

PROPOSTA DE MODELO BIODINÂMICO ACOPLADO PARA AVALIAR A INTERAÇÃO ENTRE PEDESTRE E ESTRUTURA

Marcelo André Toso, marcelo.toso@ifsc.edu.br¹

Herbert Martins Gomes, herbert@mecanica.ufrgs.br²

¹Instituto Federal de Santa Catarina, Euclides Hack, 1603, 89820-000, Xanxerê, SC, Brasil.

²Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Sarmento Leite, 425, 90050-170, Porto Alegre, RS, Brasil.

Resumo: Alguns problemas estruturais dinâmicos caracterizam-se pela possibilidade da ocorrência de ressonância, devido à coincidência ou proximidade entre as frequências de excitação e as frequências naturais do sistema. A interação entre humanos em movimento e estruturas, geralmente, ocorre em estruturas esbeltas, na qual o nível de vibração é potencialmente elevado. Além disso, há a adição de massa para o sistema estrutural, devido à presença de pessoas e um aumento de amortecimento devido à capacidade do corpo humano em absorver energia vibratória. Para avaliar a interação dinâmica entre pedestre e estrutura na direção vertical, este trabalho propõe um modelo biodinâmico (composto de massa, mola, amortecedor e atuador) que, posteriormente, é acoplado a uma estrutura. O modelo proposto considera interações com estruturas rígidas e flexíveis que são excitadas dinamicamente por um pedestre. Os resultados do modelo proposto são comparados com a solução analítica de um problema de viga simplesmente apoiada, utilizando um modelo com um grau de liberdade, apresentando respostas praticamente idênticas. Desta forma, conclui-se que o modelo acoplado proposto é válido, estando apto para realizar análises que consideram a interação pedestre/estrutura.

Palavras-chave: modelo biodinâmico, vibrações estruturais, passarelas, interação pedestre-estrutura.

1. INTRODUÇÃO

Passarelas são destinadas essencialmente para a travessia de pedestres, sendo construídas de forma temporária ou permanente, visando transpor uma via de trânsito motorizado ou obstáculos naturais. Essas estruturas precisam ser seguras e apresentar um comportamento que não ofereça desconforto aos usuários, tornando-as propensas ao uso. As passarelas atuais apresentam arquiteturas arrojadas, projetos inovadores, ou em outros casos, visam atender limitações físicas e/ou orçamentárias. Como resultado têm-se estruturas esbeltas, flexíveis, com baixa rigidez e amortecimento. Os carregamentos produzidos por movimentos humanos como, por exemplo, o caminhar, ocorrem em baixas frequências, podendo aproximar-se ou coincidir com as frequências naturais de estruturas como passarelas de pedestres. Nestas situações, podem ocorrer vibrações excessivas. A compreensão da interação pedestre/estrutura é limitada, ou muitas vezes, ignorada por órgãos normativos. Problemas dinâmicos em diferentes sistemas estruturais ocorrem em virtude do desconhecimento dos reais esforços, aplicações dos mesmos sobre as estruturas, condições de contorno do sistema, entre outros. Muitas passarelas têm frequências naturais próximas ou coincidentes com as frequências dominantes do carregamento dinâmico dos pedestres e, portanto, têm um potencial para sofrer vibrações excessivas. Altos níveis de vibrações estruturais também estão associados a baixos coeficientes de amortecimento. Esses níveis de vibrações podem ter valores acima do desejável, seja com relação à segurança estrutural ou em função do conforto dos usuários, causando incômodo direto ou indireto para os pedestres. De acordo com Zivanovic *et al.* (2005), a interação pedestre-estrutura é um tema relevante e tem suma importância no projeto de estruturas esbeltas e flexíveis dinamicamente excitadas por seres humanos.

As vibrações, induzidas por pedestres ao utilizar passarelas, têm sido por longa data reconhecidas como um problema de projeto. Passarelas são estruturas destinadas essencialmente ao tráfego de pedestres, sendo o caminhar a atividade típica mais comumente estudada e usualmente adotada pelas normas de projeto. Os problemas de vibrações tornam-se cada vez mais importantes devido à frequente necessidade de se otimizar os projetos das estruturas. Nas últimas décadas, os materiais utilizados no projeto de estrutural, tais como passarelas, têm mudado significativamente. A presença de materiais de construção de alta resistência, sistemas estruturais cada vez mais esbeltos, flexíveis com menor massa e amortecimento contribuem para esse novo contexto de projeto. Como consequência, estas estruturas

tornam-se susceptíveis a vibrações quando sujeitas a carregamentos dinâmicos. A maioria das passarelas atuais são longas e leves. Essas estruturas podem enfrentar problemas devido à vibração excessiva ou até mesmo se tornarem pouco atrativas em seu uso, devido à insegurança que podem trazer aos seus usuários.

