

3.01.02: Estruturas

Ação do Caminhar de Pedestres em Passarelas FlexíveisFilipe A. Rezende^{1*}, Eliane M. L. Carvalho²

1. Aluno de Graduação, Escola de Engenharia Civil da UFF, Niterói

2. D. Sc., Prof. Titular / Orientadora, TEC/UFF, Niterói

Resumo:

Devido às atuais tendências arquitetônicas de concepções estruturais inovadoras para projetos de passarelas, houve um aumento do número dos casos de problemas de vibração nestas estruturas associados à ação do caminhar dos pedestres. Guias de projeto internacionais já tratam a ação do caminhar como carregamento dinâmico, através da utilização de um modelo de força periódica. Porém, em estruturas muito leves ocorre maior interação pessoa-estrutura, ocasionando uma alteração considerável nas propriedades dinâmicas do sistema, onde se destaca a simulação dos pedestres através de modelos biodinâmicos. O presente trabalho realizou simulações do carregamento humano feitas por meio de modelo de força e modelos biodinâmicos, de maneira a avaliar a relevância da interação pessoa-estrutura na resposta estrutural de uma passarela flexível localizada no Rio de Janeiro. Um sistema de controle de vibrações foi proposto como solução para a estrutura em questão.

Palavras-chave: Vibração, Experimental, Controle**Apoio financeiro:** PIBIC**Trabalho selecionado para a JNIC pela instituição:** UFF**Introdução:**

Passarelas são estruturas muito leves e recorrentes no cenário urbano, que apresentam, muitas vezes, baixa rigidez associada a longos vãos. Com a atual tendência de utilização de concepções estruturais inovadoras para o projeto dessas estruturas, houve um aumento do número dos casos de problemas de vibração relacionados à ação do caminhar dos pedestres. De acordo com Dang e Zivanovic (2013), as passarelas mais susceptíveis a apresentarem problemas de vibração são aquelas cujas frequências naturais estão compreendidas na faixa típica do caminhar humano, entre 1,5Hz e 2,4Hz.

Guias de projeto internacionais já tratam a ação do caminhar como carregamento dinâmico, através da utilização de um modelo de força periódica. Porém, em estruturas muito leves ocorre maior interação pessoa-estrutura, ocasionando uma alteração considerável nas propriedades dinâmicas do sistema, onde se destaca a simulação dos pedestres através de modelos biodinâmicos.

O modelo de força consiste numa força variável na posição e no tempo, cuja intensidade é periódica, representada por uma Série de Fourier. O modelo biodinâmico, por sua vez, simula os pedestres por sistemas massa-mola de propriedades dinâmicas próprias.

Desta forma, o presente trabalho tem como objetivo o estudo dos modelos de simulação do carregamento humano através do modelo de força e modelos biodinâmicos, de maneira a avaliar a relevância da interação pessoa-estrutura na resposta estrutural. A estrutura analisada é uma passarela de pedestres localizada no Rio de Janeiro, que apresenta problemas de vibração e cuja frequência para o primeiro modo vertical é de 1,85Hz (Rezende *et al.*, 2016).

Para tal fim, dois modelos numéricos foram elaborados, e posteriormente calibrados com os resultados experimentais. O primeiro deles é tridimensional, para análise de vibrações livres para obter as propriedades dinâmicas da estrutura. O segundo modelo utiliza as propriedades dinâmicas do primeiro com o intuito de obter as respostas da estrutura sob a ação do caminhar humano.

Como a passarela apresentou níveis de aceleração que levaram ao desconforto dos pedestres, foi proposto um sistema de controle de vibração a ser instalada na referida estrutura, para atender aos valores recomendados pelos códigos de projeto para o Estado Limite de Serviço.

