

Análise Dinâmica de Passarelas

Gabriel Araujo Saramago¹, Sergio Hampshire de Carvalho Santos², Mayra Soares Pereira Lima Perlingeiro³

¹Escola Politécnica da UFRJ / gabrielsaramago@poli.ufrj.br

²Escola Politécnica da UFRJ / sergiohampshire@poli.ufrj.br

³Escola de Engenharia – UFF / mavraperlingeiro@id.uff.br

Resumo

Este trabalho apresenta e compara duas metodologias para cálculo e análise do comportamento dinâmico de uma passarela em concreto protendido sob a ação do caminhar de pedestres. São utilizadas as metodologias propostas por BACHMANN (1987) e pelo guia técnico SÉTRA (2006). Com o avanço tecnológico no desenvolvimento de projetos estruturais e a utilização de materiais mais leves e resistentes, as pontes e passarelas têm alcançado maiores vãos. Como resultado, há uma diminuição da rigidez dos elementos estruturais e, também, das frequências naturais da estrutura. No caso de passarelas, essa redução aumenta o risco de ressonância ao se aproximar da frequência do carregamento dinâmico exercido por pedestres, o que pode gerar vibrações excessivas e desconforto aos usuários ou, até mesmo, comprometer a segurança estrutural. Para evitar esses problemas, normas nacionais e internacionais sugerem limites aceitáveis para as frequências naturais e acelerações máximas que a estrutura pode desenvolver. Essas análises podem se mostrar limitadas ao não realizar um estudo mais aprofundado e específico do projeto.

Palavras-chave

análise dinâmica; passarelas; carregamento de pedestres, vibrações.

Introdução

Ao longo da história, diversas passarelas apresentaram problemas de vibrações excessivas devido ao caminhar de pedestres. TILLY *et al.* (1984) apresenta um dos primeiros casos de pontes em que ocorreu o colapso estrutural devido à vibração induzida por pedestres, a Ponte de Broughton, na Inglaterra. A estrutura foi à ruína em 1831, quando 60 soldados marchavam sobre a ponte em estrutura de ferro fundido.

O guia francês SÉTRA/AFGC (2006) descreve dois casos recentes de passarelas que apresentaram oscilações transversais excessivas com a passagem de multidões de pedestres: a *Millenium Bridge* em Londres e a *Pont du Solférino* em Paris. As duas passarelas foram fechadas logo após sua inauguração para que medidas corretivas fossem implementadas. DALLARD *et al.* (2001) observaram que as oscilações estavam relacionadas com a força lateral exercida pelos pedestres ao caminhar pelo tabuleiro da passarela. Este efeito está relacionado com a proximidade da frequência natural da estrutura com a frequência do caminhar.

Objetiva-se, neste trabalho, analisar o comportamento dinâmico de uma passarela em concreto protendido em fase de projeto, pelas metodologias propostas por Bachmann e pela SÉTRA. Ao final do trabalho, é feita uma comparação entre os resultados obtidos.

Carregamento Dinâmico de Pedestres

Diversos estudos da natureza do carregamento dinâmico exercido pelo caminhar são realizados desde o século XX. GALBRAITH e BARTON (1970) caracterizaram o carregamento de um único passo como uma função em forma de sela na direção vertical, com dois pontos máximos de carregamento: o primeiro devido ao impacto do indivíduo no solo e o segundo devido ao movimento de saída. Durante o caminhar, existe um período em que os dois pés estão em contato com o pavimento, o que faz com que a função da força aplicada por cada pé se sobreponha.

MATSUMOTO *et al.* (1978) realizaram diversos estudos experimentais buscando determinar a frequência do passo. Foi obtida uma faixa de 1,5 a 2,5 Hz para o caminhar na direção vertical. Outros pesquisadores realizaram experimentos semelhantes, obtendo a frequência do passo na direção vertical e horizontal-longitudinal em torno de 2 Hz. O guia SÉTRA (2006) salienta que, para a direção horizontal-transversal, a frequência do carregamento é metade das outras direções, portanto, em torno de 1Hz.

