



AVALIAÇÃO NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DA RESPOSTA ESTRUTURAL DINÂMICA DE PASSARELAS DE PEDESTRES

Gilvan Lunz Debona

gilvanld@yahoo.com.br

Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, PGECIV/FEN/UERJ

Rua São Francisco Xavier, Nº 524, Maracanã, 20550-900, Rio de Janeiro/RJ, Brasil

José Guilherme Santos da Silva

jgss@uerj.br

Departamento de Estruturas e Fundações, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ

Rua São Francisco Xavier, Nº 524, Maracanã, 20550-900, Rio de Janeiro/RJ, Brasil

Resumo. *Este trabalho de pesquisa tem por objetivo a monitoração experimental e modelagem numérica da resposta estrutural dinâmica de passarelas, com base na consideração do efeito da interação dinâmica pedestre-estrutura. Para tal, o modelo estrutural investigado corresponde a uma passarela de pedestres de concreto armado, simplesmente apoiada, com vão de 24,4m, localizada na Faculdade de Engenharia da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (FEN/UERJ), na cidade do Rio de Janeiro/RJ. 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). Para tal, 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, ainda, a partir da utilização de outro sistema para a medição de vibrações (Shaker). Em seguida, testes de vibração forçada foram realizados, com base nas cargas dinâmicas oriundas dos pedestres; e, finalmente, um modelo numérico tridimensional, desenvolvido a partir do uso do método dos elementos finitos, foi desenvolvido e calibrado, incorporando o efeito da interação dinâmica pedestre-estrutura, com base no emprego de modelos biodinâmicos representativos dos pedestres.*

Palavras-chave: *Passarelas de pedestres, Interação dinâmica pedestre-passarela, Análise dinâmica de estruturas.*

1 INTRODUÇÃO

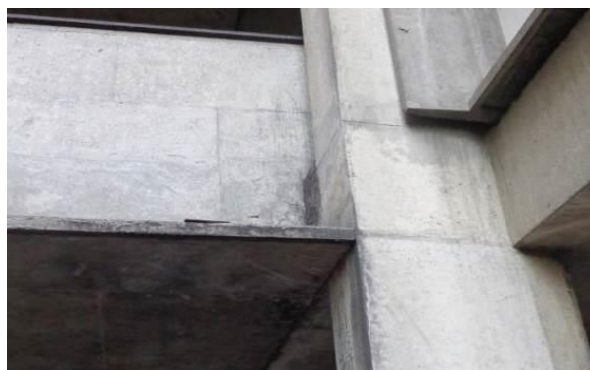
A análise do comportamento dinâmico de passarelas de pedestres por parte dos engenheiros civis não é uma prática regular nos escritórios de projeto de engenharia, especialmente no que diz respeito ao atendimento dos estados limite de utilização em estruturas, entretanto vários autores tem se dedicado 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., 2003), 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 se 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, objetivando contribuir para o estudo deste tema de pesquisa, o objetivo principal 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. A identificação modal e de vibração forçada da estrutura foi realizada com base em um sistema de aquisição de dados tradicional ADS-2002, fabricado pela LYNX Tecnologia Eletrônica. A vibração modal também foi identificada utilizando uma metodologia com vibrometria a laser (Portable Digital Vibrometer: PDV-100) e a partir da utilização de outro sistema para a medição de vibrações (Shaker). Em seguida, os modelos numéricos foram calibrados com os resultados modais e de vibração forçada experimentais, com base no método dos elementos finitos (FEM) utilizando o programa ANSYS (2010).

2 PASSARELA DE PEDESTRES INVESTIGADA

O modelo estrutural investigado 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 em 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.



b) Detalhe do apoio

Figura 2. Passarela investigada

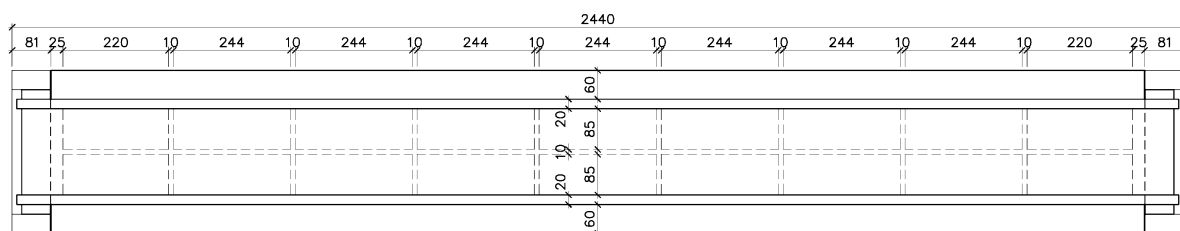


Figura 3. Projeto estrutural: planta. Dimensões em (cm)

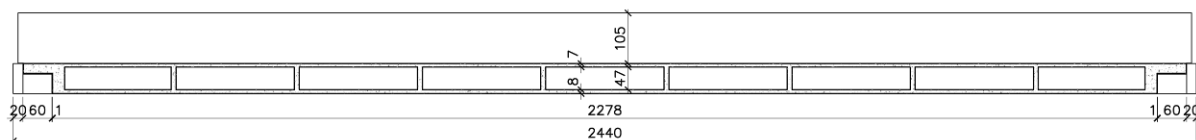


Figura 4. Projeto estrutural: corte longitudinal típico. Dimensões em (cm)

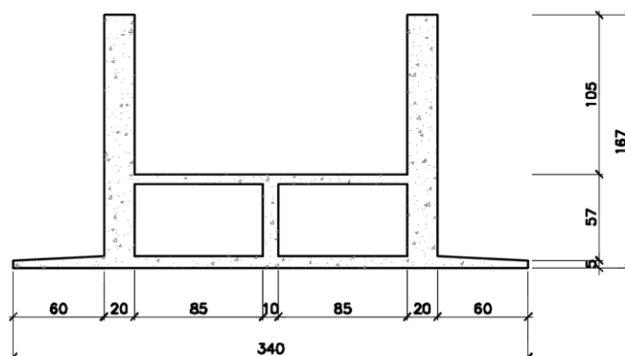


Figura 5. Projeto estrutural: corte transversal típico. Dimensões em (cm)

3 MODELO NÚMÉRICO DA PASSARELA

No modelo numérico desenvolvido são empregadas técnicas usuais de discretização, via método dos elementos finitos, por meio do emprego do programa ANSYS (2010). Neste modelo computacional, todas as seções de concreto armado foram simuladas por meio de elementos finitos de casca SHELL63 (2010), conforme ilustrado na Fig. 6.

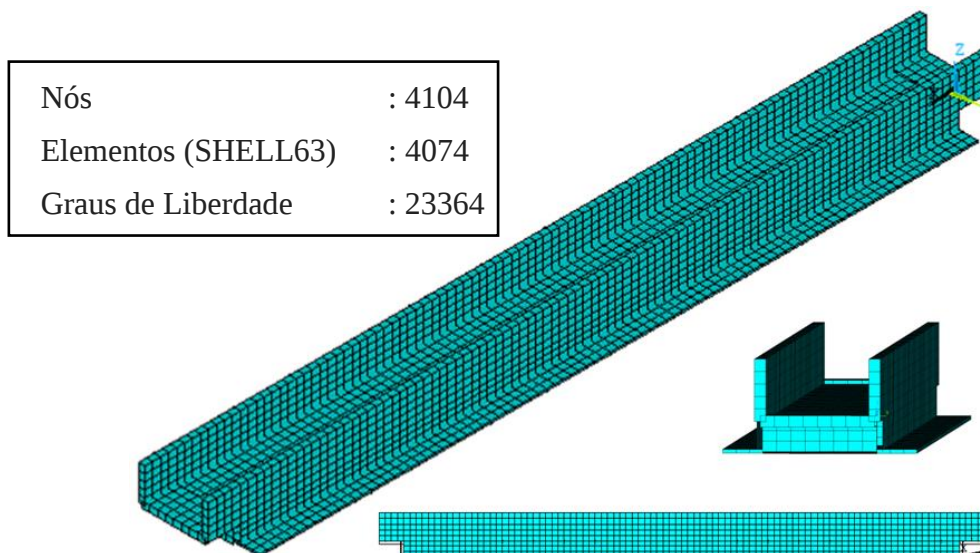


Figura 6. Modelo em elementos finitos

4 ANÁLISE 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.

Antes da realização dos testes experimentais modais, o produto modal numérico dos modos de vibração foi obtido, de modo a se ter o melhor ponto comum da estrutura onde a excitação provocada na estrutura (utilizando-se o martelo de impacto, o shaker ou excitação humana) possa excitar a maioria dos modos de vibração. Depois disso, alguns pontos de interesse foram escolhidos para as análises, como ilustrado na Fig. 7, com o objetivo de obter as funções de resposta em frequência (FRF) da passarela investigada.

