



AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL E NUMÉRICA SOBRE A RESPOSTA DINÂMICA DE PASSARELAS DE PEDESTRES

Gilvan Lunz Debona

Cássio Marques Rodrigues Gaspar

José Guilherme Santos da Silva

gilvanld@yahoo.com.br

cgaspac@yahoo.com.br

jgss@uerj.br

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

Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ

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

Wendell Diniz Varela

wendelldv@gmail.com

Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ

Pedro Calmon St., Nº 550, Ilha do Governador, 21941-901, Rio de Janeiro/RJ, Brasil

Resumo. *Este trabalho de pesquisa apresenta uma avaliação numérica e experimental sobre o modelo de uma passarela de pedestres, com 24,4m de vão, localizada no campus da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Rio de Janeiro/RJ, Brasil. Inicialmente, uma análise modal experimental foi conduzida, via monitorização dinâmica, através de acelerômetros instalados na estrutura e, em seguida, utilizando-se um sistema para aquisição de dados com base em vibrometria a laser. Um modelo numérico foi desenvolvido com base em técnicas de discretização, via método de elementos finitos, com base no emprego do programa ANSYS e calibrado com os resultados obtidos nos testes experimentais. Após o que, uma análise de vibração forçada foi realizada sobre a passarela, com base no emprego das cargas dinâmicas induzidas pelos pedestres, considerando-se dois tipos de carregamentos: o primeiro destina-se a excitar a passarela controlando o passo dos pedestres; o segundo é relacionado com a caminhada aleatória de pessoas, tal como ocorre durante a vida útil da estrutura. Finalmente, a resposta dinâmica da passarela é avaliada e o conforto humano é comparado com critérios estabelecidos em normas e recomendações de projeto.*

Palavras-chave: *Passarelas de pedestres, Análise modal experimental, Conforto humano*

1 INTRODUÇÃO

A questão do conforto humano de estruturas civis tem ganhado uma relevância importante por diversos pesquisadores (Debona, 2015; Cunha e Caetano, 2006; Živanović et al., 2006; Nimmena et al., 2014). Precisamente, em passarelas, tem-se notado que estas, em sua maioria, estão sendo construídas com frequências naturais na mesma faixa de frequência do caminhar humano e de seus harmônicos superiores. Este fato pode facilmente levar as estruturas a um estado de ressonância. Além disso, o avanço tecnológico no campo dos materiais tem permitido o uso de sistemas estruturais mais esbeltos, leves e com baixo amortecimento inerente, ocasionando para o aumento do desconforto humano dos pedestres (Nimmena et al., 2014).

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 (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).

Neste sentido, 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 da estrutura foi realizada com base em um sistema de aquisição de dados tradicional ADS-2002, fabricado pela LYNX Tecnologia Eletrônica, e também usando uma metodologia com vibrometria a laser (Portable Digital Vibrometer: PDV-100). Em seguida, o modelo numérico foi calibrado com os resultados experimentais, com base no método dos elementos finitos (FEM) utilizando o programa ANSYS (2010).

Esta investigação é realizada com base na correlação entre os resultados experimentais relacionados com a resposta dinâmica da passarela e aqueles obtidos com o modelo de elementos finitos. 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). Os valores de aceleração de pico encontrados indicam que a passarela analisada apresenta problemas relacionados ao conforto humano em apenas um caso quando os seus limites são comparados com os valores limites propostos pelo AISC (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

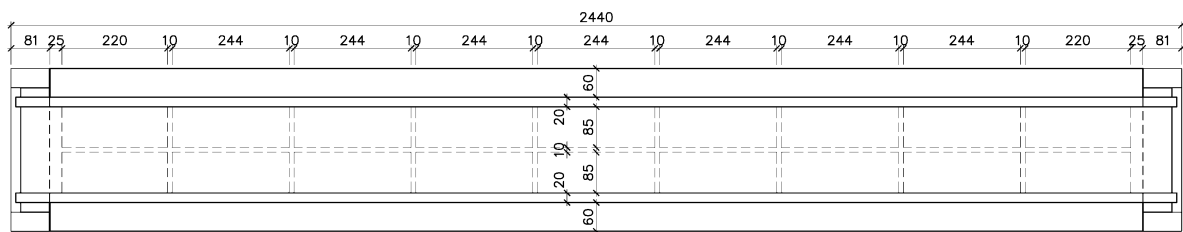


Figura 3. Projeto estrutural: planta. Dimensões em (cm)

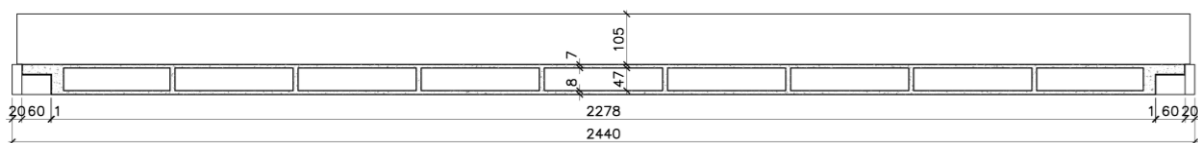


Figura 4. Projeto estrutural: corte longitudinal típico. Dimensões em (cm)

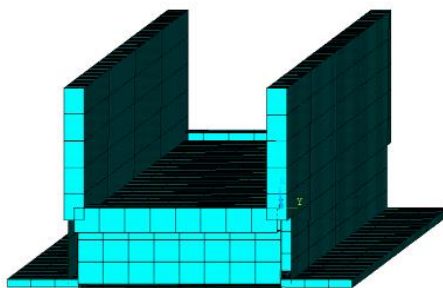


Figura 8. Modelo em elementos finitos – vista frontal

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 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.