Stoyanoff e Hunter (2003), relatam que as frequências naturais de passarelas com vãos curtos normalmente não são suscetíveis às vibrações provocadas por pedestres. Porém, quando a distância entre os vãos aumenta, diminuem-se as frequências naturais da estrutura, sendo que a ocupação e interação humana sobre estas, torna-se uma preocupação devido aos fenômenos de ressonância. Os autores afirmam que forças verticais produzem frequências situadas entre 1,5 a 4,0 Hz. Neste contexto, Kala *et al.* (2009) e Hauksson (2005), afirmam que passarelas que apresentam problemas de operacionalidade devido à vibração são estruturas de baixa frequência ou com frequências naturais, dentro da faixa de frequência da caminhada humana. Nesse caso, o fenômeno de ressonância pode ocorrer quando uma frequência natural da estrutura possuir valores coincidentes com os valores de frequência da marcha e/ou seus harmônicos correspondentes. Normalmente, os primeiros três harmônicos são considerados como potencialmente ressonantes. Esses harmônicos surgem devido ao padrão de caminhada de cada indivíduo, caracterizando um aumento de carga devido a um pé e o descarregamento simultâneo do outro pé, e variações na amplitude da força entre as pernas. Recentemente, Dang e Zivanovic (2013), relatam que problemas de vibrações em passarelas modernas sob o tráfego de pedestres, geralmente, são motivo de preocupação se a estrutura tem um dos modos de vibração na faixa de frequência típica da taxa de passos humana, compreendida entre 1,5 a 2,4 Hz. Este trabalho objetiva propor um modelo biodinâmico vertical acoplado a estrutura, considerando os efeitos da massa modal, rigidez e amortecimento corporal, visando analisar a interação existente entre pedestre e estrutura.

2. MODELO BIODINÂMICO DE UM GRAU DE LIBERDADE COM ATUADOR

Nesta Seção apresenta-se um modelo biodinâmico composto de massa, mola, amortecedor e atuador. Este acoplamento objetiva avaliar a interação existente entre pedestre e estrutura na direção vertical. O modelo proposto considera interações com estruturas rígidas e flexíveis. O modelo apresenta alguns aspectos similares a metodologia proposta por Costa (2013), posteriormente publicado por Pfeil *et al.* (2014). No entanto, os autores utilizam o método da superposição modal, considerando somente um modo de vibração estrutural, assumindo uma estrutura de passarela no plano, além de considerar o deslocamento do calcanhar do pedestre como fonte de excitação e atuação do indivíduo.

2.1. Modelo de Interação: Estrutura Rígida

No caso do caminhar sobre uma superfície rígida, u_{pr} representa as oscilações em deslocamento em torno do centro de gravidade do pedestre (CG) em relação à sua posição inicial de equilíbrio com a força da gravidade. Experimentalmente, mede-se tanto a força vertical de reação do solo F_R quanto a aceleração do CG do pedestre $\ddot{u}_{pr}$. De acordo com a Figura 1, o pedestre desloca-se com velocidade constante v e a representação do esforço da caminhada é realizada pela força do atuador F_A o qual irá gerar as oscilações no sistema de 1 GDL. Assume-se que o pedestre se comporte como um sistema 1 GDL com massa, rigidez e amortecimento e que a presença de um atuador irá fornecer a excitação necessária à oscilação vertical.

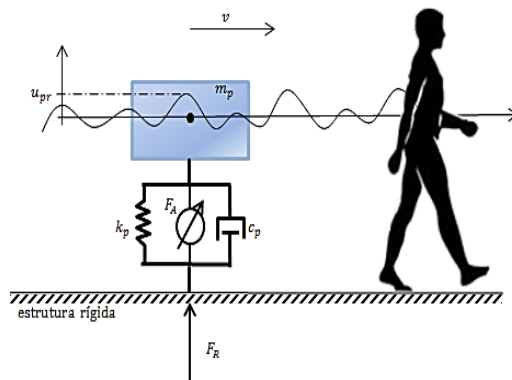


Figura 1. Sistema de 1GDL com atuador para representar o caminhar de um pedestre.

Considerando o equilíbrio de forças no ponto de contato do pé com a superfície rígida, obtêm-se a Eq. (1):

$$F_R + c_p \dot{u}_{pr} + k_p u_{pr} + F_A = 0 \quad (1)$$

Agora, considerando condições de equilíbrio no centro de gravidade do pedestre, tem-se a Eq. (2):

$$m_p \ddot{u}_{pr} = -c_p \dot{u}_{pr} - k_p u_{pr} - F_A \quad (2)$$

Reescrevendo as equações anteriores obtêm-se a Eq. (3):

$$F_R = m_p \ddot{u}_{pr} \quad (3)$$

Assim, a força de reação vertical é proporcional a força de inércia no centro de massa desenvolvida pelo pedestre durante a caminhada.

2.2. Modelo de Interação: Estrutura Flexível

Neste caso, considera-se que a estrutura é flexível em função da baixa rigidez e amortecimento. A estrutura, no ponto de contato, poderá apresentar deslocamento u_s . Assim, ao caminhar sobre uma estrutura flexível, u_p^* irá representar o deslocamento vertical do pedestre em torno do CG referente à sua situação em repouso. Este deslocamento pode ser reescrito em duas parcelas, conforme a Eq. (4):

$$u_p^* = u_{pr} + u_p \quad (4)$$

Onde: u_{pr} é o deslocamento em torno do CG na condição da superfície rígida e u_p é o deslocamento relacionado à interação do pedestre com a estrutura flexível também medido em relação à situação do pedestre em repouso. A Figura 2 representa o caminhar do pedestre sobre uma superfície flexível.