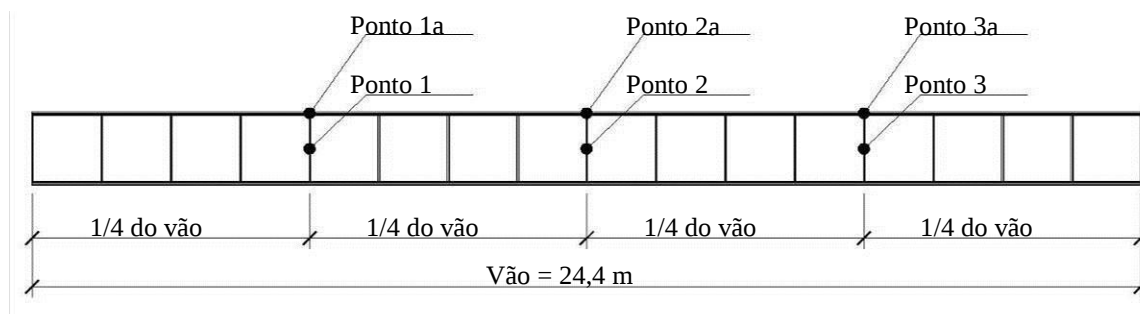
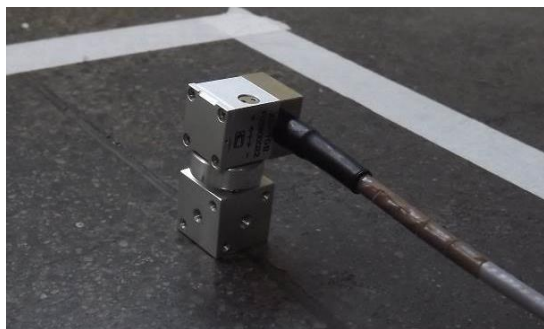


Figura 7. Pontos de medição da passarela investigada. Dimensões em (m)

O primeiro ensaio de vibração livre foi realizado de tal forma que a estrutura fosse excitada através do impacto de uma pessoa de 95 kg pulando no centro da passarela a uma altura de 0,5 m. O método utilizado neste ensaio foi o de dados de entrada única e de saída múltipla (SIMO). Os resultados de vibração livre foram obtidos por meio de três acelerômetros resistivos Kyowa localizados no 1/4, 1/2 e 3/4 do vão da passarela, ligados a um sistema de aquisição de dados ADS-2002 fabricado pela empresa LYNX Tecnologia Eletrônica (veja a Fig. 8). 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.



a) Acelerômetro



b) Sistema ADS 2002 e computador

Figura 8. Ensaio1: Sistema de aquisição ADS 2002 conectado a acelerômetros

Em seguida, foi realizado o ensaio 2, com entrada de dados única e de saída única (SISO) combinando o vibrômetro à laser Polytec PDV-100 a um martelo de impacto Dytran, como mostrado nas Figs. 9 e 10. O funcionamento básico da metodologia de vibrometria a laser está relacionado a um feixe de laser focado na estrutura ensaiada de modo que a velocidade do movimento relativo entre a estrutura e o equipamento possa ser medida através do efeito Doppler, ou seja, pela variação da frequência assim como do comprimento de onda do feixe de luz incidido e refletido na estrutura. (Prislan, 2008).



Figura 9. Ensaio 2: Vibrômetro à laser Polytec (Portable Digital Vibrometer: PDV-100)



Figura 10. Ensaio 2: Martelo de impacto Dytran

Baseado nos ensaios anteriores, um terceiro ensaio foi realizado utilizando-se um excitador Shaker S 51140-M (Fig. 11a), um amplificador de potência BAA 1000 (Fig. 11b) e um Sistema de Vibrometria à Laser PDV 100 (Vibromêtro Digital Portátil) da Polytec (Fig. 9). Um aplicativo (SGenerator), instalado em um iPad A1459, com faixa de frequência de 1 Hz à 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), foi possível obter as velocidades no domínio do tempo e as respostas FFT do sistema.



a) TIRAvib – S 51140-M



b) BAA 1000

Figura 11. Ensaio 3: Shaker (TIRAvib – S 51140-M) e Amplificador de Potência BAA 1000

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 1 é apresentada nas Figs. 12 a 14 (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 dos pontos investigados.

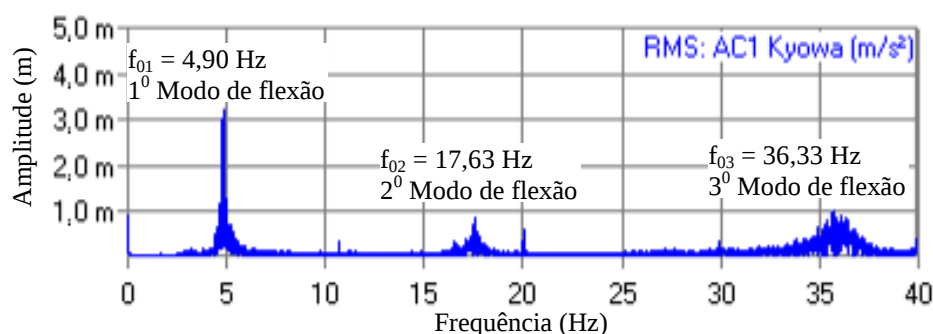


Figura 12. Ensaio 1: Espectro de resposta da vibração da estrutura no ponto 1 (1/4 do vão)

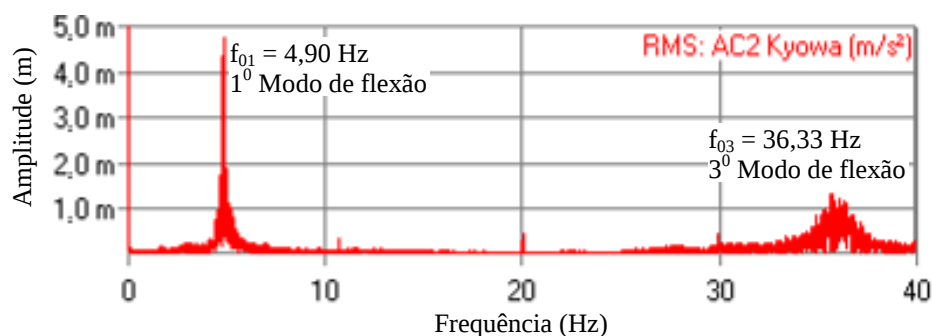


Figura 13. Ensaio 1: Espectro de resposta da vibração da estrutura no ponto 2 (1/2 do vão)

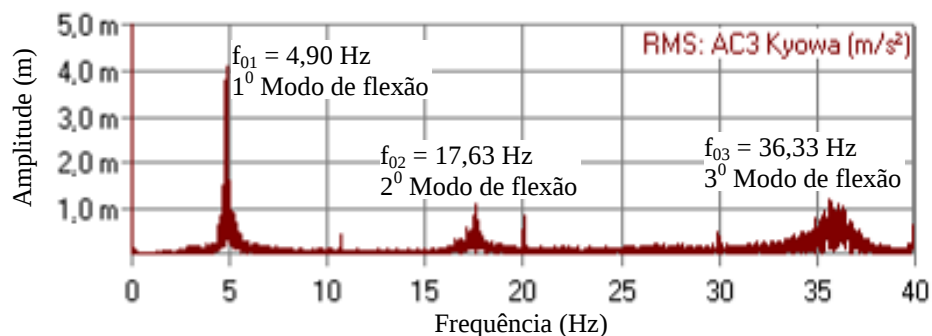


Figura 14. Ensaio 1: Espectro de resposta da vibração da estrutura no ponto 3 (3/4 do vão)

As Figs. 15 a 17 apresentam as respostas FRF do sistema de vibrometria a laser (PDV-100) devido ao impacto do martelo Dytran sobre a estrutura de concreto (Ensaio 2). Vale ressaltar que, neste caso, o valor da força de impacto introduzida pelo martelo é mensurado através de um sensor de força na cabeça do mesmo, portanto, sendo possível a obtenção das FRFs. As FFTs obtidas no Ensaio 3, utilizando-se o Shaker, é descrita nas Figs. 18 e 19 nos pontos de interesse 1 e 2 (Fig. 7).

