



Análise da Resposta Estrutural Dinâmica de Passarelas de Pedestres via Emprego de uma Metodologia de Análise Probabilística

Lucas de Souza S. Moreira¹, Jorge Maurício dos S. de Souza¹, José Guilherme S. da Silva¹

¹Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil (PGE CIV) / Faculdade de Engenharia (FEN) / Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ) / suzanolucas@gmail.com; jorgebulk@hotmail.com; jgss@uerj.br

Resumo

Atualmente, as passarelas de pedestres têm sido construídas leves e esbeltas, com base em projetos arquitetônicos arrojados. Tal arrojado arquitetônico tem gerado problemas de vibrações excessivas, especialmente no que diz respeito ao projeto de passarelas mistas (aço-concreto). Neste sentido, cabe destacar que as normas e recomendações de projeto consideram que as forças induzidas pelo caminhar humano são determinísticas. Entretanto, o caminhar humano e as respectivas forças dinâmicas geradas apresentam um comportamento randômico. Deste modo, esta investigação objetiva contribuir com os projetistas de estruturas, a partir do desenvolvimento de uma abordagem probabilística para a avaliação da resposta dinâmica de passarelas, no que diz respeito a vibrações excessivas que podem vir a causar desconforto humano. Para tal, utiliza-se como estrutura base para as análises uma passarela mista (aço-concreto) construída no campus do Instituto de Traumatologia e Ortopedia (INTO), na cidade do Rio de Janeiro/RJ, Brasil. Considerando-se a utilização de métodos probabilísticos é possível determinar a probabilidade de ocorrência dos valores das acelerações de pico da estrutura ultrapassarem ou não os critérios de conforto humano. Os resultados obtidos ao longo deste estudo revelam que os valores das acelerações máximas, calculadas com base exclusivamente nos métodos determinísticos, podem vir a ser superestimados em diversas situações de projeto.

Palavras-chave

Passarelas de pedestres; análise dinâmica de estruturas; vibrações excessivas; conforto humano.

1. Introdução

Considerando-se o arrojado arquitetônico atual e, bem como, a utilização de novos materiais empregados na construção civil, sistemas estruturais compostos por passarelas de pedestres tornaram-se muito mais suscetíveis a problemas de vibração quando submetidos a carregamentos dinâmicos induzidos por pessoas (BACHMANN & AMMANN, 1987); (ISO-2631/2, 1989); (MOREIRA, 2023); (MURRAY et al., 2016); (RAINER et al., 1988); (SOUZA, 2012).

Ao longo dos anos, uma série de investigações e pesquisas sobre o tema, além de normas e recomendações de projeto tem sugerido a utilização de métodos determinísticos simplificados para determinação da resposta dinâmica de passarelas de pedestres (BACHMANN & AMMANN, 1987); (MURRAY et al., 2016); (RAINER et al., 1988). Entretanto, o caminhar humano é um fenômeno de natureza não determinística, cuja força dinâmica gerada neste processo está associada às características individuais de cada pedestre tais como peso, velocidade, comprimento e frequência do passo (SHAHABPOOR et al., 2018); (ŽIVANOVIĆ, 2006); (ŽIVANOVIĆ, 2012).

Por outro lado, sabe-se que passarelas de pedestres em situações de ressonância com a excitação dinâmica induzida pelas pessoas apresentam amplificações da resposta estrutural (deslocamentos e esforços) bastante elevadas em relação à resposta puramente estática. Tal fato pode vir a acarretar vibrações excessivas da estrutura e desconforto aos usuários (PIMENTEL et al., 2001). Assim

sendo, os engenheiros estruturais devem procurar evitar projetar passarelas de pedestres cujas frequências naturais apresentem maior probabilidade de estar em ressonância com o carregamento dinâmico induzido pelas pessoas (MOREIRA, 2023); (SOUZA, 2012); (MURRAY et al., 2016); (SETAREH, 2012).

