



Interação dinâmica pedestre - estrutura de passarela submetida ao tráfego de multidão

Igor Braz N. Gonzaga¹, Michèle S. Pfeil², Wendell D. Varela³

¹ COPPE / UFRJ / PEC / igor.gonzaga@coc.ufrj.br

² POLI - COPPE / UFRJ mpfeil@coc.ufrj.br

³ FAU - COPPE / UFRJ wendell@coc.ufrj.br

Resumo

Tradicionalmente as normas técnicas nacionais para o dimensionamento de passarelas consideram a ação humana através de uma carga estática uniformemente distribuída ao longo da área transitável da estrutura. Para passarelas susceptíveis aos efeitos dinâmicos do caminhar de pedestres, normas internacionais e guias práticos são frequentemente utilizados pois fornecem métodos de análise baseados no modelo de carga móvel aplicado a sistemas de um grau de liberdade generalizado. Neste caso, a estimativa das amplitudes de resposta do sistema estrutural é, em geral, obtida através do produto entre a resposta para uma única pessoa caminhando em ressonância com a estrutura pelo coeficiente do número equivalente de pedestres que depende, em geral, do número médio de pessoas na passarela. Todavia, há evidências experimentais na literatura indicando que os citados métodos apresentam resultados conservadores, por não considerarem a introdução de amortecimento ao sistema pela presença dos pedestres. Portanto, o objetivo desse trabalho é avaliar a influência da interação pessoa-estrutura (IPE) na resposta de passarelas sob vibração em flexão vertical. Para isso, um modelo analítico do sistema acoplado multidão-estrutura é apresentado no qual cada pedestre é representado por um modelo biodinâmico de um grau de liberdade. Este modelo é aplicado a uma passarela de seção mista aço-concreto considerando diferentes densidades de ocupação por meio de simulações de Monte Carlo para obter estimativas de aceleração máxima. Análises da mesma estrutura submetida ao tráfego de pedestres considerados a partir do modelo de carga móvel são também efetuadas. Os resultados obtidos foram comparados com os procedimentos normativos comumente usados para considerar a ação dinâmica de pedestres em passarelas e mostraram que, para a passarela analisada, a metodologia empregada pelas normas resultou em amplitudes de aceleração maiores do que as do modelo analítico de IPE.

Palavras-chave

Dinâmica; passarela; carga de multidão; normas técnicas; simulação Monte Carlo; interação pessoa-estrutura.

1. INTRODUÇÃO

Passarelas concebidas estruturalmente para serem leves vêm se tornando cada vez mais frequentes e constituem uma tendência atual do mercado da construção seja pelo aspecto econômico, estético ou ainda pelos processos de otimização que tendem a usar integralmente a capacidade resistente dos materiais.

Contudo, a baixa massa modal e elevada esbeltez de passarelas configuram um cenário propenso ao comportamento dinâmico das estruturas frente às ações variáveis no tempo, especialmente o caminhar humano. Em situações de ressonância com a frequência do caminhar dos pedestres, as amplitudes de resposta da passarela são amplificadas e podem comprometer os estados limites de serviço estabelecidos em projeto.

A NBR 6118 (ABNT, 2014) e a NBR 8800 (ABNT, 2008) adotam uma metodologia simplificada, em que recomendam uma faixa de valores de frequência de excitação crítica da qual as frequências naturais da estrutura devem estar afastadas. Ainda que o procedimento seja eficiente por minimizar os riscos de ressonância com o caminhar, ele nem sempre pode ser atendido porque envolve, muitas vezes, a alteração da concepção estrutural da passarela.

Por outro lado, normas técnicas e guias práticos internacionais (CEN, 2004; ISO 10137, 2007; SÈTRA, 2006; BSI, 2008 *apud* MARTENSSON e NILSSON, 2014) vem sendo utilizados para considerar os efeitos

dinâmicos do caminhar humano em passarelas. O procedimento adotado por essas normas e guias consiste na representação do caminhar humano através do modelo de carga móvel (CM). As amplitudes máximas de vibração da estrutura podem ser determinadas a partir análise modal da estrutura sob a passagem de um pedestre em ressonância com a estrutura (em geral como uma carga uniformemente distribuída). A aceleração obtida é multiplicada pelo coeficiente do número equivalente de pedestres que depende, sobretudo, do número médio de pessoas na passarela.

Todavia, registros experimentais (PIMENTEL, 1997; WANG *et al.*, 2011; SILVA *et al.*, 2013; NIMMEN *et al.*, 2015) vem indicando que o emprego do modelo de carga móvel utilizado pelas normas e guias resulta em amplitudes de resposta do sistema pessoa-estrutura conservadoras. PIMENTEL (1997), por exemplo, notou diferenças significativas entre as medições realizadas na passarela Aberfeldy na Escócia e as respostas obtidas da simulação numérica representando o pedestre pelo modelo de CM. Um dos fatores que justificam estas divergências é a ausência de consideração do acréscimo de amortecimento produzido pela capacidade de absorção da energia de vibração do corpo humano em relação à estrutura isolada.

NIMMEN *et al.* (2015) verificaram em medições da travessia de pedestres na passarela da Universidade de Warwick que o modelo de carga móvel (CM) conduz a respostas superestimadas da estrutura por não considerar os efeitos da interação existente entre a passarela e os pedestres. WANG *et al.* (2011) apontam acréscimo da taxa de amortecimento modal da passarela Olga, na Alemanha, de até 4 vezes quando ocupada em relação à passarela vazia.

