectro de resposta ter sido obtido sobre a metade do vão da estrutura, onde o valor da amplitude de oscilação do segundo

modo de vibração é nulo. Entretanto percebe-se que o valor da amplitude de oscilação do primeiro modo é máximo neste ponto (1/2 do vão), quando comparado aos demais gráficos (Figs. 11 a 16), como era de se esperar.

Os coeficientes de amortecimento foram obtidos via monitoração experimental dinâmica dos ensaios descritos anteriormente e encontram-se resumidos e apresentados na Tabela 1. O amortecimento crítico pode ser calculado no domínio do tempo (Ensaio 1), através do método do decremento logarítmico, filtrando-se os respectivos modos de vibração, e no domínio da frequência (Ensaio 1 e 3) com base no emprego do “3db Bandwidth” (Brandt, 2011).

Tabela 1: Taxas de amortecimento obtidas experimentalmente

Monitoração Experimental Dinâmica		Coeficiente de Amortecimento (%)		Características do Modo de Vibração (Flexão vertical)
Ensaio 1	Excitação: Humana Aquisição de Dados: ADS2002	ξ_{01}	1,80	1 ^o Modo
		ξ_{02}	1,15	2 ^o Modo
		ξ_{03}	1,02	3 ^o Modo
Ensaio 2	Excitação: Martelo de Impacto Dytran Aquisição de Dados: PDV 100	ξ_{01}	1,55	1 ^o Modo
		ξ_{02}	1,04	2 ^o Modo
		ξ_{03}	1,24	3 ^o Modo
Ensaio 3	Excitação: Shaker Aquisição de Dados: PDV 100	ξ_{01}	1,80	1 ^o Modo
		ξ_{02}	1,12	2 ^o Modo
		ξ_{03}	0,86	3 ^o Modo

Fonte: Autor, 2019

Observa-se com base nos resultados fornecidos pela Tabela 1 que os coeficientes de amortecimento da estrutura foram obtidos experimentalmente com valores muito próximos, em todos os ensaios, entretanto, deve-se ressaltar que os valores dos coeficientes de amortecimento estrutural obtidos com base do sistema ADS 2002 devem ser considerados mais confiáveis do que aqueles obtidos a partir do uso do sistema PDV 100. Tal fato se explica devido à forma de obtenção das velocidades do movimento do sistema estrutural, via sistema PDV 100, através do efeito Doppler, pois se torna difícil para o autor garantir que a estrutura de referência estava em total repouso no momento exato da medição experimental.

5. TESTES EXPERIMENTAIS DE VIBRAÇÃO FORÇADA

O caminhar humano sobre a passarela de pedestres foi monitorado com base no controle do movimento dos pedestres (sincronismo do caminhar das pessoas) ao longo de toda a sua travessia, mediante a utilização de placas com acelerômetros acopladas ao centro de

massa de cada pedestre (Fig. 17). Deste modo, podem ser obtidas as forças dinâmicas oriundas do movimento do grupo de pedestres sobre a laje de concreto da passarela. A aquisição de dados nestes testes de vibração forçada foi realizada a partir do sistema ADS-2002, utilizando os acelerômetros resistivos Kyowa e capacitivos Dytran, para o registro das acelerações do movimento do corpo dos pedestres (Fig. 17) e da estrutura (Ponto 2: ver Fig. 4).

Figura 17: Monitoração experimental dinâmica: placa com acelerômetro acoplado ao centro de massa e pedestres caminhando sobre a passarela (1 e 8 pedestres: $f = 2,45$ Hz: ressonância).



Fonte: Autor, 2019

Objetivando controlar o passo de cada pedestre (frequência do passo dos pedestres) e manter-se a sincronização do ritmo do grupo de pessoas que se movimentava sobre a estrutura utilizou-se um metrônomo durante a realização dos testes experimentais. Este dispositivo foi conectado a uma caixa acústica de modo que foi possível produzir pulsos sonoros de duração regular. A unidade representativa do metrônomo é o “bpm” (batidas por minuto). Portanto, cada “batida” sonora corresponde ao contato de cada passo do pedestre sobre a estrutura.