Considerando-se os aspectos mencionados anteriormente, esta investigação tem como objetivo apresentar uma metodologia de análise probabilística para avaliação da resposta dinâmica de passarelas, levando-se em consideração a natureza não determinística do caminhar dos pedestres sobre a estrutura (MOREIRA, 2023); (SOUZA, 2012).

O modelo estrutural analisado corresponde a uma passarela de pedestres mista (aço-concreto) construída no campus do Instituto de Traumatologia e Ortopedia (INTO), na cidade do Rio de Janeiro/RJ, Brasil (MOREIRA, 2023); (SOUZA, 2012). Os resultados obtidos ao longo do estudo apontam para o fato de que os valores das acelerações de máximas (ou de pico) calculadas com base nos métodos determinísticos podem vir a ser superestimados em diversas situações de projeto.

2. Metodologia de Análise Probabilística

Nesta investigação, a metodologia de análise probabilística desenvolvida e implementada computacionalmente considera que as variáveis aleatórias e independentes correspondentes ao caminhar dos pedestres sobre as passarelas seguem uma distribuição normal (SOUZA, 2012): frequência do passo (f_p) e comprimento do passo (l_p).

Em seu trabalho de pesquisa (HAUSDORFF et al., 1999) demonstrou que a frequência do passo de um pedestre não é constante durante a caminhada. A variação da frequência do passo de um dado pedestre ao longo do tempo caracteriza a intravariabilidade do passo. Por outro lado, a variação da frequência do passo entre pedestres é denominada intervariabilidade.

Ressalta-se que no método probabilístico desenvolvido neste estudo foram considerados tanto o efeito da intervariabilidade quanto da intravariabilidade do passo dos pedestres (HAUSDORFF et al., 1999). A Tabela 1 apresenta os valores médios e respectivos desvios padrões das variáveis aleatórias independentes utilizadas neste trabalho de pesquisa quando das simulações numéricas de Monte Carlo, objetivando a determinação da resposta dinâmica das passarelas.

Tabela 1 - Parâmetros estatísticos associados ao caminhar das pessoas.

Variável	Unidades	Média (μ)	Desvio Padrão (σ)	Referências
Intravariabilidade	(Hz)	-	$1,3 + 0,1\%$ de μ	(HAUSDORFF et al., 1999)
f_p	(Hz)	2,00	0,20	(BACHMANN, 1987)
l_p	(m)	0,71	0,071	(ŽIVANOVIĆ, 2006)

3. Modelo Estrutural Investigado

O modelo estrutural investigado neste trabalho consiste em uma passarela de pedestres mista (aço-concreto) com vão de 15m (MOREIRA, 2023); (SOUZA, 2012). A Tabela 2 apresenta as propriedades geométricas do modelo estrutural. Os perfis de aço ASTM A36 utilizados são do tipo “I” soldados. Com referência às vigas de aço foi considerado um módulo de elasticidade igual a 205 GPa. A laje de concreto da passarela de pedestres possui espessura de 0,10m, resistência característica a compressão de 25 MPa e módulo de elasticidade igual a 28 GPa. Em seguida, as Figuras 1 e 2 ilustram, respectivamente, o projeto estrutural da passarela e o modelo numérico em elementos finitos desenvolvido para este estudo, via emprego do programa ANSYS (ANSYS, 1017).

Tabela 2 - Características geométricas das vigas da passarela (dimensões em mm).

Tipo de Perfil	Altura do Perfil (H)	Largura da Mesa (b_f)	Espessura da Mesa Superior (t_f)	Espessura da Mesa Inferior (t_f)	Espessura da Alma (t_w)
Longarinas - I 700 x 159,9	700	300	25,0	25,0	8,0
Transversinas - I 330 x 45,4	330	200	9,5	9,5	6,3

Tabela 3 - Variação dos parâmetros utilizados ao longo da análise estrutural dinâmica.