Uma das abordagens que tem sido utilizadas na literatura para representar a interação pedestre- estrutura (IPE) é a representação do pedestre através de modelo biodinâmico (MB), que é um sistema massa-mola-amortecedor, em geral, de 1 grau de liberdade (1GL) (ARCHBOLD, 2004; SILVA, 2013; TOSO, 2016; COSTA, 2019). As equações de movimento do sistema acoplado composto do modelo numérico da estrutura e do MB em movimento sobre a mesma permitem efetuar a análise dinâmica de passarelas considerando a IPE (PFEIL *et al.*, 2014).

Portanto, neste trabalho, o MB calibrado experimentalmente por COSTA (2019) será usado para considerar os efeitos da IPE em uma passarela de seção mista aço-concreto. Serão avaliadas as amplitudes de resposta da passarela para diferentes densidades de ocupação através de simulações Monte Carlo com o modelo analítico de IPE proposto por PFEIL *et al.* (2014) para um único pedestre. Uma extensão desse modelo analítico é aqui desenvolvida para considerar o efeito de multidões.

Os resultados obtidos, em termos de amplitudes máximas de aceleração, foram comparados com os procedimentos normativos que fazem uso do modelo de carga móvel. Para a passarela avaliada neste estudo, a metodologia das normas resultou em amplitudes de respostas conservadoras em relação ao modelo de IPE. Além disso, notou-se que as acelerações máximas da estrutura tendem a estabilizar com o aumento da densidade de ocupação.

2. METODOLOGIA DAS NORMAS E GUIAS PRÁTICOS

A seguir é feita uma breve descrição das metodologias empregadas por normas técnicas e guias internacionais que são referência por considerar os efeitos dinâmicos do caminhar em estruturas de passarelas. Os procedimentos descritos se limitam a situações de baixa densidade de ocupação da área trafegável da passarela, onde os pedestres caminham livremente, isto é, sem restrições.

2.1 Eurocódigo 5 - (CEN, 2004)

Essa norma utiliza uma expressão simplificada (Eq. (1)) para o cálculo da aceleração na direção vertical ($a_{vert,1}$) quando um pedestre caminha em passarelas de madeira representadas por um modelo de viga simplesmente apoiada nas bordas. Todavia, o procedimento empregado pode ser estendido a estruturas concebidas de outros materiais (ŽIVANOVIĆ *et al.*, 2010).

$$a_{vert,1} = \begin{cases} \frac{200}{M_e \xi_e} & \text{para } f_{vert} \leq 2,5 \text{ Hz} \\ \frac{100}{M_e \xi_e} & \text{para } 2,5 < f_{vert} \leq 5,0 \text{ Hz} \end{cases} \quad (1)$$

onde: M_e e ξ_e são a massa da estrutura em kg e a taxa de amortecimento estrutural do modo analisado, respectivamente.

Os valores de força 200 N e 100 N mostradas na Eq. (1) são resultantes do produto entre o peso dos pedestres ($P = 700 N$), o coeficiente dinâmico da carga do primeiro e segundo harmônicos ($\alpha_1 = 0,4$ e $\alpha_1 = 0,2$) respectivamente e, um fator redutor de 0,7 que considera que o efeito do caminhar não é estacionário, portanto, deve ser combinado o efeito equivalente da carga aplicada sobre a área do tabuleiro da passarela (A) em relação ao seu efeito resultante nodal.

Para grupo de pessoas, a aceleração calculada pela Eq. (1) quando um único pedestre caminha é multiplicada pelo número N_{ped} , que é o número médio de pedestres esperado na passarela, reduzido por $0,23k_{vert}$. O fator k_{vert} considera a probabilidade de não ressonância do caminhar dos pedestres com a estrutura ($k_{vert} = 1$, na ressonância).

$$a_{vert,n} = 0,23a_{vert,1}N_{ped}k_{vert} \quad (2)$$

O número de pedestres (N_{ped}) deve ser tomado como: (i) $N_{ped} = 13$, para grupos de pedestres e, (ii) $N_{ped} = 0,6A$ para fluxo contínuo de pedestres.

2.2 Anexo UK ao Eurocódigo 1 (BSI, 2008 *apud* MARTENSSON e NILSSON, 2014)

Em situação de travessia de multidão, o Anexo Inglês do EC.1 (BSI, 2008 *apud* MARTENSSON e NILSSON, 2014) propõe que a carga harmônica, $Q(t)$, indicada na Eq. (3) seja uniformemente distribuída ao longo da área transitável (A) da passarela representada simplifcadamente por um sistema dinâmico de 1 GL.

$$Q(t) = 1,8 \frac{F_0}{A} k \sqrt{\frac{\gamma N_{ped}}{\lambda}} \text{sen}(2\pi f_e t) \quad (3)$$

sendo F_0 a amplitude da força gerada pelo pedestre: produto entre o peso do pedestre ($P = 700N$) e o coeficiente dinâmico da carga do primeiro harmônico do caminhar ($\alpha_1 = 0,4$);

f_e é a frequência natural da estrutura no modo analisado;

γ é o fator que considera a falta de correlação entre as pessoas e a multidão (não sincronismo). Em fluxo contínuo de pessoas é coerente adotar: $\gamma = 7,4\xi_e$; onde ξ_e é a taxa de amortecimento da estrutura;

$k \in [0,1]$ é o coeficiente redutor para avaliar os possíveis riscos de ressonância entre a estrutura e um dos múltiplos harmônicos do caminhar e;

λ é o fator de redução para o número efetivo de pedestres. Simplificadamente, esse fator ajusta a ação devido ao efeito de uma única pessoa na passarela para considerar o efeito da multidão, é calculado de acordo com a Eq. (4):

$$\lambda = \frac{\int_0^L |\phi(x)| / \phi_{máx} dx}{L} \quad (4)$$

onde: $\phi(x)$ é a forma de vibrar da passarela e, $\phi_{máx}$ é o valor máximo de $\phi(x)$.