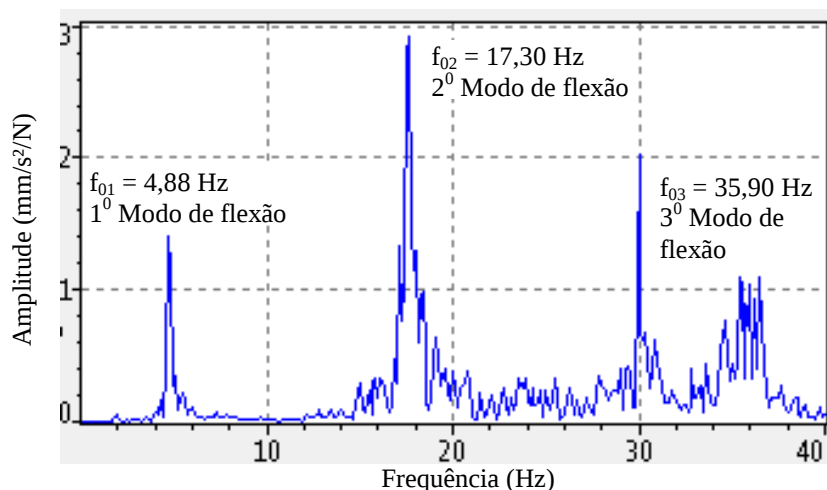


Figura 15. Ensaio 2: FRF no ponto 1 (1/4 do vão)

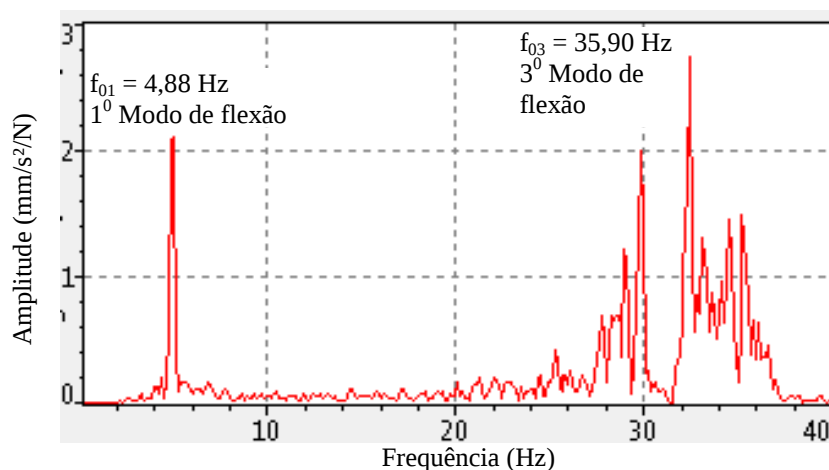


Figura 16. Ensaio 2: FRF no ponto 2 (1/2 do vão)

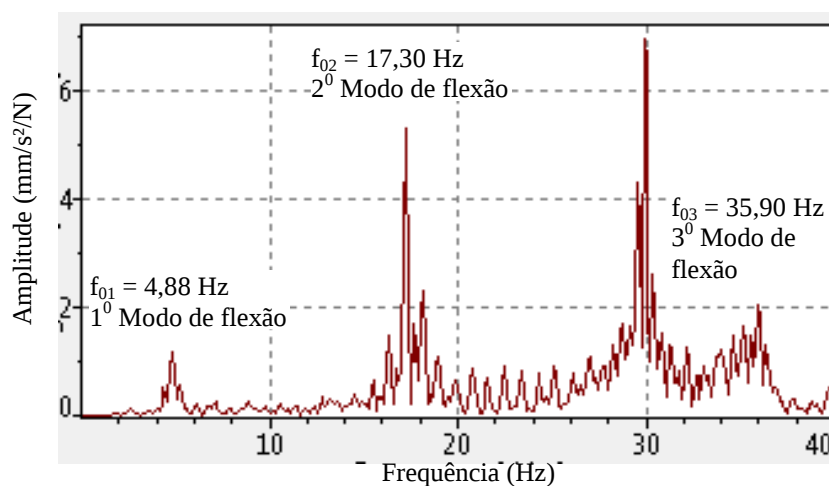


Figura 17. Ensaio 2: FRF no ponto 3 (3/4 do vão)

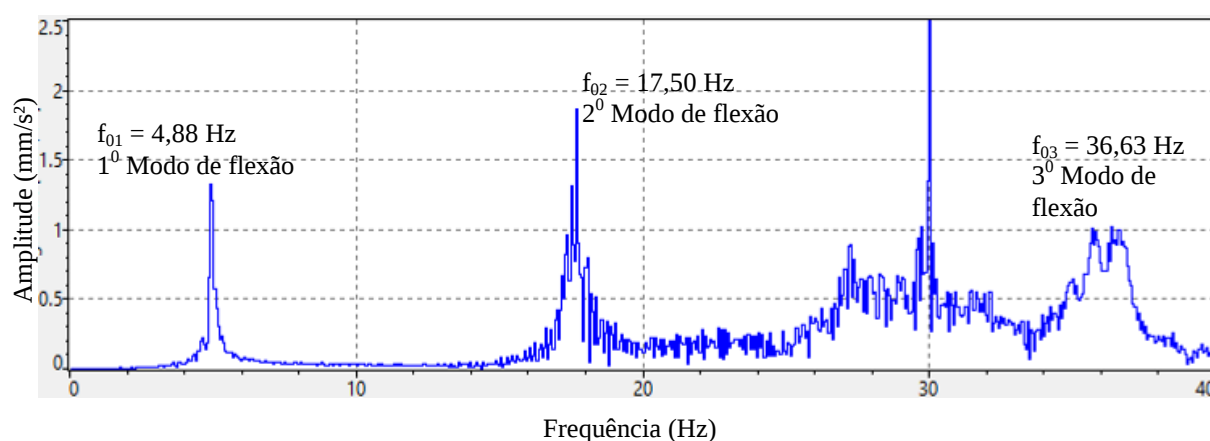


Figura 18. Ensaio 3: Espectro de resposta da vibração da estrutura no ponto 1 (1/4 do vão)

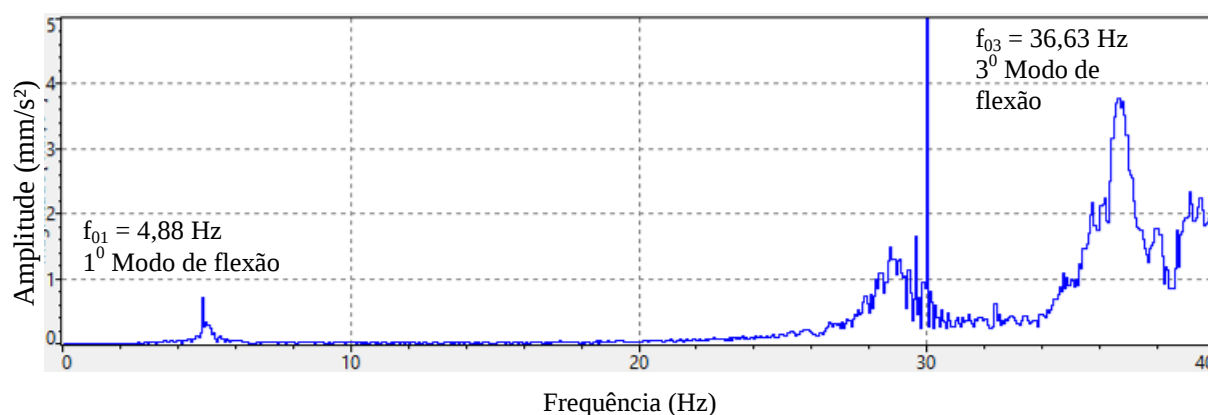


Figura 19. Ensaio 3: Espectro de resposta da vibração da estrutura no ponto 2 (1/2 do vão)

Analisando os resultados apresentados nas Figs. 12 a 19 notam-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. 13, 16 e 19, devido ao espectro de resposta ser na 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. 12 a 19), como era de se esperar.