Parâmetros Investigados	Variação Paramétrica
Frequência fundamental: f_{01}	1 Hz a 10 Hz
Amortecimento estrutural: ξ	0,5% a 2,0%
Vão da passarela: L	10 m a 30 m

Os valores das acelerações de pico foram determinados utilizando-se a formulação matemática proposta por (RAINER et al., 1988), no que diz respeito à determinação dos coeficientes dinâmicos (α). Evidentemente, a determinação dos coeficientes dinâmicos está intrinsicamente ligada à ressonância entre a frequência do harmônico da excitação dinâmica e a frequência fundamental da passarela em estudo.

A partir dos valores calculados das acelerações de pico, obtidos probabilisticamente, foram determinados os valores relativos ao percentil 95% ($a_{95\%}$). O percentil 95% corresponde ao valor com 95% de probabilidade de ocorrência, ou seja, calculando-se a resposta dinâmica máxima da estrutura analisada 100 vezes espera-se que em 95 casos os valores das acelerações de pico sejam iguais ou inferiores ao valor representativo do percentil 95% ($a_{95\%}$).

Com base nos valores referentes ao percentil 95% foram construídos os espectros de resposta probabilísticos para uma passarela de referência com massa total igual a 20.000 kg (SOUZA, 2012). Assim sendo, as Figuras 3 a 6 apresentam os espectros de resposta para os comprimentos de vão variando na faixa de 10 m a 30 m ($L = 10$ m a 30 m), respectivamente. Ressalta-se, também, que o comprimento de vão $L = 15$ m (Figura 4) corresponde especificamente ao modelo estrutural da passarela de pedestres mista (aço-concreto) real, existente e construída no campus do Instituto de Traumatologia e Ortopedia (INTO), na cidade do Rio de Janeiro/RJ, Brasil (MOREIRA, 2023); (SOUZA, 2012), conforme ilustrado nas Figuras 1 e 2.

5. Análise e Discussão dos Resultados

Objetivando permitir a comparação dos valores referentes ao percentil 95% ($a_{95\%}$) com base nos critérios de conforto humano (MURRAY et al., 2016), nas Figuras 3 a 6 encontram-se delineados por linhas tracejadas os valores limites das acelerações de pico estabelecidos por normas e recomendações de projeto (MURRAY et al., 2016) para passarelas de pedestres externas e internas, correspondentes aos valores $0,49$ m/s² e $0,15$ m/s², respectivamente (passarelas de pedestres externas: $a_{lim} = 0,49$ m/s²; passarelas de pedestres internas: $a_{lim} = 0,15$ m/s²), conforme apresentado nas Figuras 3 a 6.

Observando-se os resultados apresentados nas Figuras 3 a 6, verifica-se que a resposta dinâmica (acelerações de pico) das passarelas de pedestres simplesmente apoiadas analisadas neste estudo varia em função do respectivo comprimento do vão, ou seja, do tempo de atuação do carregamento dinâmico sobre a estrutura durante a fase permanente da resposta do sistema.

Verifica-se que a contribuição do primeiro harmônico da excitação dinâmica devido ao caminhar humano é muito mais relevante que a contribuição dos demais harmônicos, no que diz respeito à avaliação da resposta do sistema, Figuras 3 a 6. Tal fato faz com que os limites de conforto humano sejam violados ($a_{95\%} > a_{lim} = 0,49$ m/s² e $a_{95\%} > a_{lim} = 0,15$ m/s²) praticamente em todos os casos de projeto analisados nesta investigação, Figuras 3 a 6.

As Figuras 3 a 6 permitem concluir que o segundo, terceiro e quarto harmônicos do caminhar não geram valores de acelerações acima dos valores limites de projeto para os coeficientes de amortecimento empregados nesta investigação ($\xi = 0,5\%$, 1% , $1,5\%$ e 2%), quando são consideradas as passarelas externas ($a_{95\%} < a_{lim} = 0,49$ m/s²) (MURRAY et al., 2016).