2.3 ISO 10137 (ISO, 2007)

A ISO 10137 (ISO, 2007) é uma norma internacional que apresenta as bases para dimensionamento de passarelas em vibrações de serviço. Essa norma é mencionada pelos Eurocódigos (BSI, 2008; CEN, 2004) como orientação adicional para suprir a metodologia usada por eles (MARTENSSON e NILSSON, 2014).

A ação do pedestre caminhando é representada pela força de reação vertical que o pedestre produz enquanto caminha. Essa força é expressa através de uma série de Fourier de nh harmônicos, conforme indicado na Eq. (5):

$$F(t) = P \left[1 + \sum_{i=1}^{nh} \alpha_i \text{sen}(2\pi f_p t + \varphi_i) \right] \quad (5)$$

em que: P é o peso do pedestre (700 N); α_i é o coeficiente dinâmico da carga ($\alpha_i = 0,37f_p - 0,37$); f_p é a frequência do caminhar do pedestre, atribuída com valor igual à frequência natural da estrutura ($f_p = f_e$) em

situações onde há risco de ressonância (1,6 – 2,4 Hz) (BACHMANN e AMANN, 1987); φ_i é o ângulo de fase.

Para considerar um grupo de N_{ped} -pessoas caminhando de forma não sincronizada em passarelas, a força que representa a ação de um único pedestre caminhando é multiplicada pelo coeficiente $C(N_{ped})$, definido pela expressão:

$$C(N_{ped}) = \sqrt{N_{ped}} \quad (6)$$

2.4 SÉTRA (SÉTRA/AFGC, 2006)

O SÉTRA (2006) é um guia técnico promovido pela Associação Francesa de Engenharia Civil (AFGC) em 2006. A metodologia adotada por esse guia consiste, essencialmente, em aplicar a carga que representa o efeito de multidões caminhando, $Q(t)$, sobre a área transitável (A) de uma passarela representada por um sistema dinâmico equivalente de 1 GL. A carga de multidão proposta pelo SÉTRA (2006) é dada por:

$$Q(t) = \frac{F_0}{A} \cos(2\pi f_p t) N_{eq} \Psi \quad (7)$$

onde: F_0 é a amplitude da força gerada pelo pedestre ($280 N = 0,4 \times 700 N$); f_p é a frequência do caminhar do pedestre; Ψ é o fator de redução que considera a probabilidade de não haver ressonância entre o caminhar e a estrutura; N_{eq} é o número equivalente de pedestres na estrutura que, para tráfego sem restrições, é calculado pela expressão: $N_{eq} = 10,8 \sqrt{N_{ped} \xi_e}$; sendo N_{ped} o número de pedestres e, ξ_e a taxa de amortecimento estrutural.

O coeficiente N_{eq} indica o número de pedestres que, caminhando em ressonância com a estrutura (vibração na forma de meia onda senoidal) e em fase, produzem o mesmo efeito da multidão em tráfego de características aleatórias. A expressão para N_{eq} foi determinada a partir de simulações Monte Carlo e considerando a abordagem de MATSUMOTO *et al.* (1978) segunda a qual N_{eq} é proporcional a $\sqrt{N_{ped}}$.

3. MODELO BIODINÂMICO E MODELO DE INTERAÇÃO PESSOA-ESTRUTURA (IPE)

No modelo matemático de IPE utilizado neste trabalho (PFEIL *et al.* 2014) o pedestre em atividade de caminhada é representado por um modelo biodinâmico (MB) de 1 GL com propriedades de massa (m_p), rigidez (k_p) e amortecimento (c_p). A passarela, por sua vez, é também representada por um modelo de 1 grau de liberdade generalizado associado a um determinado modo de vibração em flexão vertical, como mostrado na Figura 1. As propriedades generalizadas da passarela são a massa modal (m_e), rigidez modal (k_e) e amortecimento modal (c_e). O MB atua acoplado à estrutura como um subsistema auxiliar. As forças de interação (elástica e de amortecimento) entre o MB e a estrutura são consideradas na formulação das equações de movimento do sistema acoplado.

Utiliza-se neste trabalho o modelo biodinâmico desenvolvido por COSTA (2019), cujas oscilações são induzidas pela excitação de base, que é o mecanismo relacionado a impulsão do pedestre com elevação e rebaixamento do calcanhar (VARELA *et al.*, 2020). As propriedades generalizadas de massa, rigidez e amortecimento desse MB são determinadas a partir das equações de regressão mostradas na Tabela 1:

Tabela 1: Equações de regressão do modelo biodinâmico de COSTA (2019)

$$\begin{array}{l} m_p = 12,940 + 0,874m - 9,142f_p \\ \hline k_p = 360,30m - 1282,5 \\ \hline \xi_p = -20,818f_{ma} + 87,513 \\ \hline f_{ma} = \sqrt{\frac{k_p}{m_p} (1 - \xi_p)^2} \\ \hline \end{array}$$

sendo: m a massa do pedestre; ξ_p a taxa de amortecimento do MB (processo iterativo) e, f_{ma} a frequência amortecida do MB.