Os coeficientes de amortecimento foram obtidos via monitoração experimental dinâmica dos ensaios demonstrados 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 2 e 3) através do método “3db Bandwidth” (Brandt, 2011). Esta equação é válida para $\xi < 0,1$ (Brandt, 2011).

Tabela 1. Taxas de amortecimento obtidas experimentalmente

Ensaio		Coeficiente de Amortecimento (%)		Características do Modo de Vibração (flexão vertical)
1	Excitação Humana e 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
2	Excitação com Martelo de Impacto Dytran (borracha vermelha) e 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
3	Excitação com Shaker e 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

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.

5 ANÁLISE EXPERIMENTAL DE VIBRAÇÃO FORÇADA

O caminhar humano na passarela de pedestres investigada foi realizada com base no controle do movimento (aceleração) dos pedestres ao longo de toda a sua travessia, utilizando-se de acelerômetros acoplados no centro de gravidade de cada indivíduo que estava excitando a estrutura. A aquisição de dados 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. 20) e da estrutura (ponto 2, ver Fig. 7). Os resultados experimentais são ilustrados nas Figs. 21 a 26.

Para controlar o passo de cada pedestre e manter-se a sincronização do ritmo do grupo de pessoas que se movimentava sobre a estrutura utilizou-se um metrônomo. Esse 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.

A partir de resultados experimentais foi identificada uma grande dificuldade de calibração dos modelos numéricos com os carregamentos propostos por vários autores ao longo dos anos, sendo necessário um controle mais rigoroso dos movimentos de excitação do caminhar dos pedestres na estrutura. Para tal sincronismo, foi adotado placas com acelerômetros acopladas ao centro de massa de cada pedestre que caminhava sobre a estrutura (ver Fig. 22) obtendo assim as forças oriundas do movimento do grupo de pedestres na passarela.

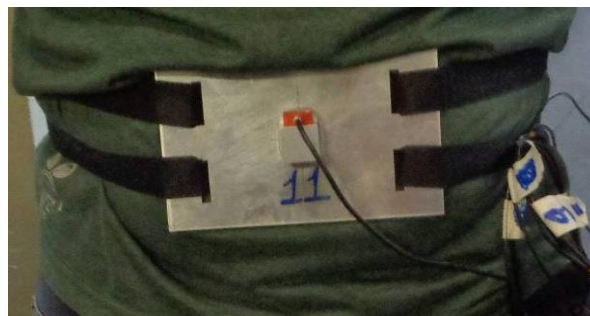


Figura 20. Placa com acelerômetro acoplado no centro de massa do pedestre

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).

Os resultados obtidos a partir dos ensaios experimentais são mostrados nas Figs. 22 a 25, 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. 7). Deve ser enfatizado que o índice "m" no eixos verticais das Figs. 21 a 26, 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.



Figura 21. Teste experimental com pedestres caminhando ($f=2,45$ Hz: ressonância)

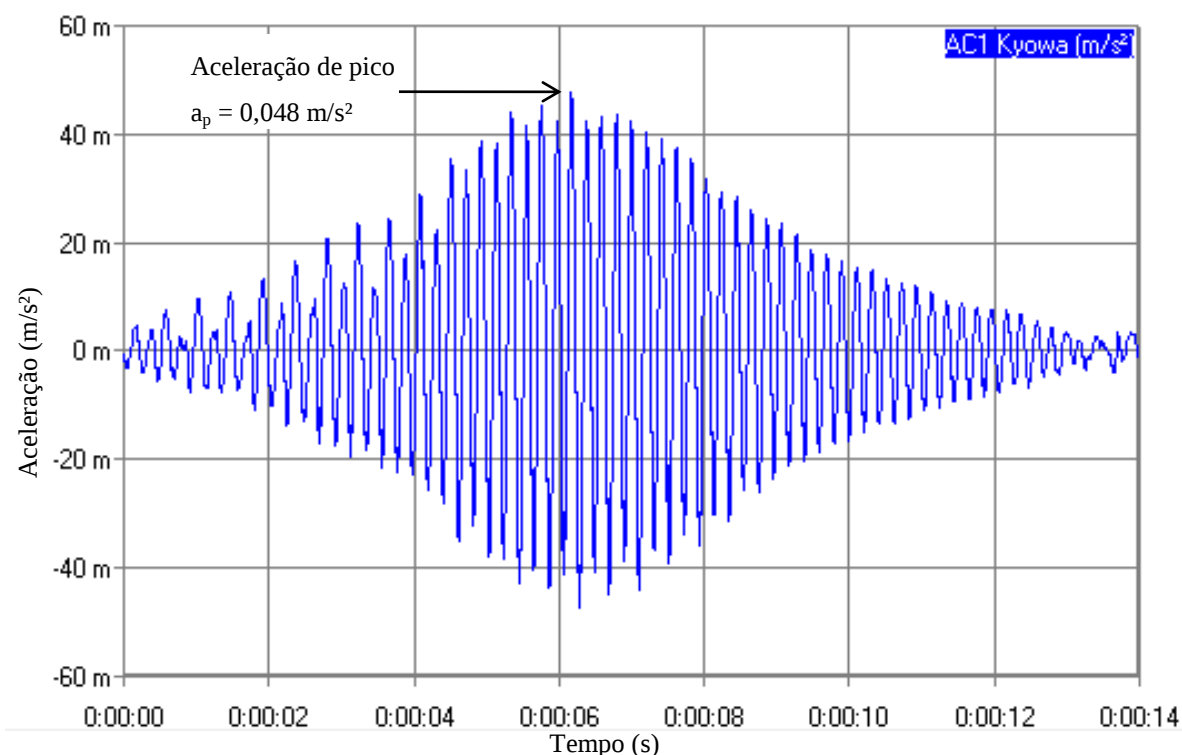


Figura 22. Aceleração vertical da estrutura no domínio do tempo devido a um pedestre caminhando ($f=2,45$ Hz: ressonância): 1/2 do vão