Considerando-se o caso das passarelas internas com base na redução do valor da aceleração limite ($a_{lim} = 0,15$ m/s²) (MURRAY et al., 2016), observa-se, por exemplo, que o segundo harmônico correspondente ao caminhar humano provoca valores de acelerações de pico superiores aos valores limites a partir do vão de 10 m ($a_{95\%} > a_{lim} = 0,15$ m/s²), para os coeficientes de amortecimento estrutural de ($\xi = 0,5\%$ e 1%), Figura 3.

A partir do aumento do comprimento do vão dos modelos estruturais investigados, observa-se, também, que os harmônicos da excitação dinâmica associados ao caminhar humano geram valores de acelerações de pico superiores aos valores limites estabelecidos para passarelas de pedestres internas (MURRAY et al., 2016) em inúmeras situações ($a_{95\%} > a_{lim} = 0,15 \text{ m/s}^2$), no que diz respeito aos coeficientes de amortecimento estrutural estudados neste trabalho de pesquisa ($\xi = 0,5\%$, 1% , $1,5\%$ e 2%), conforme ilustrado nas Figuras 3 a 6.

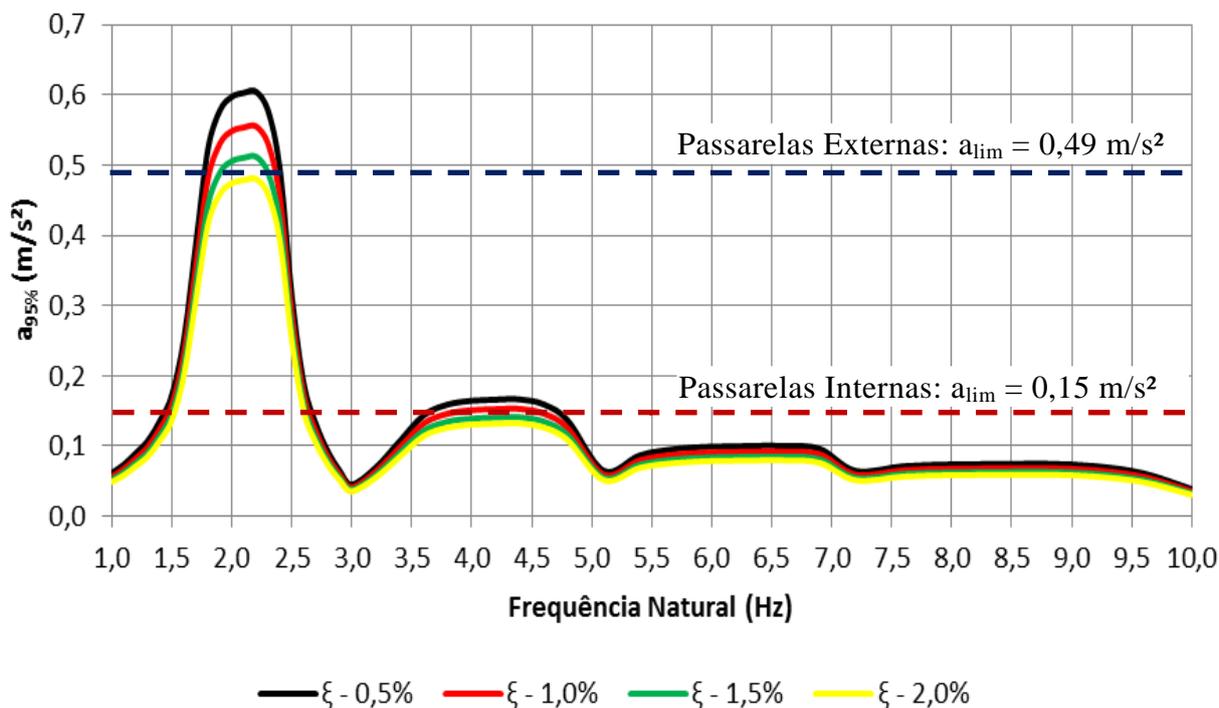


Figura 3 - Espectro de resposta para as acelerações de pico: L = 10 m.