Nos testes experimentais o valor no metrônomo foi fixado em 147 bpm ($f = 2,45$ Hz), de modo que o segundo harmônico do caminhar humano ($2 \times 2,45$ Hz = 4,90 Hz) de cada pedestre que atravessa a passarela de forma sincronizada pudesse forçar um movimento ressonante com o primeiro modo de vibração vertical ($f_{01} = 4,90$ Hz). Representativamente, os resultados obtidos a partir dos ensaios experimentais são mostrados nas Figs. 18 e 19, descritos no domínio do tempo e da frequência, respectivamente. Estes resultados correspondem ao acelerômetro instalado no meio da passarela investigada (Ponto 2: 1/2 do vão, ver Fig. 4). Deve ser enfatizado que o índice "m" nos eixos verticais das Figs. 18 e 19, no domínio do tempo, corresponde ao prefixo "mili" (10^{-3}). Por outro lado, os eixos horizontais apresentam o tempo em segundos e frequência em Hz, respectivamente, de acordo com cada análise.

Analisando-se os resultados apresentados nas Figs. 18 e 19 observa-se que os

harmônicos são relevantes para a avaliação da resposta dinâmica das passarelas, demonstrando que os testes em ressonância ($2 \times 2,45 \text{ Hz} = 4,90 \text{ Hz}$) apresentam efetivamente as frequências dos harmônicos componentes da excitação. Os valores máximos de aceleração encontrados neste estudo experimental são, respectivamente, iguais a $0,048 \text{ m/s}^2$ e $0,053 \text{ m/s}^2$ para 1 e 8 pessoas, respectivamente, em ressonância ($f = 2,45 \text{ Hz}$). A aproximação da amplitude dos valores de pico demonstra a dificuldade de se ter todos os pedestres em fase, de forma a se obter uma ressonância “perfeita”.

Figura 18: Aceleração vertical no domínio do tempo: 8 pedestre [Ponto 2 (1/2 vão): $f = 2,45$ Hz (ressonância)].