Metodologia:

Neste trabalho, o modelo de força utilizado para as simulações foi extraído do guia de projeto Sétra (2006), representado pela Série de Fourier

$$F(t) = G + \sum_{j=1}^n G \alpha_j \sin(2j\pi f_p t - \phi_j)$$

Onde G é o peso de uma pessoa, f_p é a frequência do passo (Hz), α_j e ϕ_j são os coeficientes do j -ésimo harmônico da Série de Fourier. $F(t)$ é a intensidade da força, variando no tempo t , em segundos.

O modelo biodinâmico utilizado, foi o mesmo proposto por Silva *et al.* (2013), de um grau de liberdade, ilustrado na Figura 1.

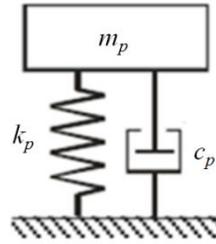


Figura 1: Modelo biodinâmico de um grau de liberdade utilizado

As propriedades dinâmicas do pedestre foram definidas em concordância com as expressões obtidas por Silva *et al.* (2013) por meio de modelos de regressão calibrados com resultados experimentais, dadas por

$$m_p = 97,082 + 0,275m - 37,518f_p$$

$$c_p = 29,041m_p^{0,833}$$

$$k_p = 30351,744 - 50,261c_p + 0,035c_p^2$$

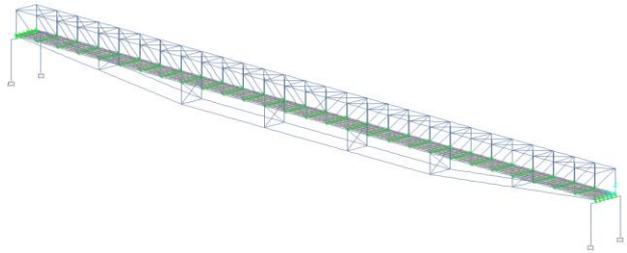
Onde m_p é a massa modal da pessoa (kg), m é a massa da pessoa (kg), f_p é a frequência do passo (Hz), c_p é o coeficiente de amortecimento da pessoa (N.s/m), e k_p é a rigidez da pessoa (N/m).

A campanha experimental foi realizada numa passarela localizada no Rio de Janeiro (Rezende *et al.*, 2016). A estrutura analisada possui um vão de 68,6m. A passarela possui seus elementos de vigas, pilares e contraventamentos em perfis metálicos soldados, e a laje é de concreto. Os ensaios consistiram em testes de vibração livre e forçada com uma e quatro pessoas andando em ressonância com a passarela.

Os sinais de vibração livre foram usados para a calibração de um modelo numérico elaborado no SAP2000, por meio da correlação entre as respectivas frequências naturais. A Fig. 2a apresenta uma foto da passarela enquanto que a Fig. 2b mostra o modelo numérico desenvolvido.



(a) Foto da passarela



(b) Modelo Tridimensional da Passarela

Figura 2: Foto e modelo da passarela

As propriedades dinâmicas do modelo tridimensional foram então exportadas para um outro modelo mais simples, bidimensional. Devido a estrutura analisada ser uma passarela, o comportamento deste modelo foi semelhante ao de uma viga biapoiada.

A fim de validar as simulações do caminhar humano, elas foram comparadas com os resultados experimentais de vibração forçada. É importante ressaltar que devido à dificuldade de manter a mesma marcha por um período razoável de tempo e também pelo fato do trânsito na passarela não ter sido impedido no dia dos ensaios, os sinais mostraram diferentes padrões ao longo do tempo, alternando entre batimentos e trechos em ressonância. Portanto, os sinais foram divididos cada um em três trechos, como mostra a Figura 3.

