



MODELAGEM NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DO CAMINHAR HUMANO SOBRE PASSARELAS DE PEDESTRES

Gilvan Lunz Debona

Pedro Vieira de Souza Junior

gilvanld@yahoo.com.br

pedro84_souza@hotmail.com

Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, PGE CIV/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. *O objetivo deste trabalho de pesquisa diz respeito ao desenvolvimento de uma metodologia de análise com base na realização de testes experimentais e modelagem numérica, no que tange avaliação da resposta estrutural dinâmica de passarelas de pedestres, a partir do emprego de modelos biodinâmicos acoplados, levando-se em consideração as características dinâmicas dos pedestres (massa, rigidez e amortecimento). O sistema estrutural em estudo tem como base uma passarela com 24,4 m de comprimento, localizada na Faculdade de Engenharia (FEN) da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Rio de Janeiro/RJ, Brasil. Para a modelagem numérica do sistema são empregadas técnicas usuais de discretização, via método dos elementos finitos (MEF), por meio do programa ANSYS. Inúmeros testes experimentais foram realizados sobre o modelo estrutural, de maneira a calibrar os resultados numéricos. Com base na metodologia de análise desenvolvida neste estudo, a resposta dinâmica da passarela investigada (frequências naturais e acelerações de pico) é comparada com os valores limites propostos por normas e recomendações de projeto, objetivando uma avaliação do desempenho da estrutura, no que diz respeito ao conforto humano e, também, ao problema de vibrações excessivas.*

Palavras-chave: *Passarelas de pedestres, Modelos biodinâmicos, Testes experimentais.*

1 INTRODUÇÃO

Alguns autores têm se dedicados a novas pesquisas no âmbito da questão do conforto humano em estruturas civis, principalmente em estruturas de passarelas de pedestres, tais como Debona (2016), Cunha e Caetano (2006), Živanović et al. (2006) e Nimmema 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. Devido ao avanço tecnológico no campo de materiais, estas estruturas estão cada vez mais esbeltas, leves e com baixo amortecimento, ocasionando facilmente as estruturas a um nível de frequência ressonante ao caminhar dos seres humanos e aumentando o desconforto dos pedestres.

Embora 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), há uma falta de atenção em relação à avaliação e a validação experimental das características dinâmicas das estruturas (Nimmema 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 (Nimmema et al., 2014).

O presente trabalho tem como objetivo investigar o comportamento dinâmico de 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. Assim, 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). 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). A resposta dinâmica do sistema estrutural, em termos de acelerações de pico, foi obtida e comparada com os valores limites propostos por diversos autores e padrões de projeto (SÉTRA, 2006; Murray et al., 2003).

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.

A estrutura de concreto armado apresenta uma resistência à compressão (f_{ck}) especificada de 14 MPa, módulo de elasticidade 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 66200 kg.



Figura 1. Passarela investigada: vista lateral



a) Vista frontal



b) Detalhe do apoio

Figura 2. Passarela investigada

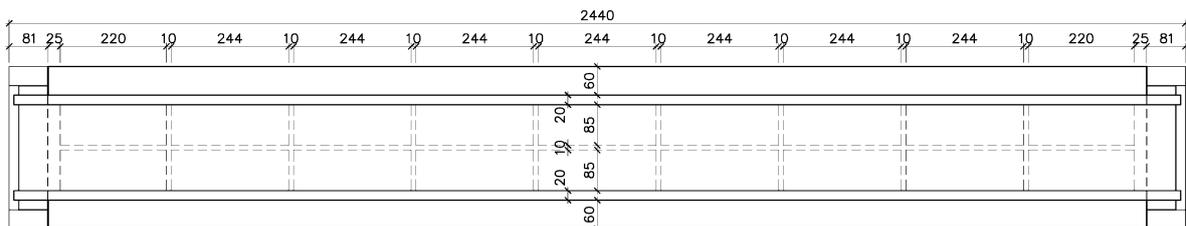


Figura 3. Projeto estrutural: planta. Dimensões em (cm)

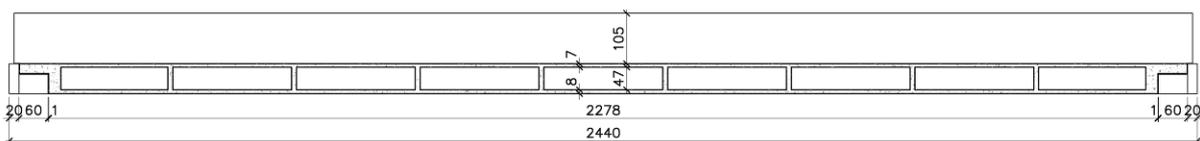


Figura 4. Projeto estrutural: corte longitudinal típico. Dimensões em (cm)

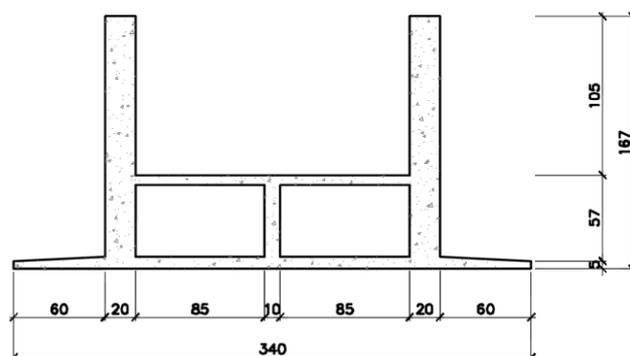


Figura 5. Projeto estrutural: corte transversal típico. Dimensões em (cm)

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 nas Figs. 6 a 8.