Modelo Proposto por BACHMANN e AMMANN (1987)

BACHMANN e AMMANN (1987) descrevem a função do carregamento do caminhar como periódica e representada por uma série de Fourier. Esta representação apresenta uma parcela constante e uma soma de forças harmônicas. Cada força harmônica apresenta frequência múltipla da frequência básica do passo e amplitude caracterizada pelo coeficiente de Fourier. O carregamento na direção vertical devido a um pedestre caminhando é representada por uma função do tempo, dada por:

$$F(t) = G_0 \cdot \left[1 + \alpha_{v1} \cdot \sin(2\pi \cdot f_p \cdot t) + \alpha_{v2} \cdot \sin(4\pi \cdot f_p \cdot t - \phi_2) + \alpha_{v3} \cdot \sin(6\pi \cdot f_p \cdot t - \phi_3) \right] \quad (1)$$

onde

f_p é a frequência do passo;

G_0 é o peso de uma pessoa, sendo adotado 800 N;

α_{vi} é o coeficiente de Fourier para a direção vertical;

ϕ_i é o ângulo de fase.

Para um caminhar de 2 Hz são adotados os coeficientes de Fourier $\alpha_{v1} = 0,40$ e $\alpha_{v2} = \alpha_{v3} = 0,10$. Os ângulos de fase para esta frequência do passo são $\phi_2 = \phi_3 = \pi/2$.

Para considerar os efeitos devido ao caminhar de multidões, o método adota o modelo proposto por MATSUMOTO *et al.* (1978). Este estabelece que o efeito causado por uma multidão pode ser determinado a partir da multiplicação do efeito de um único pedestre por um fator (m) dado por:

$$m = \sqrt{\lambda \cdot T} \quad (2)$$

onde:

λ é a taxa de chegada dos pedestres na passarela (em pessoas/s · m);

T é o tempo necessário para atravessar a passarela de comprimento L (calculado como $T = L / v_s$);

v_s é a velocidade de travessia da passarela ($\cong 1,5$ m/s).

O produto $\lambda \cdot T$ representa o número de pessoas (N) presentes na estrutura em um dado momento. Desta forma, pode ser entendido que um grupo de N pedestres produz o efeito aproximadamente igual a \sqrt{N} pedestres sincronizados.

Segundo BACHMANN e AMMANN (1987), a equação 2 pode ser aplicada em passarelas com a frequência natural dentro do intervalo comum de frequência do passo (entre 1,8 Hz e 2,2 Hz). Para frequências naturais entre 2,2 Hz e 2,4 Hz e entre 1,6 Hz e 1,8 Hz sugere-se uma redução linear do fator m até o limite inferior de $m_{min} = 2,0$. Este resultado considera a diferença de fase entre o carregamento aplicado por cada pedestre, por estes entrarem em diferentes instantes de tempo na passarela.

Modelo Proposto pelo Guia de Projeto SETRÁ (SÉTRA/AFGC, 2006)

Em 2006, o Departamento de Engenharia de Transportes, Rodovias e Pontes SÉTRA, da Associação Francesa de Engenharia Civil AFGC, lançou um guia técnico para a avaliação do comportamento dinâmico de passarelas sujeitas ao carregamento de pedestres. O guia teve como base os conhecimentos obtidos a partir de testes realizados na passarela Solférino, em Paris e em um modelo de teste experimental.

A metodologia se baseia no conceito de classificação da passarela em função do tráfego esperado e do nível de conforto exigido para a estrutura. Desta forma, passarelas em um meio urbano não são tratadas da mesma forma que as passarelas construídas em áreas rurais. A proximidade das frequências naturais da estrutura com a do carregamento de pedestres classifica o risco de ressonância. Dependendo do uso esperado da passarela e da faixa de risco das suas frequências naturais, são aplicados diferentes casos de carregamento para cada direção.

O carregamento é distribuído pela área do tabuleiro, de acordo com o modo analisado. Este carregamento considera apenas um harmônico, o qual está em ressonância com o modo analisado.

A consideração do efeito randômico de grupo é feita pela multiplicação da carga pelo fator N_{eq} , que depende do nível de tráfego esperado. Para multidões esparsas e densas (densidade $< 1,0$ pessoas/m²), tem-se:

$$N_{eq} = 10,8 \cdot \sqrt{N \cdot \xi} \quad (3)$$

Para multidões muito densas:

$$N_{eq} = 1,85 \cdot \sqrt{N} \quad (4)$$

onde:

ξ é o amortecimento relativo;
 N é o número de pedestres.