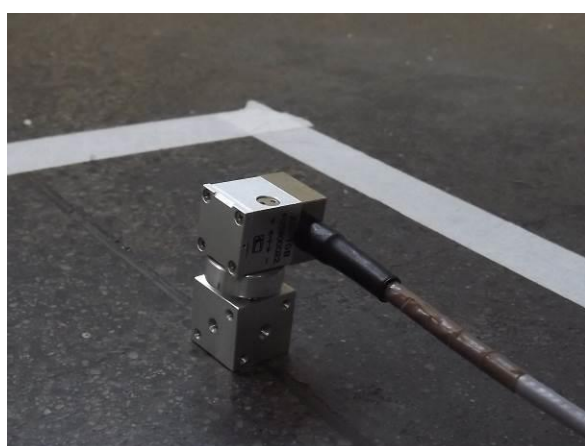
O primeiro ensaio de vibração livre foi realizado de tal forma que a estrutura fosse excitada através do impacto de uma pessoa de 95 kg pulando no centro da passarela a uma altura de 0,5 m. O método utilizado neste ensaio foi o de dados de entrada única e de saída múltipla (SIMO). Os resultados de vibração 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 à laser Polytec PDV-100 a um martelo de impacto Dytran, como mostrado nas Figs. 10 e 11. O funcionamento básico da metodologia de vibrometria à 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*) 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 pulo 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 à 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 logaritmo, sendo, respectivamente, iguais a 1,80% (1º modo), 1,15% (2º modo) e 1,02% (3º modo).



a) Acelerômetro



b) Sistema ADS 2002 e computador

Figura 9. Sistema de aquisição ADS 2002 conectado a acelerômetros



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



Figura 11. Martelo de impacto Dytran

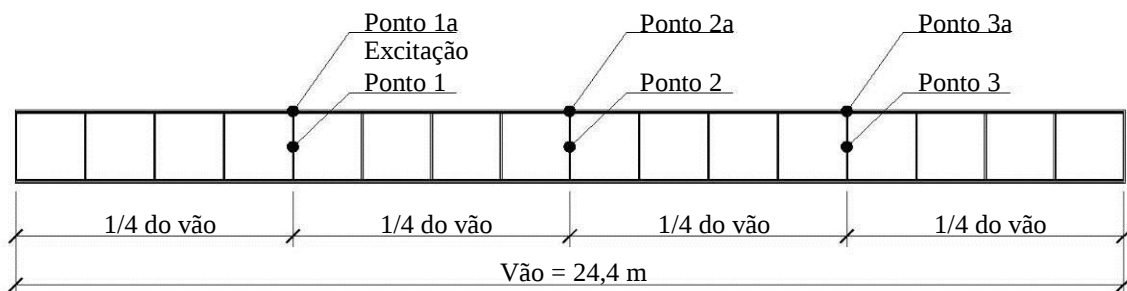


Figura 12. Pontos de medição da passarela investigada. Dimensões em (m)

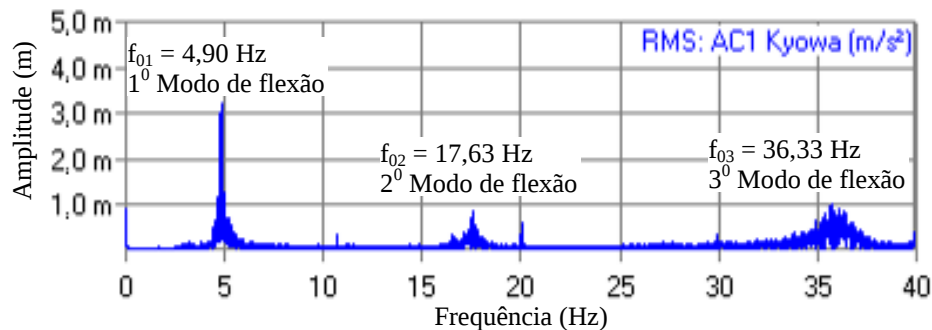


Figura 13. ADS 2002: Espectro de resposta da vibração da estrutura no ponto 1 (1/4 do vão)

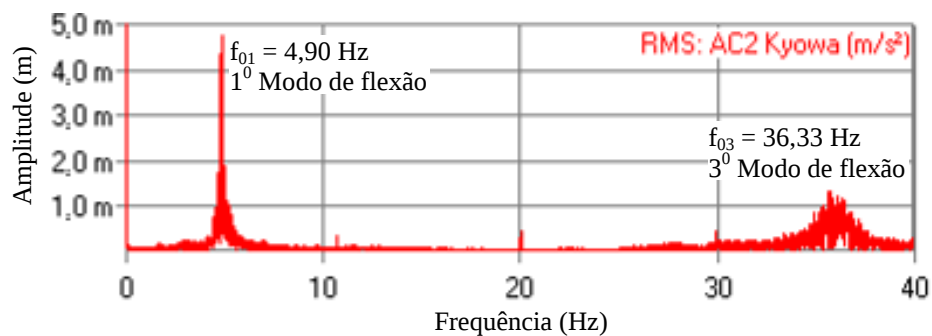


Figura 14. ADS 2002: Espectro de resposta da vibração da estrutura no ponto 2 (1/2 do vão)