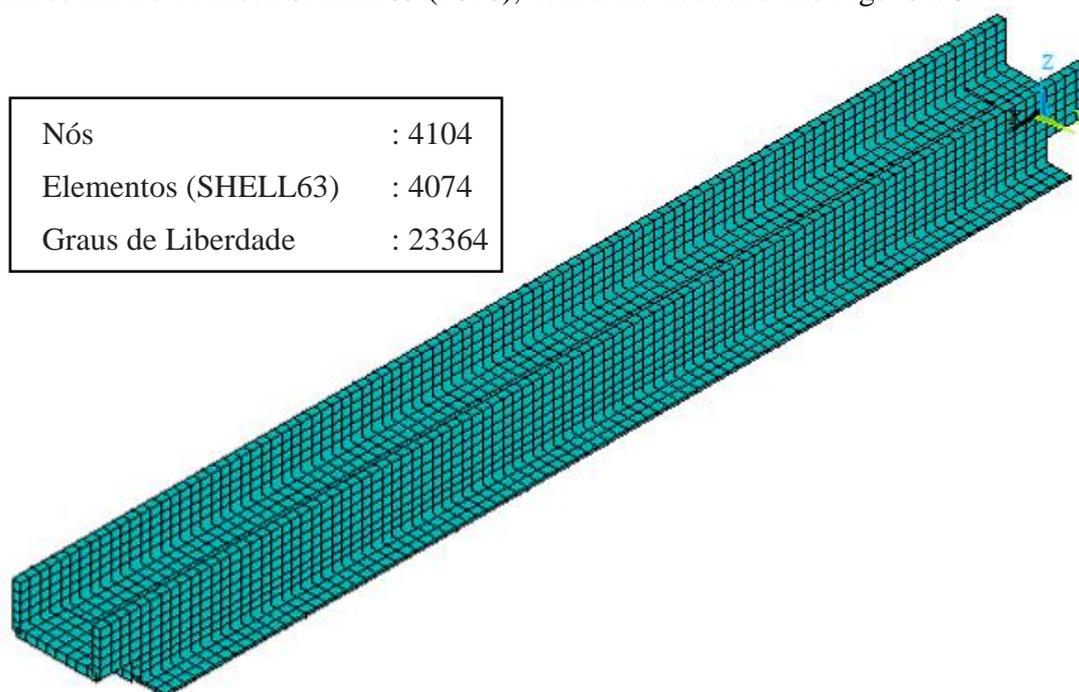


Figura 6. Modelo em elementos finitos – vista 3D

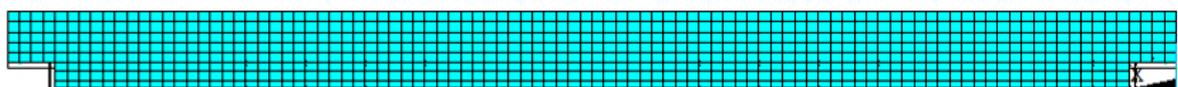


Figura 7. Modelo em elementos finitos – vista lateral

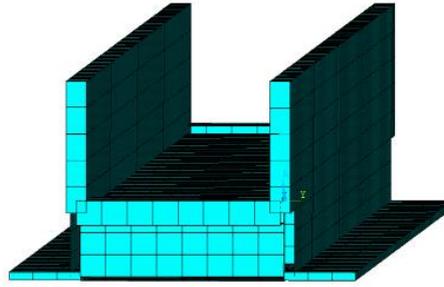


Figura 8. Modelo em elementos finitos – vista frontal

4 ANÁLISE MODAL EXPERIMENTAL

A análise modal experimental da passarela estudada foi conduzida por monitorização dinâmica através de acelerômetros instalados na estrutura, bem como por um dispositivo para aquisição de dados com base em vibrometria a laser (Portable Digital Vibrometer: PDV-100).

Nesse sentido, foram utilizadas duas técnicas de ensaio 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 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. 9). 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.

Em seguida, foi realizado um ensaio de 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. 10 e 11. 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).

Antes da realização do teste experimental modal, o produto modal numérico dos modos de vibração foi obtido, de modo a se ter o melhor ponto comum da estrutura onde o martelo de impacto possa excitar a maioria dos modos de vibração. Depois disso, seis pontos foram

escolhidos nesta análise, como ilustrado na Fig. 12, com o objetivo de obter as funções de resposta em frequência (FRF) da passarela investigada.

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, apresentada nas Figs. 13 a 15 (ADS-2002). É importante ressaltar que uma vez que a carga de impacto do pulso não foi mensurada, 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. As Figs. 16 a 18 apresentam as respostas FRF do sistema do vibrômetro a laser (PDV-100). Vale a pena lembrar 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. Os coeficientes de amortecimentos modais da estrutura relativos aos três primeiros modos de flexão foram obtidos pelo método de decremento logarítmico, sendo, respectivamente, iguais a 1,80% (1º modo), 1,15% (2º modo) e 1,02% (3º modo).

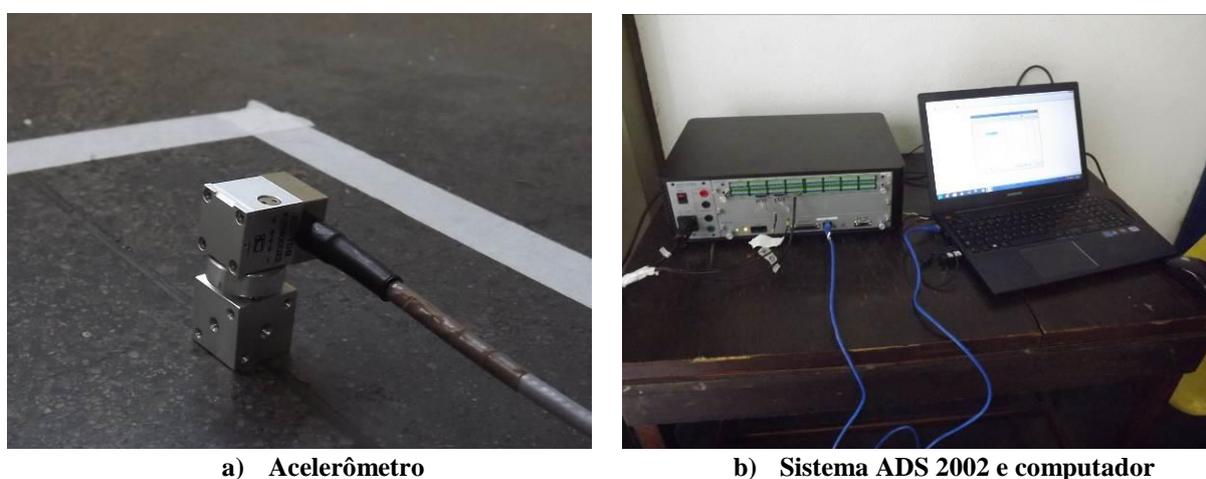


Figura 9. Sistema de aquisição ADS 2002 conectado a acelerômetros

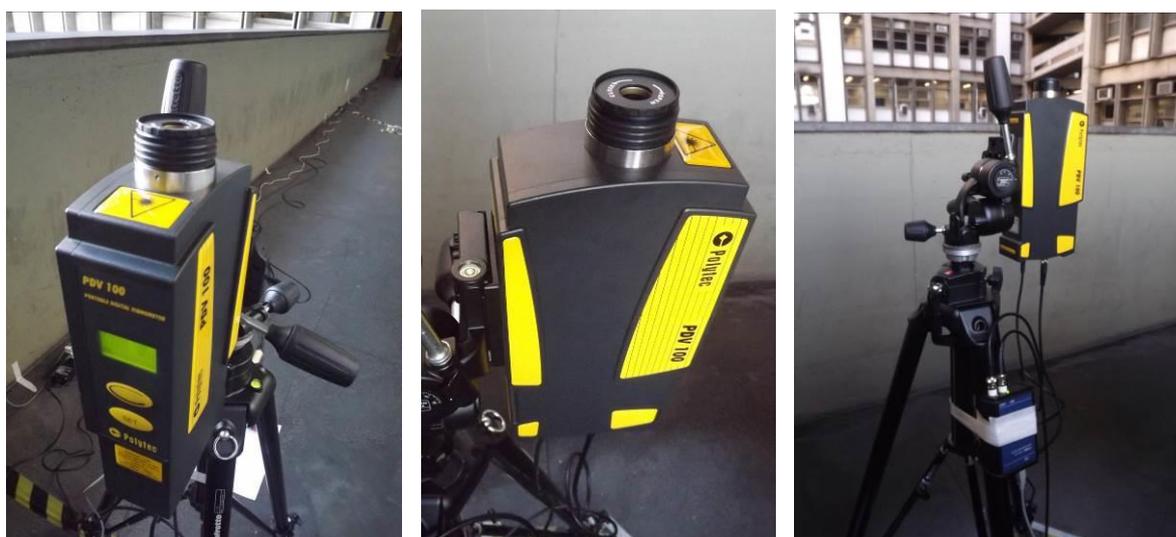


Figura 10. Vibrômetro a laser Polytec (Portable Digital Vibrometer: PDV-100)