Aplica-se, também, considerado um fator redutor ψ que considera o risco de ressonância menos provável, na medida em que a frequência natural da estrutura se afasta da faixa média de frequência do passo dos pedestres (1,7 Hz a 2,1 Hz). Este fator é definido em relação à frequência do modo analisado. A equação básica do carregamento proposto pelo SÉTRA é apresentada a seguir:

$$F(t) = \frac{d}{N} \cdot \alpha \cdot G_0 \cdot \cos(2\pi \cdot f_i \cdot t) \cdot N_{eq} \cdot \psi \quad (5)$$

onde:

d é a densidade de pedestres (pessoas/m²);

α é o coeficiente de Fourier;

f_i é a frequência do modo analisado;

G_0 é o peso de uma pessoa, sendo adotado 700 N.

Análise do conforto

A determinação de limites aceitáveis de vibrações em estruturas é uma tarefa árdua, tendo em vista que a sensibilidade à vibração das pessoas depende de diversos fatores, tais como: tempo de exposição, posição (em pé, sentado, deitado), idade, humor, frequência de ocorrência, o ambiente em que ela se desenvolve, dentre outros (VARELA, 2004).

As normas nacionais são, em alguns casos, omissas e, em outros, tratam da avaliação dinâmica de forma simplificada. A NBR 6118:2014 analisa exclusivamente a frequência natural dos modos verticais da estrutura. Recomenda-se que a frequência natural da estrutura seja ao menos 20% superior à frequência considerada crítica (4,5 Hz).

Entretanto, a mesma norma preconiza que, nos casos em que as prescrições anteriores não puderem ser atendidas, deve ser feita uma análise dinâmica mais acurada, conforme estabelecido em Normas Internacionais, enquanto não existir Norma Brasileira específica.

BACHMANN et al. (1995) apresentam dois limites para as acelerações verticais desenvolvidas pela estrutura, em função da frequência natural do modo analisado. Os limites são os adotados pelas normas BS 5400 e ONT 83, apresentados na Tabela 1:

Tabela 1 – Limites de aceleração vertical.

Norma	Aceleração máxima (m/s ²)
BS 5400	$0,5 f_v^{0,5}$
ONT 83	$0,25 f_v^{0,78}$

Para frequência igual a 2 Hz, a BS 5400 limita a aceleração em 0,7 m/s² e a ONT 83 em 0,43 m/s². Estes limites foram propostos para a aceleração da estrutura devido ao carregamento de um único pedestre. Não são apresentados limites para a aceleração causada por multidões.

Já o guia SÉTRA (2006) aborda o assunto de forma classificatória. Verifica-se com as Tabelas 2 e 3 em qual intervalo a aceleração obtida está inserida, para obter o nível de conforto correspondente.

Tabela 2 – Níveis de conforto e acelerações limites na direção vertical.

Intervalo	Aceleração (m/s ²)	Nível de Conforto
1	0,0 - 0,5	Máximo
2	0,5 - 1,0	Médio
3	1,0 - 2,5	Mínimo
4	> 2,5	Intolerável

Tabela 3 – Níveis de conforto e acelerações limites na direção horizontal.

Intervalo	Aceleração (m/s ²)	Nível de Conforto
1	0,0 - 0,15	Máximo
2	0,15 - 0,30	Médio
3	0,30 - 0,80	Mínimo
4	> 0,80	Intolerável

O guia ainda salienta que, para a direção horizontal-transversal, acelerações acima de 0,10 m/s² podem causar o efeito de sincronização forçada “*lock-in*”, fazendo com que a aceleração aumente rapidamente. Desta forma, acelerações horizontais transversais acima deste limite devem ser evitadas.

Descrição do Projeto

A estrutura é de uma passarela com 30,0 m de vão em concreto pré-fabricado, com superestrutura composta por uma única longarina protendida com 1,60 m de altura e pré-lajes em concreto armado com 0,13 m de espessura. As cargas são transmitidas às fundações pela mesoestrutura, constituída por um pilar em cada apoio. Analisa-se apenas a travessia de pedestres. As Figuras 1 e 2 a seguir apresentam as seções transversais no apoio e no meio do vão, assim como a estrutura em elevação.