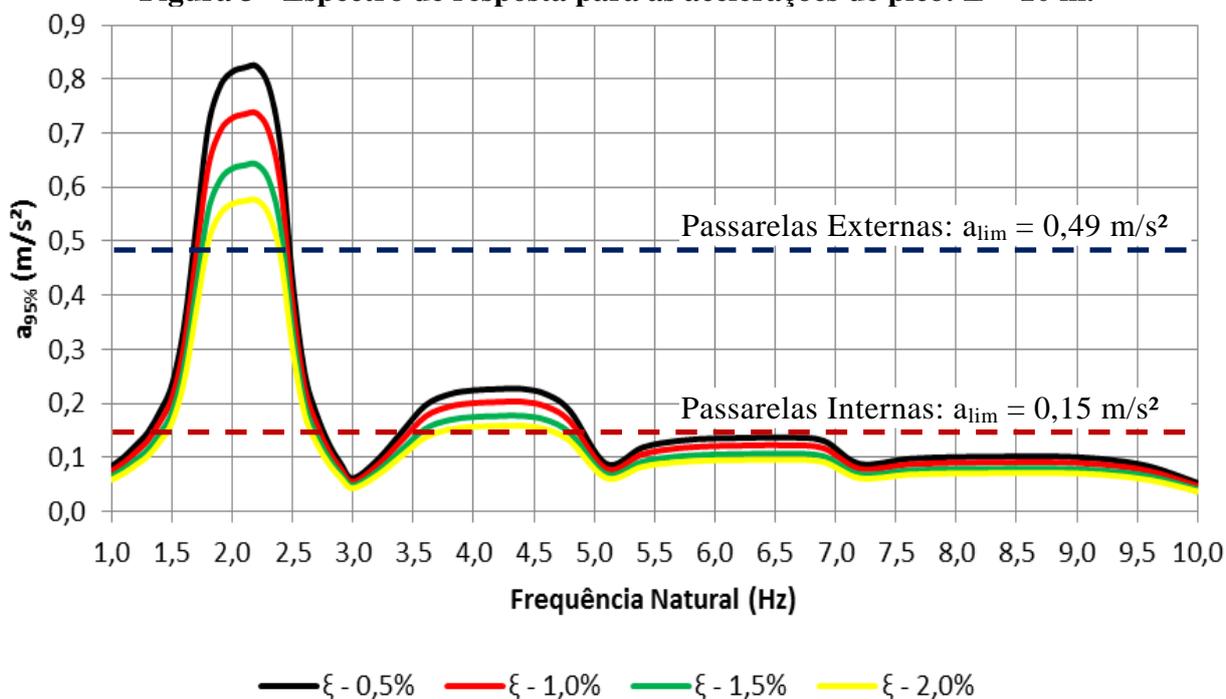


Figura 4 - Espectro de resposta para as acelerações de pico: L = 15 m.

