



ANÁLISE DE CONFORTO HUMANO EM PASSARELAS DE PEDESTRES MISTAS (AÇO-CONCRETO) COM BASE NA UTILIZAÇÃO DE MODELOS BIODINÂMICOS

Ivis Fernandes Bravo Duarte

Gilvan Lunz Debona

ivis.fernandes.bravo@hotmail.com

gilvanld@yahoo.com.br

Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, PGECIV/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. No Brasil, até recentemente, não era comum nos escritórios de cálculo a verificação de passarelas de pedestres quanto ao atendimento do estado limite de utilização associado ao conforto humano, no que diz respeito ao caráter dinâmico do caminhar das pessoas sobre a estrutura. Entretanto, como o propósito de uso das passarelas é o transporte de pedestres, estas precisam apresentar um comportamento dinâmico que não ofereça desconforto aos usuários. O presente trabalho tem como objetivo o estudo da resposta dinâmica de uma passarela mista (aço-concreto) submetida ao caminhar humano. O modelo estrutural corresponde a uma passarela real, construída sobre a Avenida Ayrton Senna, na cidade do Rio de Janeiro/RJ, Brasil, possuindo um vão central com 68,6m de comprimento. A frequência fundamental do sistema aproxima-se bastante da frequência de passo do pedestre, possibilitando a transmissão da energia proveniente do caminhar humano para a estrutura através do fenômeno da ressonância. Assim sendo, para uma avaliação mais realista acerca do conforto humano da estrutura, este trabalho de pesquisa considera a interação dinâmica pedestre-passarela, com base na utilização de modelos biodinâmicos acoplados. Os resultados alcançados na análise paramétrica desenvolvida ao longo do estudo indicam um alto grau de desconforto humano quando da utilização da estrutura.

Palavras-chave: Passarelas mistas, Modelos biodinâmicos, Análise de conforto humano.

1 INTRODUÇÃO

Ao longo dos últimos anos, diversos autores têm realizado importantes contribuições quanto à modelagem do caminhar humano e a análise do conforto humano em passarelas de pedestres. A importância do tema se torna evidente ao analisarmos o histórico de casos ao redor do mundo, em estruturas que apresentaram problemas de vibração excessiva ou sofreram falhas em seu sistema estrutural (Duarte, 2015).

Em seu trabalho de pesquisa, Figueiredo (2005) menciona o desabamento de uma passarela de pedestres na Carolina do Norte/EUA após a saída de uma multidão em um evento esportivo, fato este que resultou em cem pessoas feridas. Outro exemplo amplamente citado na literatura internacional se refere à passarela “Millenium”, construída em Londres sobre o rio Tâmsa e inaugurada em Junho de 2000. Cabe ressaltar que logo após a inauguração da estrutura, percebeu-se que a passarela apresentava oscilações laterais com grandes amplitudes, devido à ação dinâmica dos pedestres. De acordo com Newland *apud* Lima (2007), medições experimentais indicaram amplitudes da ordem de 75mm com frequência entre 0,8Hz e 1,0Hz, o que obrigou as autoridades a fecharem a passarela três dias, após sua inauguração, por medida de segurança, tendo sido necessária a adoção de uma série de medidas corretivas no modelo estrutural.

A principal ação dinâmica atuante em estruturas de passarelas são aquelas de origem humana, como caminhar, pular e correr. Quando ocorre a situação onde a frequência de vibração natural da passarela se aproxima da frequência de excitação da ação dinâmica, ocorre o fenômeno físico da ressonância, que aumenta significativamente a amplitude do deslocamento vertical da estrutura e o valor de aceleração de pico, parâmetro que é utilizado para verificação de serviço quanto ao desconforto na utilização das passarelas.

Atualmente, inúmeras abordagens têm sido utilizadas para o estudo do problema e estas estratégias podem empregar modelos simplificados, com apenas um pedestre em movimento sobre a estrutura, ou modelos mais complexos, que consideram o efeito da multidão e o amortecimento e rigidez do corpo humano na modelagem numérica. Neste sentido, investigações com base no uso de modelos biodinâmicos têm sido realizadas quando se deseja analisar de maneira mais realista o comportamento estrutural dinâmico de passarelas submetidas à passagem de uma grande quantidade de pedestres, levando-se em consideração a interação dinâmica pedestre-passerela (Duarte, 2015).

Deste modo, o objetivo deste trabalho de pesquisa é o de investigar o comportamento dinâmico de uma estrutura real associada a uma passarela mista (aço-concreto), simplesmente apoiada, que possui uma extensão total de 135,3m, com 68,6m de comprimento de vão central, situada na Avenida Ayrton Senna, na cidade do Rio de Janeiro/RJ, Brasil. Para tal, serão empregados modelos biodinâmicos para simular o caminhar humano sobre a passarela e, conseqüentemente, a interação dinâmica pedestre-estrutura. O sistema estrutural em estudo possui largura de 2,55m e altura útil igual a 2,60m, acrescidos de mais 2,60m de um reforço em estruturas metálicas, adicionado posteriormente à estrutura, com o objetivo de contribuir para um aumento da rigidez da passarela.

Para a modelagem numérica do sistema são empregadas técnicas usuais de discretização, via método dos elementos finitos (MEF), realizadas no software de análise estrutural ANSYS (2009). A resposta dinâmica da passarela será avaliada com base nos valores das frequências naturais de vibração e das acelerações verticais de pico. Em seguida, os resultados encontrados ao longo deste trabalho de pesquisa serão comparados com os valores limites propostos por normas e recomendações de projeto (Sétra, 2006; HIVOSS, 2008).

2 MODELO DE CARREGAMENTO DINÂMICO

Existem inúmeras formulações matemáticas para simulação do caminhar humano em estruturas. No entanto, quando se deseja investigar os movimentos e as forças dissipativas ocorridas na locomoção do pedestre faz-se necessária a adoção de um modelo biodinâmico, que é dotado de massa (m_p) amortecimento (c_p) e rigidez (k_p). Estes modelos biodinâmicos têm sido empregados por alguns estudos como uma forma mais realista de modelagem do carregamento do pedestre, em relação à “força dura”, que é a forma mais usual utilizada para a análise dinâmica em estruturas de passarelas (Duarte, 2015).

Esses modelos biodinâmicos podem representar uma pessoa parada, em pé ou sentada (ISO 5982, 1981; Matsumoto & Griffin, 2003; Sachse *et al.*, 2003), pessoas pulando (Nhleko *et al.*, 2008) e pessoas correndo (Ferris *et al.*, 1998; Nigg & Liu, 1999). Para pessoas caminhando existem algumas propostas mais atuais (Miyamori *et al.*, 2001; Kim *et al.*, 2008; Caprani *et al.*, 2011; Silva, 2011; Costa, 2013), distintas em relação ao número de graus de liberdade e na forma de determinação dos parâmetros de massa, amortecimento e rigidez.