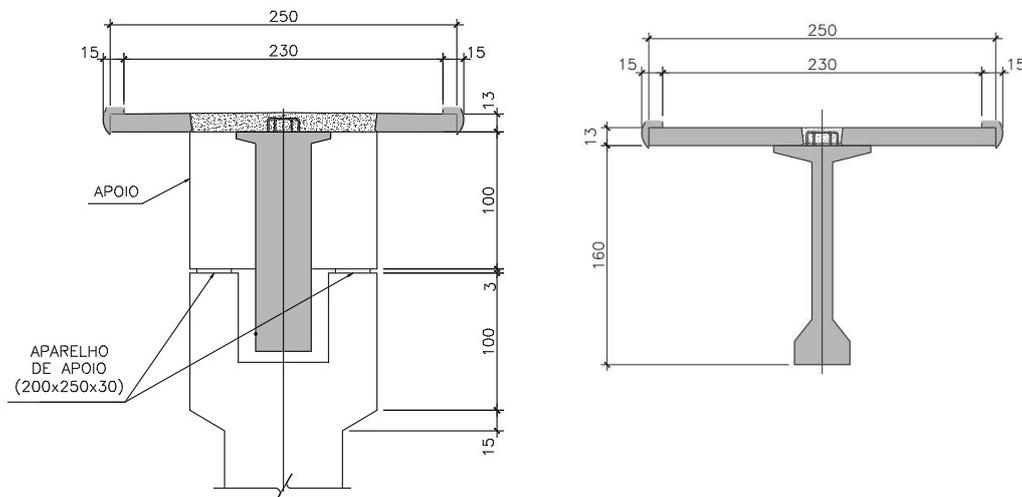


Figura 1 – Seção transversal no apoio e no meio do vão. (unid: cm)

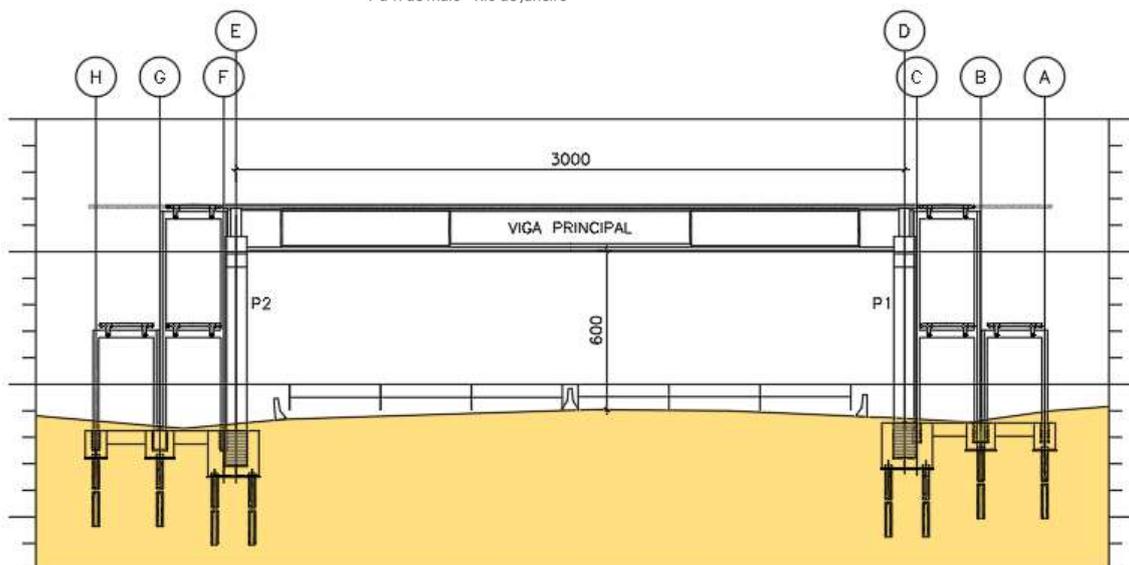


Figura 2 – Estrutura em elevação. (unid: cm)

Metodologia

Para o desenvolvimento do estudo de caso, foi elaborado um modelo tridimensional em elementos finitos, utilizando o programa de análise estrutural SAP2000. No modelo ilustrado na Figura 3, a viga principal, os pilares e as travessas de apoio foram representados por elementos de barras. Para as lajes e consoles de apoio foram utilizados elementos de casca. Os apoios da estrutura foram considerados engastados no bloco de fundação.

O programa considera a massa da estrutura a partir das propriedades definidas para cada material dos elementos estruturais. Ao modelo, foram adicionadas as massas dos elementos não estruturais previstos (guarda-corpos). Esta massa foi adicionada nas laterais da passarela, de acordo com a discretização utilizada.