Quando se considera um grupo de N_{ped} -pessoas representadas por N_{ped} -MBs atravessando a passarela têm-se um sistema de $(N_{ped} + 1)$ equações diferenciais que representam o movimento do sistema acoplado multidão-estrutura indicado pela Eq. (8):

$$\begin{bmatrix} m_e & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & m_{p,1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & m_{p,2} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & m_{p,N_{ped}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{y} \\ \ddot{u}_1 \\ \ddot{u}_2 \\ \vdots \\ \ddot{u}_{N_{ped}} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_e + \sum_{i=1}^n c_{p,i} \phi_{p,i}^2 & -c_{p,1} \phi_{p,1} & -c_{p,2} \phi_{p,2} & \dots & -c_{p,N_{ped}} \phi_{p,N_{ped}} \\ -c_{p,1} \phi_{p,1} & c_{p,1} & 0 & \dots & 0 \\ -c_{p,2} \phi_{p,2} & 0 & c_{p,2} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -c_{p,N_{ped}} \phi_{p,N_{ped}} & 0 & 0 & \dots & c_{p,N_{ped}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{y} \\ \dot{u}_1 \\ \dot{u}_2 \\ \vdots \\ \dot{u}_{N_{ped}} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_e + \sum_{i=1}^n k_{p,i} \phi_{p,i}^2 & -k_{p,1} \phi_{p,1} & -k_{p,2} \phi_{p,2} & \dots & -k_{p,N_{ped}} \phi_{p,N_{ped}} \\ k_{p,1} \phi_{p,1} & k_{p,1} & 0 & \dots & 0 \\ k_{p,2} \phi_{p,2} & 0 & k_{p,2} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ k_{p,N_{ped}} \phi_{p,N_{ped}} & 0 & 0 & \dots & k_{p,N_{ped}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} y \\ u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_{N_{ped}} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \sum_{i=1}^{N_{ped}} \phi_{p,i}(x) F_i(t) \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (8)$$

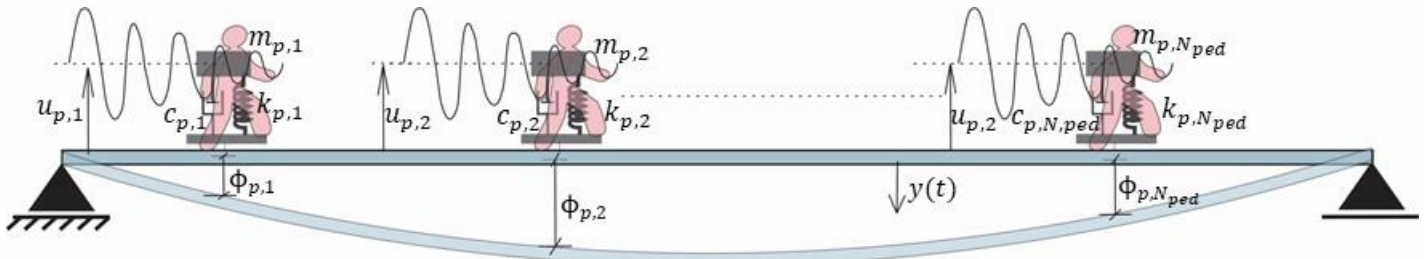


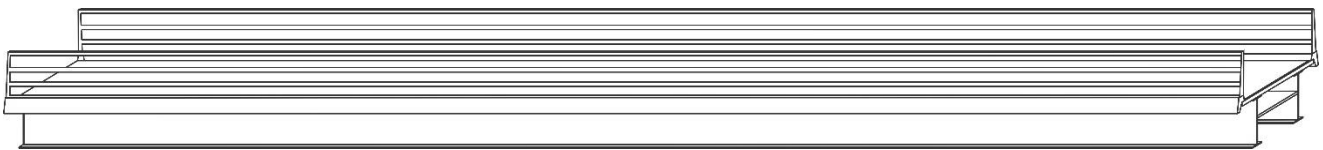
Figura 1: Multidão representada por N_{ped} -MBs se deslocando na estrutura de passarela

A força $F_i(t)$ aplicada pelo pedestre é calculada a cada instante de tempo t como mostrado na Equação (8). Essa equação é expressa através de uma série de Fourier (PFEIL *et al.*, 2014; COSTA, 2019; VARELA *et al.*, 2020) dada pela soma de duas parcelas: estática e flutuante. A amplitude da parcela flutuante de $F_i(t)$ é calculada pelo produto entre o peso do pedestre (G) e o coeficiente dinâmico da força (α_1) que, neste trabalho, foi simplificada adotado com valor igual ao utilizado pelas normas técnicas e guias ($\alpha_1 = 0,4$) (CEN, 2004; BSI, 2008 *apud* MARTENSSON e NILSSON, 2014; SËTRA, 2006).

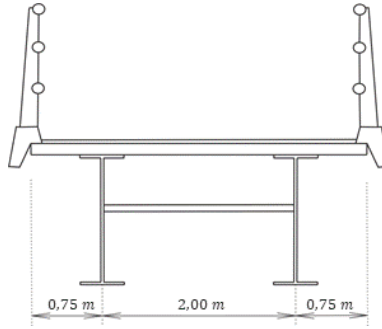
O sistema de equações diferenciais indicado na Equação (8) é resolvido numericamente utilizando o método de integração de Runge-Kutta através da ferramenta computacional desenvolvida neste trabalho, denominada PIPE (Programa de Interação Pessoa-Estrutura).

4. DESCRIÇÃO DA ESTRUTURA E SIMULAÇÃO DE MULTIDÃO

A estrutura analisada neste trabalho, trata-se de uma passarela em viga reta de seção mista aço-concreto. A Figura 2 ilustra a passarela cujas propriedades generalizadas do modo crítico de flexão vertical estão indicadas na Tabela . Maiores detalhes sobre a concepção e dimensionamento da passarela estão indicados em VASCONCELOS (2005).