Para este estudo, inicialmente, foi adotada uma metodologia de análise centrada no emprego dos modelos biodinâmicos, simulados como sistemas do tipo “massa-mola-amortecedor”, com apenas um grau de liberdade (S1GL), conforme ilustrado na Fig.1. Este sistema foi inserido no modelo numérico, em conjunto com uma força dinâmica que se move ao longo da estrutura com velocidade constante $v(t)$ e exerce uma força $F_p(t)$ sobre a passarela. A função matemática representativa do caminhar humano foi modelada através de uma série de Fourier, conforme apresentado na Eq.(1).

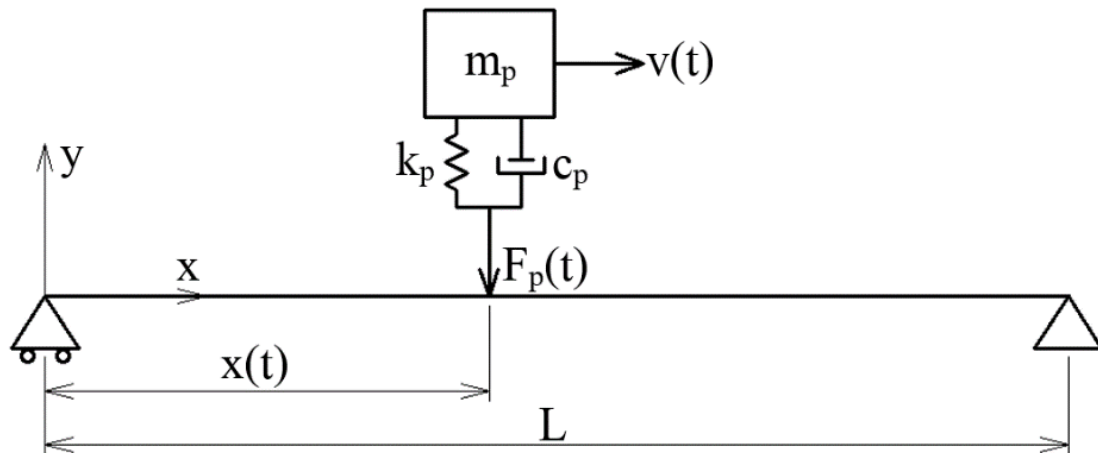


Figura 1. Representação do caminhar humano sobre a passarela Debona (2014)

$$F_p(t) = P \left[\sum \alpha_i \cos(2\pi f_p t + \phi_i) \right] \quad (1)$$

Onde:

- $F_p(t)$: função de carregamento dinâmico (N);
- P : peso de uma pessoa (N);
- α_i : coeficiente dinâmico para a força harmônica (fator de carga dinâmica);
- i : número do harmônico (1, 2, 3, etc.);
- f_p : frequência do passo humano (Hz);
- t : tempo (s);
- ϕ_i : ângulo de fase para o harmônico i (radianos).

Para a formulação da função de carregamento dinâmico, representativa do caminhar dos pedestres, Eq. (1), os coeficientes dinâmicos utilizados neste trabalho de pesquisa seguem a proposta de Bachmann (1995), conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Coeficientes propostos por Bachmann (1995)

Harmônico	Coeficiente Dinâmico (α_i)	Ângulo de Fase (ϕ_i)
1	0,37	0
2	0,10	$\pi/2$
3	0,12	$\pi/2$
4	0,04	$\pi/2$
5	0,08	$\pi/2$

3 PASSARELA MISTA (AÇO-CONCRETO) INVESTIGADA

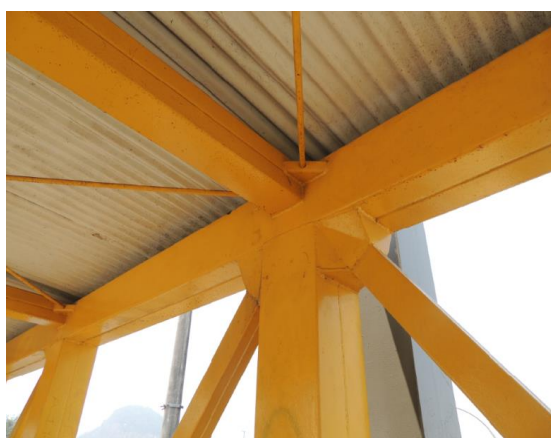
A passarela mista (aço-concreto) investigada se refere a um modelo estrutural existente, situado na Avenida Ayrton Senna, na cidade do Rio de Janeiro/RJ, Brasil. O sistema estrutural é composto por três vãos simplesmente apoiados, o vão central do modelo possui 68,6 m de comprimento, sendo divididos em 28 módulos simétricos de 2,45m cada, altura de 2,6m e largura de 2,55m. Os perfis metálicos que compõem o sistema estrutural são vazados, de formato retangular, formados por chapas dobradas de aço do tipo USI-SAC 300, soldados em suas extremidades. A espessura destes perfis de aço é variável ao longo do comprimento da passarela, Figs. 2 a 6. Cabe ressaltar que a estrutura é frequentemente utilizada por estudantes, ciclistas e moradores da região para travessia da Avenida Ayrton Senna, estando, também, próxima a estabelecimentos de ensino e casas de show (Duarte, 2015).



Figura 2. Vista lateral global da passarela



Figura 3. Vista lateral próxima a região dos apoios do vão central



a) Detalhe da ligação entre os perfis de aço



b) Detalhe do reforço estrutural

Figura 4. Detalhes da estrutura

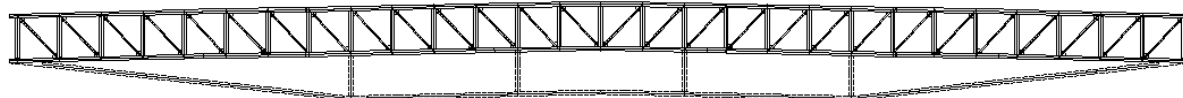


Figura 5. Vista esquemática do sistema estrutural completo do vão central

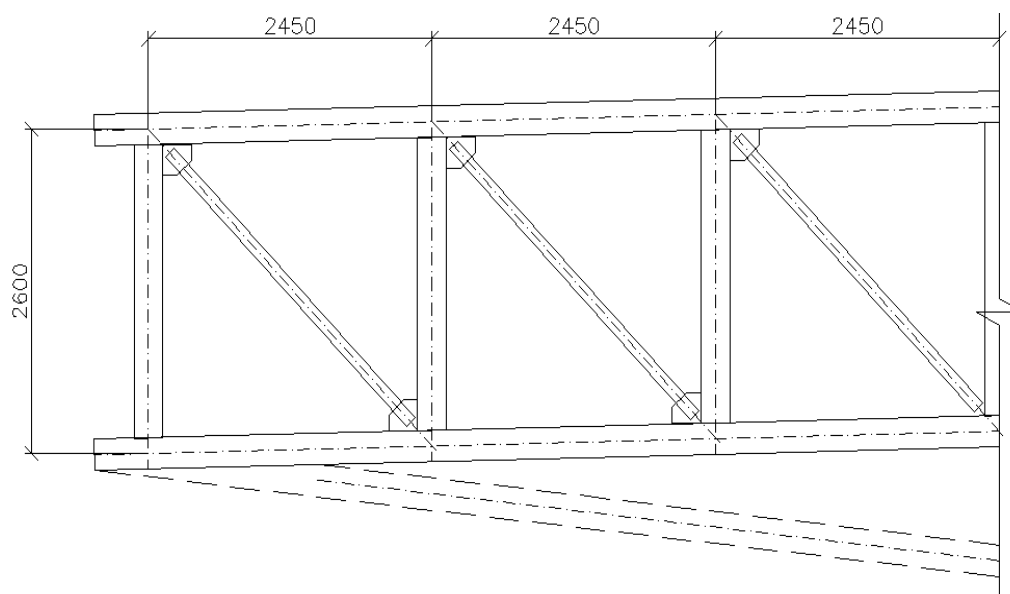


Figura 6. Detalhe da vista lateral dos módulos treliçados (dimensões em mm)