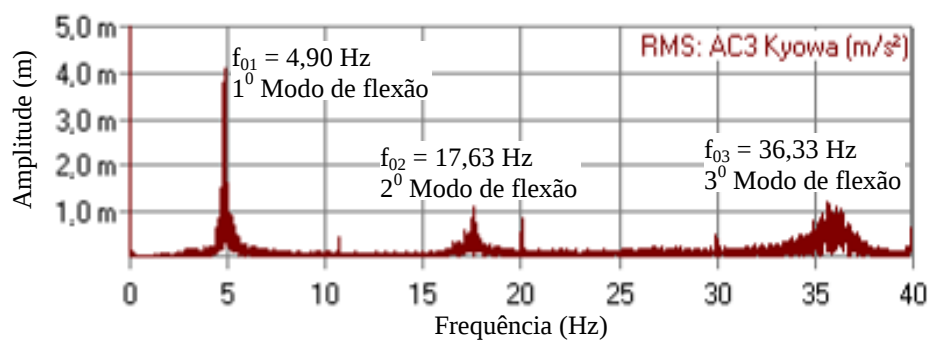


Figura 15. ADS 2002: Espectro de resposta da vibração da estrutura no ponto 3 (3/4 do vão)

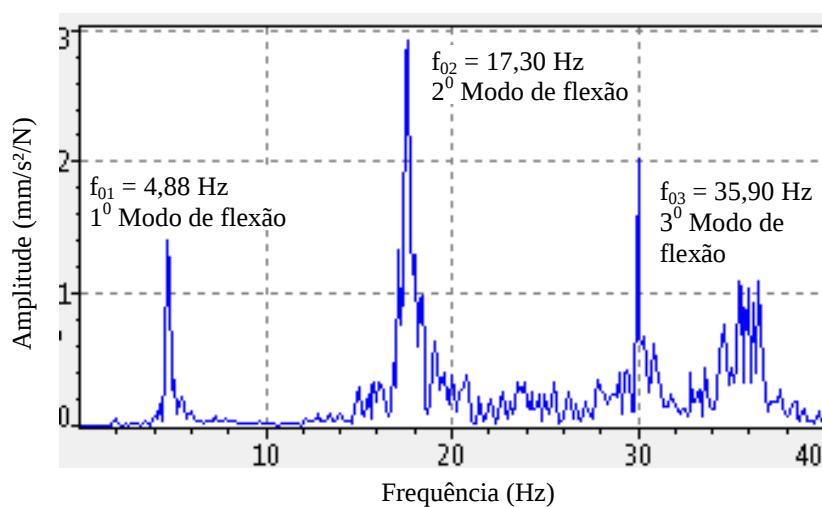


Figura 16. PDV-100: FRF no ponto 1 (1/4 do vão)

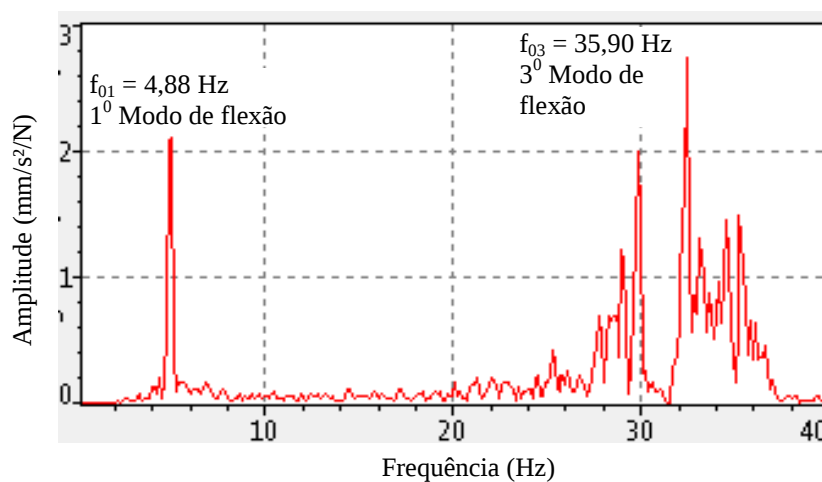


Figura 17. PDV-100: FRF no ponto 2 (1/2 do vão)

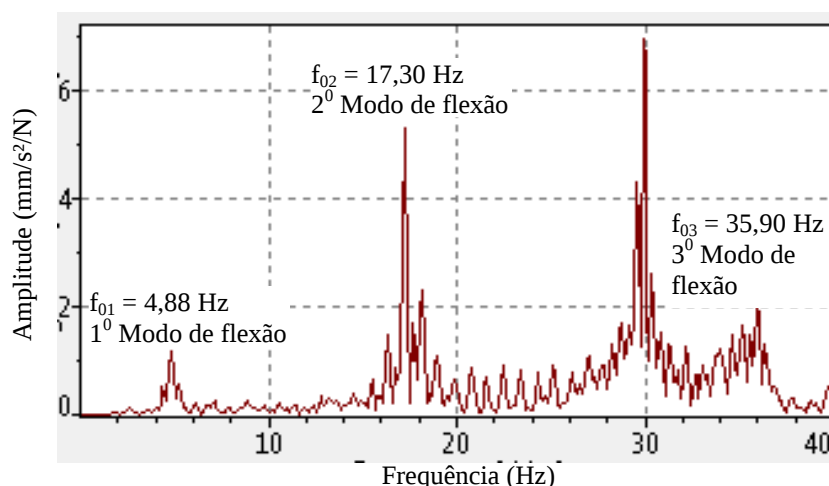


Figura 18. PDV-100: FRF no ponto 3 (3/4 do vão)