(a) Vista lateral



(b) Seção transversal

Figura 2: Passarela de seção mista aço-concreto

Tabela 2: Propriedades mecânicas/físicas da passarela de seção mista aço-concreto (COSTA, 2013)

| | |
|--|---------|
| Comprimento (L) | 35,00 m |
| Largura transitável (B) | 3,00 m |
| Massa modal (m_e) | 32,02 t |
| Frequência natural do primeiro modo de flexão vertical (f_e) | 2,0 Hz |
| Taxa de amortecimento modal (ξ_e) | 0,50% |

Foram feitas 300 simulações usando o método de Monte Carlo para densidades de ocupação da passarela de seção mista variando de 0,1 ped/m² - 0,8 ped/m². As amplitudes de aceleração máxima da passarela foram determinadas a cada simulação numérica. As seguintes variáveis que compõem o carregamento foram tomadas como aleatórias: a massa dos pedestres (m), frequência do caminhar (f_p), comprimento do passo (λ_p) e tempo de entrada dos pedestres na passarela (T_{entr}). As funções de distribuição de probabilidade das variáveis mencionadas e seus parâmetros estão indicados na Tabela , juntamente com as referências utilizadas:

Tabela 3: Distribuição de probabilidade das variáveis

| Variável | Distribuição | Valor médio | Desvio padrão | Referência |
|------------------------------------|--------------|-------------|---------------|---|
| Peso dos pedestres (P) | Normal | 700 | 150 | SÈTRA (2006), ŽIVANOVIĆ <i>et al.</i> , (2012) |
| Frequência do caminhar (f_p) | Normal | 2,000 | 0,175 | SÈTRA (2006) |
| Comprimento do passo (λ) | Normal | 0,750 | 0,080 | ŽIVANOVIĆ <i>et al.</i> , (2012) |
| Tempo de entrada (T_{entr}) | Poisson | λ^* | - | MATSUMOTO <i>et al.</i> , (1978) |

Considerando que o valor médio da distribuição da frequência do caminhar (f_p) dos pedestres é igual à frequência natural da passarela ($f_e = 2 \text{ Hz}$), é conveniente adotar para os coeficientes redutores (k_{vert} , k e Ψ) das normas o valor unitário. Em outras palavras, significa dizer que, é grande a probabilidade da ocorrência de cenários em que se observa a ressonância entre a estrutura e a frequência do passo.

O parâmetro λ indicado na Tabela 3, que é o intervalo do tempo de entrada de dois pedestres consecutivos, depende da densidade de ocupação da passarela (ρ), conforme indicado na Eq. (9):

$$\lambda = \frac{1}{\rho B v_{p,m}} \quad (9)$$

onde B é a largura da área transitável da passarela e, $v_{p,m}$ é o valor médio da velocidade do caminhar dos pedestres.

Com o intuito de validar a ferramenta computacional desenvolvida (PIPE) para simulação do tráfego de pedestres e análise dinâmica da estrutura, foram efetuadas simulações considerando o modelo de carga móvel para representar a ação dos pedestres de modo a se comparar os resultados com aqueles fornecidos pelo procedimento do SÈTRA (2006).

As variáveis intrapessoais de cada pessoa são definidas a partir das mesmas distribuições de probabilidade indicadas na Tabela e os parâmetros do modelo de força (equação 5) são iguais aos usados no desenvolvimento do procedimento do SÉTRA (2006). Os resultados obtidos em termos de aceleração máxima da estrutura para cada uma das diferentes densidades de ocupação consideradas na análise estão indicados no gráfico da Figura 3:

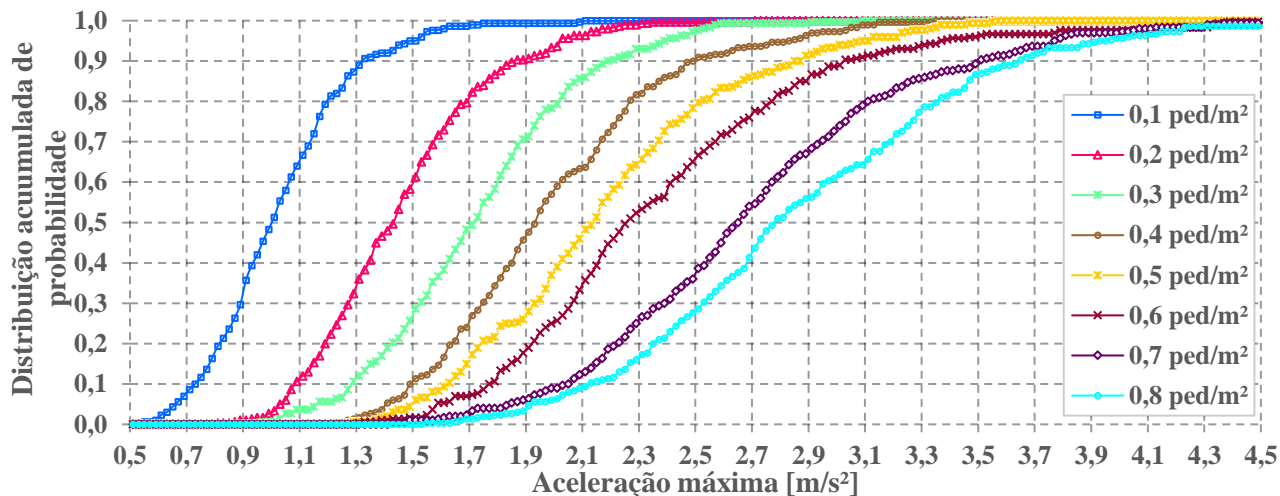


Figura 3: Função de distribuição acumulada das acelerações máximas na passarela no modelo de CM

O valor característico das acelerações máximas obtidas com as simulações usando o modelo de CM para cada densidade de ocupação da passarela, indicado pelas curvas do gráfico da Figura 3, foi tomado como aquele cuja probabilidade de não excedência é de 95% (SÉTRA, 2006).