A passarela é composta por uma estrutura treliçada de aço e lajes de concreto apoiadas nos perfis de travamento entre as duas faces laterais da treliça, formando um sistema misto de aço-concreto com interação total. A transferência dos esforços entre a estrutura treliçada metálica e os pórticos se dá através de apoios de Neoprene de dimensões 200x250x30 mm. As Tabelas 2 e 3 apresentam as propriedades geométricas dos elementos estruturais da passarela.

Tabela 2. Descrição dos perfis estruturais da estrutura principal (vão central)

Perfil	Dimensões em mm	Espessura em mm
Longitudinal	250	Variável
Montante	150	4,75
Travamento	100	4,75
Diagonal	100	4,75

Tabela 3. Descrição dos perfis estruturais do reforço

Perfil	Dimensões em mm	Espessura em mm
Longitudinal	250	Variável
Montante	150	4,75
Travamento	100	3,00

As chapas de aço utilizadas na confecção dos perfis são do tipo USI-SAC 300, fornecidos pela Usiminas, com o limite de escoamento $\sigma_y = 300\text{MPa}$, módulo de elasticidade longitudinal $E = 205\text{GPa}$, coeficiente de Poisson $\nu = 0,3$ e massa específica $\rho = 7850\text{kg/m}^3$.

4 MODELAGEM DO SISTEMA PEDESTRE-ESTRUTURA

4.1 Modelagem numérica da passarela

Na modelagem da passarela foram empregadas técnicas usuais de discretização via método dos elementos finitos, com base no uso do programa computacional ANSYS (2009). O modelo numérico da passarela encontra-se ilustrado nas Figs. 7 a 9. Para modelagem nas vigas de aço, montantes, diagonais e barras de travamentos, foi utilizado o elemento de viga tridimensional BEAM44 ANSYS (2009), que permite a consideração de efeitos de flexão e torção. As lajes de concreto da passarela foram modeladas com base no uso do elemento de casca SHELL63 ANSYS (2009) e os contraventamentos foram modelados a partir do emprego do elemento de treliça espacial LINK 8 ANSYS (2009).

São utilizadas, também, conexões rígidas do tipo “offset”, de forma a se garantir a compatibilidade de deslocamentos e de deformações entre os nós dos elementos de casca utilizados para modelagem das lajes e os nós dos elementos de viga tridimensionais. As extremidades da passarela não foram restringidas quanto aos graus de liberdade referentes à rotação, fazendo assim com que a estrutura funcionasse de maneira simplesmente apoiada. Além disso, considera-se que ambos os materiais (aço e concreto) tenham um comportamento elástico. A interação total entre a laje de concreto e as vigas de aço foi considerada e, portanto, impedindo a ocorrência de qualquer deslizamento relativo entre os elementos.

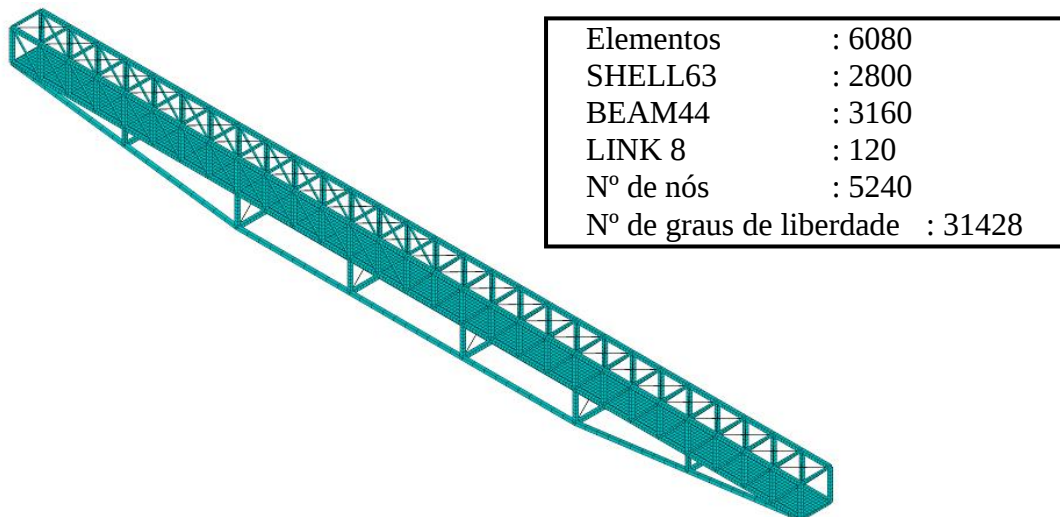


Figura 7. Vista em perspectiva do modelo em elementos finitos da passarela



Figura 8. Vista lateral do modelo computacional



Figura 9. Vista inferior do modelo numérico

4.2 Modelagem do sistema pedestre-passarela

Destaca-se que para modelagem do sistema pedestre-passarela, a posição dos modelos “massa-mola-amortecedor”, representativo dos pedestres, foi mantida fixa a posição da força dinâmica, obtida através da Eq. (1), foi modificada ao longo do tempo. Cabe ressaltar que para carregamentos de multidão esta estratégia de modelagem conduz a resultados bastante satisfatórios (Silva, 2011).

Deste modo, os modelos biodinâmicos foram distribuídos ao longo da estrutura, sobre o vão central principal de 68,6m, respeitando-se um espaçamento entre pedestres da ordem de 1m, para uma situação mais desfavorável e de 1,47m, para uma situação com um número menor de pessoas sobre o modelo estrutural, de acordo com a Figura 10. Nesta situação, foi possível acoplar um número máximo de 140 pedestres e um mínimo de 46 pedestres sobre a passarela investigada (Duarte, 2015).

Neste trabalho de pesquisa, os valores referentes às características dinâmicas dos pedestres foram obtidos do estudo desenvolvido por Silva (2011), Tabela 4. Na Tabela 4, a variável m_p representa a massa do modelo biodinâmico, c_p é o coeficiente de amortecimento do modelo biodinâmico, k_p simula a rigidez do modelo biodinâmico, M corresponde a massa total do indivíduo f_p é a frequência do passo.

