



JSAEE-2022

EFEITO DA INTERAÇÃO DINÂMICA PESSOA-ESTRUTURA EM PASSARELAS SOB A AÇÃO DO CAMINHAR DE GRUPOS DE PEDESTRES

DYNAMIC INTERACTION BETWEEN GROUPS OF PEDESTRIANS AND FOOTBRIDGE STRUCTURE

Igor Braz N. Gonzaga (1) (A); Michèle S. Pfeil (2); Wendell D. Varela (3)

(1) MSc. Eng. Civil, Doutorando, PEC/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.

(2) Dr. Prof., Universidade Federal do Rio de Janeiro, POLI/COPPE, Rio de Janeiro, Brasil.

(3) Dr. Prof., Universidade Federal do Rio de Janeiro, FAU/COPPE, Rio de Janeiro, Brasil.

Endereço para correspondência: igor.gonzaga@coc.ufrj.br; (A) Apresentador

Área temática: Métodos computacionais

Resumo

Para fins práticos de projeto de passarelas susceptíveis à ação dinâmica induzida por grupos de pedestres caminhando, dispõe-se no guia Sètra (2006) de um modelo equivalente de carga harmônica o qual foi desenvolvido considerando a ação humana por meio de um modelo de carga móvel (MCM). No entanto, resultados experimentais mostram que este modelo conduz a estimativas conservadoras de resposta dinâmica da estrutura por não contemplar os efeitos providos da interação pessoa-estrutura (IPE). Para avaliar estes efeitos, uma das abordagens recomendadas na literatura é representar pedestres caminhando como modelos biodinâmicos (MBs). Este trabalho apresenta resultados de simulações numérico-computacionais obtidos através do PIPE (Programa de Interação Pessoa-Estrutura) com o objetivo de conduzir um estudo paramétrico sobre a resposta de estruturas de passarelas sob a ação do caminhar de grupos de pedestres representados tanto pelo MCM como por MBs. A simulação do tráfego de pedestres é capaz de lidar com a variabilidade das características físicas e do caminhar dos pedestres em uma abordagem probabilística. Os parâmetros estudados são a massa modal, a taxa de amortecimento e o comprimento do vão da estrutura. Inicialmente, o PIPE foi validado por comparação das respostas de passarelas aos resultados obtidos empregando-se o modelo de carga do Sètra (2006). Em seguida, os resultados da simulação considerando a IPE são comparados aos deste modelo, mostrando o efeito da atenuação das respostas da estrutura, o qual é mais proeminente nos casos de estruturas leves e de baixo amortecimento.

Palavras-chave: Interação pessoa-estrutura, passarelas, Monte Carlo, modelos biodinâmicos.

Abstract

For practical design issues of footbridges susceptible to dynamics induced by walking groups, the equivalent moving load model (MLM) developed for modeling human walking is available on Sètra (2006). Nevertheless, experimental results show that this model leads to a conservative estimation for the dynamic response of footbridges because it does not account for the effects provided by the human-structure interaction (IPE). To evaluate these effects, one of the recommended approaches in the literature is to represent the pedestrians as moving biodynamic models (BMs). This work presents the results of numerical-computational simulations obtained through PIPE (Human-Structure Interaction Program) with the objective of conducting a parametric study of the dynamic response of footbridges for pedestrians modelling as MLM and BMs. The simulation of pedestrian traffic is able to lead with the variability of the physical characteristics and gait of the pedestrians in a probabilistic approach. The parameters analyzed are the modal mass, the damping ratio and the span of the structure. Firstly, the PIPE was validated by comparing the responses of the footbridge with the results obtained using the Sètra load model (2006). Then, the simulation results considering the IPE are compared to those of this model, showing the effect of the attenuation on the responses of the structure, which is more prominent in cases of light structures and low damping.

Keywords: Human-structure interaction, footbridges, Monte Carlo, biodynamic models.



1. INTRODUÇÃO

Estruturas de passarelas são susceptíveis ao efeito dinâmico do carregamento de pessoas caminhando. Para modelagem deste carregamento, as duas principais abordagens consideradas na literatura são: (i) representação dos pedestres através de um modelo de carga móvel (MCM) e (ii) representação dos pedestres através de modelos biodinâmicos (MBs) de 1 grau de liberdade (1GL) acoplados na estrutura (Pfeil *et al.*, 2014).