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 FREQUÊNCIAS NATURAIS E MODOS DE VIBRAÇÃO

Com o objetivo de se calibrar o modelo experimental e numérico da passarela, suas frequências naturais e modos de vibração foram determinados também a partir da análise modal numérica, via método dos elementos finitos utilizando o programa ANSYS (2010) 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

Frequências Naturais	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

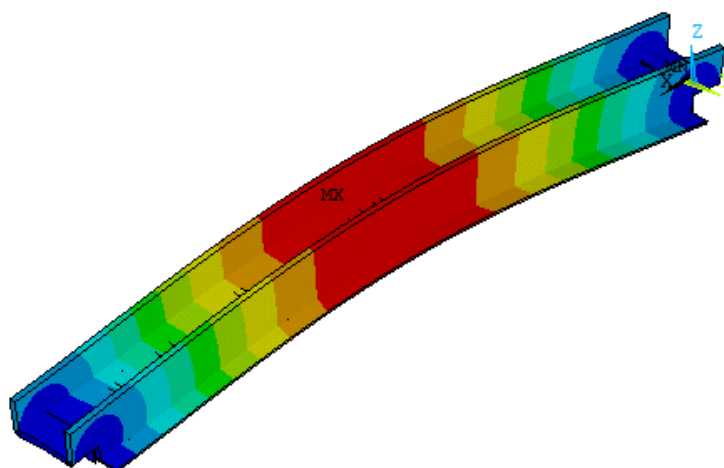


Figura 19. Modo de vibração relativo à 1ª frequência natural vertical (f_{01})

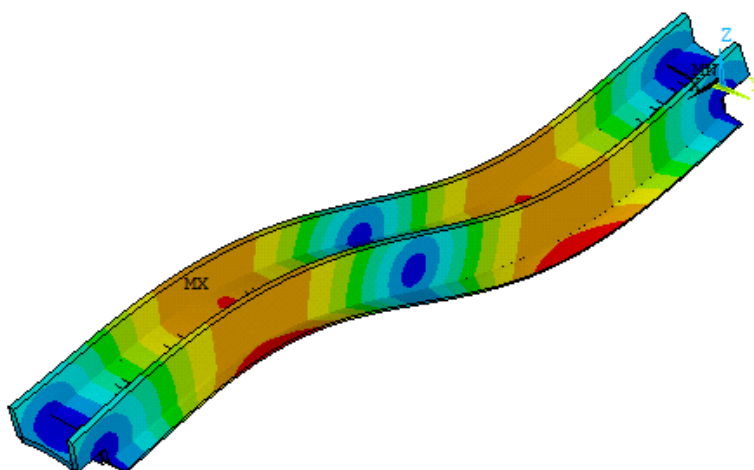


Figura 20. Modo de vibração relativo à 2ª frequência natural vertical (f_{02})

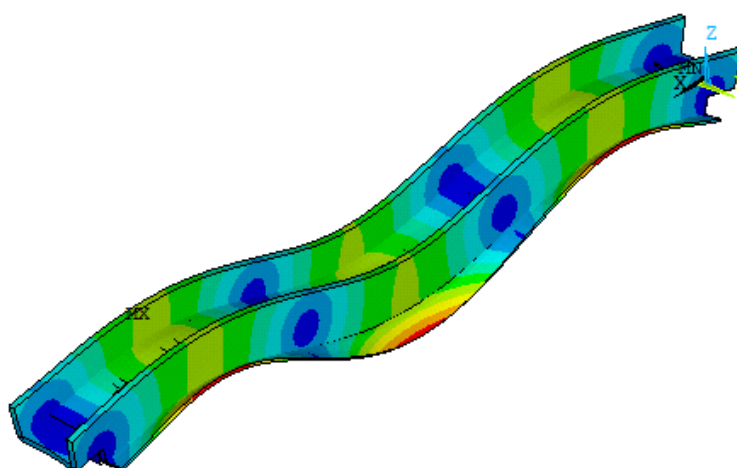


Figura 21. Modo de vibração relativo à 3ª frequência natural vertical (f_{03})

6 ANÁLISE EXPERIMENTAL DE VIBRAÇÃO FORÇADA

A excitação do caminhar humano na passarela de pedestres investigada foi realizada com base em dois grupos de controle: a primeira destina-se a excitar a estrutura para causar um movimento com uma frequência de ressonância, controlando o passo de cada pedestre; a segunda está relacionada com as pessoas andando livremente sobre a estrutura da passarela de forma aleatória, como ocorre normalmente durante a sua vida útil. Os dados obtidos relativos a estes testes experimentais foram registrados pelo sistema de aquisição de dados ADS-2002, utilizando o acelerômetro resistivos Kyowa no ponto 2, ver a Fig. 12. Os resultados experimentais são ilustrados nas Figs. 22 a 33.

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.

Inicialmente, 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 oito pedestres que atravessam de forma sincronizada a passarela pudesse forçar um movimento ressonante com o primeiro modo de vibração vertical ($f_{01} = 4,90$ Hz, ver Tabela 1). Depois disso, a fim de realizar dois ensaios adicionais, o valor do metrônomo foi alterado para 120 bpm para induzir os pedestres a atravessar a estrutura em caminhada normal ($f = 2$ Hz) e também para uma caminhada lenta com o metrônomo ajustado em 102 bpm ($f = 1,7$ Hz). Após, o último ensaio experimental foi realizado com nove pedestres caminhando livremente de forma aleatória sobre a estrutura.