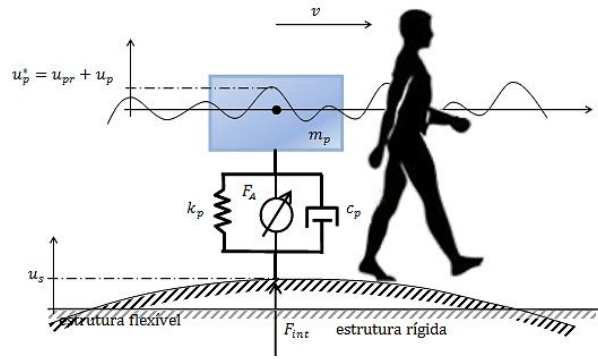


Figura 2. Sistema de 1GDL com atuador para representar o caminhar de um pedestre sobre uma superfície flexível.

Considerando o equilíbrio de forças no ponto de contato do pé com a superfície flexível, obtêm-se a Eq. (5):

$$F_{int} + c_p(\dot{u}_{pr} + \dot{u}_p - \dot{u}_s) + k_p(u_{pr} + u_p - u_s) + F_A = 0 \quad (5)$$

Agora, considerando o equilíbrio de forças no CG do pedestre caminhando sobre a estrutura flexível, obtêm-se a Eq. (6):

$$m_p(\ddot{u}_{pr} + \ddot{u}_p) = -c_p(\dot{u}_{pr} + \dot{u}_p - \dot{u}_s) - k_p(u_{pr} + u_p - u_s) - F_A \quad (6)$$

Assumindo a atuação similar à situação da superfície rígida, substituindo a Eq. (1) na Eq. (5), tem-se a Eq. (7):

$$F_{int} = -c_p(\dot{u}_p - \dot{u}_s) - k_p(u_p - u_s) + F_R \quad (7)$$

A equação anterior considera que a força de interação a ser aplicada na estrutura não é apenas a força de reação do solo (na situação piso rígido) F_R , mas também componentes de amortecimento e rigidez do movimento relativo entre o CG do pedestre e estrutura. Substituindo a Equação 5 na Equação 6, obtêm-se a Eq. (8):

$$m_p(\ddot{u}_{pr} + \ddot{u}_p) = -c_p(\dot{u}_{pr} + \dot{u}_p - \dot{u}_s) - k_p(u_{pr} + u_p - u_s) + F_R + c_p \dot{u}_{pr} + k_p u_{pr} \quad (8)$$

Considerando a Eq. (3) e reescrevendo-a, tem-se a Eq. (9):

$$m_p \ddot{u}_p = -c_p(\dot{u}_p - \dot{u}_s) - k_p(u_p - u_s) \quad (9)$$

Esta é a equação de movimento do CG do pedestre relativo ao deslocamento de interação u_p . Para obter os deslocamentos reais do pedestre na situação de superfície flexível (u_p^*), é preciso somar ao deslocamento de interação (u_p), o deslocamento obtido na situação de superfície rígida (u_{pr}). A força de reação vertical de interação F_{int} é igual à força de inércia desenvolvida pelo pedestre neste sistema (considerando a aceleração de interação do pedestre $\ddot{u}_p$ e não a aceleração do CG do pedestre na condição de piso rígido $\ddot{u}_{pr}$) somado à força de reação do caso com a superfície rígida, conforme Eq. (10):

$$F_{int} = m_p \ddot{u}_p + F_R \quad (10)$$

Lembrando que o deslocamento u_s é o deslocamento vertical no ponto onde se encontra o pedestre em contato com a estrutura (não necessariamente um determinado grau de liberdade da estrutura), então, a Eq. (9) deve ser colocada em função de todos os graus de liberdade da estrutura $\{u_s\}$ sendo acoplada à equação da estrutura. Supondo um elemento de viga plana de Euler-Bernoulli para discretizar a estrutura, as funções de forma de um elemento são escritas de acordo com a Eq. (11) [Gere e Weaver, 1987]:

$$[N^e(\xi_0)] = \begin{bmatrix} 1 - \xi_0 & 0 & 0 & \xi_0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 - 3(\xi_0)^2 + 2(\xi_0)^3 & L(\xi_0 - 2(\xi_0)^2 + (\xi_0)^3) & 0 & 3(\xi_0)^2 - 2(\xi_0)^3 & L(-(\xi_0)^2 + (\xi_0)^3) \\ 0 & (-6\xi_0 + 6\xi_0^2)/L & 1 - 4\xi_0 + 3\xi_0^2 & 0 & (6\xi_0 - 6\xi_0^2)/L & 3\xi_0^2 - 2\xi_0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