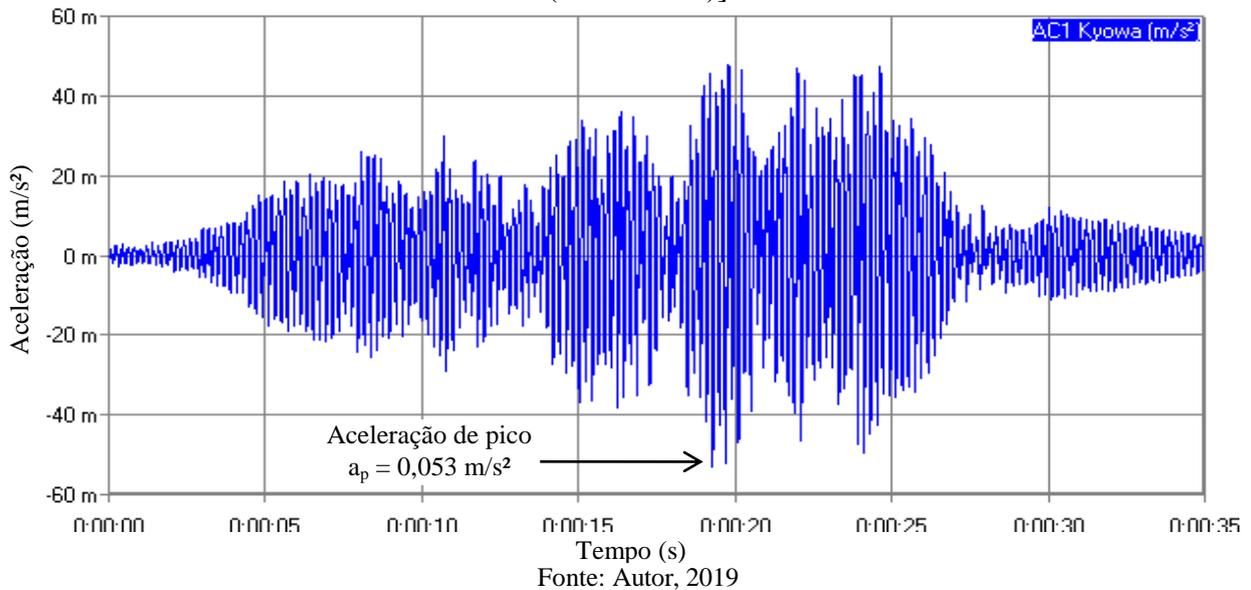
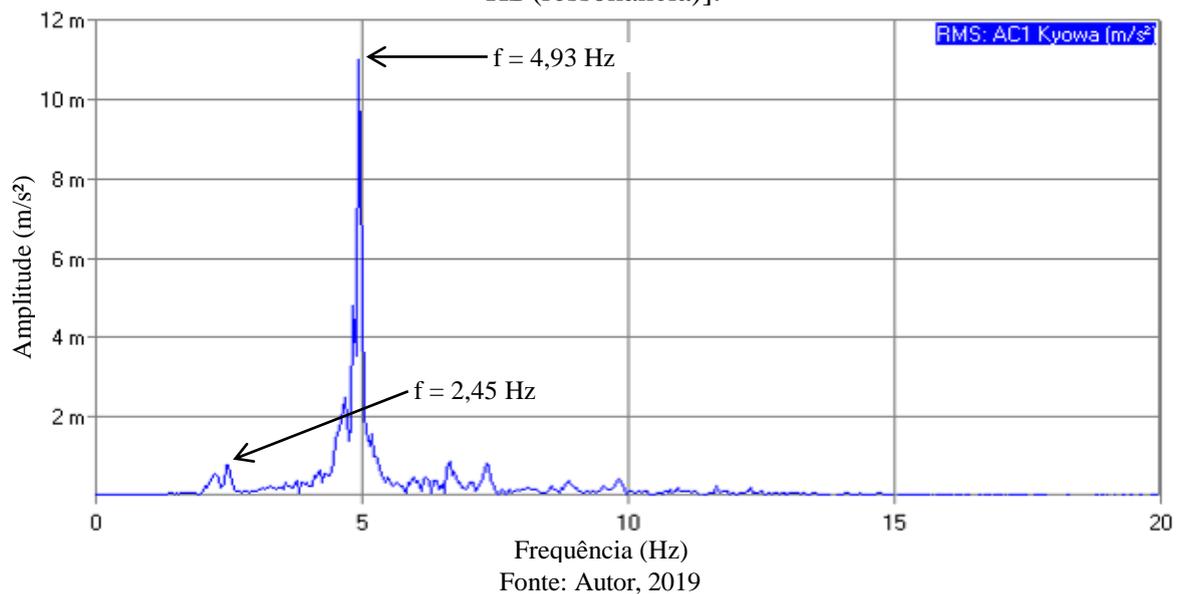


Figura 19: Aceleração vertical no domínio da frequência: 8 pedestres [Ponto 2 (1/2 vão): $f = 2,45$ Hz (ressonância)].