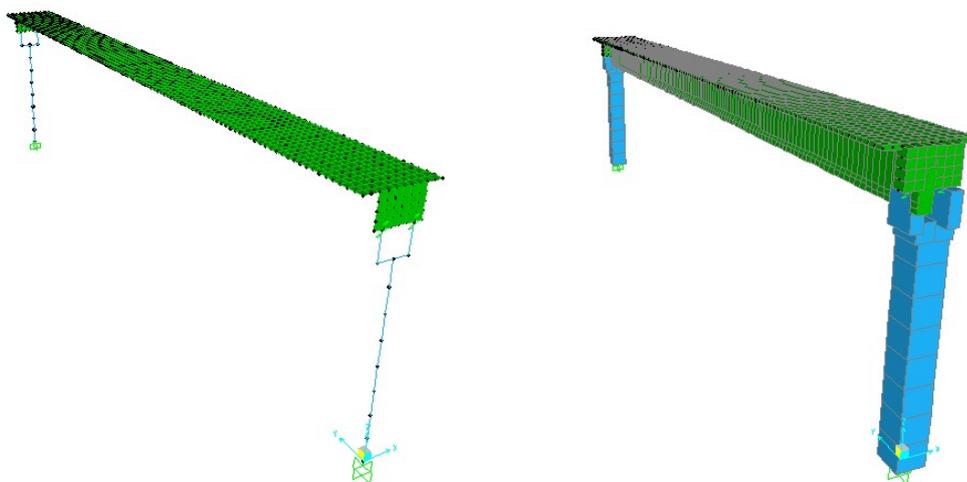


Figura 3 – Modelo tridimensional em elementos finitos.

A partir do modelo gerado, foi realizada a análise modal para a determinação das frequências naturais da estrutura e das respectivas configurações deformadas. Foram efetuadas duas análises, uma considerando apenas a massa da estrutura e outra adicionando a massa dos pedestres ($d = 1$ pedestre/m²) ao modelo. Os resultados estão agrupados na Tabela 4:

Tabela 4 – Frequências naturais da passarela.

Característica do Modo	Vazia		Carregada	
	Frequência (Hz)	Período (s)	Frequência (Hz)	Período (s)
Transversal	1,891	0,529	1,813	0,552
Longitudinal	2,462	0,406	2,372	0,422
Transversal	3,402	0,294	3,297	0,303
Vertical	3,585	0,279	3,421	0,292
Transversal	6,636	0,151	6,423	0,156
Torção	10,648	0,094	9,704	0,103
Vertical	13,347	0,075	12,743	0,078
Transversal	15,370	0,065	14,864	0,067

- Análise de acordo com BACHMANN e AMMANN (1987)

A metodologia proposta por Bachmann e Ammann é aplicada sem a consideração da massa dos pedestres. Dois casos de carga diferentes, considerando as frequências do passo (f_p), foram analisados. O primeiro com a frequência do passo igual a 2 Hz e o segundo carregamento com a frequência do passo igual a 1,79 Hz, buscando a ressonância do segundo harmônico com o primeiro modo vertical (3,58 Hz). As equações dos carregamentos são:

- 1º Caso de carga ($f_p = 2,00$ Hz)

$$F(t) = 800N \cdot \left[\begin{array}{l} 0,4 \cdot \sin(2\pi \cdot 2,00 \cdot t) + 0,1 \cdot \sin\left(2\pi \cdot 4,00 \cdot t - \frac{\pi}{2}\right) + \\ 0,1 \cdot \sin\left(2\pi \cdot 6,00 \cdot t - \frac{\pi}{2}\right) \end{array} \right]$$

- 2º Caso de carga ($f_p = 1,79$ Hz)

$$F(t) = 800N \cdot \left[\begin{array}{l} 0,4 \cdot \sin(2\pi \cdot 1,79 \cdot t) + 0,1 \cdot \sin\left(2\pi \cdot 3,58 \cdot t - \frac{\pi}{2}\right) + \\ 0,1 \cdot \sin\left(2\pi \cdot 5,38 \cdot t - \frac{\pi}{2}\right) \end{array} \right]$$

O carregamento é aplicado pontualmente e a função é associada ao caso de carga. O amortecimento estrutural adotado é de 0,010 para todos os modos. Feita a análise, é obtida a aceleração vertical (U_z) para o ponto central da passarela.