Figura 11. Martelo de impacto Dytran

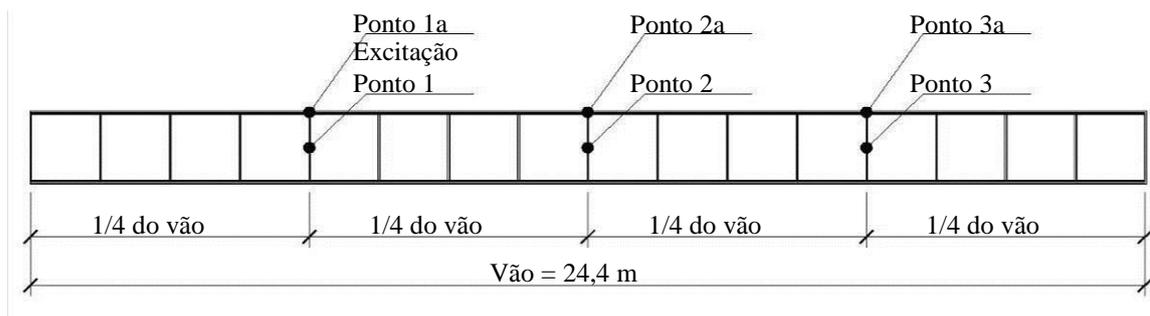


Figura 12. Pontos de medição da passarela investigada. Dimensões em (m)

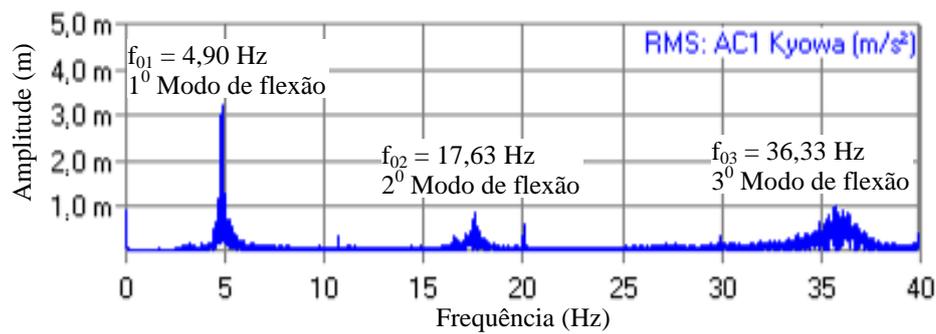


Figura 13. ADS 2002: Espectro de resposta da vibração da estrutura no ponto 1 (1/4 do vão)

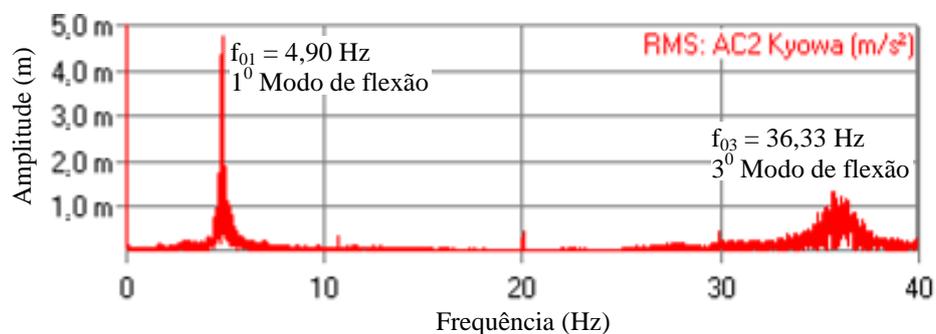


Figura 14. ADS 2002: Espectro de resposta da vibração da estrutura no ponto 2 (1/2 do vão)

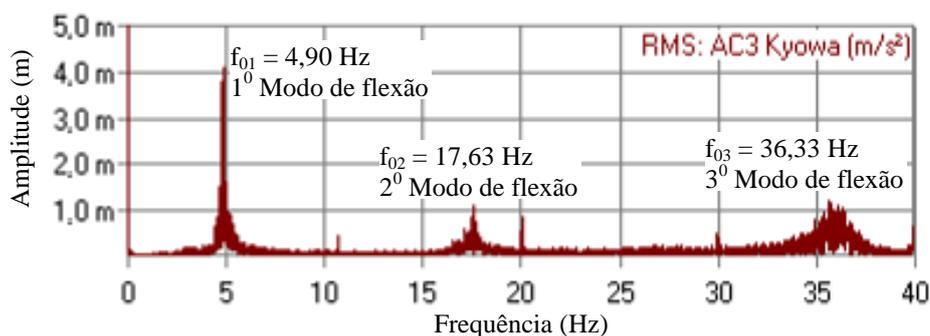


Figura 15. ADS 2002: Espectro de resposta da vibração da estrutura no ponto 3 (3/4 do vão)

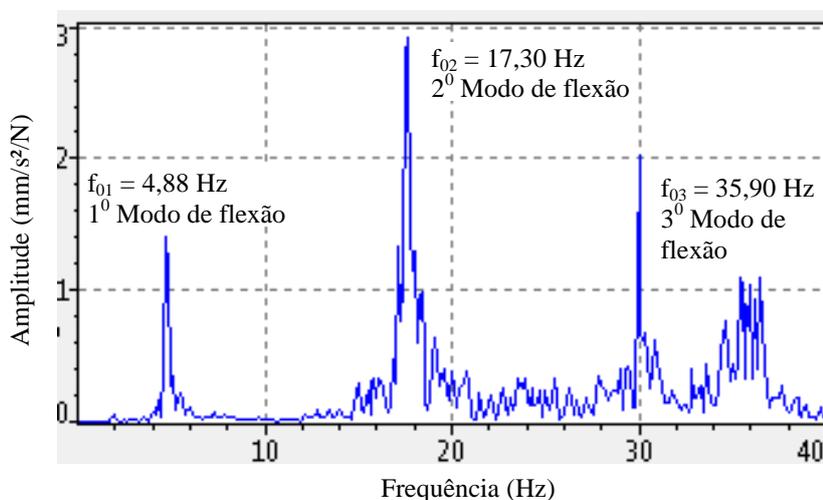


Figura 16. PDV-100: FRF no ponto 1 (1/4 do vão)

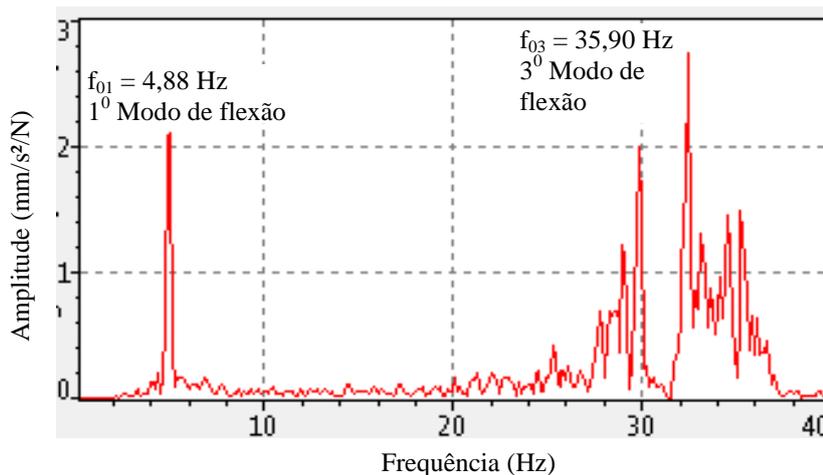


Figura 17. PDV-100: FRF no ponto 2 (1/2 do vão)