Os resultados obtidos a partir dos ensaios experimentais são mostrados nas Figs. 22 a 33, 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. 22 a 33, 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 22. Teste experimental com pedestres caminhando ($f=1,7$ Hz: caminhada lenta)

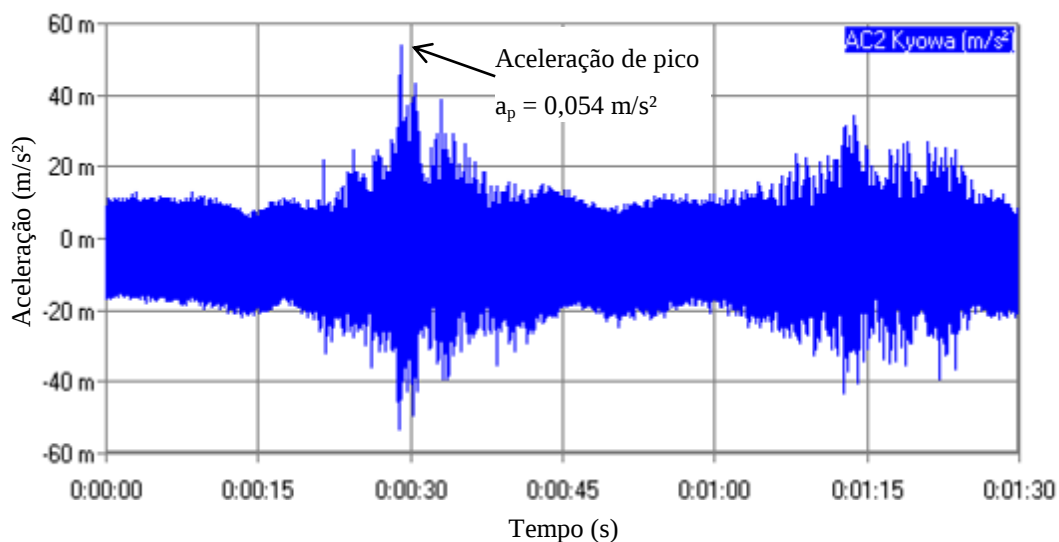


Figura 23. Aceleração vertical no domínio do tempo ($f=1,7 \text{ Hz}$: caminhada lenta): 1/2 do vão

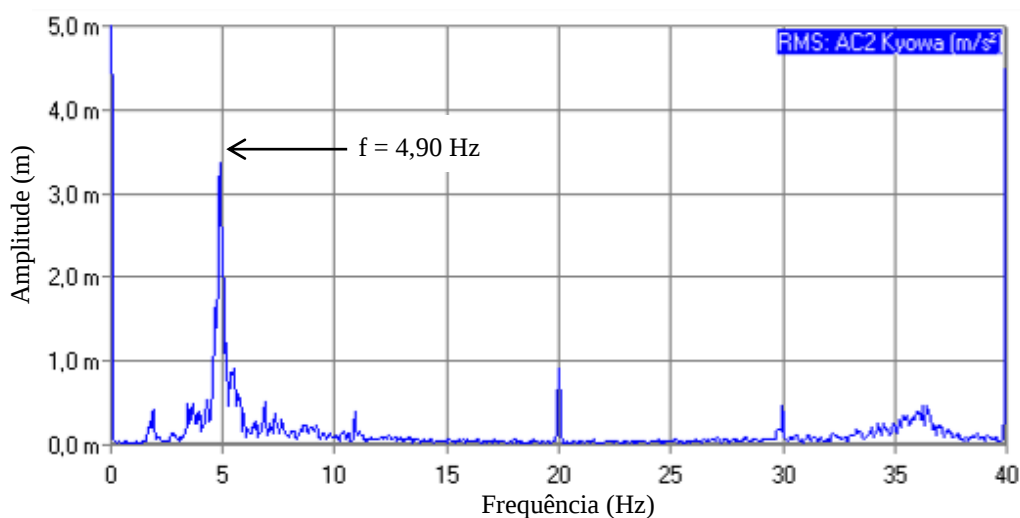


Figura 24. Aceleração vertical no domínio da frequência ($f=1,7 \text{ Hz}$: caminhada lenta): 1/2 do vão



Figura 25. Teste experimental com pedestres caminhando ($f=2,0 \text{ Hz}$: caminhada normal)