Onde: $\xi_0 = x_0/L$, sendo, x_0 a distância do ponto de contato para o início do elemento; L é o comprimento do elemento. Os deslocamentos no ponto de contato no interior do elemento e podem ser interpolados utilizando-se as funções de forma e os deslocamentos nos nós do elemento, de acordo com a Eq. (12):

$$\{u_s^e(x)\}_{3 \times 1} = \begin{Bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{Bmatrix} = [N^e(\xi_0)]_{3 \times 6} \{\bar{u}_s^e\}_{6 \times 1} \quad (12)$$

Onde: $\{\bar{u}_s^e\} = \{x_i \ y_i \ \theta_i \ x_j \ y_j \ \theta_j\}^T$ sendo i o nó inicial e j o nó final. Assim, para avaliar apenas o deslocamento vertical no local de contato, considera-se a Eq. (13):

$$u_s = [0 \ 1 \ 0] [N^e(\xi_0)] \{\bar{u}_s^e\} \quad (13)$$

O deslocamento nodal do elemento e ($\{\bar{u}_s^e\}$) pode ser expresso em função dos deslocamentos da estrutura utilizando-se uma matriz que selecionará os GDLs respectivos (vertical no caso abaixo), de acordo com a Eq. (14):

$$u_s = [0 \ 1 \ 0] [N^e(\xi_0)] \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 1 \end{bmatrix} \{u_s\} = [0 \ 1 \ 0]_{1 \times 3} [N^e(\xi_0)]_{3 \times 6} [Q]_{6 \times n} \{u_s\}_{n \times 1} \quad (14)$$

Onde:

$$u_s = \{H(e, \xi_0)\} \{u_s\} \quad (15)$$

E considerando:

$$\{H(e, \xi_0)\} = [0 \ 1 \ 0]_{1 \times 3} [N^e(\xi_0)]_{3 \times 6} [Q]_{6 \times n} \quad (16)$$

Portanto a equação do movimento do pedestre, Eq. (9), quando caminhar em uma estrutura flexível, pode ser reescrita conforme a Eq. (17):

$$m_p \ddot{u}_p + c_p(\dot{u}_p - \{H(e, \xi_0)\} \{\dot{u}_s\}) + k_p(u_p - \{H(e, \xi_0)\} \{u_s\}) = 0 \quad (17)$$

Para a força de interação F_{int} ocorre o mesmo, é necessário escrevê-la em função dos graus de liberdade da estrutura utilizando as funções de forma, metodologia similar a anteriormente apresentada. Assim, obtêm-se a Eq. (18):

$$\{\mathbf{F}^e\}_{6 \times 1} = [\mathbf{N}^e(\xi_0)]_{6 \times 3}^T \begin{Bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{Bmatrix}_{3 \times 1} F_{int} \quad (18)$$

Onde: $\xi_0 = x_0/L$ é o ponto de aplicação da força de interação nas coordenadas adimensionais do elemento. Lembrando que $\{\mathbf{F}^e\}$ pode ser colocado em função das forças globais da estrutura, conforme a Eq. (19):

$$\{\mathbf{F}_{int}\}_{n \times 1} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 1 \end{bmatrix}^T \{\mathbf{F}^e\} = [\mathbf{Q}]_{n \times 6}^T \{\mathbf{F}^e\}_{6 \times 1} \quad (19)$$

Substituindo a Eq. (18) na Eq. (19), obtêm-se a Eq. (20):

$$\{\mathbf{F}_{int}\} = [\mathbf{Q}]^T [\mathbf{N}^e(\xi_0)]^T \begin{Bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{Bmatrix} F_{int} = \{\mathbf{H}(e, \xi_0)\}^T F_{int} \quad (20)$$

Agora, substituindo a Eq. (7) e (15) na Eq. (20), obtêm-se a Eq. (21):

$$\{\mathbf{F}_{int}\} = \{\mathbf{H}(e, \xi_0)\}^T [-c_p(\dot{u}_p - \{\mathbf{H}(e, \xi_0)\}\{\dot{\mathbf{u}}_s\}) - k_p(u_p - \{\mathbf{H}(e, \xi_0)\}\{\mathbf{u}_s\}) + F_R] \quad (21)$$

Esta equação representa a força de interação do pedestre quando caminha em uma estrutura flexível.

2.3. Acoplamento: Modelo Biodinâmico e Equação do Movimento Estrutural

Em um determinado instante de tempo t , a força de interação estará atuando em determinado ponto (x_0) em um elemento (e) de uma estrutura discreta que possui n graus de liberdade. Lembrando que a força de interação calculada anteriormente é a resultante da ação da estrutura no pedestre, para manter o equilíbrio de forças, devemos representar a força de interação como sendo $-F_{int}$ aplicada à estrutura, pois será a resultante da ação do pedestre na estrutura para manter o equilíbrio. Na análise dinâmica de estruturas, os deslocamentos nodais de um sistema dinâmico podem ser obtidos usando a Eq. (22):

$$[\mathbf{M}]\{\ddot{\mathbf{u}}_s\} + [\mathbf{C}]\{\dot{\mathbf{u}}_s\} + [\mathbf{K}]\{\mathbf{u}_s\} = \{\mathbf{F}(t)\} - \{\mathbf{F}_{int}(t)\} \quad (22)$$