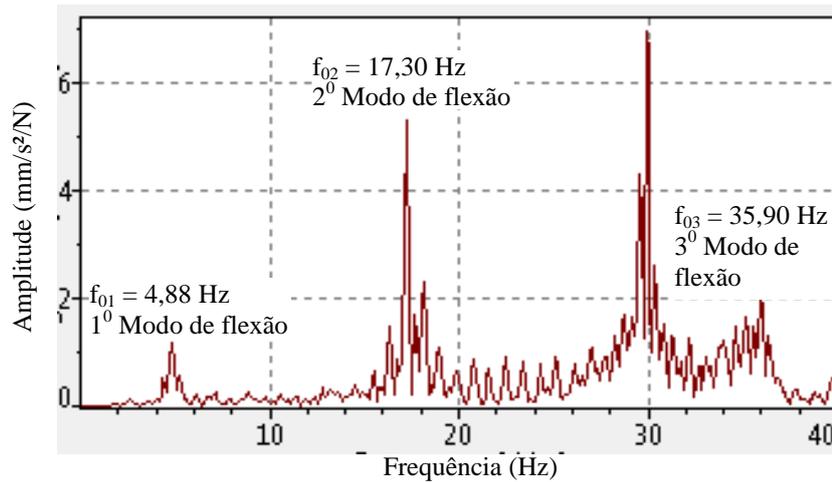


Figura 18. PDV-100: FRF no ponto 3 (3/4 do vão)

Analisando os resultados apresentados nas Figs. 13 a 18, nota-se é que possível identificar os três picos de principais de frequência correspondentes aos três modos verticais de vibração da estrutura apresentaram para ambos os ensaios realizados. Observa-se que o segundo modo de vibração não se manifesta nas leituras observadas nas Figs. 14 e 17, 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, quando comparado aos demais gráficos (Figs. 13 a 18), como era de se esperar.

5 ANÁLISE DAS FREQUÊNCIAS NATURAIS E MODOS DE VIBRAÇÃO DO SISTEMA

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 1 e as Figs. 19 a 21.

Com base nos resultados da Tabela 1, pode-se observar que os resultados experimentais obtidos apresentaram uma boa concordância entre si, bem como para os resultados numéricos. 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.

Tabela 1. Frequências naturais da passarela investigada

Frequência natural	MEF (Hz)	Experimental (Hz)		Diferença (%)	
		ADS 2002	PDV 100	ADS 2002	PDV 100
f_{01}	4,898	4,900	4,880	0,04	0,37
f_{02}	15,923	17,630	17,300	10,72	8,65
f_{03}	32,154	36,330	35,900	12,99	11,65

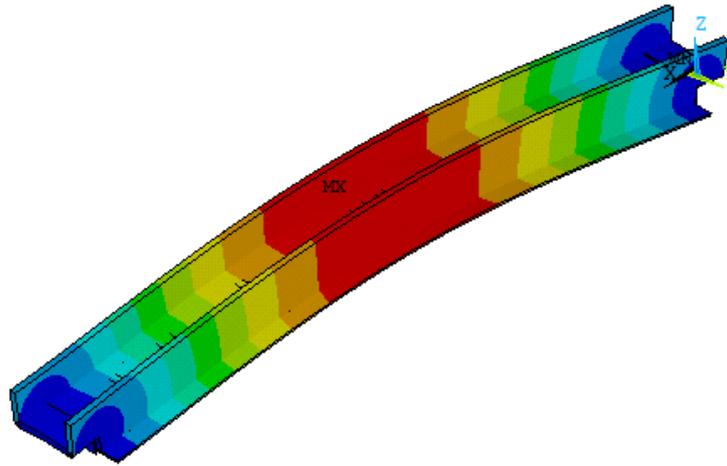


Figura 19. Modo de vibração relativo à 1ª frequência natural vertical (f_{01})

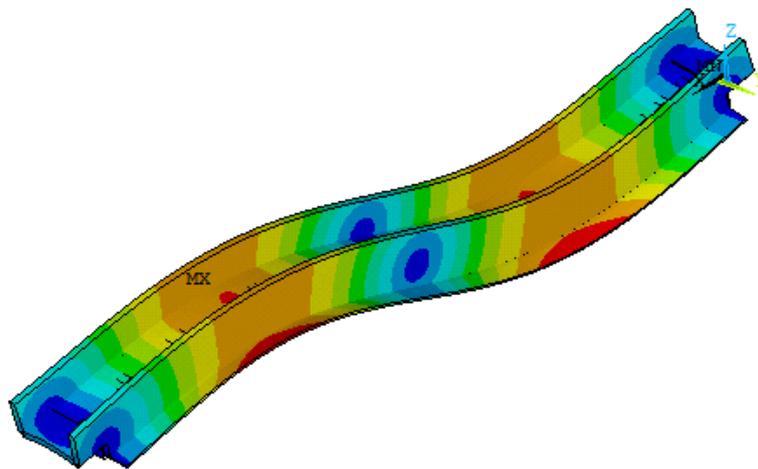


Figura 20. Modo de vibração relativo à 2ª frequência natural vertical (f_{02})

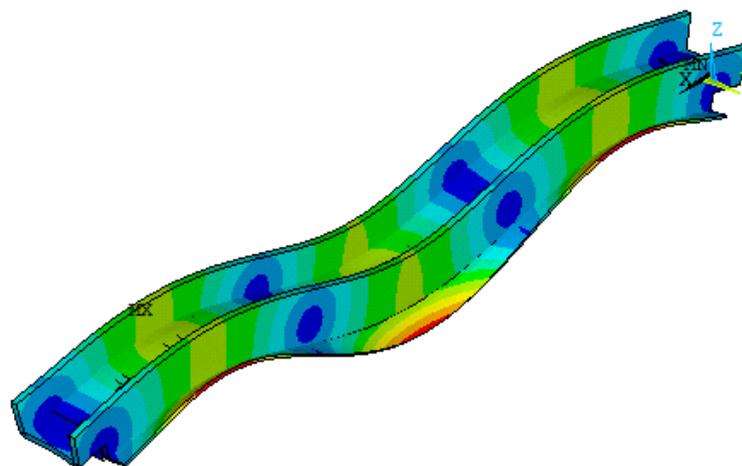


Figura 21. Modo de vibração relativo à 3ª frequência natural vertical (f_{03})

6 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. 22) e da estrutura (ponto 2, ver Fig. 12). Os resultados experimentais são ilustrados nas Figs. 23 a 28.

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 da 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 22. Placa com acelerômetro acoplados 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, ver Tabela 1).

Os resultados obtidos a partir dos ensaios experimentais são mostrados nas Figs. 23 a 28, 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. 12). Deve ser enfatizado que o índice "m" no eixos verticais das Figs. 23 a 28, 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 23. Teste experimental com um pedestres caminhando ($f=2,45$ Hz: ressonância)