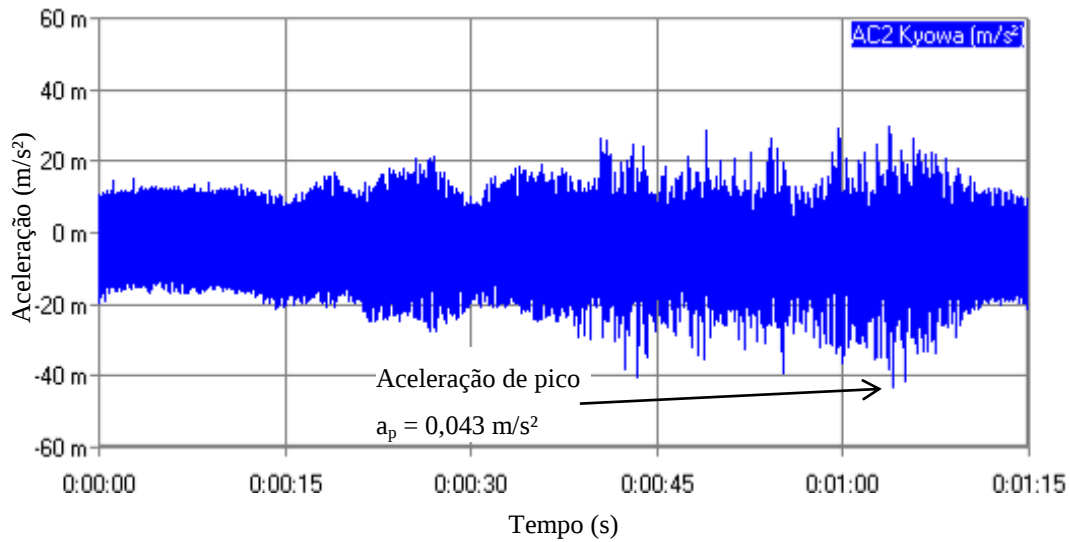


Figura 26. Aceleração vertical no domínio do tempo ($f=2,0$ Hz: caminhada normal): 1/2 do vão

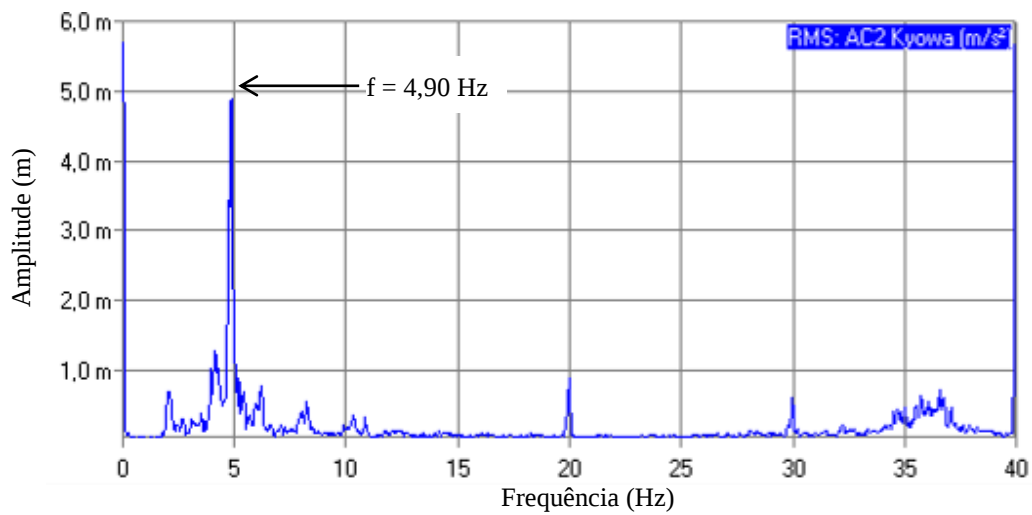


Figura 27. Aceleração vertical no domínio da frequência ($f=2,0$ Hz: caminhada normal): 1/2 do vão

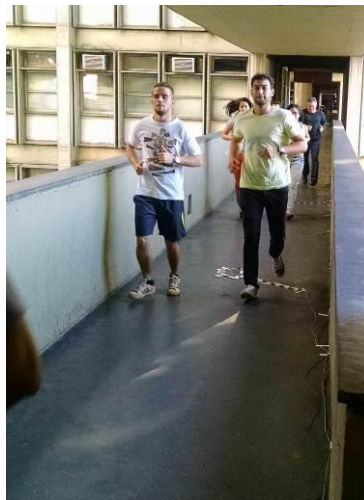


Figura 28. Teste experimental com pedestres caminhando ($f=2,45$ Hz: ressonância)

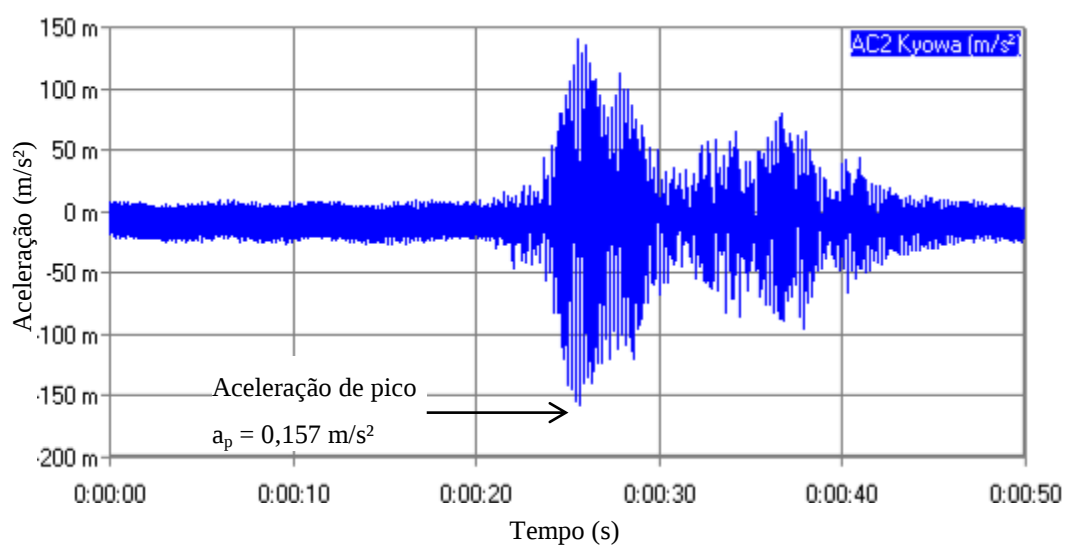


Figura 29. Aceleração vertical no domínio do tempo ($f=2,45$ Hz: ressonância): 1/2 do vão