Onde: $[\mathbf{M}]$, $[\mathbf{C}]$ e $[\mathbf{K}]$ são as matrizes de ordem $n \times n$ (sendo n o número de graus de liberdade do sistema) descrevendo a massa, amortecimento e rigidez respectivamente; $\{\mathbf{u}_s\}$, $\{\dot{\mathbf{u}}_s\}$ e $\{\ddot{\mathbf{u}}_s\}$ são vetores de ordem $n \times 1$ representando os deslocamentos, velocidades e acelerações nodais; $\{\mathbf{F}\}$ é o vetor de forças atuantes na estrutura no GDL correspondente. Utilizando-se a Eq. (21), para o valor da força de interação tem-se a Eq. (23):

$$[\mathbf{M}]\{\ddot{\mathbf{u}}_s\} + [\mathbf{C}]\{\dot{\mathbf{u}}_s\} + [\mathbf{K}]\{\mathbf{u}_s\} - \{\mathbf{H}(e, \xi_0)\}^T c_p \dot{u}_p + c_p \{\mathbf{H}(e, \xi_0)\}^T \{\mathbf{H}(e, \xi_0)\}\{\dot{\mathbf{u}}_s\} - \{\mathbf{H}(e, \xi_0)\}^T k_p u_p + k_p \{\mathbf{H}(e, \xi_0)\}^T \{\mathbf{H}(e, \xi_0)\}\{\mathbf{u}_s\} = \{\mathbf{F}\} - \{\mathbf{H}(e, \xi_0)\}^T F_R \quad (23)$$

A Eq. (23) pode ser reescrita de forma compacta, conforme a Eq. (24):

$$[\mathbf{M}]\{\ddot{\mathbf{u}}_s\} + [\mathbf{C}] + \mathbf{C}^* \{\dot{\mathbf{u}}_s\} + [\mathbf{K}] + \mathbf{K}^* \{\mathbf{u}_s\} - \{\mathbf{H}(e, \xi_0)\}^T c_p \dot{u}_p - \{\mathbf{H}(e, \xi_0)\}^T k_p u_p = \{\mathbf{F}\} - \{\mathbf{F}_R\} \quad (24)$$

Onde: $\{\mathbf{F}_R\} = \{\mathbf{H}(e, \xi_0)\}^T F_R$.

Utilizando a Eq. (17) do pedestre, que é desenvolvida em função dos vetores de deslocamento da estrutura e acoplando esta equação com a Eq. (24) da estrutura, obtêm-se a Eq. (25):

$$\begin{bmatrix} [\mathbf{M}] & \{\mathbf{0}\} \\ \{\mathbf{0}\}^T & m_p \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\dot{\mathbf{u}}_s\} \\ \dot{u}_p \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [\mathbf{C}] + \mathbf{C}^* & -\{\mathbf{H}(e, \xi_0)\}^T c_p \\ -\{\mathbf{H}(e, \xi_0)\} c_p & c_p \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\dot{\mathbf{u}}_s\} \\ \dot{u}_p \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [\mathbf{K}] + \mathbf{K}^* & -\{\mathbf{H}(e, \xi_0)\}^T k_p \\ -\{\mathbf{H}(e, \xi_0)\} k_p & k_p \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\mathbf{u}_s\} \\ u_p \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{\mathbf{F}(t)\} \\ 0 \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} \{\mathbf{F}_R(t)\} \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (25)$$

Considerando $\mathbf{X} = \{\{\mathbf{u}_s\} u_p\}^T$ e reescrevendo a equação anterior, obtêm-se a Eq. (26):

$$[\mathbf{M}]\{\ddot{\mathbf{X}}\} + [\mathbf{C}(t)]\{\dot{\mathbf{X}}\} + [\mathbf{K}(t)]\{\mathbf{X}\} = \{\mathbf{F}^*\} - \{\mathbf{F}_R^*(t)\} = \{\mathbf{F}\} \quad (26)$$

As Eq. (27), (28) e (29) representam as matrizes do sistema acoplado (estrutura e pedestre), considerando massa, amortecimento e rigidez respectivamente:

$$[\mathbf{M}]_{n+1 \times n+1} = \begin{bmatrix} [\mathbf{M}]_{n \times n} & \{\mathbf{0}\}_{n \times 1} \\ \{\mathbf{0}\}_{1 \times n}^T & m_p \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$[\mathbf{C}(t)]_{n+1 \times n+1} = \begin{bmatrix} [[\mathbf{C}]_{n \times n} + \mathbf{C}^*(i)_{n \times n}] & -\{\mathbf{H}(e, \xi_0)\}^T c_p \\ -\{\mathbf{H}(e, \xi_0)\} c_p & c_p \end{bmatrix} \quad (28)$$

$$[\mathbf{K}(t)]_{n+1 \times n+1} = \begin{bmatrix} [[\mathbf{K}]_{n \times n} + \mathbf{K}^*(i)_{n \times n}] & -\{\mathbf{H}(e, \xi_0)\}^T k_p \\ -\{\mathbf{H}(e, \xi_0)\} k_p & k_p \end{bmatrix} \quad (29)$$

Uma das maneiras de resolver a equação do movimento no domínio do tempo (Eq. 26) é usando um método de integração direta. Neste trabalho, utiliza-se o Método de Newmark (Bathe, 1996) para determinar a resposta estrutural, considerando todos os modos de vibração da estrutura.