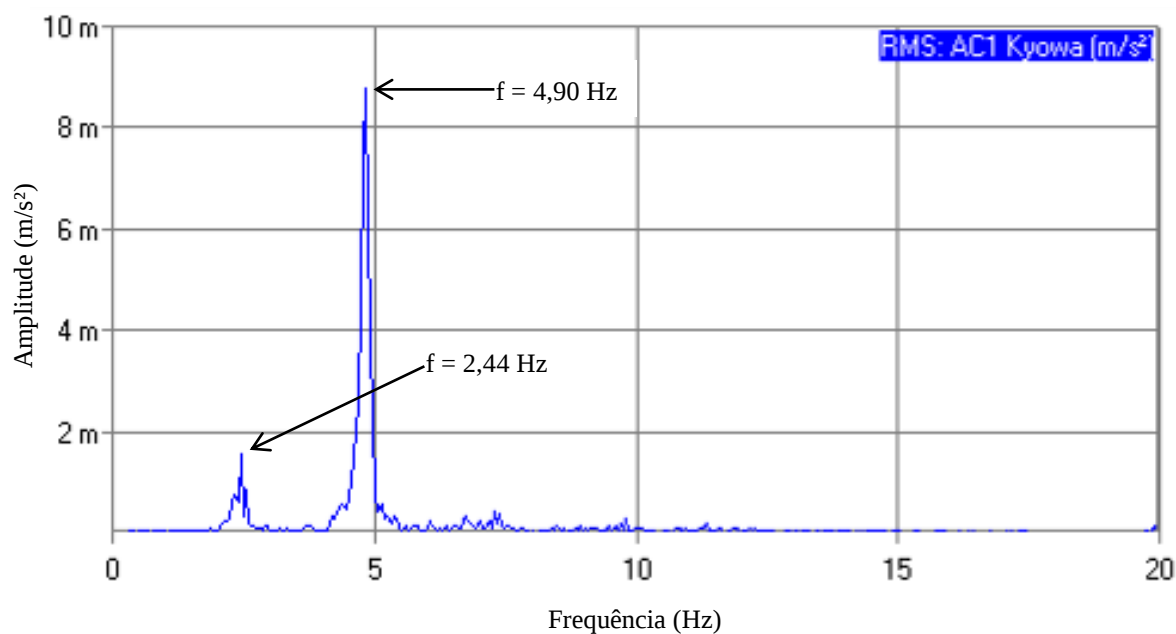


Figura 23. Aceleração vertical da estrutura no domínio da frequência devido a um pedestre caminhando ($f=2,45$ Hz: ressonância): 1/2 do vão

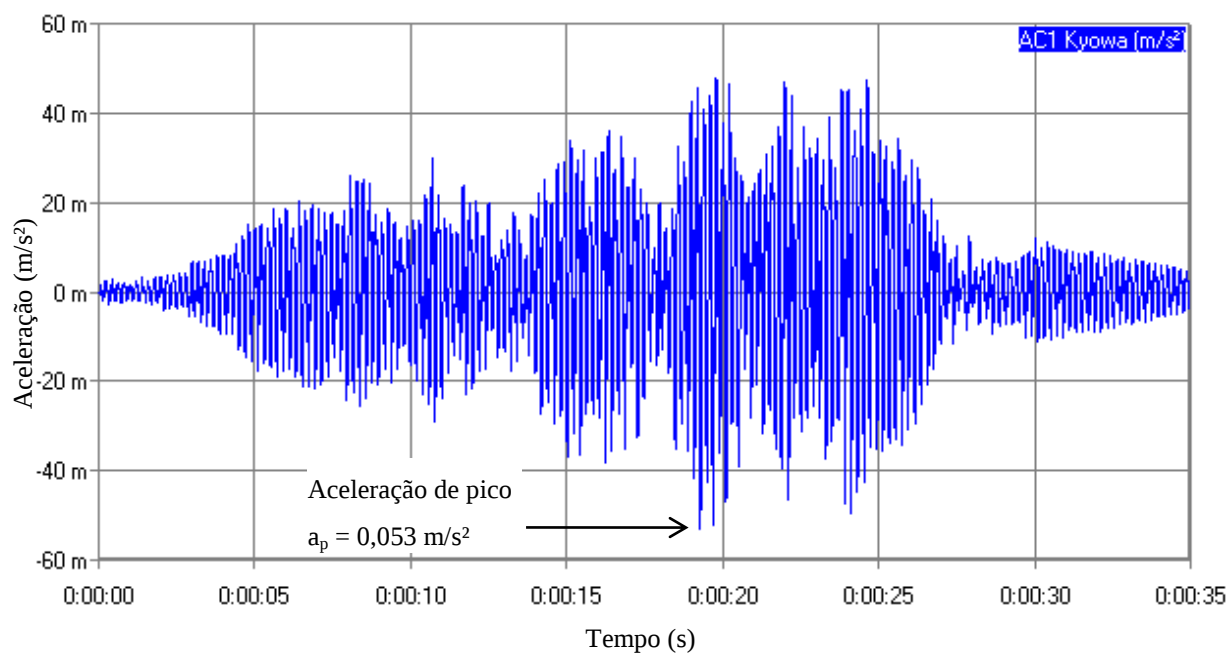


Figura 24. Aceleração vertical experimental da estrutura no domínio do tempo devido a oito pedestres caminhando ($f=2,45$ Hz: ressonância): 1/2 do vão

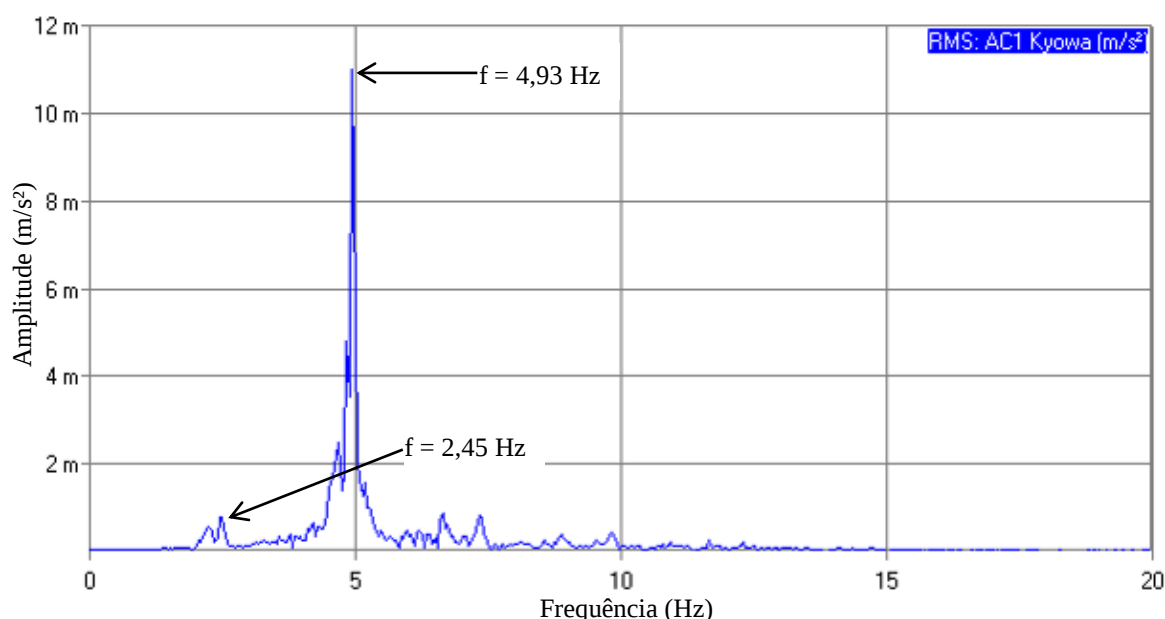


Figura 25. Aceleração vertical experimental da estrutura no domínio da frequência devido a oito pedestres caminhando ($f=2,45$ Hz: ressonância): 1/2 do vão

Analisando as Figs. 22 a 25 observa-se que os harmônicos são extremamente relevantes para a avaliação da resposta dinâmica das passarelas, demonstrando que os modelos em ressonância ($2 \times 2,45$ Hz = $4,90$ Hz) apresentam as frequências dos harmônicos componentes da excitação dinâmica humana. Os valores máximos de aceleração de pico encontrados nesta investigação experimental são, respectivamente, iguais a $0,048$ m/s² e $0,053$ m/s² para 1 e 8 pessoas em ressonância ($f = 2,45$ 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”.

6 CALIBRAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

6.1 Frequências naturais e modos de vibração

Objetivando-se a calibração dos resultados experimentais dinâmicos via modelo numérico-computacional da passarela, suas frequências naturais e modos de vibração da estrutura foram determinados a partir da análise modal numérica, via método dos elementos finitos (FEM) utilizando o programa computacional ANSYS (2010) e apresentados de acordo com a Tabela 2 e a Fig. 26. Comparando-se os valores das frequências naturais da passarela pode-se perceber que o modelo estrutural em estudo encontra-se bem representado numericamente pelo modelo computacional desenvolvido, via método dos elementos finitos (ANSYS, 2010). As características dinâmicas do sistema, no que diz respeito às frequências naturais (massa e rigidez) estão bem representadas, pois a diferença existente entre os valores numéricos e experimentais são pequenos, com valores máximos da ordem de 0,37%, 10,72% e 13,92% em relação ao primeiro, segundo e terceiro modos de vibração verticais da estrutura, respectivamente. Além disso, deve-se ressaltar que a frequência natural fundamental da passarela encontra-se na faixa de frequência do caminhar humano. Assim, uma possível situação de ressonância pode ser esperada.