A comparação entre os resultados fornecidos pelo procedimento do SÉTRA (2006) e o valor característico das acelerações máximas determinadas no PIPE está mostrada no gráfico da Figura 4. Observa-se uma ótima correlação entre as acelerações máximas da passarela utilizando o procedimento do SÉTRA e a ferramenta numérico-computacional desenvolvida nesse trabalho.

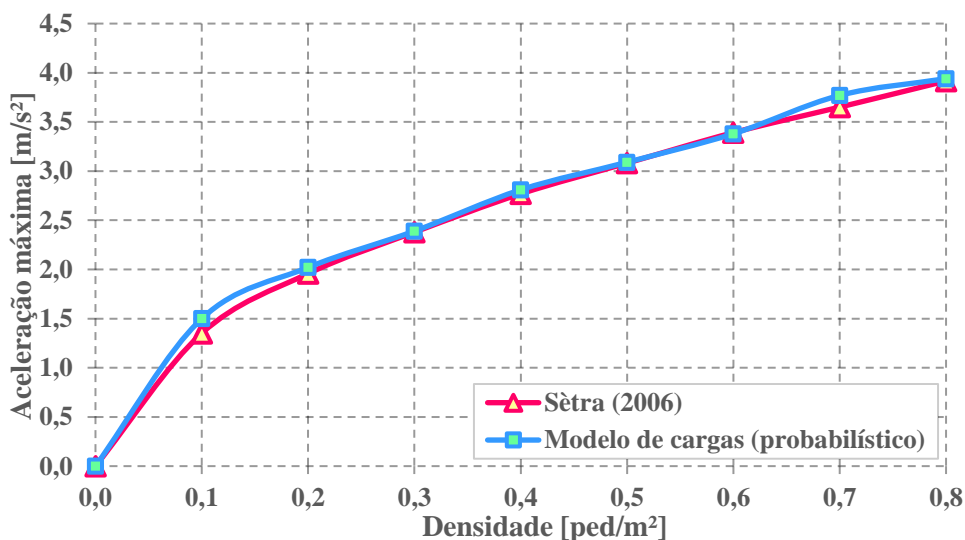


Figura 4: Validação do modelo de cargas

5. COMPARAÇÃO ENTRE OS PROCEDIMENTOS NORMATIVOS E O MODELO DE IPE

A partir da validação do modelo de cargas implementado, simulações Monte Carlo foram feitas usando o modelo analítico de interação pessoa-estrutura (IPE) proposto neste trabalho. Os resultados obtidos para as diferentes situações de ocupação da passarela estão indicados no gráfico da Figura 5:

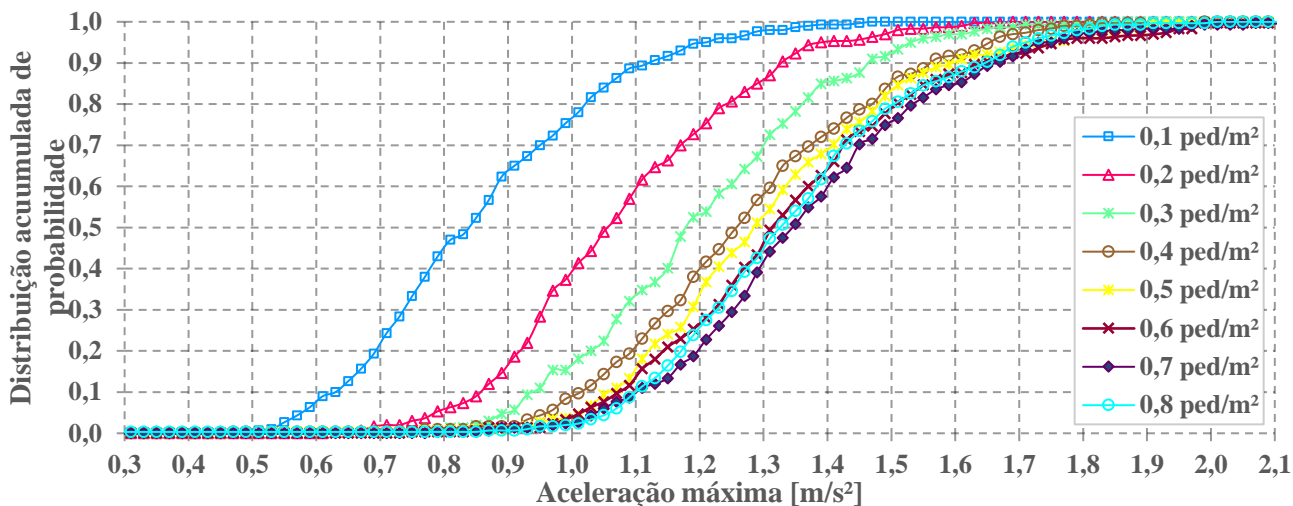


Figura 5: Função de distribuição acumulada das acelerações máximas na passarela no modelo de IPE

O valor de aceleração característica máxima para cada uma das densidades de ocupação da passarela de seção mista aço-concreto avaliadas neste trabalho é comparado na Figura 6 com os correspondentes valores dos procedimentos empregados pelas normas técnicas e guias brevemente descritos na seção 2.

Convém destacar que a metodologia do EUROCÓDIGO 5 (CEN, 2004) não está mostrada no gráfico da Figura 6, pois ela resulta em amplitudes de acelerações muito maiores do que as estimadas pelos outros guias. Multiplicando-se a amplitude de vibração da passarela devido a ação de um único pedestre ($a_1 = 0,625 \text{ m/s}^2$) pelo número de pessoas na estrutura referente ao fluxo contínuo ($N_{ped} = 0,6A$), por exemplo, obtém-se o valor de aceleração máxima da ordem de $9,0 \text{ m/s}^2$. Qualquer passarela sujeita a esse nível de amplitude de aceleração, provavelmente, apresentaria sérios problemas relativos à integridade da estrutura.