O MCM é frequentemente adotado pelas normas técnicas como, por exemplo, no guia prático francês Sètra (2006), que propõe uma carga harmônica a ser aplicada na área transitável da estrutura com efeito equivalente à de pedestres caminhando. A abordagem (ii) permite que sejam contabilizados os efeitos da interação pessoa estrutura (IPE) e fornece, em geral, estimativas de amplitude de resposta dinâmica da estrutura menos conservadoras que aquelas que seriam determinadas com o modelo de CM (Živanović, 2010).

O MCM é apropriado para grande parte das estruturas de passarelas, no entanto, em estruturas leves como aquelas construídas de materiais compósitos, é esperado que haja alto grau de IPE, sendo recomendável a representação dos pedestres como MBs (Pfeil *et al.*, 2014). Segundo Shahabpoor *et al.* (2016), a IPE é um efeito mútuo e contínuo da atuação dos pedestres sobre a passarela e, conseqüentemente, da passarela sobre os pedestres. Jones *et al.* (2011) definem a IPE como o fenômeno resultante do sistema dinâmico equivalente resultante da combinação entre as pessoas ocupantes e a estrutura.

No entanto, quantificar os efeitos procedentes da IPE envolve uma série de complexidades, como, por exemplo, definir um modelo matemático para representação do movimento do sistema dinâmico acoplado dos pedestres e da passarela (Pfeil *et al.*, 2014) e calibrar os parâmetros do MB representativo de pessoas caminhando (Pfeil *et al.*, 2022). Se a avaliação envolve grupos de pedestres, é necessário considerar também os efeitos da aleatoriedade das pessoas (Gonzaga *et al.*, 2021).

Desse modo, o objetivo deste trabalho é apresentar os resultados obtidos através de uma ferramenta computacional, denominada PIPE (Programa de Interação Pessoa-Estrutura), desenvolvida para representar pedestres através dos modelos de carga móvel e biodinâmico, e identificar os efeitos da IPE. A validação da implementação computacional foi efetuada comparando-se as respostas dinâmicas da estrutura para diferentes parâmetros de massa modal (m_e), taxa de amortecimento (ξ_e) e comprimentos de vão (L) com aquelas obtidas usando o modelo de carregamento harmônico proposto pelo guia Sètra (2006).

Para a análise dos efeitos da IPE, é proposto um modelo matemático que consiste em um sistema de equações diferenciais resultante do acoplamento dos sistemas dinâmicos de 1 grau de liberdade (1 GL) equivalente da estrutura de passarela e dos pedestres caminhando, estes últimos representados pelo modelo biodinâmico de Pfeil *et al.* (2022). Simulações numéricas são realizadas variando os parâmetros da passarela para diferentes densidades de ocupação.

2. MODELOS DE FORÇA

2.1 Modelo de Carga Móvel (MCM)

Durante a ação do caminhar de pedestres a massa corporal humana é constantemente acelerada/desacelerada e, portanto, é induz forças na direção vertical, longitudinal e lateral. Contudo, a componente vertical da força é a mais investigada (Ross, 2009).



Para simular o efeito da força vertical (f) gerada durante o caminhar de um pedestre, um modelo de carga móvel (CM) determinístico representado através de uma série de Fourier, como indicado na Eq. (1), é frequentemente utilizado (Bachmann e Ammann, 1987).

$$f(t) = G + \sum_{i=1}^{nh} G\alpha_i \sin(2\pi i f_p t - \varphi_i) \quad 1$$

sendo G o peso do pedestre, α_i o fator de amplificação dinâmica, f_p a frequência natural do caminhar do pedestre, t o tempo, φ_i o ângulo de fase em relação ao primeiro harmônico e nh o número de harmônicos da força.