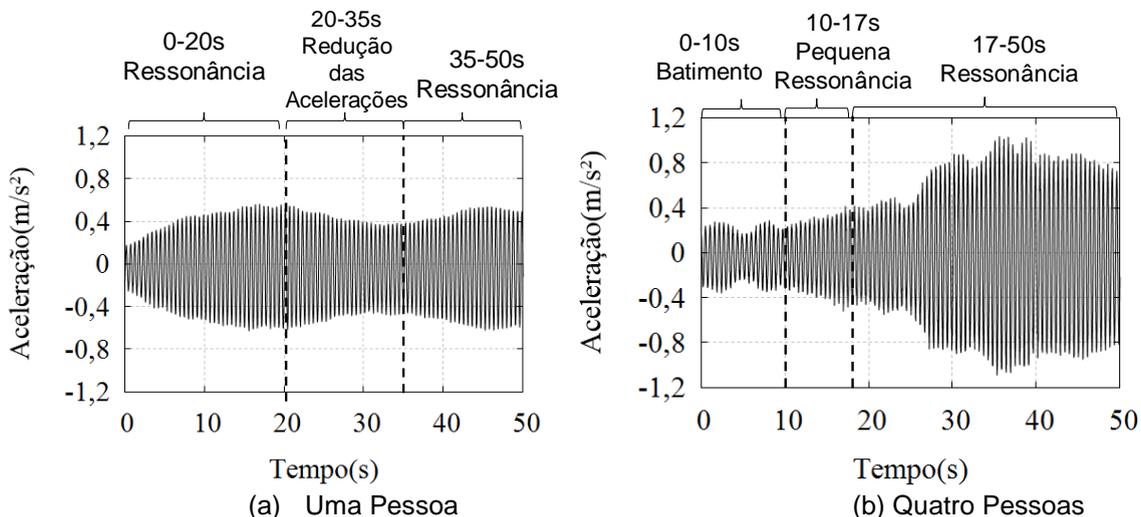


Figura 3: Divisão em trechos dos sinais experimentais de vibração forçada na direção vertical

Desta forma, foram conduzidas simulações do caminhar humano por meio de Série de Fourier e por modelos biodinâmicos, associados a sistema de controle de vibração. As simulações feitas foram também correlacionadas com os ensaios de vibração forçada, mostrados na seção a seguir.

Resultados e Discussão:

As simulações feitas com os modelos de carregamento humano geraram as respostas teóricas mostradas na Figura 4 e na Figura 5, nos domínios do tempo e da frequência, respectivamente.

A análise dos resultados permite concluir que ambos os modelos de simulação do carregamento obtiveram uma boa correlação com os resultados experimentais no domínio do tempo. As diferenças entre os dois modelos foram mais notáveis no sinal no domínio do tempo com quatro pessoas caminhando na passarela, no qual a simulação por modelo biodinâmico obteve resultados mais próximos dos experimentais, enquanto o modelo de força gerou resultados mais conservadores. Os melhores resultados do modelo biodinâmico são justificáveis, uma vez que com mais pessoas caminhando sobre a passarela, cresce a interação dinâmica pessoa-estrutura, aumentando a relevância em considerá-la na análise. Em relação ao sinal no tempo com uma pessoa andando sobre a passarela, as diferenças entre os dois modelos foram negligenciáveis.

Os resultados no domínio da frequência não sinalizam diferenças consideráveis na energia entre estes cenários, uma vez que os picos de frequência ficaram bem justapostos. Porém os espectros do modelo biodinâmico ficaram ainda mais próximos do espectro do sinal experimental.