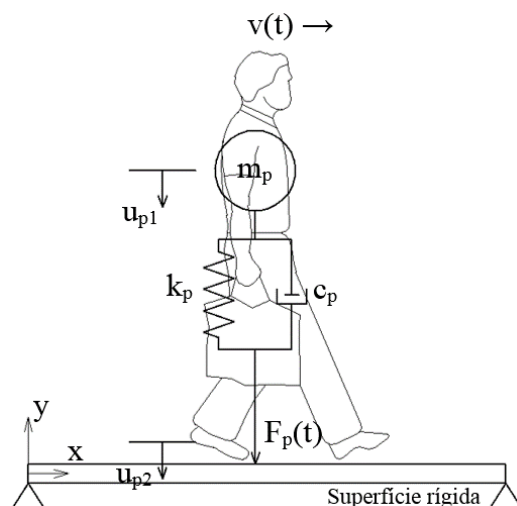


Figura 10. Modelos biodinâmicos utilizados para a representação dos pedestres Debona (2014)

Tabela 4. Características dinâmicas dos pedestres (Silva (2011))

Características Dinâmicas		m_p (kg)	c_p (Ns/m)	k_p (N/m)	M (kg)	f_p (Hz)
LABEME/UFPB	Média	45,33	841,56	15085,56	68,58	1,88
(Silva 2011)	DP	10,46	176,21	4985,03	12,42	0,13

5 ANÁLISE DINÂMICA DO SISTEMA PEDESTRE-PASSARELA

Na análise dinâmica do sistema pedestre-passarela são estudadas as modificações nos valores das frequências naturais de vibração da passarela, em função da variação do número de pedestres sobre a estrutura, e, ainda, os valores das acelerações máximas (acelerações de pico) oriundas da travessia dos pedestres sobre o modelo. Uma avaliação do conforto humano do sistema será realizada com base na comparação entre os valores das acelerações de pico e os limites estabelecidos em normas internacionais de projeto (Sétra 2006; HIVOSS, 2008).

5.1 Análise das frequências naturais e modos de vibração do sistema

Após a realização da análise modal do modelo estrutural com base no emprego do programa ANSYS (2009), foram obtidos os valores das frequências naturais (autovalores) da estrutura e seus respectivos modos de vibração (autovetores), considerando-se duas situações distintas: modelo estrutural sem e com a consideração da interação dinâmica pedestre-estrutura. No que diz respeito à análise de vibração livre com a inclusão do efeito da interação pedestre-estrutura foram considerados 140 pedestres, como pode ser visualizado na Tabela 5.

Tabela 5. Comparação das frequências naturais dos modelos estudados

Estratégia de Modelagem	Frequências Naturais da Passarela (Hz)		
	f_{01}	f_{02}	f_{03}
Sem Interação Pedestre-Estrutura	1,9474	4,6744	8,4802
Com Interação Pedestre-Estrutura (140 pedestres)	1,7266	4,7756	8,5264
Diferença Percentual (%)	12,78	2,12	0,54

Os três primeiros modos de vibração, todos com preponderância dos efeitos de flexão, associados às frequências naturais de vibração do modelo estrutural, com base na consideração da interação dinâmica pedestre-estrutura (140 pedestres) podem ser visualizados nas Figs. 11 a 13.