Pela característica determinística da Eq. (1), torna-se inapropriado analisar a ação de multidão ou grupo de pessoas caminhando em passarelas, pois a força exercida por cada pedestre possui padrões individuais que dependem essencialmente das características próprias (físicas e do caminhar) de cada pessoa (Tubino e Picardo, 2018). Portanto, para avaliar os efeitos de multidão ou grupo de pessoas caminhando, o modelo da Eq. (1) é adaptado visando considerar a aleatoriedade do movimento dos N_{ped} pedestres caminhando sobre a estrutura em uma abordagem de carga móvel probabilística:

$$F(t) = \sum_{i=1}^{N_{ped}} \phi_{i,k} \delta_i \left[G_i + \sum_{j=1}^{nh} G_i \alpha_{j,i} \sin(2\pi j f_{p_i} t - \varphi_{j,i}) \right] \quad 2$$

em que: $\phi_{i,k}$ é o valor da amplitude modal (k -ésimo modo) associado a posição instantânea do i -ésimo pedestre na estrutura, δ_i é a função degrau unitário que controla se o pedestre está ou não na passarela, G_i e f_{p_i} são o peso e frequência do caminhar do i -ésimo pedestre, respectivamente. Estes dois últimos parâmetros (G_i e f_{p_i}) são gerados aleatoriamente com distribuição normal de probabilidade cuja média (μ) e desvio padrão (σ) são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1. Média e desvio padrão do peso e frequência do caminhar dos pedestres.

| Parâmetro | Média (μ) | Desvio padrão (σ) |
|------------|-----------------|----------------------------|
| G (kg) | 74,40 | 13,00 |
| f_p (Hz) | 2,00 | 0,175 |

O tempo de entrada dos pedestres na passarela segue distribuição de Poisson (Matsumoto *et al.*, 1978) com valor médio (λ) dado por:

$$\lambda = \frac{L/v_p}{N_{ped}} \quad 3$$

sendo L o comprimento da passarela e v_p a velocidade média do caminhar dos pedestres, igual a 1,5 m/s para todos os pedestres (Sètra, 2006).

2.2 Modelo de Carga do Sètra (2006)

O guia prático francês Sètra (2006) é uma das recomendações mais completas da atualidade para avaliação da ação de pedestres caminhando sobre passarelas. O procedimento adotado neste guia consiste em limitar as amplitudes máximas de aceleração da estrutura para o carregamento proposto baseado em critérios de conforto dos usuários. O modelo de carga do Sètra (2006) usado para simular a força gerada por pessoas caminhando na direção vertical, em situação de tráfego livre, isto é, para densidades de ocupação da estrutura inferiores a 1 ped/m² é dado por:



$$F(t) = F_0 \cos(2\pi f_s t) N_{eq} \psi \quad 4$$

em que: F_0 é a força de atuação do pedestre, cujos valores são: 280 N para o primeiro harmônico e 70 N para o segundo harmônico, f_e é a frequência natural da estrutura e, $\psi \in [0,1]$ é um fator de redução que considera o risco de ressonância entre a passarela e o valor médio da frequência do caminhar da multidão.

O número equivalente de pedestres (N_{eq}) indicado em (4) foi obtido em um procedimento denominado *equivalência de fluxos*. A determinação desse parâmetro foi realizada por meio de simulações numérico-computacionais e consiste, essencialmente, definir o número representativo de pedestres que reproduzem, em caminhada síncrona e em fase, o efeito da força equivalente do número real de pessoas caminhando aleatoriamente sobre a passarela. De acordo com o guia Sètra (2006), o N_{eq} pode ser determinado com:

$$N_{eq} = 10,8 \sqrt{\xi_e N_{ped}} \quad 5$$

sendo ξ_e a taxa de amortecimento estrutural e N_{ped} o número médio de pedestres esperado na estrutura.

2.3 Validação do programa PIPE

Simulações numéricas foram realizadas para validar a ferramenta computacional implementada para representação de pedestres caminhando através do modelo de carga móvel (CM) probabilístico. O conjunto de forças resultante da passagem aleatória dos pedestres (representado pela Eq. 2) foi aplicado como força generalizada $P(t)$ na equação de movimento do modelo de 1 grau de liberdade (1 GL) da estrutura, como mostrado na Eq. (6).

$$m_e \ddot{y}(t) + (2\xi_e \omega_e m_e) \dot{y}(t) + (\omega_e^2 m_e) y(t) = P(t) \quad 6$$

sendo \ddot{y} , \dot{y} e y , respectivamente, a aceleração, a velocidade e o deslocamento da estrutura ao longo do tempo. $\omega_e = 2\pi f_e$ é a frequência circular da estrutura.