Parâmetros biodinâmicos (massa modal, rigidez e amortecimento) relacionados a vários pedestres podem ser encontrados em: Toso *et al.* (2014) e Toso *et al.* (2016).

3. VALIDAÇÃO DO MODELO BIODINÂMICO ACOPLADO A ESTRUTURA

Esta Seção objetiva validar o modelo biodinâmico proposto anteriormente. A seguir, realiza-se um comparativo com a solução analítica e o modelo proposto por Yang *et al.* (2004). Considera-se o problema de uma viga simplesmente apoiada, utilizando um modelo de um grau de liberdade. O modelo apresentado pelos pesquisadores avalia a interação e o acoplamento existente entre veículo e estrutura. Neste caso, realizam-se readequações, adotando-se as mesmas hipóteses utilizadas por Yang *et al.* (2004), porém, utiliza-se o modelo biodinâmico aqui proposto (interação pedestre e estrutura) a fim de verificar a formulação e potencialidades do modelo. Tanto o modelo de Yang *et al.* (2004), quanto o modelo proposto utilizam o método de Newmark considerando dinâmica não linear para resolver os sistemas de equações diferenciais do movimento.

3.1. Interação Veículo-Estrutura

Yang *et al.* (2004), consideram uma viga biapoiada, onde o modelo de veículo atua com velocidade constante. A estrutura possui comprimento (L_b) de 25 m; módulo de elasticidade (E) de 2,87 GPa; coeficiente de Poisson (ν) de 0,2; momento de inércia (I) de 2,4 m⁴; massa por unidade de comprimento (m) igual a 2303 kg/m. Quanto aos dados do veículo: massa (M_v) é 5750 kg; rigidez (k_v) é 1595 kN/m. O veículo trafega a uma velocidade constante de 100 km/h. A razão entre a massa do veículo e massa da ponte é 0,1. A frequência de vibração da ponte (ω_1) é 30,02 rad/s e do modelo de veículo (ω_v) é 16,66 rad/s. Representa-se o deslocamento vertical da viga (u_b) como sendo: $u_b = q_b(t) \sin(\pi x/L)$. O deslocamento do modelo é representado como $q_v(t)$. Neste problema, Yang *et al.* (2004), desconsideram o efeito do amortecimento da viga. A Eq. (30) representa o acoplamento das equações da viga e do modelo de veículo, considerando somente o primeiro modo de flexão da estrutura [Yang *et al.* 2004].

$$\begin{Bmatrix} \ddot{q}_b \\ \ddot{q}_v \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 2\omega_v^2 \frac{M_v}{mL} \sin^2 \frac{\pi vt}{L} \omega_1^2 & -2\omega_v^2 \frac{M_v}{mL} \sin \frac{\pi vt}{L} \\ -\omega_v^2 \frac{M_v}{mL} \sin \frac{\pi vt}{L} & \omega_v^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q_b \\ q_v \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -2 \frac{M_v g}{mL} \sin \frac{\pi vt}{L} \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (30)$$

A resposta dinâmica de deflexão e aceleração vertical no meio do vão da viga é apresentada na Fig. 3. Nestas figuras também é apresentado a solução analítica do problema previamente descrito. Compara-se o modelo acoplado proposto com o modelo de Yang *et al.* (2004). O modelo acoplado proposto foi discretizado utilizando 14 elementos de viga e 15 nós. Cada nó possui 3 graus de liberdade (u_x, u_y, θ_z).