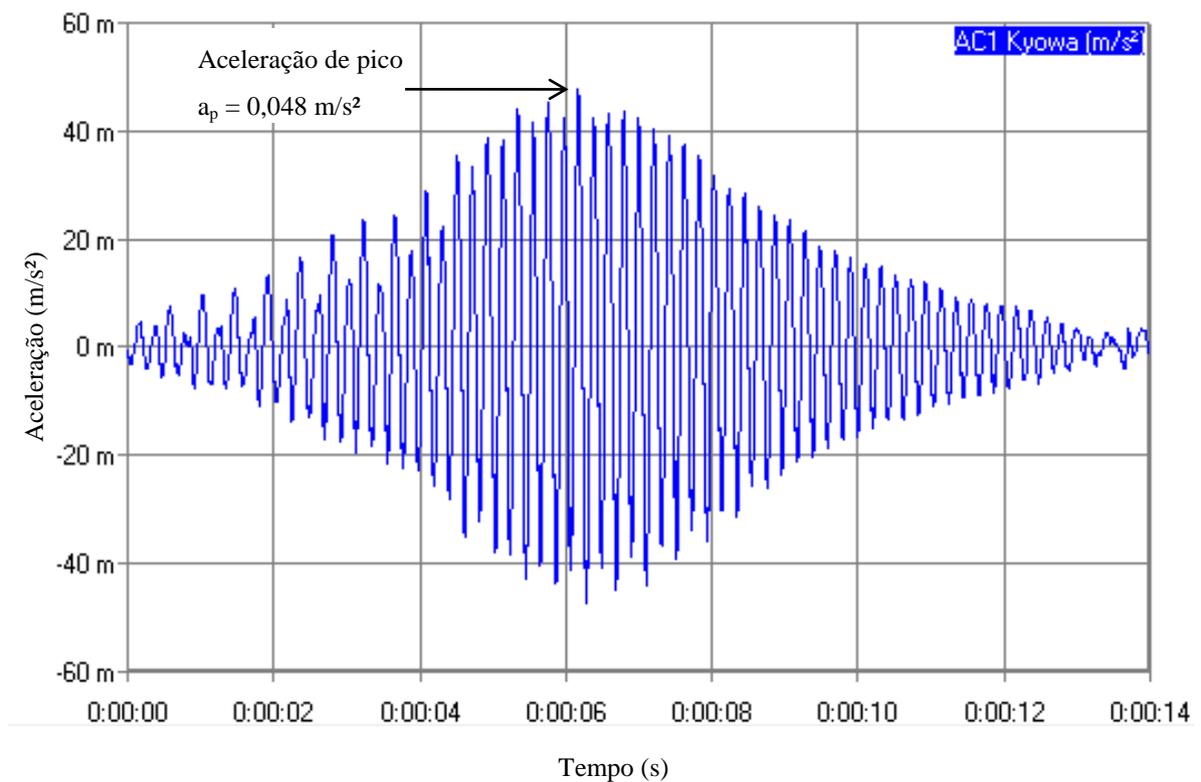


Figura 24. Aceleração vertical da estrutura no domínio do tempo devido a um pedestre caminhando ($f=2,45$ Hz: ressonância): 1/2 do vão

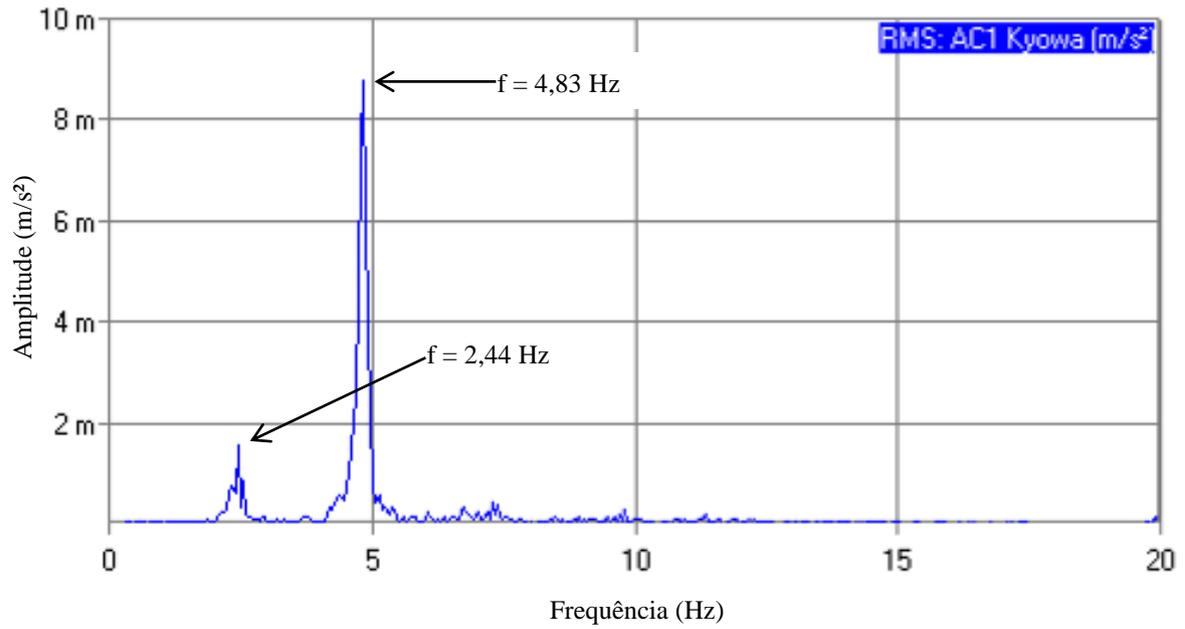


Figura 25. Aceleração vertical da estrutura no domínio da frequência devido a um pedestre caminhando ($f=2,45$ Hz: ressonância): 1/2 do vão

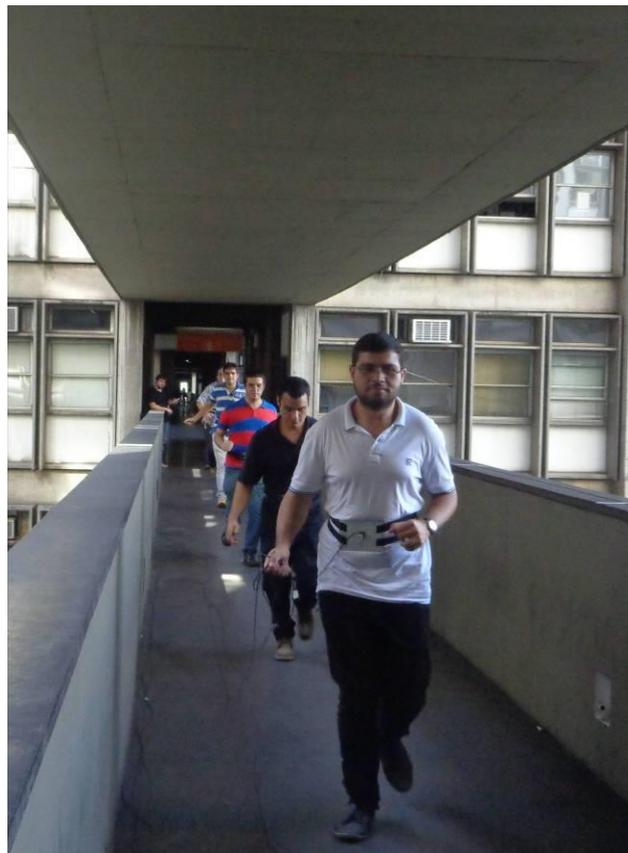


Figura 26. Teste experimental com oito pedestres caminhando ($f=2,45$ Hz: ressonância)