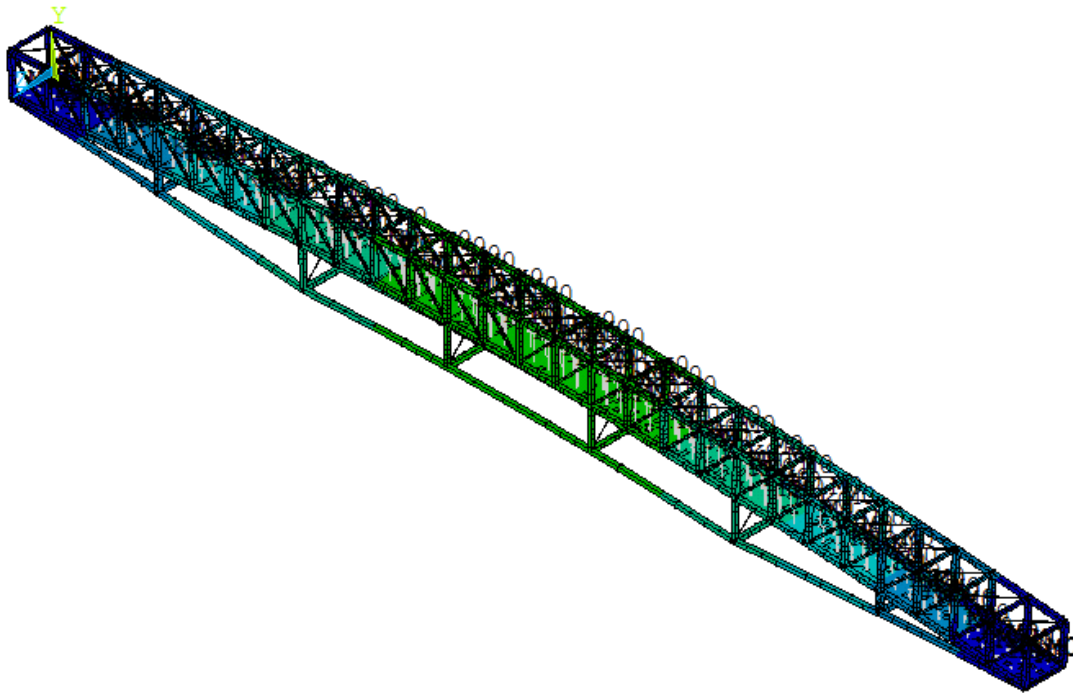


Figura 11. Primeiro modo de vibração (flexão): $f_{01} = 1,72$ Hz

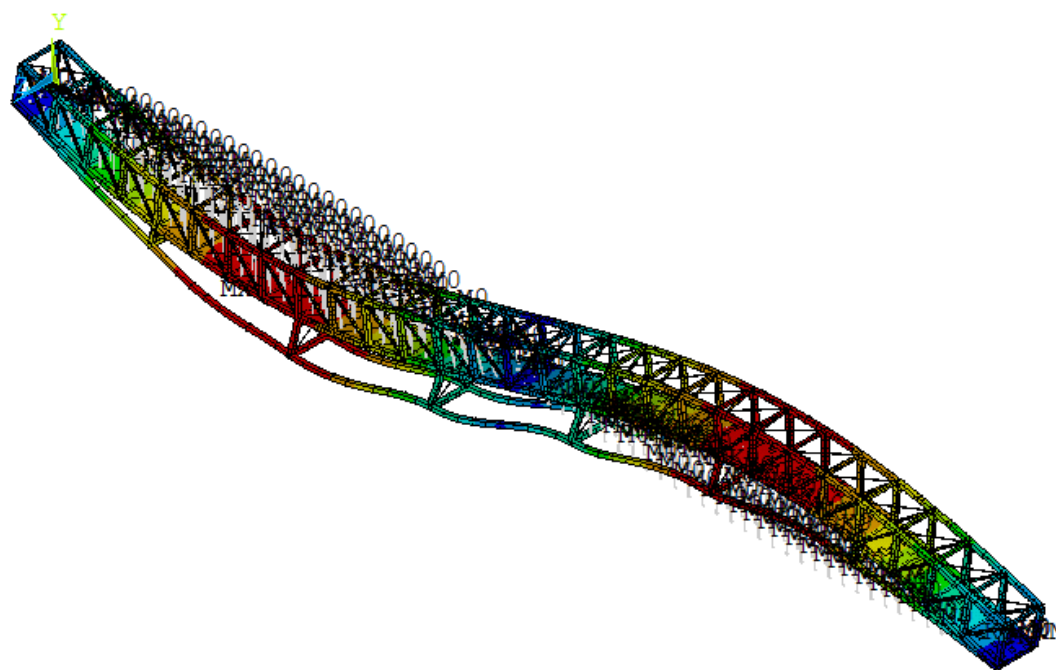


Figura 12. Segundo modo de vibração (flexão): $f_{02} = 4,77$ Hz

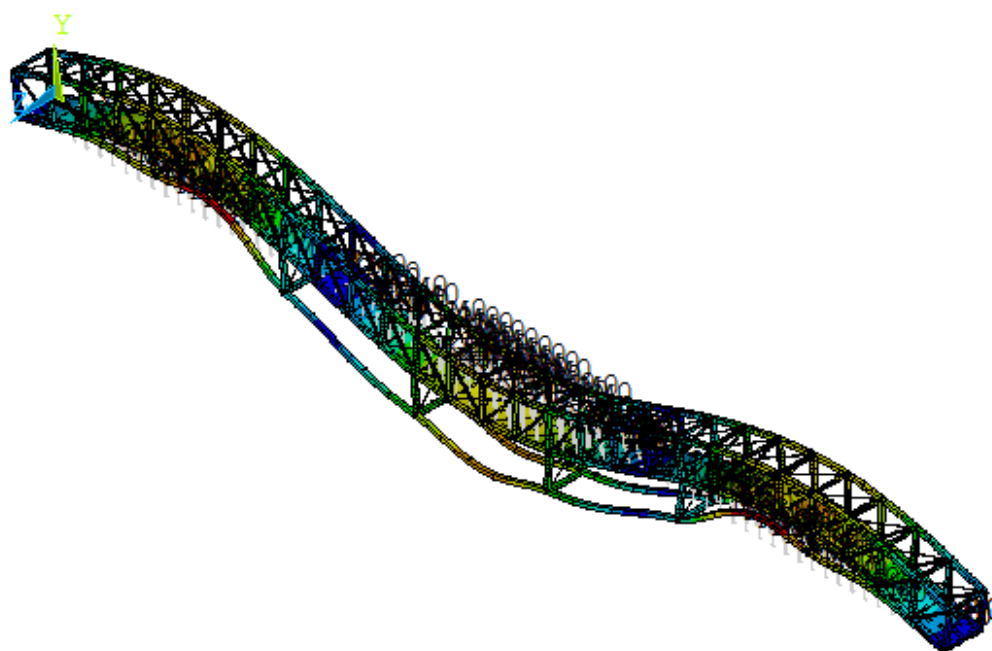


Figura 13. Terceiro modo de vibração (flexão): $f_{03} = 8,52$ Hz

Em seguida, analisando-se o gráfico associado à variação da frequência fundamental da passarela ($f_{01} = 1,72$ Hz: primeiro modo de vibração com preponderância dos efeitos de flexão, Fig. 11), em relação ao número de pedestres considerados na análise de vibração livre (efeito da interação pedestre-estrutura), observa-se que os modelos biodinâmicos provocam uma redução significativa no valor da frequência fundamental da passarela, conforme ilustrado na Fig. 14. Ou seja, na medida em que a relação $[M_p/M_F]$, entre a massa dos pedestres (M_p) e a massa da passarela (M_F) aumenta, a frequência fundamental da passarela tende a diminuir.

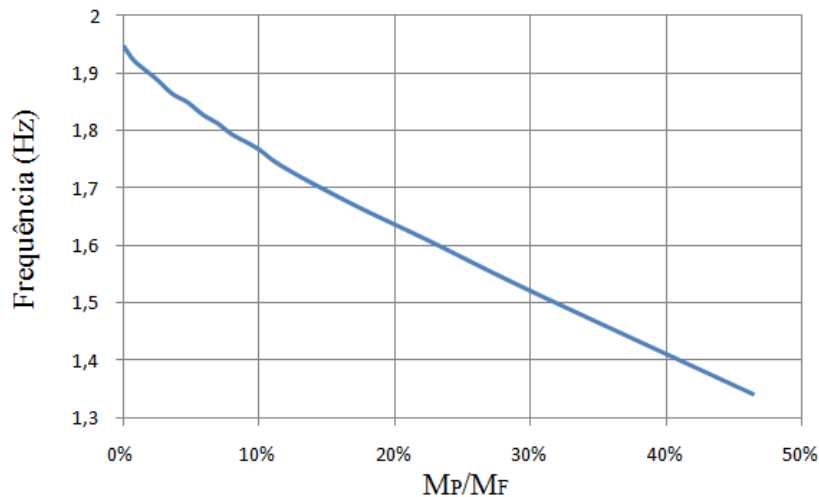


Figura 14. Variação da frequência fundamental da passarela em função da relação $[M_p/M_F]$

5.2 Análise dos valores das acelerações máximas (acelerações de pico)

Com o objetivo de avaliar o conforto humano da passarela, quando submetida à travessia de pedestres, foram realizadas análises de vibração forçada que simulam o efeito do caminhar humano (caminhada normal) sobre a estrutura. Para tal, foram utilizadas duas estratégias de análise: modelagem com base no emprego dos modelos biodinâmicos (efeito da interação pedestre-estrutura) e modelagem tradicional mediante a utilização dos modelos de “força dura”. Para as análises de vibração forçada, a frequência de passo dos pedestres (primeiro harmônico da excitação dinâmica), Eq. (1), foi colocada em ressonância com a frequência fundamental da passarela. O coeficiente de amortecimento estrutural foi considerado como sendo igual a 1% ($\xi=0,01$) (Debona, 2014). Os valores das acelerações de pico são comparados com os valores limites de normas de projeto (Sétra 2006; HIVOSS, 2008).

Inicialmente foram realizadas análises com base no emprego de 46, 56 e 70 pedestres, respectivamente, caminhando no centro da passarela, igualmente espaçados, na mesma direção e com velocidade constante, conforme ilustrado nas Fig. 15 a 17. Em seguida foram analisadas situações de carregamento considerando-se duas fileiras de pedestres caminhando sobre o tabuleiro da passarela, resultando em uma quantidade de pedestres igual a 92, 112 e 140, respectivamente, como apresentado nas Figs. 18 a 20.