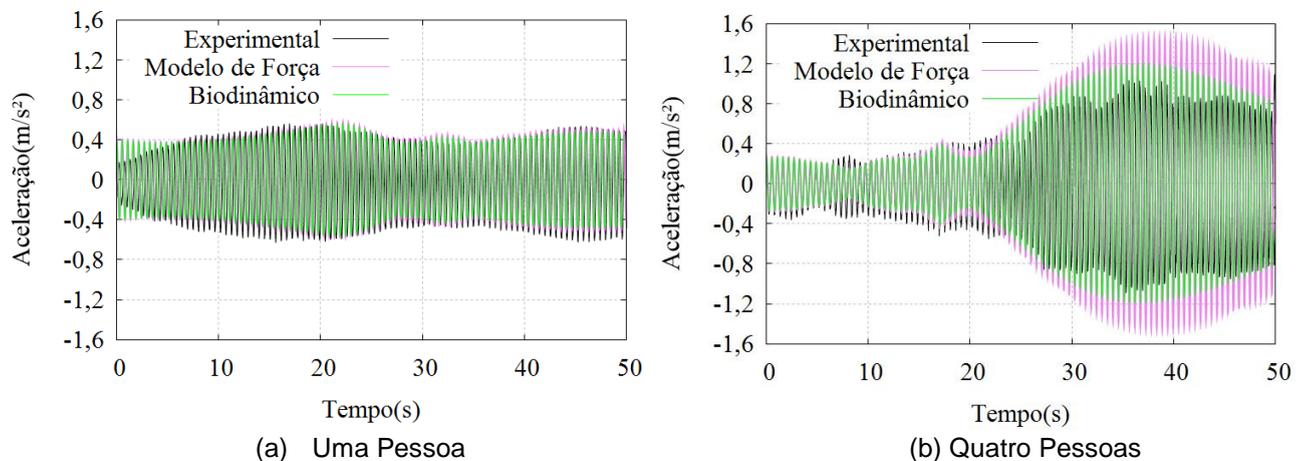


Figura 4: Simulações do caminhar de pedestres no domínio do tempo

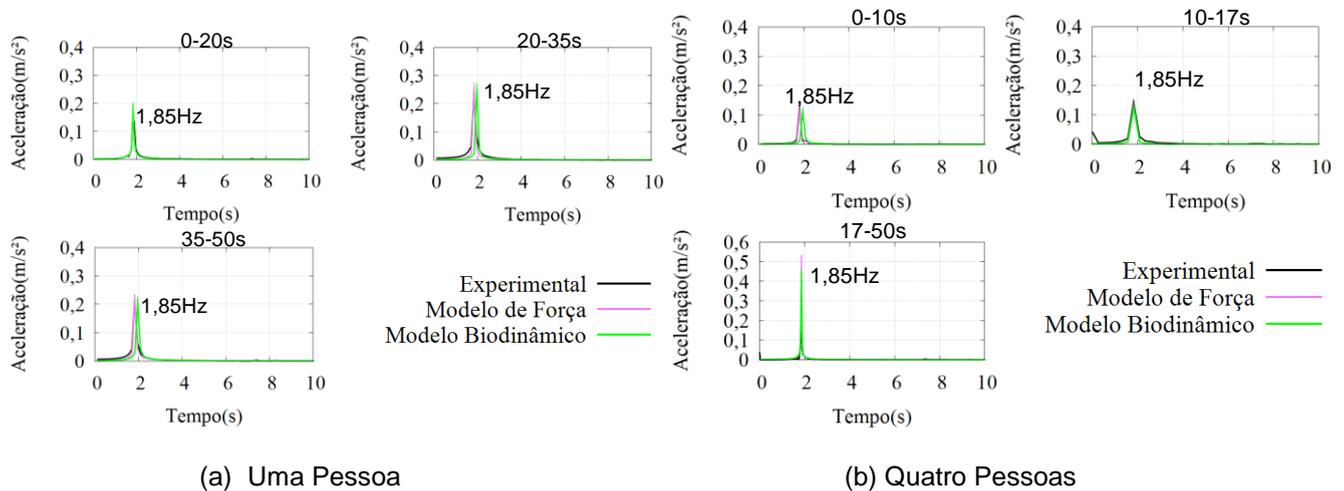
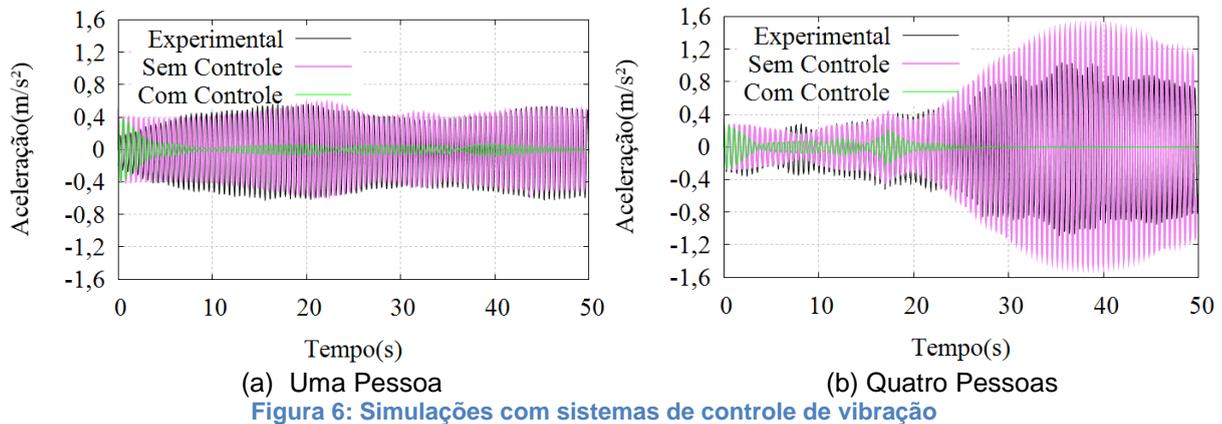