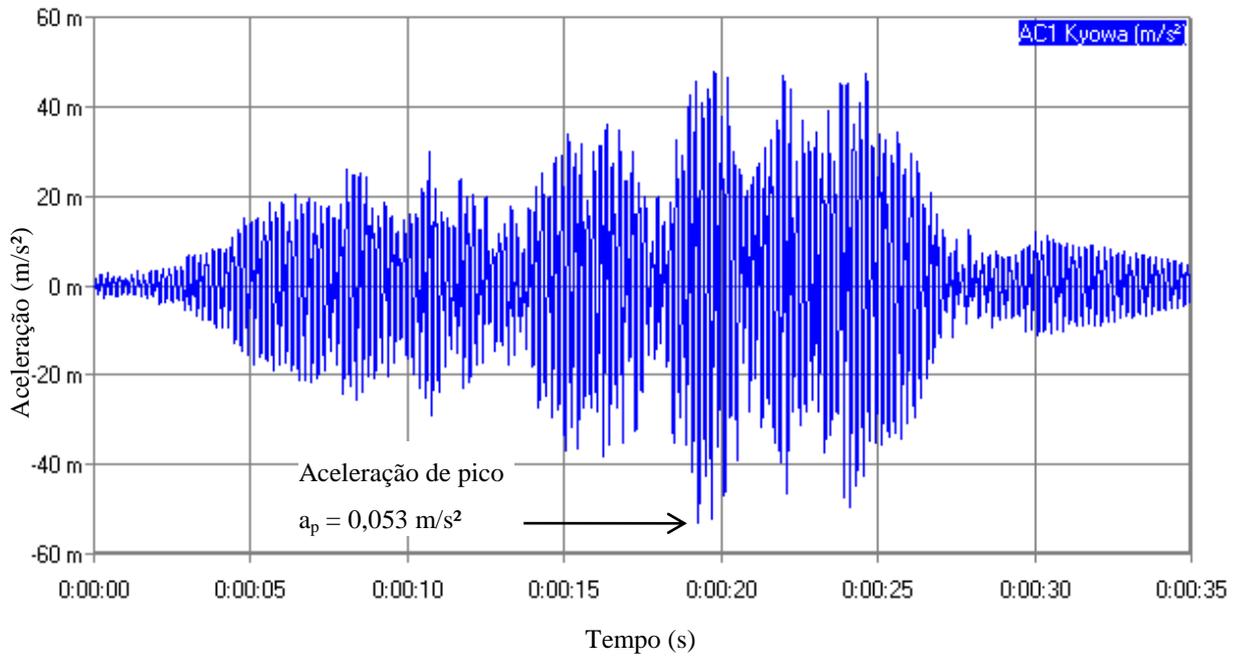


Figura 27. Aceleração vertical experimental da estrutura no domínio do tempo devido a oito pedestres caminhando ($f=2,45$ Hz: ressonância): 1/2 do vão

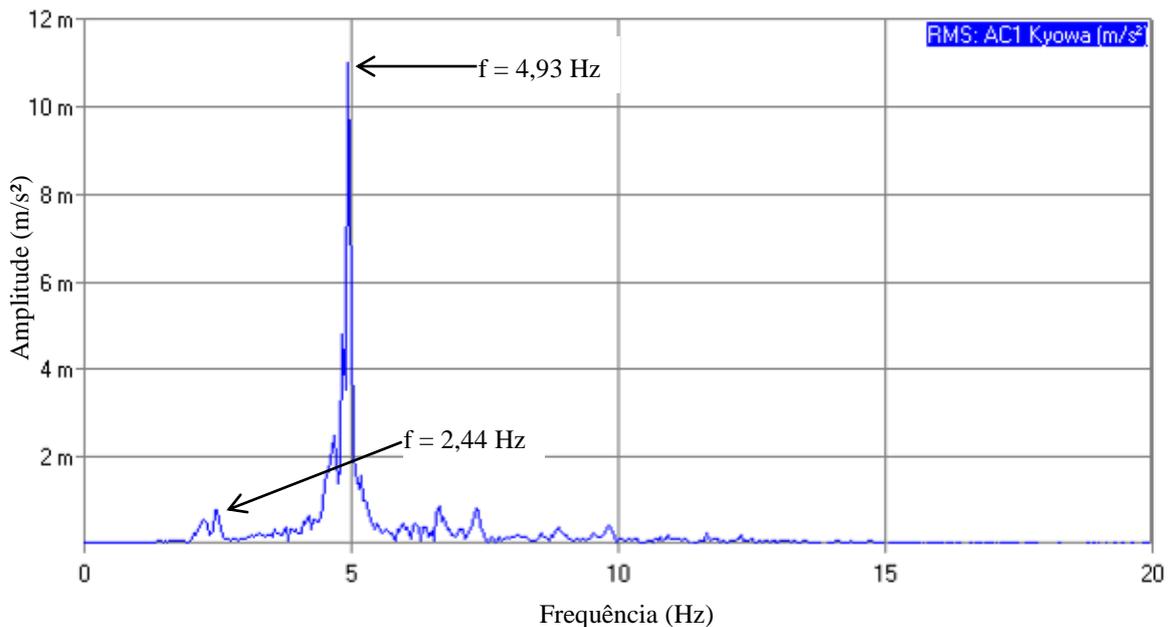


Figura 28. Aceleração vertical experimental da estrutura no domínio da frequência devido a oito pedestres caminhando ($f=2,45$ Hz: ressonância): 1/2 do vão

Analisando as Figs. 23 a 28 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”.

7 CALIBRAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

São realizadas análises de vibração forçada através da utilização do programa computacional ANSYS (2010) via modelo de elementos finitos (ver item 3) com a utilização das acelerações de cada pedestre (conforme detalhado no item anterior). As Figs. 29 e 31 mostram as acelerações no domínio do tempo, respectivamente, de um e de oito pedestres caminhando sobre a estrutura do modelo numérico estudado.

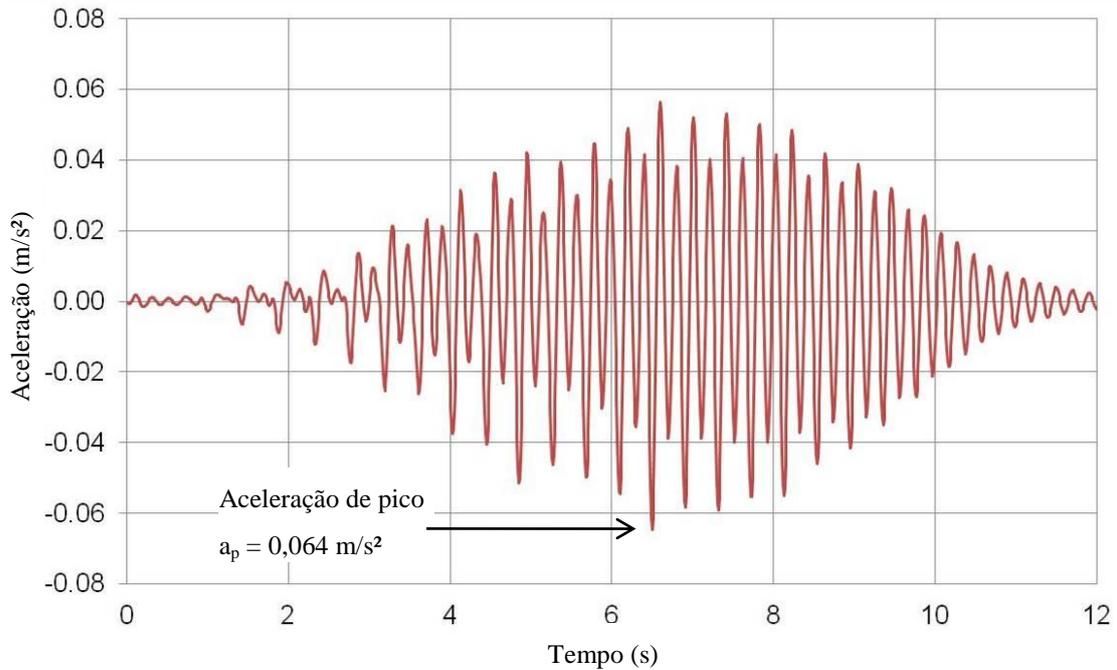


Figura 29. Aceleração vertical numérica da estrutura no domínio do tempo devido a um pedestre caminhando ($f=2,45$ Hz: ressonância): 1/2 do vão