A validação da ferramenta computacional PIPE (Programa de Interação Pessoa-Estrutura) é realizada por meio da comparação entre as respostas da estrutura, em termos de aceleração máxima característica, obtidas através da equação do movimento da estrutura (Eq. 6) com o MCM probabilístico proposto (Eq. 2) e o modelo de carga indicado pelo Sètra (2006). No caso da implementação dos pedestres pelo MCM probabilístico (Eq. 2), a aceleração máxima característica da estrutura é definida pelo percentil de 95%.

Na validação foram considerados diferentes valores para os parâmetros (X) de massa modal (m_e), taxa de amortecimento (ξ_e), frequência natural (f_e) e comprimento de vão (L) do modelo de 1GL da passarela. Conforme mostrado na Tabela 2, são indicados os valores de mínimo (X_{min}), ou seja, o menor valor adotado para determinado parâmetro (X), bem como o máximo valor ($X_{máx}$) atribuído para o parâmetro nas simulações. X_{min} é aumentado por um valor de incremento (inc) até $X_{máx}$. X_{ref} é o valor de referência atribuído para X .

Tabela 2. Valores limites e incremento para os parâmetros modais da estrutura.

| X | X_{min} | $X_{máx}$ | inc | X_{ref} |
|-------------|-----------|-----------|--------------------|-----------|
| m_e (ton) | 2,5 | 67,5 | $m_e = m_e + 2m_e$ | 7,5 |
| ξ_e (%) | 0,2 | 3,0 | 0,2 | 0,9 |
| L (m) | 20,0 | 80,0 | 20,0 | 60,0 |

A Figura 1 mostra as curvas de aceleração máxima característica no meio do vão da passarela em função dos diferentes parâmetros (X) indicados na Tabela 2. Nesses gráficos, enquanto um parâmetro X é alterado, os demais são mantidos com valores constantes em X_{ref} . Por exemplo, no gráfico da Figura 1(a),



a taxa de amortecimento (ξ_e) da passarela varia de 0,2% até 3,0%, com valores crescentes de incremento (*inc*), enquanto os valores da massa modal da estrutura (m_e) e do vão (L) são iguais aos valores de referência (X_{ref}), sendo 7,5 ton e 60 metros, respectivamente.

Para apresentação dos resultados, o valor da frequência natural da estrutura (f_e) foi mantido constante e igual ao valor médio da frequência do caminhar dos pedestres (f_p) indicado na Tabela 1 (igual a 2,0 Hz). Este procedimento foi realizado com o propósito de obter acelerações máximas da estrutura, que ocorrem na ressonância com o caminhar dos pedestres.

Os gráficos da Figura 1 mostram uma correlação satisfatória entre os resultados de aceleração máxima obtidos pelo modelo de carga equivalente do Sètra (2006) – cujas curvas são pontilhadas – e pelo PIPE, usando o modelo de carga móvel – cujos resultados são explicitados pelas curvas em linha cheia. A escala de cores desses gráficos mostra as diferentes densidades de ocupação, sendo azul, rosa e marrom, respectivamente, ocupações de 0,1 , 0,5 e 0,9 pedestres/m². Com isso validou-se o programa PIPE com MCM.