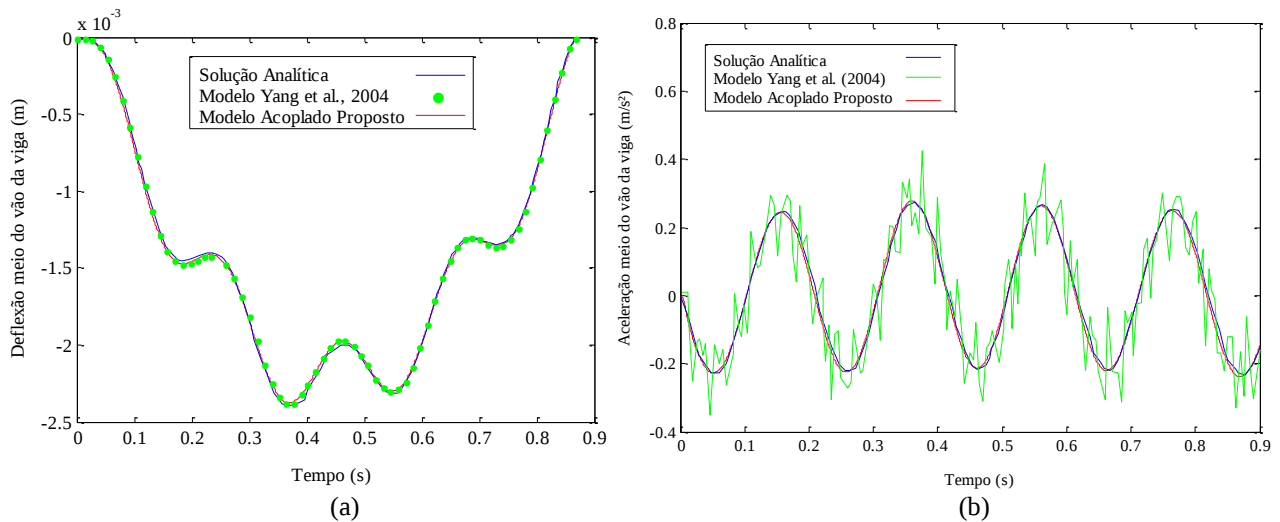


Figura 3. (a) Deflexão vertical estrutural (b) Aceleração vertical estrutural.

Observa-se boa concordância dos resultados de ambos os modelos com a resposta analítica do problema. Yang *et al.* (2004), consideram vários modos de vibração em seu modelo. Os autores afirmam que a inclusão de modos mais altos de vibração pode resultar em uma significativa oscilação da resposta de aceleração, na qual foi negligenciada na equação analítica (Eq. 30) e no modelo acoplado proposto. Os resultados da Fig. 3 mostram que o modelo acoplado proposto apresenta respostas praticamente idênticas da solução analítica do problema, considerando apenas o primeiro modo de vibração da estrutura.

A deflexão e aceleração vertical do modelo acoplado proposto; modelo de Yang *et al.* (2004) e solução analítica são apresentadas na Fig. 4.

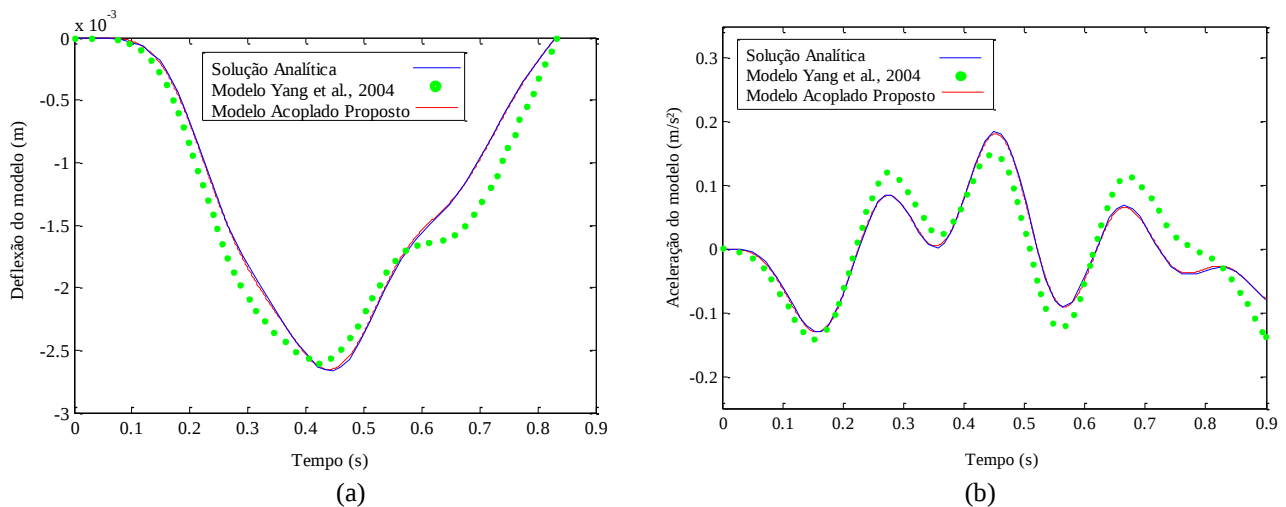


Figura 4: (a) Deflexão vertical do modelo veículo/estrutura; (b) Aceleração vertical do modelo veículo/estrutura.

Quanto aos resultados anteriores, Yang *et al.* (2004), afirmam que as diferenças obtidas nas respostas do seu modelo (solução analítica e numérica) podem ser atribuídas, principalmente, devido a inclusão de modos superiores de vibração. Os cinco primeiros valores de frequências naturais obtidos com o modelo acoplado proposto para a estrutura previamente analisada são: 30,02; 70,18; 120,08; 211,42; 270,22 *rad/s*. Observa-se que o valor de frequência fundamental estrutural (30,02 *rad/s*) é idêntico ao valor apresentado por Yang *et al.* (2004).