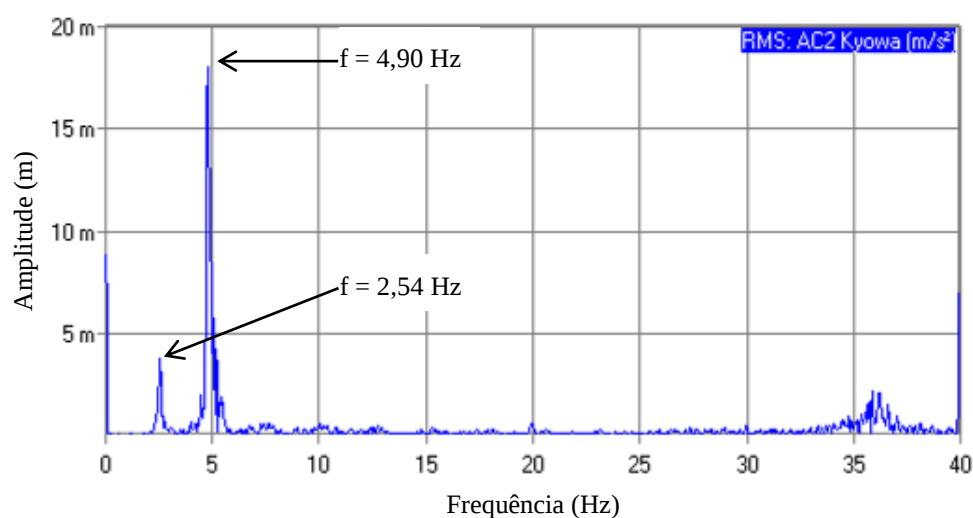


Figura 30. Aceleração vertical no domínio da frequência ($f=2,45$ Hz: ressonância): 1/2 do vão



Figura 31. Teste experimental com pedestres caminhando de forma aleatória

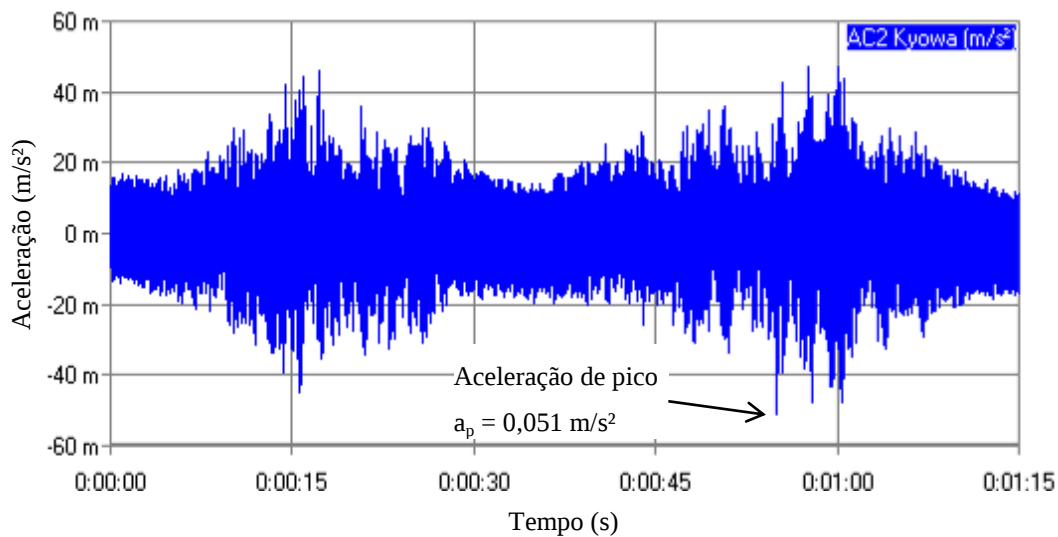


Figura 32. Aceleração vertical no domínio do tempo (caminhada aleatória): 1/2 do vão