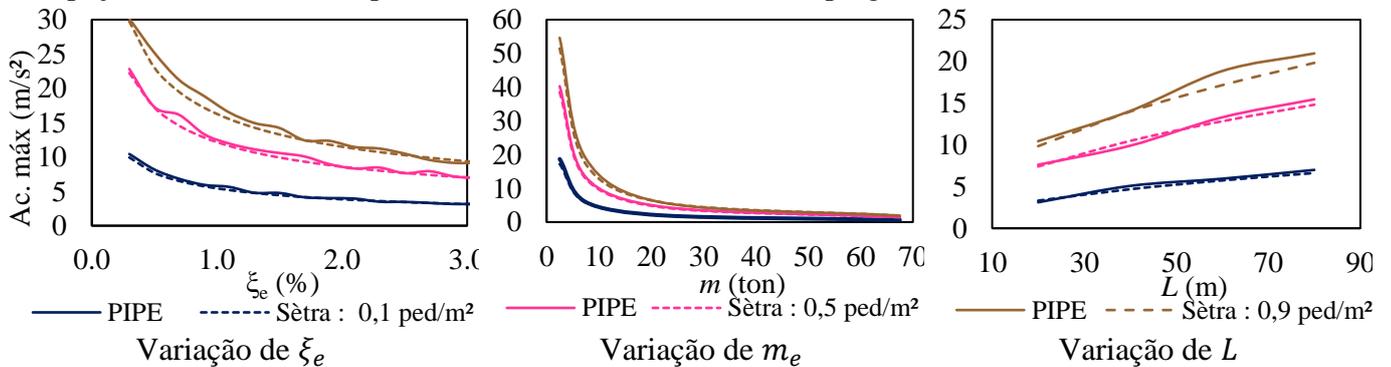


Figura 1: Comparação entre as acelerações máximas da estrutura obtidas via MCM e Sètra (2006) para diferentes densidades de ocupação.

3 MODELO DE INTERAÇÃO PESSOA-ESTRUTURA (IPE)

Uma das abordagens utilizadas para contabilizar os efeitos da interação pessoa-estrutura (IPE) é a representação de pedestres por meio de modelos biodinâmicos (Živanović *et al.*, 2010; Pfeil *et al.*, 2014). Neste trabalho, o MB de Pfeil *et al.* (2022) foi utilizado para simular o efeito da travessia de pedestres caminhando em passarelas, este MB possui algumas vantagens em relação a outros MBs que são encontrados na literatura (Gonzaga, 2021). As propriedades modais de massa (m_p), taxa de amortecimento (ξ_p) e rigidez (k_p) do MB de Pfeil *et al.* (2022) são estimadas a partir da massa (m) e frequência de caminhada (f_p) do pedestre:

$$m_p = 12.940 + 0.874M - 9.142f_p \quad 7$$

$$k_p = 360.30m_p - 1282.5 \quad 8$$

$$\xi_p = -28.818f_{am} + 87.513 \quad 9$$

em que: $f_{am} = f_{mod}\sqrt{1 - \xi_p^2}$ é a frequência natural amortecida do MB; $c_p = 2\xi_p f_{mod} m_p$ é a constante de amortecimento; f_{mod} é a frequência natural do MB.

Uma adaptação ao modelo de IPE apresentado por Pfeil *et al.* (2014), que considera um único pedestre caminhando como MB em uma superfície flexível, é feita neste trabalho para considerar o efeito de multidão. Como resultado, tem-se um modelo matemático acoplado de $N_{ped} + 1$ equações diferenciais do movimento, referentes ao grau de liberdade (GL) generalizado na direção vertical de cada um dos N_{ped} - pedestres/MBs e da estrutura (Gonzaga, 2021):



$$\begin{bmatrix} m_e & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & m_{p,1} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & m_{p,N_{ped}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{y} \\ u_{p,1} \\ \vdots \\ \ddot{u}_{p,N_{ped}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_e + \sum_{i=1}^{N_{ped}} c_{p,i} \phi_{k,i}^2 & -c_{p,1} \phi_{k,1} & \cdots & -c_{p,N_{ped}} \phi_{k,N_{ped}} \\ -c_{p,1} \phi_{k,1} & c_{p,1} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -c_{p,N_{ped}} \phi_{k,N_{ped}} & 0 & \cdots & c_{p,N_{ped}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{y} \\ u_{p,1} \\ \vdots \\ \dot{u}_{p,N_{ped}} \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} k_e + \sum_{i=1}^{N_{ped}} k_{p,i} \phi_{k,i}^2 & -k_{p,1} \phi_{k,1} & \cdots & -k_{p,N_{ped}} \phi_{k,N_{ped}} \\ -k_{p,1} \phi_{k,1} & k_{p,1} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -k_{p,N_{ped}} \phi_{k,N_{ped}} & 0 & \cdots & k_{p,N_{ped}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y \\ u_{p,1} \\ \vdots \\ u_{p,N_{ped}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P(t) \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}$$