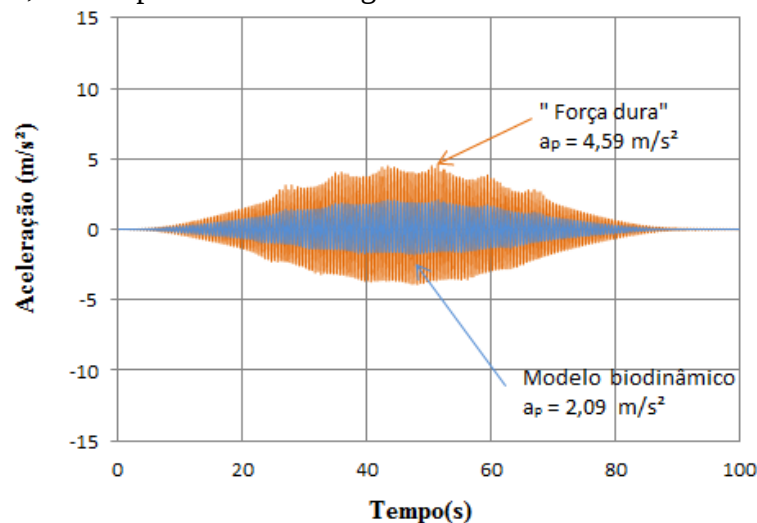


Figura 15. Aceleração vertical associada ao caminhar de 46 pedestres espaçados em 1,47m

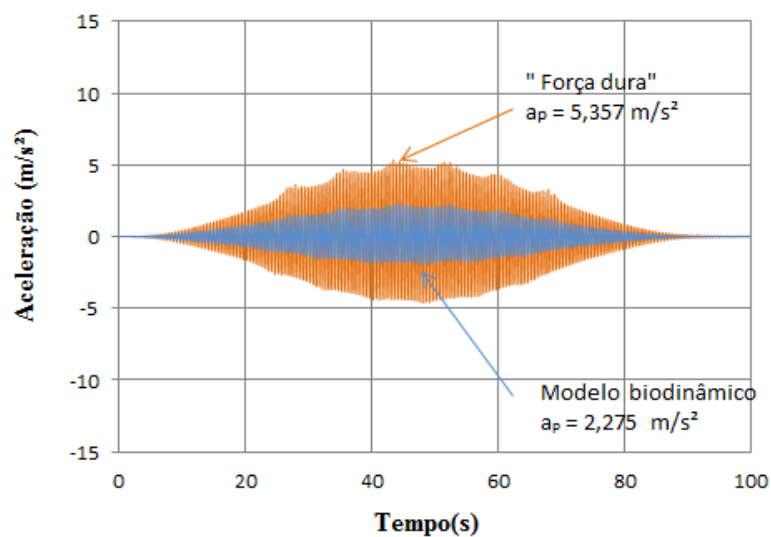


Figura 16. Aceleração vertical associada ao caminhar de 56 pedestres espaçados em 1,25 m

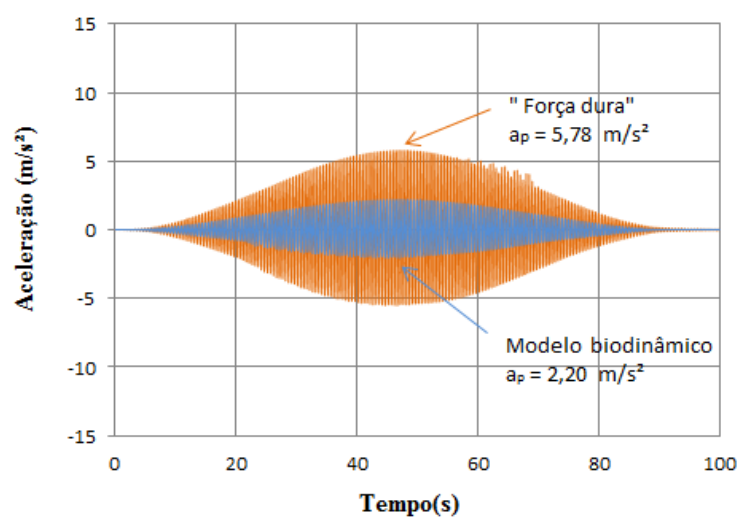


Figura 17. Aceleração vertical associada ao caminhar de 70 pedestres espaçados em 1,00 m

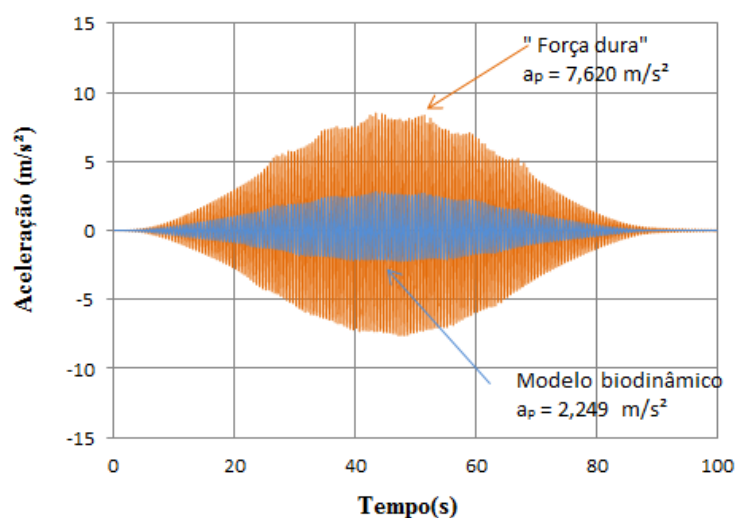


Figura 18. Aceleração vertical associada ao caminhar de 92 pedestres espaçados em 1,47 m

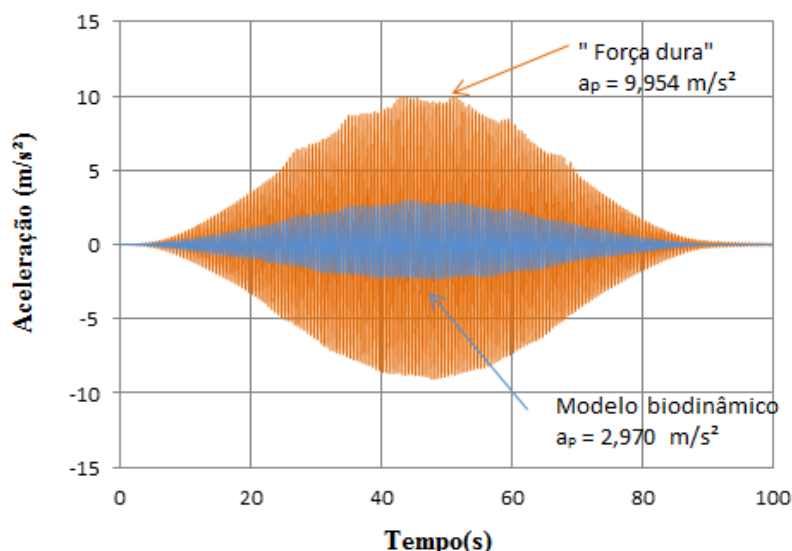


Figure 19. Aceleração vertical associada ao caminhar de 112 pedestres espaçados em 1,25 m