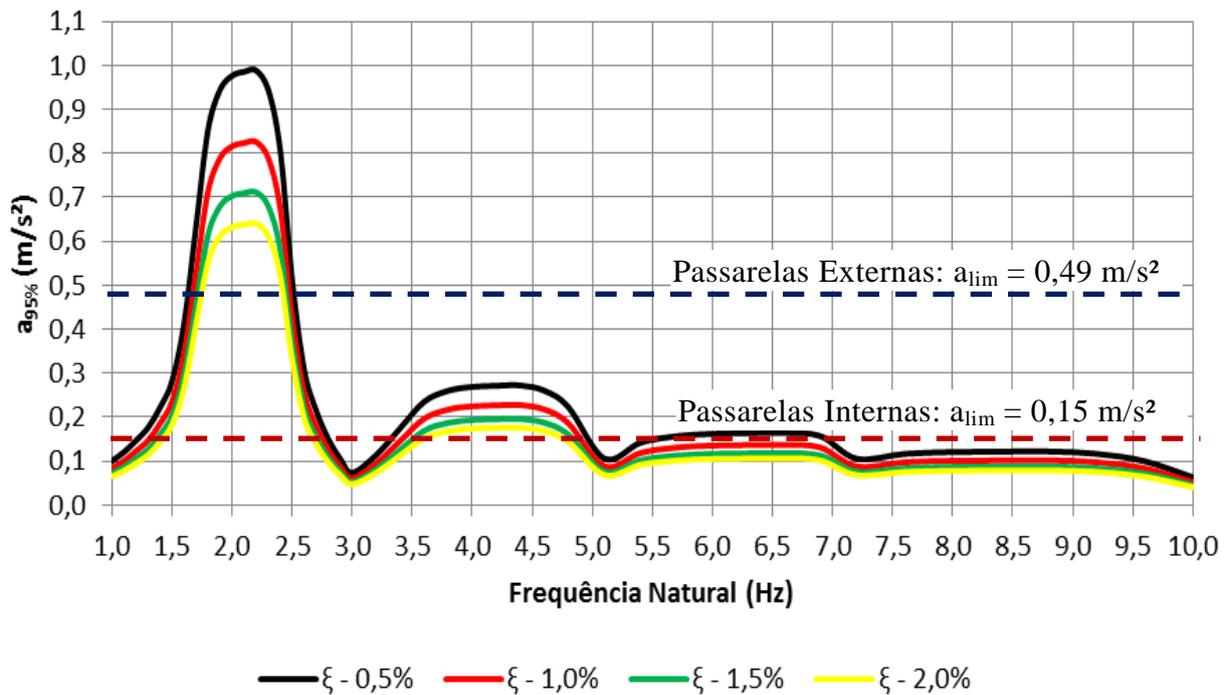


Figura 5 - Espectro de resposta para as acelerações de pico: L = 20 m.