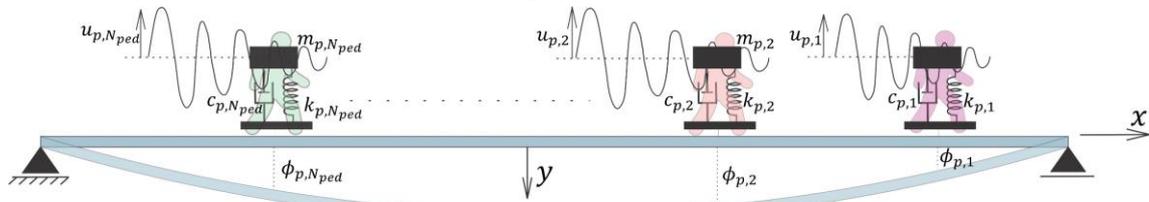


Figura 2. Pedestres representados como MBs caminhando sobre a estrutura de passarela.

Assim como foi feito para o MCM (seção 2.3 deste trabalho), o sistema de equações diferenciais indicado em (10) foi resolvido numericamente empregando o método de Runge-Kutta de 4ª ordem e a aceleração máxima característica da estrutura é obtida pelo percentil de 95% da função de distribuição acumulada das respostas dinâmicas no meio do vão para os diferentes parâmetros (X) avaliados da estrutura (Tabela 2) e densidades de ocupação consideradas (0,1, 0,5 e 0,9 ped/m²).

O gráfico da Figura 3 mostra a comparação entre as acelerações máximas da passarela usando o modelo de IPE (curvas em linha cheia) e aquelas determinadas com o modelo de carga harmônica do Sètra (2006) (curvas pontilhadas). A legenda de cores segue representação idêntica àquela feita na Figura 1.

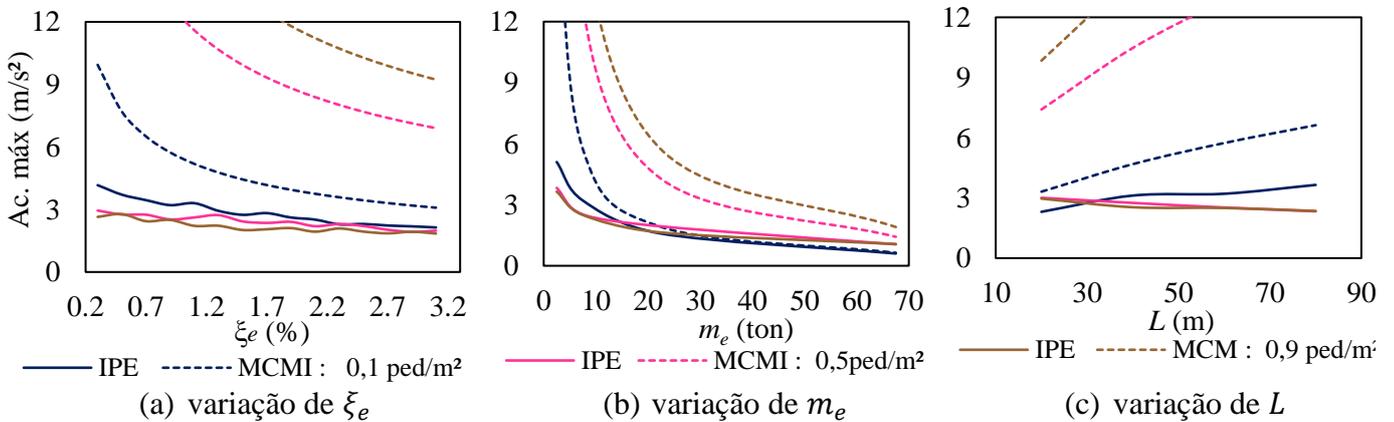


Figura 3: Comparação entre as acelerações máximas da estrutura obtidas via modelo de IPE e Sètra (2006) para diferentes densidades de ocupação.