6. CALIBRAÇÃO NUMÉRICA E ANÁLISE DINÂMICA

Com o objetivo de se calibrar a modelagem experimental e numérica da passarela, as frequências naturais e modos de vibração foram determinados através da análise modal numérica (ver Fig. 6), via Método dos Elementos Finitos (MEF), utilizando-se o programa computacional ANSYS (ANSYS, 2010), conforme apresentado na Tabela 2 e Fig. 20. Observa-se uma boa concordância entre os resultados experimentais e numéricos apresentados na Tabela 2, representando indicativo de que as características dinâmicas do sistema, no que

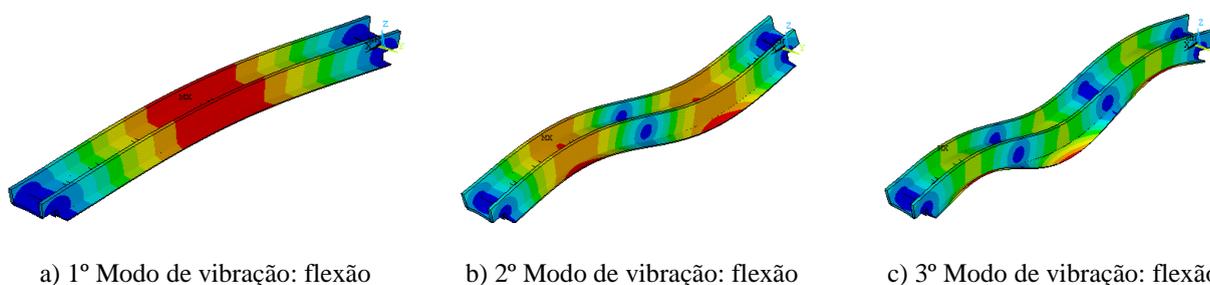
diz respeito às frequências naturais (massa e rigidez) estão bem representadas. Além disso, ressalta-se que a frequência fundamental da passarela encontra-se na faixa de frequência do caminhar, e uma possível situação de ressonância pode ocorrer.

Tabela 2: Frequências naturais da passarela analisada: resultados experimentais versus resultados numéricos.

Frequências Naturais (Hz)	MEF (Hz)	Resposta Experimental (Hz)			Diferenças (%)		
		Ensaio I	Ensaio II	Ensaio III	Ensaio I	Ensaio II	Ensaio III
f_{01}	4,898	4,900	4,880	4,880	0,04	0,37	0,37
f_{02}	15,923	17,630	17,300	17,500	10,72	8,65	9,90
f_{03}	32,154	36,330	35,900	36,630	12,99	11,65	13,92

Fonte: Autor, 2019

Figura 20: Modos de vibração relativos as frequência naturais verticais.



a) 1º Modo de vibração: flexão

b) 2º Modo de vibração: flexão

c) 3º Modo de vibração: flexão

Fonte: Autor, 2019

Análises numéricas de vibração forçada foram realizadas através do emprego do programa ANSYS (ANSYS, 2010), via modelo em elementos finitos (ver Fig. 6), com base na utilização das acelerações medidas experimentalmente, oriundas de cada pedestre (Debona, 2016). O modelo numérico foi calibrado a partir dos resultados experimentais das acelerações no domínio do tempo obtidas para 1 e 8 pedestres caminhando sobre a estrutura, incorporando à análise o efeito da interação dinâmica pedestre-estrutura, com base no emprego de modelos biodinâmicos representativos dos pedestres (Debona, 2016). Em seguida, a Tabela 3 apresenta um resumo das acelerações de pico encontradas e a Fig. 21 ilustra uma comparação típica entre os resultados experimentais e numéricos para o caso de 8 pedestres.

Tabela 3: Acelerações máximas da passarela em estudo: resultados experimentais versus resultados numéricos.