Para a consideração do efeito de uma multidão, a aceleração máxima é multiplicada pelo coeficiente m . Adotando a densidade sugerida de 1 pedestre/m², o número de pessoas na passarela é $30 \times 2,3 = 69$ pedestres. Logo, utilizando a Equação 2, $m = 8,3$.

A aceleração máxima devido a um único pedestre e para um grupo de pedestres, caminhando na passarela é apresentado na Tabela 5:

Tabela 5 – Resultado - Bachmann e Ammann.

Caso de carga	f_p (Hz)	$a_{1pedestre}$ (m/s ²)	a_{grupo} (m/s ²)
1º	2,00	0,033	0,27
2º	1,79	0,147	1,22

Os limites sugeridos pelas normas BS5400 e ONT 83, considerado a frequência do modo analisado, são, respectivamente, 0,95 m/s² e 0,68 m/s². Nota-se, para a situação de um único pedestre atravessando a passarela o limite é atendido, mas não para a passagem de multidão para o carregamento com a frequência do passo de 1,79 Hz

Classificando o resultado obtido para a passagem de multidão de pedestres proposto pelo SETRÁ, a passarela atende ao conforto máximo para o 1º caso de carga e mínimo para o 2º caso.

- Análise de acordo com o guia SÉTRA (2006)

A metodologia proposta pelo guia SÉTRA propõe que a passarela seja enquadrada em classes, de acordo com o tráfego esperado. Em seguida, é feita uma análise das frequências naturais da estrutura para a situação de passarela sem a massa dos pedestres e com a massa dos pedestres adicionadas ao modelo de cálculo. De acordo com a proximidade da frequência natural com a do passo e a classe da passarela, são aplicados diferentes casos de carga, uniformemente distribuídos no tabuleiro. É considerado o primeiro harmônico do carregamento de pedestres nos casos de carga 1 e 2, ou o segundo harmônico no caso 3. Como o local de implantação da passarela não é definido, a análise foi realizada considerando todas as classes.

A Tabela 6 apresenta os casos de carga que devem ser aplicados à passarela para a realização da análise dinâmica, considerando cada classe. Para as Classes III e IV, a verificação é atendida sem a necessidade de aplicação do carregamento dinâmico.

Tabela 6 – Casos de carga dinâmicos para cada classe.

Característica do Modo	Frequência (Hz)	Faixa de risco	Caso de carga		
			Classe 1	Classe 2	Classe 3
Transversal	1,813	3 (mínimo)	3	3	-
Longitudinal	2,372	2 (médio)	2	1	-
Transversal	3,297	-	-	-	-
Vertical	3,421	3 (mínimo)	3	3	-
Transversal	6,423	-	-	-	-
Torção	9,704	-	-	-	-

A densidade (d) e o número equivalente de pedestres (N_{eq}) para as Classes I e II são apresentados na Tabela 7:

Tabela 7 – Densidade e Número Equivalente de pedestres.

Classe	d (pedestres/m ²)	N (pedestres)	N_{eq} (pedestres)
I	1	69,0	15,4
II	0,8	55,2	8,0

Os parâmetros necessários e a função de carregamento de pedestres para cada caso são apresentados a seguir:

Tabela 8 – Parâmetros e carregamentos aplicados considerando Classe I.

Carregamento	f_i (Hz)	ψ	$\alpha \cdot P$ (N)	$F(t)$ (N/m ²)
2ºharm. Transversal	1,81	1,00	7	$1,56 \cdot \cos(2\pi \cdot 1,81 \cdot t)$
1ºharm. Longitudinal	2,37	0,46	140	$14,25 \cdot \cos(2\pi \cdot 2,37 \cdot t)$
2ºharm. Vertical	3,42	1,00	70	$15,59 \cdot \cos(2\pi \cdot 3,42 \cdot t)$

Tabela 9 – Parâmetros e carregamentos aplicados considerando Classe II.

Carregamento	f_i (Hz)	ψ	$\alpha \cdot P$ (N)	$F(t)$ (N/m ²)
2ºharm. Transversal	1,81	1,00	7	$0,81 \cdot \cos(2\pi \cdot 1,81 \cdot t)$
1ºharm. Longitudinal	2,37	0,46	140	$7,44 \cdot \cos(2\pi \cdot 2,37 \cdot t)$
2ºharm. Vertical	3,42	1,00	70	$8,14 \cdot \cos(2\pi \cdot 3,42 \cdot t)$

Os resultados obtidos com a aplicação dos carregamentos são apresentados resumidamente na Tabela 6. Considerando a passarela como Classe I, as acelerações verticais e longitudinais são classificadas com mínimo conforto. O nível de conforto na direção transversal é máximo, e a verificação de sincronização forçada “lock in” é considerada atendida.