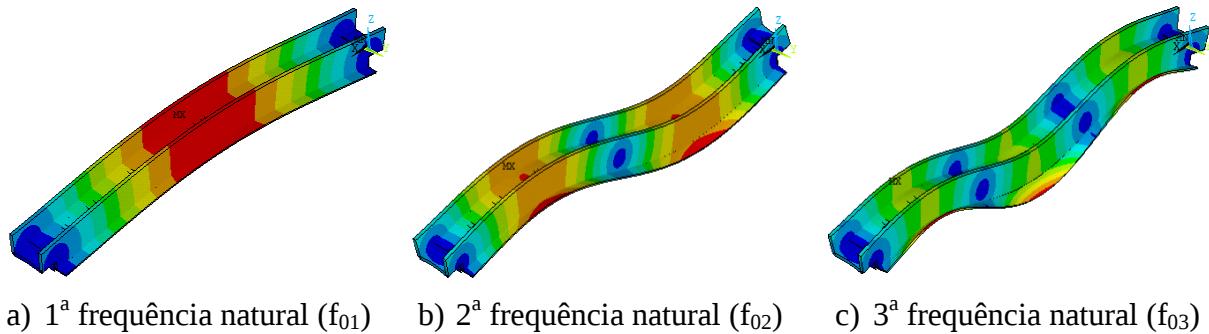


Figura 26. Modos verticais de vibração da estrutura

Tabela 2. Frequências naturais da passarela investigada

Frequência natural	MEF (Hz)	Experimental (Hz)			Diferença (%)		
		Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
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

As Figs. 27**Erro! Fonte de referência não encontrada.** a 29 apresentam a comparação dos três primeiros modos experimentais de vibração (obtidos via monitoração experimental do Ensaio 1) com os três modos correspondentes obtidos via modelo em elementos finitos, gerados pela correlação das amplitudes obtidas nos gráficos de domínio da frequência e pela amplitudes dos modos de vibração do modelo. A estrutura foi dividida em 4 partes iguais, sendo os nós 0 e 4 os apoios da passarela. Cabe ressaltar, também, que as formas modais obtidas experimentalmente, mediante o emprego dos acelerômetros, coincidiram com boa precisão com aquelas geradas via análise modal numérica.

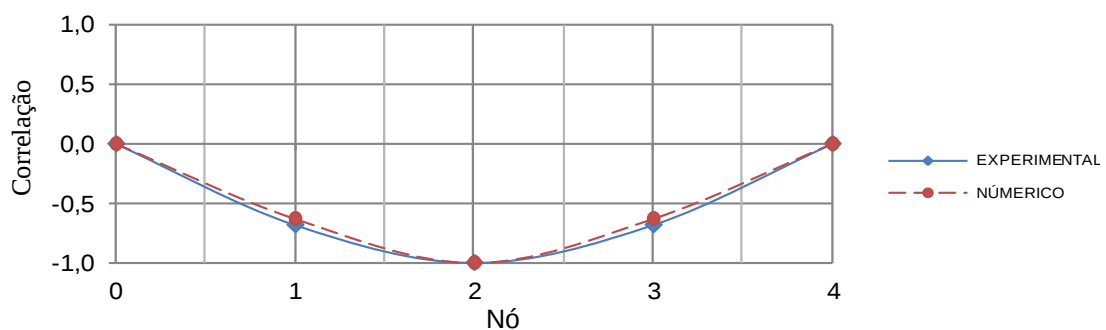


Figura 27. Comparação dos modos de vibração da estrutura: 1º Modo

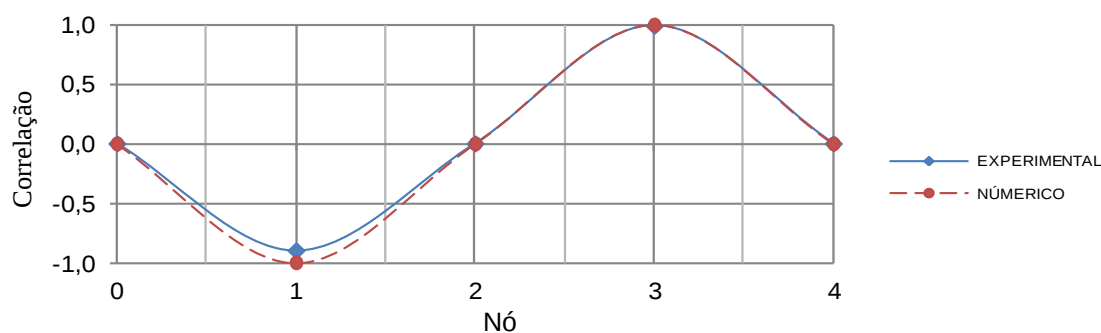


Figura 28. Comparação dos modos de vibração da estrutura: 2º Modo

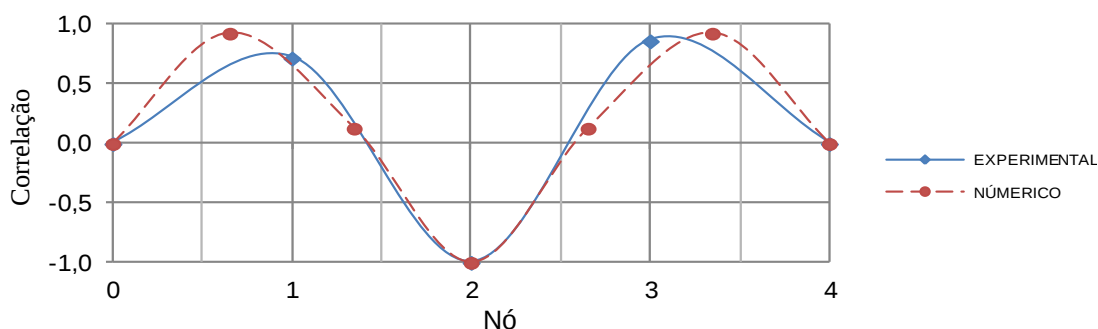


Figura 29. Comparação dos modos de vibração da estrutura: 3º Modo

6.2 Vibração forçada

Análises de vibração forçada foram realizadas através da utilização do programa computacional ANSYS (2010) via modelo de elementos finitos (ver item 2) com a utilização das acelerações de cada pedestre (conforme item 4). O modelo numérico computacional foi calibrado com os resultados experimentais das acelerações no domínio do tempo obtidos para o caminhar de um e de oito pedestres sobre a estrutura. A Tabela 3 apresenta um resumo das acelerações de pico encontradas em cada modelo e as Figs. 30 a 33 a sobreposição dos efeitos das acelerações no domínio do tempo e da frequência dos resultados experimentais e da resposta do modelo em elementos finitos (MEF).