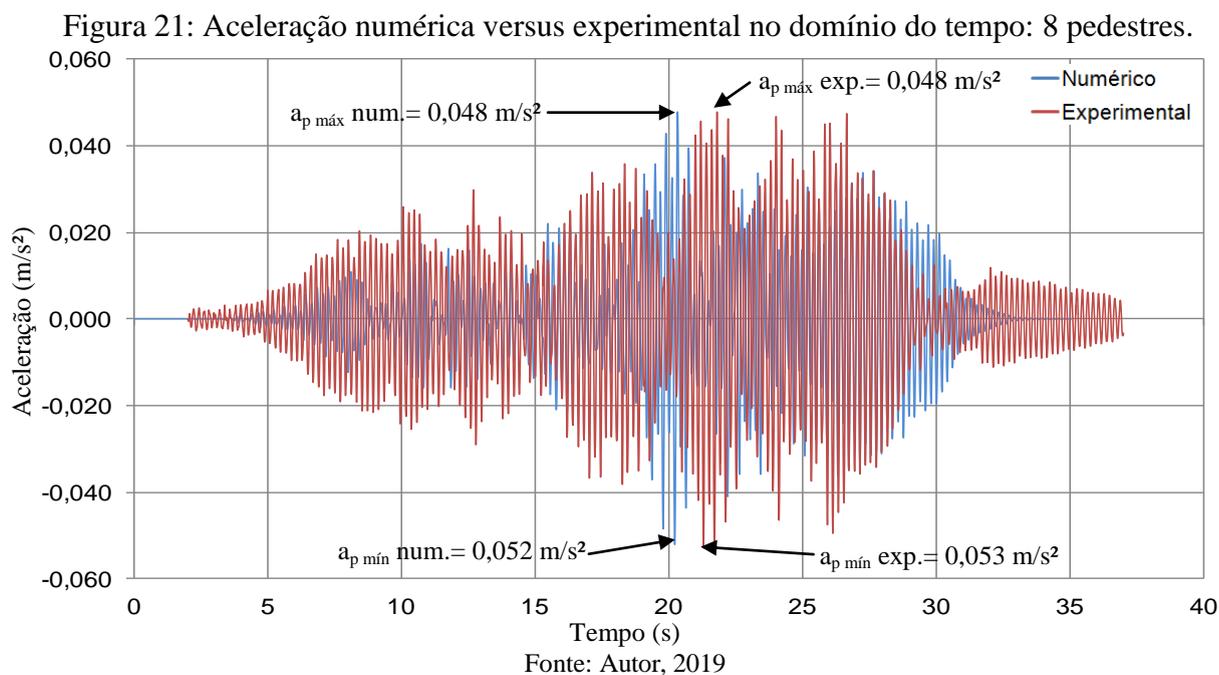
Tipo de Caminhada	Comparação da Aceleração	Acelerações de Pico (m/s^2)		Diferenças (%)	Conforto Humano
		Experimental	Numérica		

MONITORAÇÃO EXPERIMENTAL E MODELAGEM NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DE PASSARELA DE PEDESTRES

Gilvan Lunz Debona

1 Pedestre	Máximo	0,048	0,045	6,66	Máximo
	Mínimo	0,047	0,052	10,64	Máximo
8 Pedestres	Máximo	0,048	0,048	0,00	Máximo
	Mínimo	0,053	0,052	1,92	Máximo
HIVOSS (2008); SÉTRA (2006): $a_{lim} = 0,0 - 0,50 \text{ m/s}^2$: conforto máximo AISC (Murray et al., 2016): $a_{lim} = 1,5\% g = 0,15 \text{ m/s}^2$: passarelas internas					

Fonte: Autor, 2019



Analisando-se os resultados apresentados na Tabela 3 e Fig. 21, referentes aos valores das acelerações máximas, pode-se verificar que as características dinâmicas da passarela investigada estão bem representadas, com base na estratégia de modelagem numérica desenvolvida, pois a diferença existente entre a resposta numérica e experimental é pequena, Tabela 3 e Fig. 21. Ressalta-se que os testes experimentais encontram-se bem representados numericamente, salvo diferenças oriundas de dificuldades de sincronismo (frequência do passo dos pedestres), dificuldades dos indivíduos para manter a distância entre si ao longo da passarela; e, ainda, da ação de efeitos externos (ação do vento e a vibração do edifício).