Já na consideração da passarela como Classe II, as acelerações obtidas são menores, sendo o conforto classificado como médio para direção vertical, mínimo para a direção longitudinal e máximo para a direção transversal. Para a passarela classificada como Classes III e IV, a verificação é atendida sem a necessidade de aplicar carregamentos dinâmicos.

Tabela 10 – Resultados - SÉTRA.

Direção	Classe I		Classe II	
	$a_{máx}$ (m/s ²)	Conforto	$a_{máx}$ (m/s ²)	Conforto
Vertical	1,25	Mínimo	0,65	Médio
Longitudinal	0,72	Mínimo	0,38	Mínimo
Transversal	0,10	Máximo	0,05	Máximo

Conclusão

Diversos pesquisadores desenvolveram estudos de avaliação do comportamento dinâmico de passarelas, sujeitas ao carregamento de pedestres. No presente estudo foram aplicadas duas das principais metodologias, a primeira proposta por BACHMANN e AMMANN e a segunda pelo guia SÉTRA.

Observou-se que para os casos de carga utilizando a metodologia de BACHMANN, as acelerações obtidas são bastante diferentes. O primeiro caso de carga analisado aplica o carregamento dinâmico com a frequência mais provável do caminhar ($f_v = 2,0$ Hz). A aceleração máxima para o primeiro caso ($a_{máx} = 0,033$ m/s²) é bastante inferior ao obtido pelo segundo caso ($a_{máx} = 0,147$ m/s²) onde a frequência do caminhar foi de 1,79 Hz. Este fato deve-se ao efeito da ressonância associada ao segundo caso de carga, que apresenta o segundo harmônico do carregamento de pedestres com a mesma frequência natural do modo analisado.

A SÉTRA aborda o carregamento dinâmico dependendo do uso previsto para a estrutura. Esta consideração se mostra interessante pois possibilita uma análise mais precisa do projeto.

Comparando as duas metodologias para a direção vertical, os resultados obtidos são bastante semelhantes. Pelo segundo caso de carga, adotando a metodologia proposta por Bachmann e Ammann para multidão, a aceleração máxima ($a_{máx} = 1,22$ m/s²) foi muito próximo a obtida pela SÉTRA ($a_{máx} = 1,25$ m/s²), considerando a passarela como classe I. Estudos da percepção dos indivíduos à vibração foram realizados para diversas situações. Os limites de conforto toleráveis variam para cada autor, o que faz necessário o estudo pelas várias abordagens. Além disso, percebe-se que as normas nacionais ainda não refletem os avanços alcançados por esses estudos. Desta forma, conclui-se que ainda existe muito espaço para o desenvolvimento das pesquisas sobre o tema e incorporação dos avanços nas normas nacionais.

Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimentos. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.
- BACHMANN, H., AMMANN, W. Vibrations in Structures Induced by Man and Machines, International Association for Bridge and Structural Engineering, IABSE, 1987.
- BACHMANN, H. et al. Vibration Problems in Structures – practical guidelines, 2ed, Birkhäuser erlag, Basel, 1995.
- DALLARD, P., FITZPATRICK, A. J.; FLINT, A.; et al. “The London millennium footbridge”. Structural Engineer, v. 79, n. 22, p. 17–21, 2001.
- GALBRAITH, M.V., BARTON, F.W., 1970, “Ground loading from footsteps”, Journal of Acoustic Society of America, v.48, pp. 1288-1292.
- MATSUMOTO, Y.; NISHIOKA, T.; SHIOJIRI, H.; MATSUZAKI, K. “Dynamic Design of Footbridges”, IABSE Proceedings. n 17/78, pp. 1-15, 1978.
- SÉTRA / AFCG “Footbridges – Assessment of vibrational behavior of footbridges under pedestrian loading – Practical Guidelines”, 2006.
- TILLY, G.P., CULLINGTON, D.W., EYRE, R. “Dynamic Behaviour of Footbridges” IABSE Surveys, S26-84, pp. 13-24, 1984.
- VARELA, W.D. Modelo teórico-experimental para análises de vibrações induzidas por pessoas caminhando sobre lajes de edifícios, Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2004.