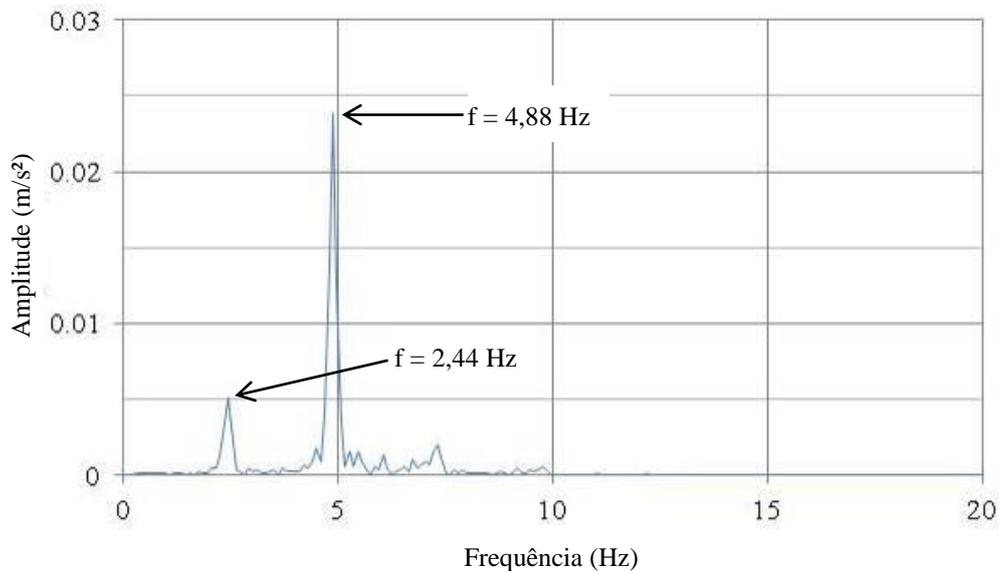


Figura 30. Aceleração vertical numérica da estrutura no domínio da frequência devido a um pedestre caminhando ($f=2,45$ Hz: ressonância): 1/2 do vão

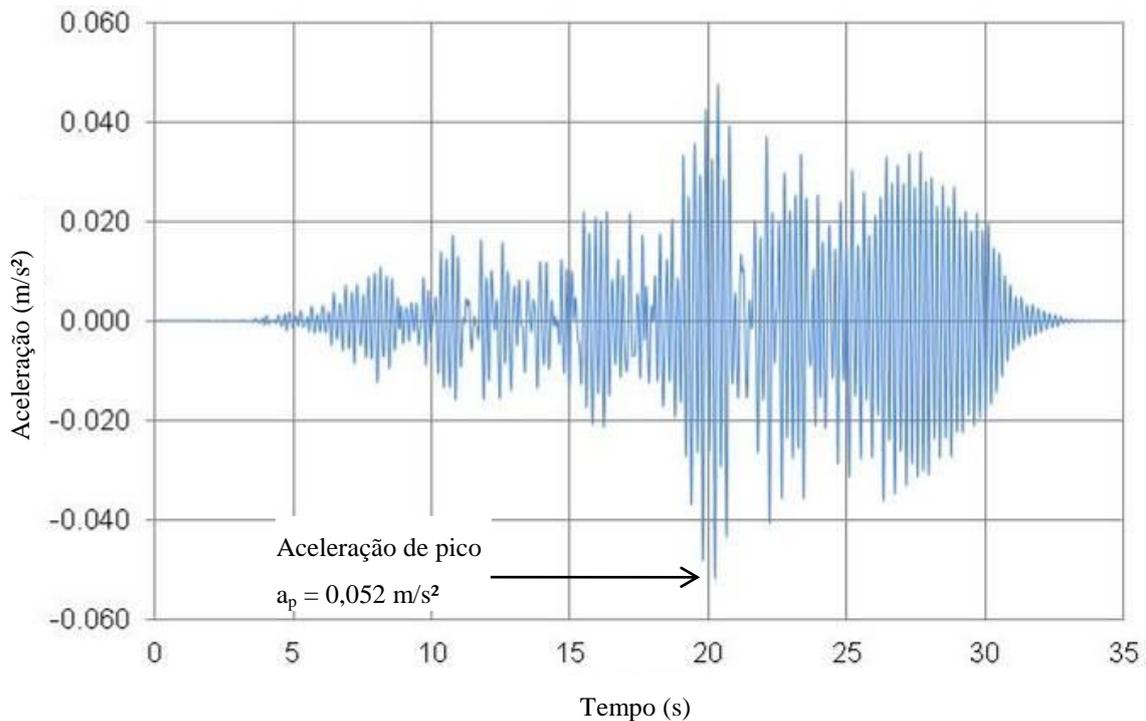


Figura 31. Aceleração vertical numérica da estrutura no domínio do tempo devido a oito pedestres caminhando ($f=2,45$ Hz: ressonância): 1/2 do vão

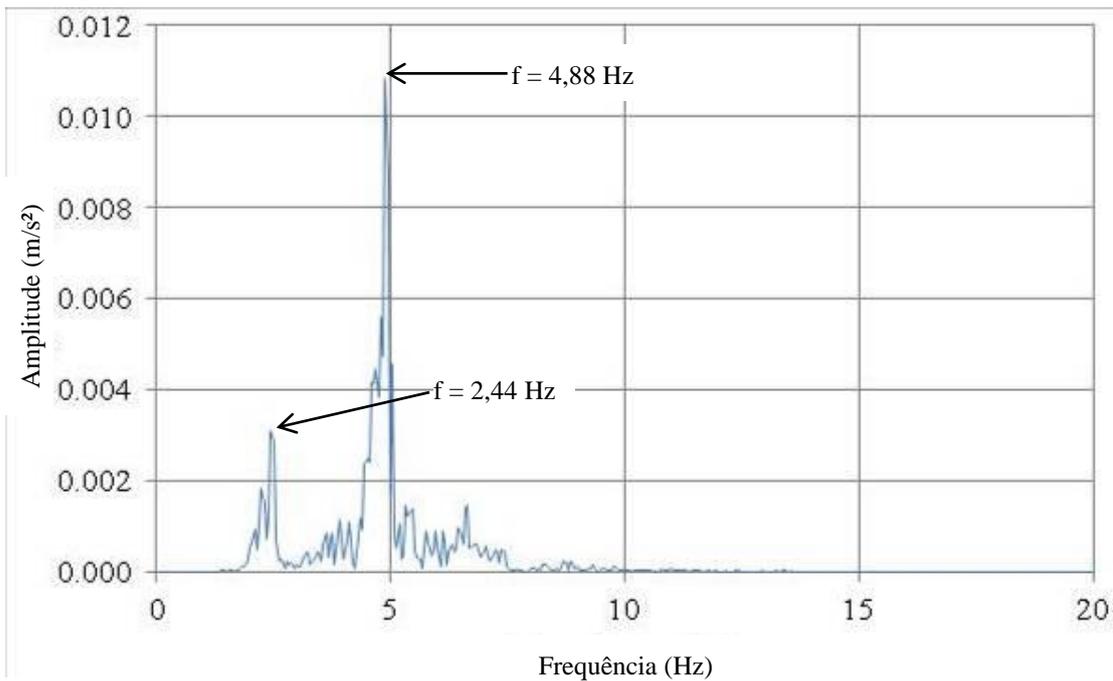
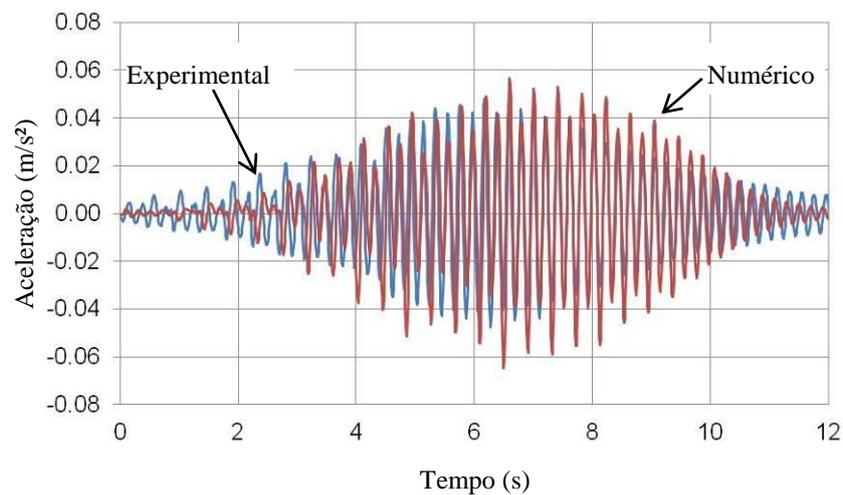
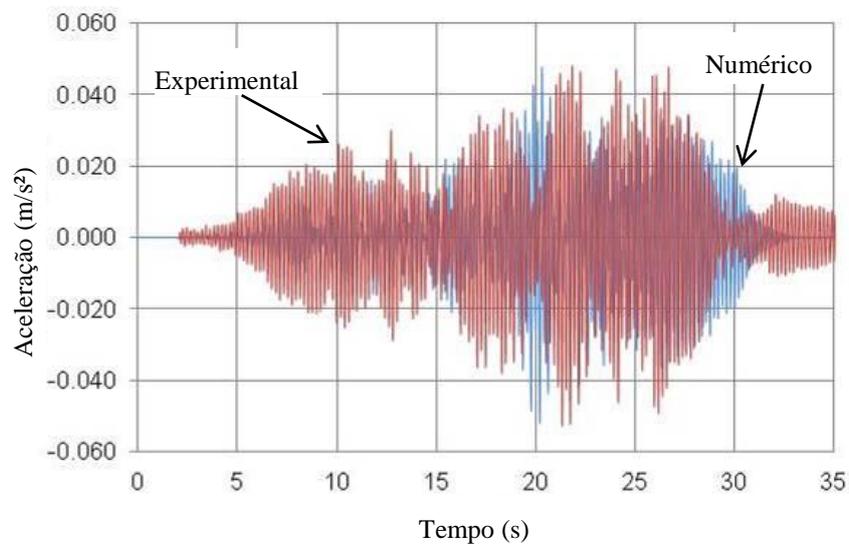