4. CONCLUSÃO

Este trabalho objetivou propor um modelo biodinâmico acoplado a estrutura para avaliar a interação entre pedestre e estruturas de baixa frequência, propensas a vibrações principalmente na direção vertical. A compreensão atual deste fenômeno é limitada e muitas vezes ignorada por diversos órgãos normativos. Os resultados preliminares deste artigo indicam que o modelo biodinâmico acoplado a estrutura aqui proposto, apresenta respostas praticamente idênticas da solução analítica (ambas considerando apenas o primeiro modo de vibração) do problema analisado, interação veículo/estrutura. Quanto ao modelo de Yang *et al.* (2004), os resultados também são próximos, porém a inclusão de

modos superiores de vibração resulta em respostas diferentes da solução analítica. Desta forma, conclui-se que o modelo acoplado proposto é válido, sendo adequado para realizar análises que consideram a interação pedestre/estrutura. A etapa seguinte deste trabalho utilizará mensurações experimentais (previamente realizadas) para obter os dados de entrada do modelo (amplitudes de forças e acelerações) que posteriormente são utilizadas para avaliar os parâmetros do modelo biodinâmico, composto de massa modal, amortecimento e rigidez. Este modelo de um único grau de liberdade representará a dinâmica na direção vertical de um pedestre caminhando, a fim de investigar os efeitos de vibrações em passarelas de pedestres.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio do CNPq e CAPES na realização desta pesquisa.

6. REFERÊNCIAS

- Bathe, K.J., 1996, "Finite Element Procedures", Ed. Prentice-Hall, New Jersey, United States, 1038 p.
- Costa, N.P.A., 2013, "Interação dinâmica pessoa-estrutura de passarelas em material compósito", Dissertação, Universidade Federal do Amazonas, Manaus.
- Dang, H. V. e Zivanovic, S., 2013, "Modelling pedestrian interaction with perceptibly vibrating footbridges", FME Transactions, Vol. 41 (4), pp. 271-278.
- Gere, J.M. e Weaver, W.J.R., 1987, "Análise de Estruturas Reticuladas", Ed. Guanabara S.A, Rio de Janeiro, Brasil, 444 p.
- Hauksson, F., 2005, "Dynamic behavior of footbridges subjected to pedestrian-induced vibrations", Master's Dissertation, Lund University, Lund.
- Kala, J., Salajka, V. e Hradil, P., 2009, "Footbridge Response on Single Pedestrian Induced Vibration Analysis", International Journal of Engineering and Applied Sciences, Vol. 5, pp. 269-280.
- Pfeil, M., Amador, N., Pimentel, R. e Vasconcelos R., 2014, "Analytic - numerical model for walking person – footbridge structure interaction", Proceedings of the 9th International Conference on Structural Dynamics, Eurodyn, Porto, Portugal, pp. 1079-1085.
- Stoyanoff, S., Hunter, M., 2003, "Footbridges: Pedestrian induced vibrations", Tech Notes, No. 15, RWDI Consulting Engineers & Scientists, pp. 1-2.
- Toso, M.A., Gomes, H.M., Silva, F.T. e Pimentel, R.L., 2014, "Correlations between parameters of a biodynamic model for human walking", Proceedings of the 8th Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Uberlândia, Brasil, pp. 1-9.
- Toso, M.A., Gomes, H.M., Silva, F.T. e Pimentel, R.L., 2016, "Experimentally fitted biodynamic models for pedestrian-structure interaction in walking situations", Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 72-73, pp. 590-606.
- Yang, Y.B., Yao, Z. e Wu, Y.S., 2004, "Vehicle-bridge Interaction Dynamics: With Applications to High-speed Railways", Ed. World Scientific, Singapore, Malásia, 530 p.
- Zivanovic, S., Pavic, A. e Reynolds, P., 2005, "Vibration serviceability of footbridges under human-induced excitation: a literature review", Journal of Sound and Vibration, Vol. 279, pp.1-74.

7. RESPONSABILIDADE AUTURAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

A COUPLED BIODYNAMIC MODEL TO ASSESS THE INTERACTION BETWEEN PEDESTRIAN AND STRUCTURE

Marcelo André Toso, marcelo.toso@ifsc.edu.br¹

Herbert Martins Gomes, herbert@mecanica.ufrgs.br²

¹Federal Institute of Santa Catarina, Euclides Hack, 1603, 89820-000, Xanxerê, SC, Brazil

²Federal University of Rio Grande do Sul, Sarmiento Leite, 425, 90050-170, Porto Alegre, RS, Brazil

Abstract. *Some structural dynamic problems are distinguished by the possibility of the occurrence of resonance, due to the coincidence or proximity between the excitation frequencies and the natural frequencies of the system. The interaction between moving humans and structures generally occurs in slender structures in which the level of vibration is potentially elevated. In addition, there is the addition of mass to the structural system, due to the presence of people and an increase in damping due to the human body's ability to absorb vibratory energy. To evaluate the dynamic interaction between pedestrian and structure in the vertical direction, this work proposes a biodynamic model (composed of mass, spring, damper, and actuator) that is later coupled to a structure. The proposed model considers interactions with rigid and flexible structures that are dynamically excited by a pedestrian. The results of the proposed model are compared with the analytical solution of a simply supported beam problem, using a model with one degree of freedom, presenting almost identical results in case of closed analytical solutions. In this way, it is concluded that the proposed coupled model is valid, being able to perform analyzes that consider the pedestrian/structure interaction.*

Keywords: *biodynamic model, structural vibrations, footbridge, pedestrian-structure interaction.*