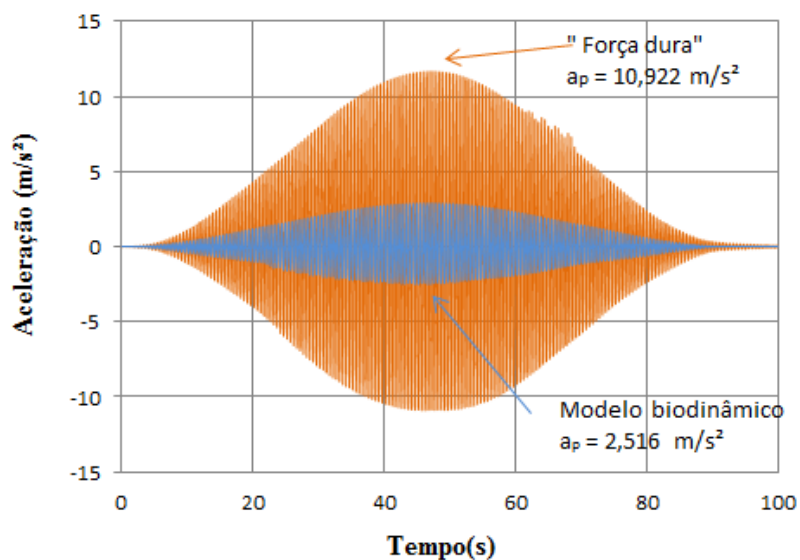


Figura 20. Aceleração vertical associada ao caminhar de 140 pedestres espaçados em 1,00 m

Em seguida, as Tabelas 6 e 7 apresentam uma comparação quantitativa entre os valores das acelerações de pico obtidos ao longo do presente estudo e os valores limites de projeto dos guias Sétra (2006) e HIVOSS (2008), assim como a classificação quanto ao conforto humano dos pedestres, para as classes de carregamento definidas por padrão em cada um dos respectivos guias de projeto Sétra (2006) e HIVOSS (2008).

Na sequência do texto, a Fig. 21 ilustra, de forma qualitativa, a variação dos valores das acelerações máximas e função do número de pedestres caminhando sobre o modelo estrutural, para cada estratégia de modelagem utilizada ao longo da pesquisa: com base no emprego dos modelos biodinâmicos (efeito da interação pedestre-estrutura) e modelagem tradicional mediante a utilização dos modelos de “força dura”.

Tabela 6. Avaliação dos valores das acelerações de pico com base no guia de projeto Sétra (2006)

Número de Pedestres	Aceleração de Pico (m/s ²)		Conforto Humano	
	Força Dura	Modelo Biodinâmico	Força Dura	Modelo Biodinâmico
46	4,59	2,09	Inaceitável	Mínimo
56	5,35	2,27	Inaceitável	Mínimo
70	5,78	2,20	Inaceitável	Mínimo
92	7,62	2,24	Inaceitável	Mínimo
112	9,95	2,97	Inaceitável	Inaceitável
140	10,92	2,51	Inaceitável	Inaceitável

Tabela 7. Comparação das acelerações de pico com base no guia de projeto HIVOSS (2008)

Número de Pedestres	Aceleração de Pico (m/s ²)		Conforto Humano	
	Força Dura	Modelo Biodinâmico	Força Dura	Modelo Biodinâmico
46	4,59	2,09	Inaceitável	Mínimo
56	5,35	2,27	Inaceitável	Mínimo
70	5,78	2,20	Inaceitável	Mínimo
92	7,62	2,24	Inaceitável	Mínimo
112	9,95	2,97	Inaceitável	Inaceitável
140	10,92	2,51	Inaceitável	Inaceitável

Com base nas análises efetuadas ao longo deste trabalho de pesquisa e nos resultados apresentados na forma de gráficos e tabelas, Figs. 15 a 20 e Tabelas 6 e 7, pode-se concluir, com clareza, que os modelos biodinâmicos (sistemas “massa-mola-amortecedor”), representativos da ação dos pedestres sobre a passarela, acoplados aos nós do modelo numérico em elementos finitos, atuam fortemente no sentido de amortecer o movimento de vibração vertical da estrutura, agindo de forma efetiva como atenuadores passivos desta vibração, ocasionando grandes diferenças quantitativas nos resultados (acelerações de pico) obtidos entre as duas estratégias de modelagem.

No que diz respeito à avaliação das acelerações de pico, mediante o emprego das classificações de conforto humano propostas pelos guias de projeto Sétra (2006) e HIVOSS (2008), verifica-se que o nível de conforto humano para os pedestres é mínimo na maioria das situações de carregamento investigadas neste estudo (até 92 pedestres). Entretanto, a partir de 92 pedestres os guias de projeto classificam o modelo estrutural como sendo inaceitável, sob o ponto de vista de conforto humano.

Com base nos resultados alcançados ao longo desta investigação, fica claro para os autores que a metodologia de análise que considera na modelagem a introdução dos modelos biodinâmicos (efeito da interação dinâmica pedestre-passarela), fornece valores de acelerações de pico menos elevados e mais próximos das medições experimentais em sistemas estruturais reais, quando comparados aos modelos que utilizam a “força dura”, conforme ilustrado na Fig. 24. Evidentemente, fica patente que, a partir da observação dos resultados apresentados na Fig. 21 que os valores das acelerações de pico provenientes da modelagem tradicional (“força dura”) não refletem a realidade prática de projeto.

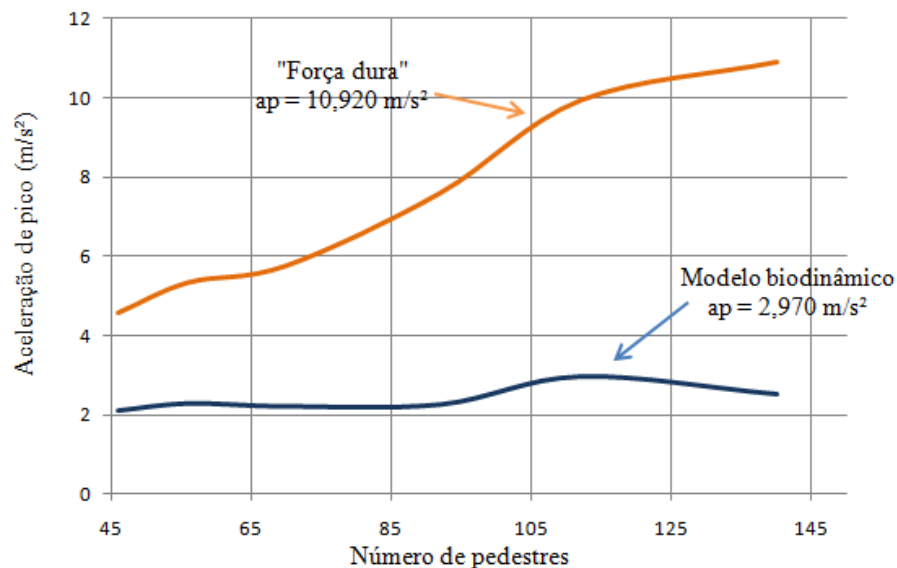


Figura 21. Variação das acelerações de pico em função do número de pedestres

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho de pesquisa apresenta uma contribuição, no sentido de avaliar-se numericamente o comportamento estrutural dinâmico de passarelas de pedestres mistas (aço-concreto) submetidas ao caminhar humano. A metodologia de análise é baseada em uma estratégia de modelagem mais realista, considerando a interação dinâmica pedestre-passarela, a partir do emprego de modelos biodinâmicos, levando-se em conta as características dinâmicas das pessoas (massa, rigidez e amortecimento).