Figura 5: Simulações do caminhar de pedestres no domínio da frequência

Com relação a performance em serviço da passarela, o sinal com quatro pessoas andando em ressonância, mostrado na Fig.3(b), já mostra acelerações elevadas, da ordem de $1,0\text{m/s}^2$. Simulações feitas com a carga de multidão proposta por Sétra (2006) geram acelerações da ordem de $4,0\text{m/s}^2$, o que, segundo o mesmo guia de projeto, representa um nível intolerável de conforto humano.

Desta forma, foram feitas análises teóricas com sistemas passivos de controle de vibração, gerando os resultados mostrados na Figura 6.



Como pode ser observado a partir da Figura 6, as acelerações caíram vertiginosamente, aumento o nível de conforto da passarela para máximo, segundo o guia de projeto Sétra (2006).

Conclusões:

As simulações feitas neste trabalho permitem avaliar a relevância da interação pessoa-estrutura em passarelas leves. Dois modelos do caminhar humano foram analisados: o modelo de força, e o modelo biodinâmico.

Apesar da boa correlação de ambas as simulações, o modelo biodinâmico obteve valores ainda mais próximos dos resultados experimentais, principalmente para o caso de quatro pessoas. Para o sinal de uma pessoa, a diferença entre os modelos biodinâmico e de força foi desprezível, o que permite concluir que quanto maior a quantidade de pessoas em trânsito na passarela, maior a relevância em se considerar a interação pessoa-estrutura.

As análises teóricas com sistemas de controle de vibração aumentaram o nível de conforto da passarela de um patamar intolerável para máximo, provando a eficácia destes sistemas de controle.

Referências bibliográficas

- Dang H.V., Zivanovic S., 2013. Modelling Pedestrian Interaction with Perceptibly Vibrating Footbridges, *FME Trans.* 41
- Rezende, F.A.; Sá, T.G; Varela, W.D; Carvalho, E.M.L., 2016. Medição de Vibrações em Passarela Metálica com Grande Vão. *XXXVII Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural*. Paraguai.
- SAP2000 14 [Software]. Computer and Structures, Berkley, CA.
- Sétra, 2006. Service d'Études techniques des routes et auto routes. Footbridges. Assessment of vibrational behaviour of footbridges under pedestrian loading.
- Silva, F.T., Brito, H.M.B.F, Pimentel, R.L., 2013. Modeling of crowd load in vertical direction using biodynamic model for pedestrians crossing footbridges. *Canadian Journal of Civil Engineering*, v. 40, n. 12, p. 1196-1204.