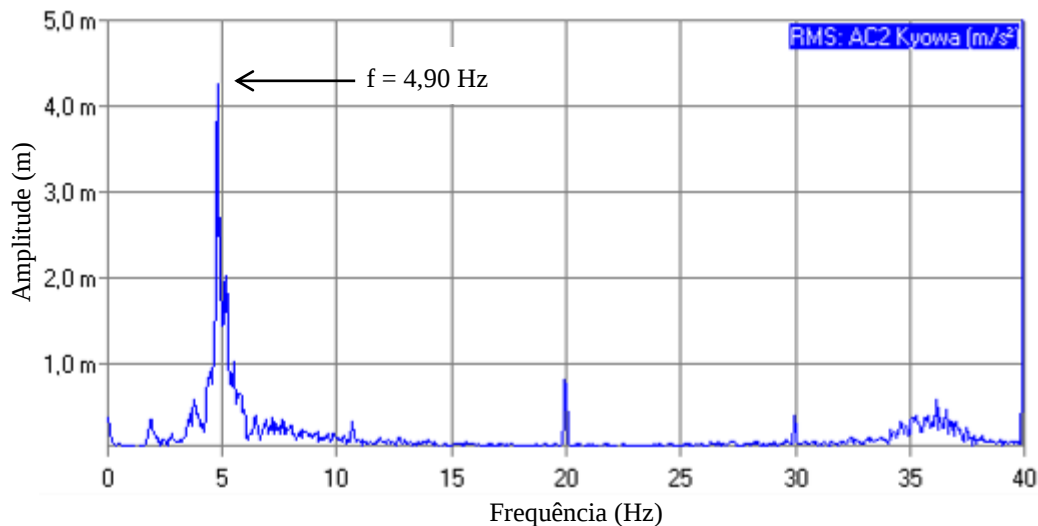


Figura 33. Aceleração vertical no domínio da frequência (caminhada aleatória): 1/2 do vão

Analisando-se as Figs. 22 a 33 observa-se que os harmônicos são extremamente relevantes para a avaliação da resposta dinâmica das passarelas. Os resultados aqui apresentados demonstram que os modelos com ressonância ($2 \times 2,45 \text{ Hz} = 4,90 \text{ Hz}$) e caminhada lenta ($3 \times 1,70 \text{ Hz} = 5,10 \text{ Hz}$) apresentam as frequências dos harmônicos componentes da excitação dinâmica humana com valores mais próximos das frequências naturais (em torno de $4,90 \text{ Hz}$) da passarela em estudo, em relação àqueles associados aos modelos de carregamentos da caminhada normal ($2 \times 2,0 \text{ Hz} = 4,00 \text{ Hz}$ ou $3 \times 2,0 \text{ Hz} = 6,0 \text{ Hz}$) e aleatória, resultando na diferença entre os valores de aceleração de pico, ver Tabela 2.

Os valores máximos de aceleração de pico encontrados nesta investigação experimental são, respectivamente, igual a $0,054 \text{ m/s}^2$ para 8 pessoas em caminhada lenta ($a_p = 0,054 \text{ m/s}^2 / f = 1,7 \text{ Hz}$), $0,043 \text{ m/s}^2$ para 8 pessoas em marcha normal ($a_p = 0,043 \text{ m/s}^2 / f = 2 \text{ Hz}$), $0,157 \text{ m/s}^2$ para 8 pessoas em ressonância ($a_p = 0,157 \text{ m/s}^2 / f = 2,45 \text{ Hz}$) e $0,051 \text{ m/s}^2$ para 9 pessoas caminhando livremente sobre a laje de concreto da passarela (caminhada aleatória).

7 AVALIAÇÃO 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 (caminhada lenta, normal, ressonância e aleatória), 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 da caminhada dos pedestres obtidos pelos ensaios estão resumidos na Tabela 2.

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 2. 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**
Lenta	0,054	Máximo	Aceitável
Normal	0,043	Máximo	Aceitável
Ressonância	0,157	Máximo	Inaceitável
Aleatória	0,051	Máximo	Aceitável

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

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

Pode ser observado a partir dos resultados da Tabela 2 que o critério de conforto humano proposto pela guia Sétra (2006) foi satisfeito para as quatro situações de caminhada. Isso significa que os valores de aceleração de pico experimentais encontram-se dentro dos limites de 0,0 a $0,5 \text{ m/s}^2$, o que corresponde a um máximo conforto humano. Por outro lado, em relação ao guia de projeto AISC (Murray et al., 2003), com limite de aceleração de pico de $0,15 \text{ m/s}^2$ para passarelas internas, os valores obtidos foram respeitados quando simulados a caminhada lenta, normal e aleatória; entretanto, ultrapassados, quando o valor da aceleração de pico foi de $0,157 \text{ m/s}^2$ para a simulação de caminhada em ressonância. No entanto, é interessante ressaltar que uma pessoa em pé pode notar um valor de aceleração de pico igual a $0,034 \text{ m/s}^2$ e $0,100 \text{ m/s}^2$ como apenas perceptível e claramente perceptível, respectivamente (Bachmann et al., 1995).

8 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.

A análise modal da estrutura foi realizada 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). Em seguida, estes resultados experimentais foram calibrados com um modelo de elementos finitos tridimensional via o programa ANSYS.

Os resultados da análise modal experimental apresentaram uma boa concordância entre si, quando comparados a monitorização dinâmica através de acelerômetros instalados na estrutura e do dispositivo de aquisição de dados com base em vibrometria a laser (Portable Digital Vibrometer: PDV-100). O modelo de elementos finitos se mostrou calibrado em relação aos dados da análise modal experimental apresentando diferenças, do ADS2002 e do PDV respectivamente, 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.

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.

A análise dinâmica experimental, realizada pelos quatro casos de carregamento considerando a caminhada de pedestres (caminhar lento, normal, ressonante e aleatório) mostraram que os valores de acelerações obtidos satisfazem os critérios de conforto humano para todos os casos analisados, exceto para o caso de ressonância ($a_p = 0,157$ m/s²), que ultrapassa o valor limite proposto pelo AISC igual a 0,15 m/s² quando oito pessoas atravessaram a passarela.

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., 2015. “*Efeito da Interação Dinâmica Pedestre-Estrutura sobre a Resposta Dinâmica de Passarelas Mistas (Aço-Concreto)*”. Tese de doutorado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, PGECIV. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ. Rio de Janeiro/RJ, Brasil (Em desenvolvimento).

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.