A passarela mista (aço-concreto) analisada refere-se a um modelo estrutural existente, situado na Avenida Ayrton Senna, na cidade do Rio de Janeiro/RJ, Brasil. O sistema estrutural é composto por três vãos simplesmente apoiados, sendo que o vão central do modelo possui 68,6m de comprimento. A passarela é frequentemente utilizada por estudantes, ciclistas e moradores da região para travessia da Avenida Ayrton Senna, estando, também, próxima a estabelecimentos de ensino e casas de show.

O modelo numérico-computacional da passarela investigada foi desenvolvido com base no emprego de técnicas usuais do método dos elementos finitos, por meio da utilização do programa ANSYS (ANSYS, 2009). Desta forma, foi possível verificar e avaliar os níveis de vibração da estrutura, quando submetida ao caminhar dos pedestres.

Cabe ressaltar que a frequência fundamental do modelo estrutural analisado se aproxima bastante da frequência de passo dos pedestres, favorecendo a ocorrência do fenômeno físico da ressonância. A resposta dinâmica da passarela, em termos dos valores das acelerações de

pico, foi obtida e comparada com os limites propostos por dois guias de projeto internacionais (Sétra, 2006; HIVOSS, 2008). Avaliando-se estes valores foi constatado que o modelo estrutural não atende os limites de conforto humano previstos pelos guias de projeto em quase todas as situações de carregamento analisadas neste estudo.

Foi verificado que os modelos biodinâmicos (efeito da interação dinâmica pedestre-passarela), representativos da ação dos pedestres sobre o modelo estrutural, atuam fortemente no sentido de amortecer o movimento de vibração da estrutura, agindo de forma efetiva como atenuadores passivos, ocasionando diferenças quantitativas importantes nos valores das acelerações de pico.

Diante dos resultados encontrados ao longo desta investigação, os autores reforçam a relevância do desenvolvimento de investigações mais detalhadas acerca da influência do amortecimento proveniente dos pedestres, mediante testes experimentais e análises numéricas. Os resultados encontrados ao longo desta investigação reforçam a urgência e importância, da consideração da ação dinâmica humana sobre passarelas de pedestres; e, bem como, apontam para a relevância de estudos mais detalhados acerca da modelagem desta ação dinâmica proveniente dos pedestres, com modelos mais realista do caminhar humano.

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, 2009. Swanson Analysis Systems, Inc., P.O. Box 65, Johnson Road, Houston, PA, 15342-0065, Version 10.0, *Basic analysis procedures*, Second edition.
- Bachmann H., W.J Ammann, F. Deischl, J. Eisenmann, J. Floegl, G.H. Hirsch, et al., 1995. *Vibration problems in structures - practical guidelines*, Basel (Switzerland): Institut für Baustatik und Konstruktion, Birkhäuser.
- Caprani, C.C., Keogh, J., Archbold, P., Fanning, P., 2011. “Characteristic Vertical Response of a Footbridge Due to Crowd Loading”, *Proceedings of the 8th International Conference on Structural Dynamics, EURODYN 2011*, Leuven, Belgium.
- Costa, N. P. A., 2013. *Interação dinâmica pessoa-estrutura de passarelas em material compósito*, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Amazonas, UFAM, Amazonas, Brasil.
- Debona, G.L., 2014. *Efeito da interação dinâmica pedestre-estrutura sobre a resposta dinâmica de passarelas mistas (aço-concreto)*, CILAMCE 2014.
- Duarte, I.F.B., 2015. *Avaliação do conforto humano de passarelas mistas (aço-concreto) mediante o emprego de modelos biodinâmicos*, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, PGECIV, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ, Rio de Janeiro, Brasil (Em desenvolvimento).
- Ferris, D. P., Louie, M. Farley, C. T., 1998. “Running in the real world: adjusting leg stiffness for different surfaces”. *Proc. R. Soc. London B* 265, pp. 989-994.
- Figueiredo, F.P., 2005, *Estudo do comportamento dinâmico de passarelas devido ao caminhar de pedestres*, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, PGECIV, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ, Rio de Janeiro, Brasil.

HIVOSS, 2008. *Human Induced Vibration of Steel Structures, Design of Footbridges Guideline. Reserch Fund for Coal and Steel.*

ISO 5982, 1981. International Organization for Standardization. *Bases for Design of Structures - Vibration and Shock-Mechanical driving point impedance of the human body.*

Kim, S. H., Cho, K. I., Choi, M. S., Lim, J. Y., 2008. "Development of human body model for the dynamic analysis of footbridges under pedestrian induced excitation". *Steel Structures*, 8, pp 333-345.

Lima, N. L. de A., 2007, *Efeito da modelagem do carregamento do impacto do calcanhar humano e do amortecimento estrutural na resposta dinâmica de passarelas mistas*, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, PGECIV, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ, Rio de Janeiro, Brasil.

Matsumoto, Y., Griffin, M. J., 2003. "Mathematical models for the apparent masses of standing subjects exposed to vertical whole-body vibration", *Journal of Sound and Vibration*, 260 pp. 431-451.

Miyamori, Y., Obata, T., Hayashikawa, T., Sato, K., 2001. "Study on identification of human walking model based on dynamic response characteristics of pedestrian bridges". *The Eighth East Asia-Pacific conference on structural engineering and construction*. In: Proceedings CD-ROM, Paper No. 1066.

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, Chicago, USA.

Nhleko, S., Zingoni, A., Moyo, P., 2008. "A variable mass model for describing load impulses due to periodic jumping". *Engineering Structures*, 30, pp. 1760-1769.

Nigg, B. M., Liu, W., 1999. "The effect of muscle stiffness and damping on simulated impact force peaks during running". *Journal of Biomechanics*, 32, pp. 849-856.

Sachse, R., Pavic, A., Reynolds, P., 2003. "Human-Structure Dynamic Interaction in Civil Engineering Dynamics: A Literature Review". *The Shock and Vibration Digest*, Vol. 35, N^o. 1, pp. 3-18.

Sétra, 2006. *Guide méthodologique passerelles piétonnes (Technical guide footbridges: Assesment of vibrational behaviour of footbridges under pedestrian loading).*

Silva, F.T., 2011. *Vibração de passarelas de pedestres na direção vertical considerando modelos biodinâmicos de pessoas caminhando*, Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, PPGEM, Universidade Federal da Paraíba, UFPB, João Pessoa, Paraíba, Brasil.