Através dos gráficos mostrados na Figura 1 e na Figura 3, é possível verificar que o aumento do número de pedestres na estrutura (densidade de ocupação), implica no aumento das amplitudes máximas de aceleração da passarela quando se usa o modelo de carga móvel (tanto o probabilístico proposto - Eq. 2 - quanto o do guia prático - Eq. 4).

No modelo que considera a IPE, se observa um comportamento diferente em relação as curvas do Sètra (2006): as amplitudes máximas de aceleração da estrutura tendem a estabilizar/reduzir com o aumento da densidade de ocupação (Gonzaga, 2021). Esse resultado é justificado pelo acréscimo de amortecimento que é fornecido à estrutura pela capacidade do corpo humano de absorver a energia de vibração (Živanović *et al.*, 2010; Jones *et al.*, 2011; Pfeil *et al.*, 2014) e fica evidente pelas curvas de IPE (curvas em linha cheia) mostradas nas Figuras 3(a) e 3(c), em que as menores amplitudes de aceleração ocorrem para a maior taxa de ocupação analisada (0,9 ped/m²).

Além disso, é possível verificar que o efeito atenuador da IPE em relação ao modelo de carga móvel (MCM) se manifesta, sobretudo, em estruturas leves e esbeltas (Gonzaga, 2021), conforme se observa nos gráficos da Figura 3. As maiores diferenças, em termos de aceleração máxima característica da estrutura, ocorrem para baixos valores de taxa de amortecimento (ξ_e) e massa modal (m_e), bem como para vãos (L) de comprimento maior.

Em relação a massa modal da passarela, nota-se que naquelas de valores elevados ($m_e > 65 \text{ ton}$), as diferenças entre os modelos de carga móvel e IPE tendem a ser pequenas. Comparando-se o comportamento para os 3 diferentes valores de densidade de ocupação analisados, observa-se que essa diferença aumenta conforme aumenta a densidade de ocupação da passarela. Portanto, esse resultado sugere que dentre os parâmetros avaliados, a razão de massa dos pedestres sobre a massa modal da estrutura (m_e) pode ser apontada como um dos principais critérios para distinção entre os modelos (CM e IPE) de representação de pessoas caminhando (Gonzaga, 2021).

Para a taxa de amortecimento estrutural (ξ_e), verifica-se que à medida que ξ_e diminui, a diferença entre as estimativas de resposta no MCM e no modelo de IPE tornam-se maiores. Isto ocorre, principalmente, porque a amplificação dinâmica da resposta da passarela para baixos valores de amortecimento tende a induzir o movimento dos modelos biodinâmicos de 1 GL representativo dos pedestres caminhando, tornando-os mais efetivos na atenuação das respostas da estrutura (Gonzaga, 2021). De forma semelhante, verifica-se que quanto maior o comprimento do vão da passarela, maiores são as diferenças entre os modelos de CM e IPE. Isto demonstra, portanto, que estruturas esbeltas e de baixo amortecimento estrutural sejam bastante susceptíveis ao efeito da IPE.

4 CONCLUSÕES

Neste trabalho, foi feita uma comparação entre as acelerações máximas obtidas em passarelas usando o modelo de carga móvel para representar pedestres caminhando como, por exemplo, o do guia francês Sètra (2006) e os modelos probabilísticos de representação de pedestre implementados em uma ferramenta computacional como: (i) carga móvel (MCM) e (ii) modelos biodinâmicos (MBs), sendo possível, nesta última, considerar os efeitos da Interação Pessoa-Estrutura (IPE).

A correlação entre as amplitudes de aceleração da estrutura obtidas com o MCM probabilístico do PIPE (Programa de Interação Pessoa-Estrutura) e aquelas determinadas com o guia Sètra (2006) indicaram a validação da ferramenta computacional implementada.