Tabela 3. Aceleração de pico dos ensaios experimentais versus numéricos

Tipo de Caminhada	Critério	Aceleração de Pico a_p (m/s ²)		Erro %
		Experimental	ANSYS (2010)	
Uma Pessoa	Máximo	0,048	0,045	6,66
	Mínimo	0,047	0,052	10,64
Oito Pessoas	Máximo	0,048	0,048	0,00
	Mínimo	0,053	0,052	1,92

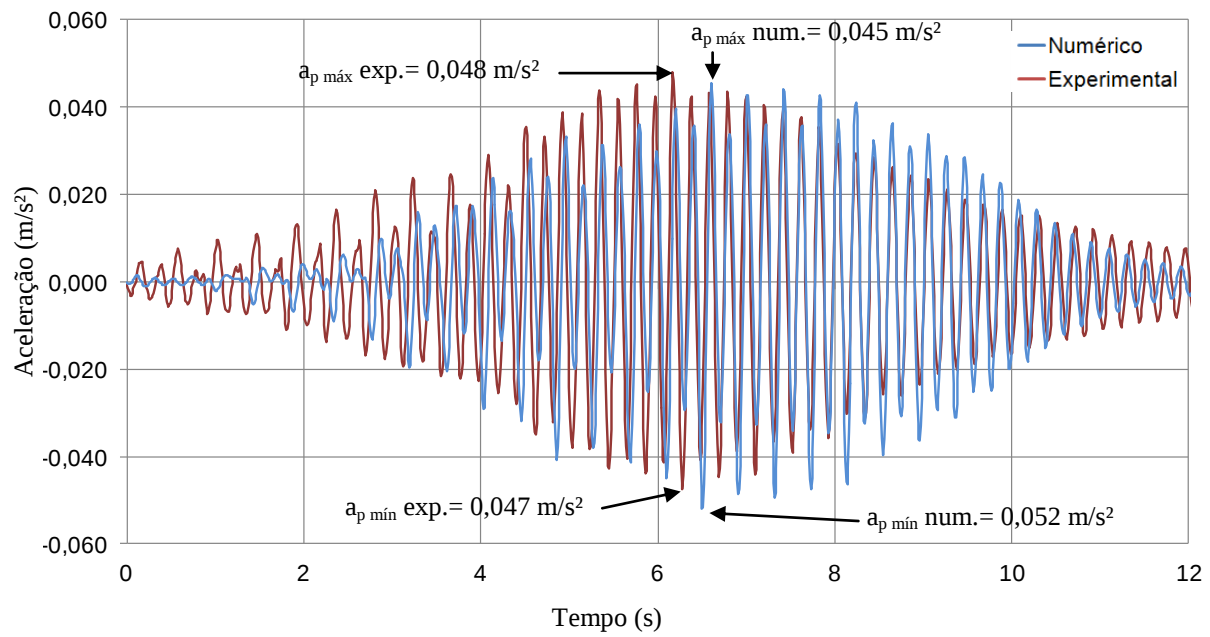


Figura 30. Aceleração vertical numérica no domínio do tempo versus experimental: Uma Pessoa

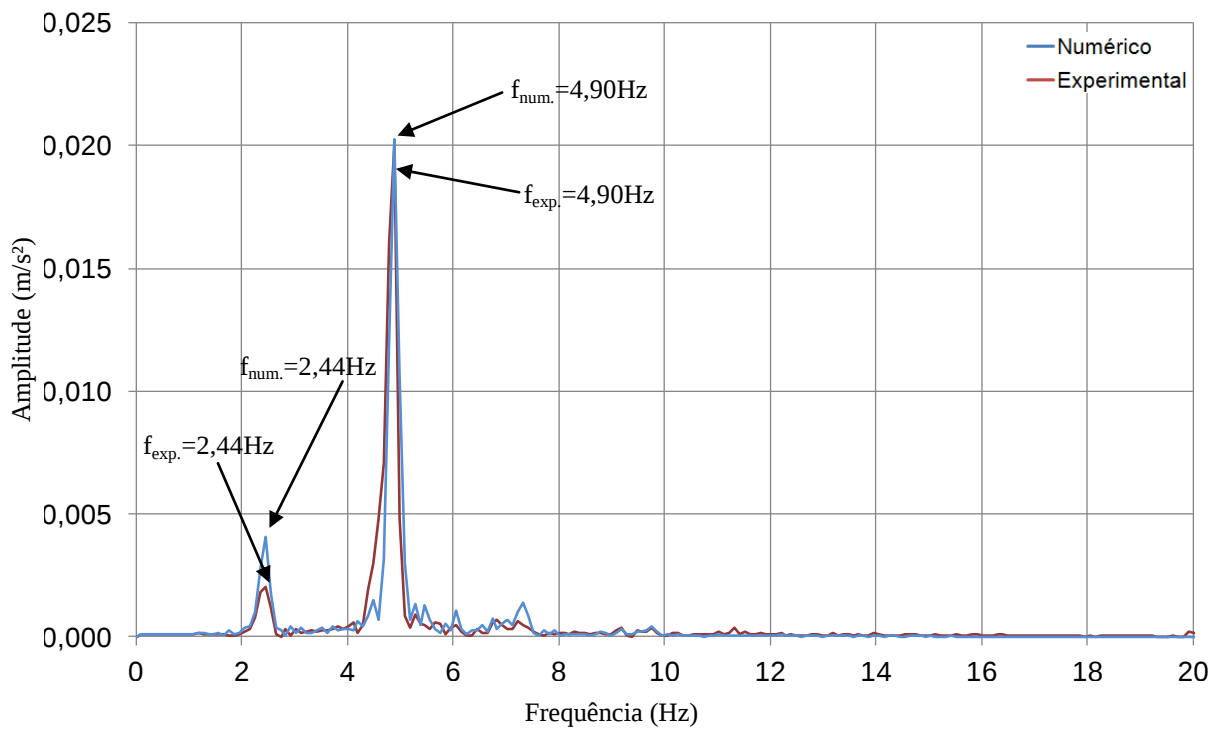


Figura 31. Aceleração vertical numérica no domínio da frequência versus experimental: Uma Pessoa

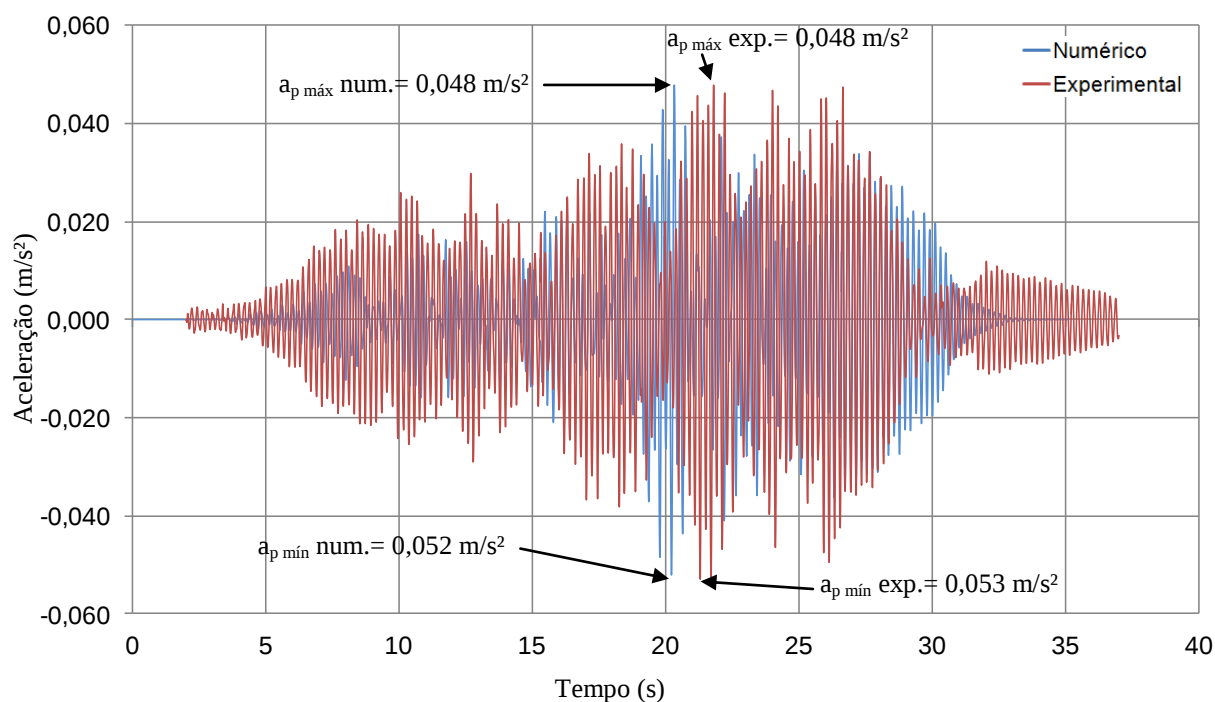


Figura 32. Aceleração vertical numérica no domínio do tempo versus experimental: Oito Pessoas