6. CONCLUSÕES

Este trabalho investigou experimentalmente e numericamente o comportamento dinâmico de uma passarela de pedestres em concreto armado com 24,4 m de vão, constituída por vigas e lajes, que tem sido utilizada correntemente para a travessia de pedestres, localizada no campus da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Rio de Janeiro/RJ, Brasil.

A frequência fundamental da passarela de pedestres investigada foi determinada experimentalmente e numericamente ($f_{01} = 4,90$ Hz), encontrando-se na mesma faixa de frequência do caminhar humano, quando considerado o segundo harmônico da excitação. Os coeficientes de amortecimento foram obtidos experimentalmente, apresentando valores muito próximos, em todos os testes experimentais realizados. Os valores dos coeficientes de amortecimento obtidos para o modo fundamental de vibração foram iguais a 1,80% (Ensaio 1);

1,55% (Ensaio 2) e 1,80% (Ensaio 3).

O modelo numérico desenvolvido neste estudo foi calibrado satisfatoriamente em relação aos resultados da análise modal experimental e de vibração forçada. A análise de vibração forçada apresentou diferenças muito pequenas para os valores máximos das acelerações verticais, considerando-se o caminhar de 1 e 8 pedestres. O valor máximo de aceleração encontrado nesta investigação foi da ordem de $0,053 \text{ m/s}^2$, atendendo aos limites de conforto humano, em consonância com as recomendações e critérios de projeto descritos nos guias HIVOSS (2008), SÉTRA (2006) e AISC (Murray et al., 2016).

Finalmente, conclui-se que a natureza do modelo de carregamento dinâmico adotado, bem como as suas componentes harmônicas é de vital importância para uma boa simulação numérica do caminhar, especialmente no que diz respeito aos valores das acelerações de pico. Deve-se destacar que as propriedades dinâmicas (massa, rigidez e amortecimento) da passarela e dos pedestres devem ser estabelecidas de maneira coerente, pois estas grandezas são bastante relevantes para uma correta definição da resposta estrutural dinâmica do modelo.

AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho de pesquisa agradecem ao suporte financeiro fornecido pelas Agências de Fomento à Pesquisa do país: CAPES, CNPq e FAPERJ.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANSYS. **Swanson Analysis Systems, Inc.**, P.O. Box 65, Johnson Road, Houston, PA, 15342-0065, Version 12.0, Basic analysis procedures, Second edition, 2010.

BRANDT, A. **Noise and vibration analysis - Signal analysis and experimental procedures**. John Wiley & Sons, Inc. 1st ed., 2011.

CUNHA, A.; CAETANO, E. **Experimental Modal Analysis of Civil Engineering Structures**. Sound and Vibration, V. 40 (6): 12-20, 2006.

DEBONA, G. L. “**Monitoração Experimental e Modelagem Numérica sobre a Resposta Estrutural Dinâmica de Passarelas de Pedestres**”. 2016. 349 folhas. Tese de doutorado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, PGECIV. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ. Rio de Janeiro, Brasil, 2016.

HIVOSS. **Research Fund for Coal and Steel**. Design of footbridges, 2008.

MURRAY T.M.; ALLEN D.E.; UNGAR E.E. **Vibrations of Steel-Framed Structural Systems due to Human Activity**. Steel Design Guide Series. American Institute of Steel Construction, AISC, 2016.

NIMMENA, K. V.; LOMBAERTA, G.; ROECKA, G. D.; BROECKA P. V. D. **Vibration serviceability of footbridges: Evaluation of the current codes of practice**. Engineering Structures, 59: 448-461, 2014.

PRISLAN R. **Laser doppler vibrometry and modal testing**. University of Ljubljana, 2008.
SÉTRA Guide méthodologique passerelles piétonnes (Technical guide footbridges: Assessment of vibrational behaviour of footbridges under pedestrian loading), 2006.

ŽIVANOVIĆ, S.; PAVIC, A.; REYNOLDS, P. **Modal testing and finite element model tuning of a lively footbridge structure**. Engineering Structures, 28 (6): 857-868, 2006.