Na análise de IPE, os resultados obtidos para a aceleração máxima da estrutura (percentil de 95%) mostram que a representação dos pedestres como modelos biodinâmicos resulta em amplitudes de resposta menores do que aquelas determinadas no MCM, em especial naquelas estruturas de baixo amortecimento estrutural e massa modal e valores crescentes de comprimento de vão.



Este resultado sugere que, em geral, para estruturas leves e esbeltas, o modelo de carga móvel adotado pelas normas e guias práticos pode conduzir a estimativas conservadoras da resposta dinâmica, em consonância com relatos da literatura, guiados por campanhas experimentais, segundo as quais a abordagem da IPE é mais realista do que a do MCM para representar a ação dos pedestres caminhando.

AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho gostariam de agradecer ao suporte das agências brasileiras de fomento à pesquisa, Capes e CNPQ, por todo auxílio para desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

BACHMANN, H.; AMMANN, W., (1987). VIBRATION IN STRUCTURES INDUCED BY MAN AND MACHINES, STRUCTURAL ENGINEERING DOCUMENT N° 3E, INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR BRIDGE AND STRUCTURE ENGINEERING, IASBE, ZURICH, SWITZERLAND.

GONZAGA, I. B. N., (2021). INTERAÇÃO ENTRE ESTRUTURA DE PASSARELA E MULTIDÃO VIA USO DE MODELOS BIODINÂMICOS. DISSERTAÇÃO DE M.Sc., COPPE/UFRJ, RIO DE JANEIRO, RJ, BRASIL.

JONES, C. A.; REYNOLDS, P.; PAVIĆ, A., (2011). VIBRATION SERVICEABILITY OF STADIA STRUCTURES SUBJECT TO DYNAMIC CROWD LOADS: A LITERATURE REVIEW. JOURNAL OF SOUND AND VIBRATION, 330, pp. 1531-1566.

MATSUMOTO, Y.; NISHIOKA, T.; SHIOJIRI, H.; MATSUZAKI, K., (1978). DYNAMIC DESIGN OF FOOTBRIDGES. IN: IABSE PROCEEDINGS, pp. 1-15.

PFEIL, M.S.; COSTA, N.P.A; PIMENTEL, R.L.; VASCONCELOS, R., (2014). ANALYTIC-NUMERICAL MODEL FOR WALKING PERSON – FOOTBRIDGE STRUCTURE INTERACTION. IN: PROCEEDINGS OF THE IX EURO DYN, PORTO, PORTUGAL, JUNE/JULY.

PFEIL, M.S.; VARELA, W.D.; COSTA, N.P.A. (2022). EXPERIMENTAL CALIBRATION OF A ONE DEGREE OF FREEDOM BIODYNAMIC MODEL TO SIMULATE HUMAN WALKING-STRUCTURE INTERACTION. ENGINEERING STRUCTURES, VOL. 262, 114330. DOI: 10.1016/J.ENGSTRUCT.2022.114330.

ROSS, I., (2009). HUMAN INDUCED VIBRATIONS ON FOOTBRIDGES. D. SC. THESIS, DELFT UNIVERSITY OF TECHNOLOGY AND ARUP, BRISBANE, AUSTRALIA.

SÉTRA, FOOTBRIDGES, (2006). ASSEMENT OF VIBRATIONAL BEHAVIOR OF FOOTBRIDGES UNDER PEDESTRIAN LOADING – PRACTICAL GUIDELINES. SERVICE ETUDES TECHNIQUES DES ROUTES ET AUTOROUTES/AFGC. OCTOBER.

TUBINO, F.; PICCARDO, G., (2016). SERVICEABILITY ASSESSMENT OF FOOTBRIDGES IN UNRESTRICTED PEDESTRIAN TRAFFIC CONDITIONS. STRUCTURE AND INFRASTRUCTURE ENGINEERING, 12(12), pp. 1652-1662.

ŽIVANOVIĆ, S.; PAVIĆ, A.; INGÓLFSSON, E. T., (2010). MODELING SPATIALLY UNRESTRICTED PEDESTRIAN TRAFFIC ON FOOTBRIDGES. JOURNAL OF STRUCTURE ENGINEERING, VOL. 136, pp. 1296-1308.