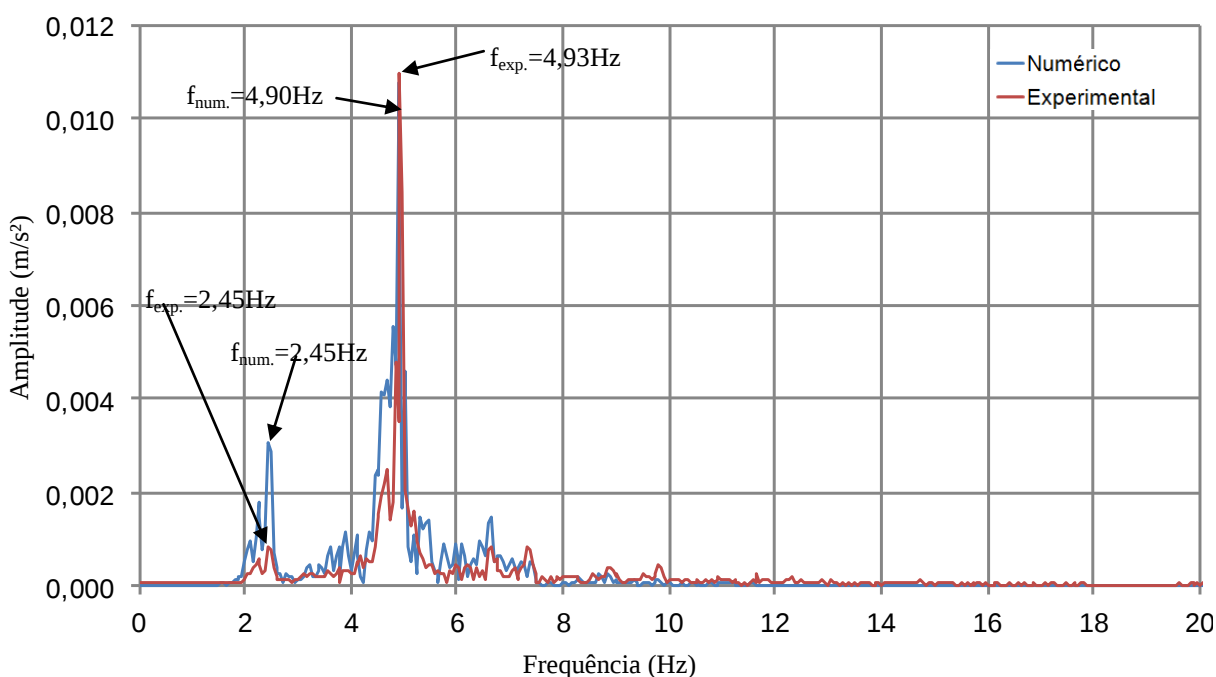


Figura 33. Aceleração vertical numérica no domínio da frequência versus experimental: Uma Pessoa

Analisando a Tabela 3 e comparando-se os valores das acelerações de pico pode-se perceber que o modelo estrutural em estudo encontra-se bem representado numericamente pelo modelo computacional desenvolvido, via método dos elementos finitos (ANSYS, 2010). As características dinâmicas do sistema estão bem representadas, pois o erro existente entre os valores numéricos e experimentais são pequenos, com diferenças de aproximação de 6,66% e 0,00% para os modelos de aceleração vertical para caminhar de um pedestre e de oito pedestres, respectivamente. A partir dos gráficos de comparação dos resultados dos testes experimentais e das respostas dos modelos numéricos (Figs. 30 a 33), pode-se observar que ambos os resultados tiveram o mesmo comportamento ao longo do tempo e da frequência, com picos de aceleração e de amplitude muito bem definidos. Demonstra-se que os testes experimentais foram bem representados pelos modelos em elementos finitos (MEF), salvo alguma diferença, devido à dificuldade de sincronismo dos pedestres com a frequência do passo, de manterem a mesma distância entre indivíduos ao longo de toda a travessia na estrutura e dos efeitos externos, como por exemplo, o vento e a vibração do prédio.

7 CONCLUSÕES

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

As análises modais e de vibração forçada da estrutura foram realizadas tanto experimentalmente quanto numericamente. A análise modal experimental da passarela foi realizada por monitorização dinâmica com acelerômetros instalados na laje de piso da estrutura, por um martelo de impacto Dytran, por um Shaker e por um dispositivo utilizando-se um sistema para aquisição de dados com base em vibrometria a laser (Portable Digital Vibrometer: PDV-100). A análise de vibração forçada da estrutura foi realizada por monitorização dinâmica com acelerômetros instalados no centro de gravidade dos pedestres e na laje de piso da estrutura. Em seguida, estes resultados experimentais foram calibrados a partir de um modelo numérico-computacional tridimensional, para o estudo do efeito da interação dinâmica do sistema pedestre-passearela, respaldada pelo emprego de modelos biodinâmicos (sistema massa-mola-amortecedor) simulando o caminhar humano.

Os coeficientes de amortecimento da passarela de concreto armado investigada foram obtidos experimentalmente, apresentando valores muito próximos, em todos os ensaios realizados. 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. Deste modo, os valores dos coeficientes de amortecimento estrutural obtidos foram iguais a 1,80% (Ensaio 1); 1,55% (Ensaio 2) e 1,80% (Ensaio 3) para o primeiro modo de vibração; 1,15% (Ensaio 1); 1,04% (Ensaio 2) e 1,12% (Ensaio 3) para o segundo modo de vibração e de 1,02% (Ensaio 1); 1,24% (Ensaio 2) e 0,86% (Ensaio 3) para o terceiro modo de vibração.

Os modelos de elementos finitos se mostraram calibrados em relação aos dados da análise modal experimental e de vibração forçada. Para a análise modal experimental as diferenças

máximas foram de 0,37% para a primeira frequência, de 10,72% para a segunda frequência e de 13,92% para a terceira frequência. A análise de vibração forçada apresenta diferenças de 6,66% e 0,00% para os modelos de aceleração vertical para caminhar de um e oito pedestres, respectivamente. A partir dos resultados experimentais e numéricos, a análise modal indicou que a primeira frequência natural da passarela de pedestres ($f_{01} = 4,88$ Hz) encontra-se na mesma frequência do caminhar humano quando considerados os demais harmônicos.

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. A partir desta calibração, pode-se então analisar, posteriormente, o efeito de outros tipos de carregamentos, baseados no caminhar humano, considerando então qualquer tipo de intravariabilidade e intervariabilidade do passo via modelo computacional (MEF).

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

- ANSYS, 2010. Swanson Analysis Systems, Inc., P.O. Box 65, Johnson Road, Houston, PA, 15342-0065, Version 12.0, *Basic analysis procedures*, Second edition.
- Brandt, A., 2011. *Noise and vibration analysis – Signal analysis and experimental procedures*. 1st ed. John Wiley & Sons, Inc.
- Cunha, A., Caetano, E., 2006. Experimental Modal Analysis of Civil Engineering Structures. *Sound and Vibration*, V. 40 (6): 12-20.
- Debona, G. L., 2016. “*Monitoração Experimental e Modelagem Numérica sobre a Resposta Estrutural Dinâmica de Passarelas de Pedestres*”. Tese de doutorado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, PGECIV. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ. Rio de Janeiro/RJ, Brasil.
- HiVoSS, 2008. *Research Fund for Coal and Steel*. Design of footbridges.
- Murray, T.M., Allen, D.E., Ungar E.E., 2003. *Floor Vibrations due to Human Activity*. Steel Design Guide Series. American Institute of Steel Construction, AISC.
- Nimmena, K. V., Lombaerta, G., Roecka, G. D., Broeck P. V. D., 2014. Vibration serviceability of footbridges: Evaluation of the current codes of practice. *Engineering Structures*, 59: 448-461.
- Prislan R., 2008. *Laser doppler vibrometry and modal testing*. University of Ljubljana.
- Sétra, 2006. *Guide méthodologique passerelles piétonnes (Technical guide footbridges: Assessment of vibrational behaviour of footbridges under pedestrian loading)*.
- Živanović, S., Pavic, A., Reynolds, P., 2006. Modal testing and finite element model tuning of a lively footbridge structure. *Engineering Structures*, 28 (6): 857-868.