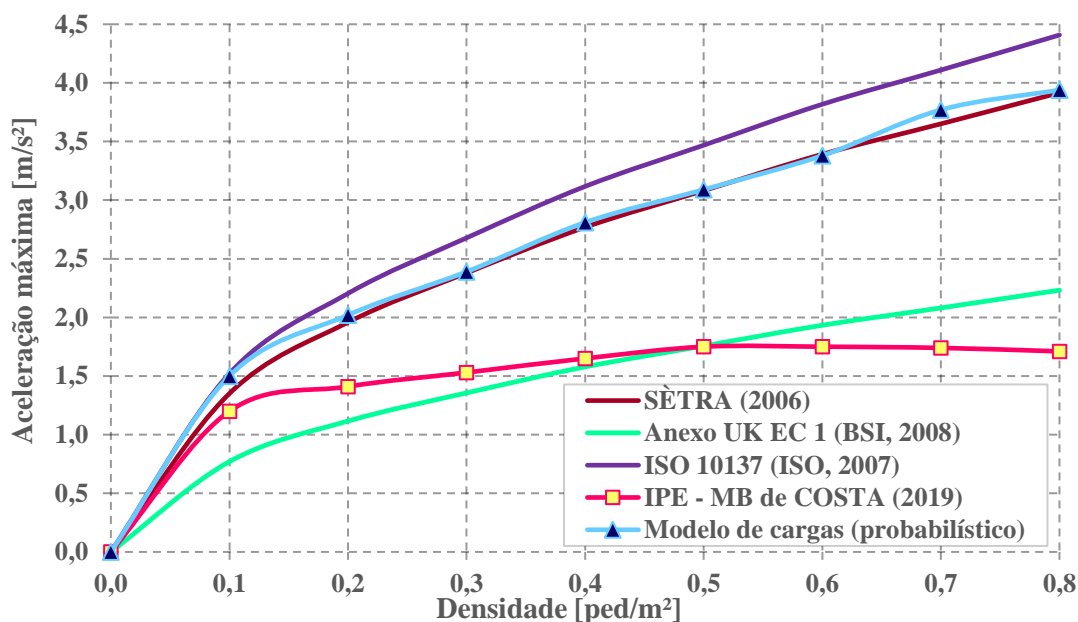


Figura 6: Aceleração na passarela vs densidade de ocupação

A Figura 6 mostra que os procedimentos da ISO 10137 (ISO, 2007) e do SÈTRA (2006) aplicados à passarela mista apresentam boa correlação de resultados. A curva de aceleração máxima do método do Anexo UK (BSI, 2008 *apud* MARTENSSON e NILSSON, 2014) forneceu valores bastante inferiores aos outros dois códigos, com redução de aproximadamente 57% dos valores do SÈTRA (2006).

Apesar do coeficiente dinâmico da força empregado pela ISO 10137 ($\alpha_1 = 0,37$) ser pouco menor que o utilizado pelas demais normas ($\alpha_1 = 0,4$), o procedimento por ela adotado foi aquele que resultou nas maiores amplitudes de aceleração da passarela dentre as diferentes metodologias indicadas pelos demais guias cujos resultados estão exemplificados no gráfico da Figura 6. Isso se deve, notadamente, pela constante de proporcionalidade do número equivalente de pedestres (N_{eq}) que, enquanto na ISO (10137) depende de $\sqrt{N_{ped}}$

no SÈTRA (2006) e no EC 1 (BSI, 2008 *apud* MARTENSSON e NILSSON, 2014), depende da relação $\sqrt{\xi_e N_{ped}}$.

As curvas identificadas por Modelo de Cargas e IPE foram obtidas com a ferramenta computacional PIPE, (usando as variáveis intrapessoais dos pedestres indicadas pelas suas respectivas distribuições de probabilidade mostradas na Tabela 3) sendo que no primeiro caso, os pedestres foram representados por cargas móveis e, no segundo caso, por modelos biodinâmicos.

Verifica-se que o uso de modelos biodinâmicos (curva em rosa da Figura 6) para representar pedestres caminhando reduz consideravelmente as amplitudes de resposta da estrutura em comparação ao modelo de carga móvel (curva azul), alcançando quase 60% de redução para a situação de maior ocupação da passarela. Comparados aos resultados das recomendações ISO 10137 (ISO, 2007) e SÈTRA (2006), os resultados obtidos usando o modelo analítico de IPE (curva rosa) apresentaram reduções similares nas amplitudes de aceleração da estrutura.

Por outro lado, a proposta do Anexo UK ao Eurocódigo 1 (BSI, 2008 *apud* MARTENSSON e NILSSON, 2014), apesar de fazer uso do modelo de carga móvel, conduziu a resultados mais próximos daqueles observados quando se considera modelo de IPE. ŽIVANOVIĆ *et al.* (2010) concluiu resultados semelhantes e verificou que a diferença percentual entre a aceleração medida na passarela em Podgorica - Montenegro e a estimada com o Anexo UK (BSI, 2008 *apud* MARTENSSON e NILSSON, 2014) era de apenas 9% para densidade de ocupação de 0,05 ped/m².

Outro aspecto interessante mostrado no gráfico da Figura 6 relativo à IPE é a tendência de estabilização das amplitudes de vibração da passarela com o aumento da densidade de ocupação. O que se observa é que, se por um lado o aumento do número de pessoas na passarela tende a amplificar a carga da multidão, por outro, esse aumento contribui favoravelmente para redução das amplitudes de resposta da passarela devido a capacidade de absorção das oscilações da estrutura pelo corpo humano, apontado na literatura como acréscimo de amortecimento (ŽIVANOVIĆ, 2012).