Figura 32. Aceleração vertical numérica da estrutura no domínio da frequência devido a oito pedestres caminhando ($f=2,45$ Hz: ressonância): 1/2 do vão

Os resultados encontrados foram confrontados com os resultados experimentais obtidos na estrutura estudada e resumidos conforme a Tabela 2. As Figs. 33 e 34 mostram a sobreposição dos efeitos das acelerações no domínio do tempo dos resultados experimentais e da resposta do modelo em elementos finitos (FEM).

Tabela 2. 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	0,056	16,66
	Mínimo	0,047	0,065	38,30
Oito Pessoas	Máximo	0,048	0,048	0,00
	Mínimo	0,053	0,052	1,92

**Figura 33. Aceleração vertical numérica versus experimental: Uma Pessoa****Figura 34. Aceleração vertical numérica versus experimental: Oito Pessoas**

Analisando a Tabela 2 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 16,66% 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. 33 e 34), pode-se observar que ambos os resultados tiveram o mesmo comportamento ao longo do tempo, com picos de aceleração 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.

8 ANÁLISE DO CONFORTO HUMANO

Pretende-se verificar a adequabilidade da passarela quando submetida ao caminhar humano, no que tange ao desconforto relacionado a vibrações. Deste modo, os valores das acelerações máximas, dos modelos de carregamento descritos anteriormente (item 6), são comparados com os valores limites propostos na literatura técnica (Sétra, 2006; Murray et al, 2003). O ponto da estrutura analisado corresponde à seção central do vão da passarela (ponto 2, Fig. 12). Os resultados experimentais e numéricos da caminhada dos pedestres obtidos pelos ensaios estão resumidos na Tabela 3.

O guia de projeto Sétra (2006) propõe uma metodologia para análise da resposta dinâmica de estruturas considerando os efeitos dinâmicos do fluxo de pedestres caminhando aleatoriamente sobre passarelas. Devido à natureza subjetiva do conforto humano, o guia de projeto Sétra (2006) recomenda patamares de aceleração de pico para avaliação do nível do conforto humano. Em ordem crescente, as três primeiras faixas correspondem ao nível máximo, médio e mínimo de conforto humano, sendo o último correspondente a um nível de aceleração não aceitável. O guia de projeto AISC (Murray et al, 2003) tem como objetivo básico fornecer os princípios básicos e ferramentas simples de análise para avaliar sistemas de pisos e passarelas submetidas a atividades humanas, estipulando o limite de $0,15 \text{ m/s}^2$ entre o aceitável e não aceitável, para passarelas internas.

Tabela 3. Aceleração de pico dos ensaios experimentais

Tipo de Caminhada		Aceleração de Pico $a_p \text{ (m/s}^2\text{)}$	Critério de Conforto Humano	
			Sétra*	AISC**
1 Pedestre	Experimental	0,048	Máximo	Aceitável
	Numérico	0,065	Máximo	Aceitável
8 Pedestres	Experimental	0,053	Máximo	Aceitável
	Numérico	0,052	Máximo	Aceitável

* Conforto máximo para aceleração de pico de 0,0 a $0,5 \text{ m/s}^2$

** $a_{lim} = 1,5\% g = 0,15 \text{ m/s}^2$: passarela interna

Pode ser observado a partir dos resultados da Tabela 3 que os critérios de conforto humano propostos pela guia Sétra (2006) e pelo guia de projeto AISC (Murray et al., 2003) foram satisfeitos para todas as situações do caminhar humano, isso significa que os valores de aceleração de pico experimentais encontram-se dentro dos limites de 0,0 a 0,5 m/s² (o que corresponde a um máximo conforto humano) e abaixo do limite de aceleração de pico de 0,15 m/s² para passarelas internas, respectivamente. No entanto, é interessante ressaltar que uma pessoa em pé pode notar um valor de aceleração de pico igual a 0,034 m/s² e 0,100 m/s² como apenas perceptível e claramente perceptível, respectivamente (Bachmann et al., 1995).

9 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, 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, desenvolvido via método dos elementos finitos, por meio do emprego do programa computacional ANSYS (2010), para o estudo do efeito da interação dinâmica do sistema pedestre-passearela, respaldada pelo emprego de modelos biodinâmicos (sistema massa-mola-amortecedor), empregados para a simulação do caminhar humano.

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, do ADS2002 e do PDV respectivamente, são de 0,04% e 0,37% para a primeira frequência, de 10,72% e 8,65% para a segunda frequência e de 12,99% e 11,65% para a terceira frequência. Já a análise de vibração forçada apresenta diferenças de 16,66% e 0,00% para os modelos de aceleração vertical para caminhar de um e oito pedestres, respectivamente. A partir dos resultados experimentais, em relação às acelerações de pico, diante dos casos de carregamento dinâmicos investigados neste estudo, a passarela de pedestres analisada não viola os critérios de conforto humano ($a_p < a_{lim}$) propostos pela guia Sétra (2006) e pelo guia de projeto AISC (Murray et al., 2003).

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. Por consequência, um possível caso de movimento ressonante pode ser esperado.

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 da caminhada humana sobre passarelas, especialmente no que diz respeito aos valores das acelerações de pico. Deve-se destacar, também, 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, no que diz respeito ao caminhar dos pedestres (caminhada lenta, normal e rápida).

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.
- Bachmann, H., et al., 1995. *Vibration problems in structures - practical guidelines*. Basel (Switzerland):Institut für Baustatik und Konstruktion, Birkhäuser.
- 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., BroECKa 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: Assesment 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.