6. CONCLUSÕES

Neste trabalho avaliou-se a influência da interação pedestre-estrutura nas amplitudes de aceleração vertical de uma passarela mista aço-concreto sujeita à passagem de multidão em comparação às estimativas feitas com base no modelo de carga móvel por procedimentos normativos. As análises da IPE foram efetuadas por ferramenta computacional especialmente desenvolvida para esta finalidade a qual se baseia em um modelo analítico do movimento do sistema acoplado multidão-estrutura em que os pedestres são representados pelo modelo biodinâmico de 1 GL calibrado por COSTA (2019). Os resultados obtidos com o modelo analítico de IPE mostraram que, diferentemente do modelo de carga móvel, há uma tendência de estabilização das amplitudes de resposta da passarela com o aumento do número de pedestres; isso pode ser explicado pelo incremento de amortecimento fornecido pelos pedestres ao sistema estrutura - multidão. As respostas obtidas a partir das metodologias empregadas pelos procedimentos normativos avaliados neste estudo indicaram que as normas e guias, exceto o Anexo UK (BSI, 2008 *apud* MARTENSSON e NILSSON, 2014), são conservadoras em relação ao modelo de IPE para a passarela considerada neste estudo.

Referências

- ARCHBOLD, P. Interactive Load Models for Pedestrian Footbridges. Thesis, University College Dublin, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de Estruturas de Concreto Armado - Procedimento. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8800: Projeto e Execução de Estruturas de Aço e de estruturas mistas aço-concreto de edifícios. Rio de Janeiro, 2003.
- BACHMANN, H.; AMMANN, W. Vibration in Structures Induced by man and Machines, Structural Engineering Document N° 3e, International Association for Bridge and Structure Engineering, IASBE, Zurich, Switzerland, 1987.
- COMITÉ EUROPEEN DE NORMALIZATION - CEN. EN 1995-2: Eurocode 5: Design of timber structures – Part 2: Bridges. British Standard Institution, 2004.
- COSTA, N.P.A. Interação Dinâmica Pessoa-Estrutura de Passarelas em Material Compósito. Dissertação de Mestrado, UFAM, Manaus, 2013.

- COSTA, N.P.A. Modelo Biodinâmico do Caminhar Humano Tendo em Vista a Interação Dinâmica Pessoa-Estrutura. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2019.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 10137: Bases for Design Structures – Serviceability of Buildings and Walkways Against Vibrations. Second Edition, Geneva, Suíça, 2007.
- MARTENSSON, A.; NILSSON, M. Dynamic Analysis Load Models for Footbridges – A review of current load models and guidelines. Master thesis, Chalmers University Technology, Gothenburg, 2014.
- MATSUMOTO, Y.; NISHIOKA, T.; SHIOJIRI, H.; MATSUZAKI, K. Dynamic design of footbridges. Em: IABSE Proceeding, 1978.
- PFEIL, M.S.; COSTA, N.P.A.; PIMENTEL, R.L.; VASCONCELOS, R. Analytic-numerical model for walking person – Footbridge structure interaction. Em: Proceedings of the IX International Conference on Structural Dynamics – Eurodyn 2014, Porto, Portugal, Junho/Julho, 2014.
- PIMENTEL, L. M. Vibrational Performance of Pedestrian Bridges Due to Human-Induced Loads. Thesis, University of Sheffield, 1997.
- SÉTRA, Footbridges. Assessment of Vibrational Behavior of Footbridges Under Pedestrian Loading – Practical Guidelines. Service etudes techniques des routes et autoroutes/AFGC. October, 2006.
- SILVA, F. P. Vibração de Passarelas de Pedestres na Direção Vertical Considerando Modelos Biodinâmicos de Pessoas Caminhando. Tese de Doutorado, UFPB, 2011.
- TOSO, M. A. Instrumentação e Modelos Biodinâmicos para Simulação de Carregamentos em Estruturas Submetidas a Esforços da Caminhada Humana. Tese de Doutorado, UFRGS, 2016.
- VAN NIMMEN, K.; MAES, K.; ŽIVANOVIĆ, S.; LOMBAERT, G.; DE ROECK, G.; VAN DEN BROECK, P. Identification and Modelling of Vertical Human-Structure Interaction. Dynamics of Civil Structures, Vol. 2, p. 319–330, 2015.
- VARELA, W. D.; PFEIL, M. S.; COSTA, N. P. A. Experimental Investigation on Human Walking Loading Parameters and Biodynamic Model. Journal of Vibration Engineering & Technologies, 2020.
- VASCONCELOS, J. R. S. B. Passarelas em viga recta sob acção dinâmica do caminhar de pessoas. Projeto Final de Curso, COPPE/UFRJ, 2005.
- WANG, D.; GAO, S. Q.; KASPERSKI, M.; LIU, H. P.; JIN, L. The Dynamic Characteristics of a Couple System by Pedestrian Bridge and Walking Persons. Applied Mechanics and Materials, Vol. 71-78, p. 1499–1506, 2011.
- ŽIVANOVIĆ, S. Benchmark Footbridge for Vibration Serviceability Assessment under Vertical Component of Pedestrian Load. ASCE Journal of Structural Engineering, 138 (10), p. 1193-1202, 2012.
- ŽIVANOVIĆ, S.; PAVIĆ, A.; INGÓLFSSON, E. T. Modeling Spatially Unrestricted Pedestrian Traffic on Footbridges. Journal of Structure Engineering, Vol. 136, p. 1296-1308, 2010.