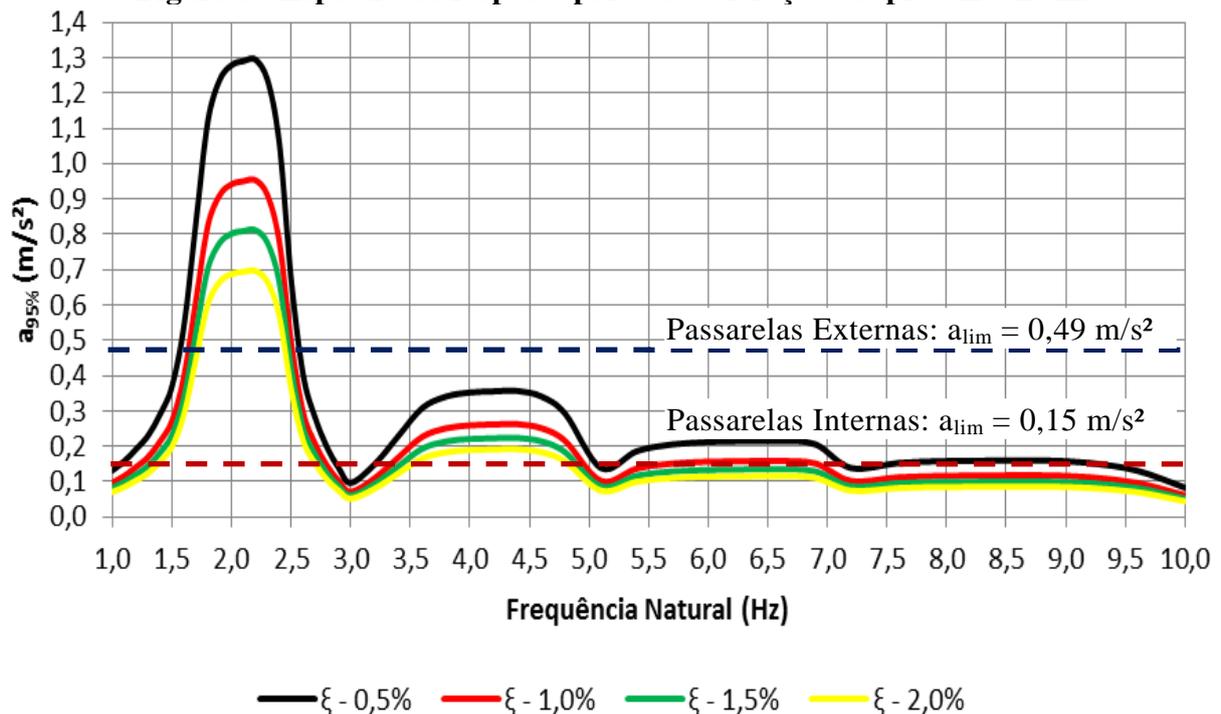


Figura 6 - Espectro de resposta para as acelerações de pico: L = 30 m.

6. Conclusões

Com base no desenvolvimento do método probabilístico para avaliação da resposta dinâmica de passarelas de pedestres, inicialmente foram calculadas as acelerações máximas (acelerações de pico) para uma passarela de referência com massa total igual a 20.000 kg (SOUZA, 2012). Em seguida, foi realizada uma extensa análise paramétrica com base na variação das frequências naturais, coeficientes de amortecimento estrutural e comprimento do vão dos modelos. A partir da análise paramétrica realizada foram construídos espectros de resposta a partir dos valores referentes ao percentil 95% das acelerações de pico ($a_{95\%}$).

Os resultados obtidos ao longo deste estudo indicam que a resposta dinâmica (acelerações máximas) das passarelas de pedestres simplesmente apoiadas analisadas varia em função do comprimento do vão dos modelos, ou seja, do tempo de atuação do carregamento dinâmico sobre a estrutura durante a fase permanente da resposta do sistema.

Os valores das acelerações de pico na fase permanente da resposta, para modelos estruturais em ressonância com a carga dinâmica, obtidos por meio dos métodos determinísticos são superiores aos valores das acelerações calculadas utilizando-se o método probabilístico proposto neste estudo, o qual leva em consideração o comprimento do vão da passarela e, portanto, o tempo de atuação do carregamento dinâmico.

Por exemplo, para uma passarela com massa total igual a 20.000 kg, comprimento do vão igual a 15 m, coeficiente de amortecimento igual a 1% e frequência natural igual 2 Hz (SOUZA, 2012), a aceleração de pico na fase permanente da resposta obtida com o emprego dos métodos determinísticos é igual a 1,5 m/s² (RAINER et al., 1988) em contraste com o valor de 0,72 m/s² obtido com base no emprego do método probabilístico desenvolvido (SOUZA, 2012).

Os métodos analíticos determinísticos propostos nos trabalhos de (MURRAY et al., 2016) e (RAINER et al., 1988); levam em consideração o tempo de atuação do carregamento sobre a estrutura. Contudo, a passarela é sempre considerada em uma situação de ressonância com a excitação dinâmica. Ou seja, nestes métodos não é considerada a distribuição normal da frequência do passo dos pedestres.

Alternativamente, pode-se, também, determinar a aceleração de pico de passarelas de pedestres adotando-se, por exemplo, como frequência do caminhar humano um valor médio igual a 2 Hz (BACHMANN & AMMANN, 1987). Neste caso, a estrutura só estaria em ressonância com o caminhar humano caso uma de suas frequências naturais fosse igual a 2 Hz. Adotando-se um valor médio da frequência do passo igual a 2 Hz (BACHMANN & AMMANN, 1987), o valor das acelerações de pico pode vir a ser subestimado, tendo em vista que, em função da distribuição normal da frequência do passo dos pedestres (intervariabilidade), uma parcela destas pessoas pode gerar carregamentos dinâmicos ressonantes com a estrutura.

Outro aspecto referente aos métodos determinísticos diz respeito à variação da frequência do passo de um dado pedestre ao longo de sua caminhada (intravariabilidade do passo), pois os referidos métodos analíticos determinísticos não levam em consideração na formulação matemática o efeito da intervariabilidade e da intravariabilidade do passo dos pedestres.

No método analítico probabilístico desenvolvido nesta investigação, o qual leva em consideração tanto a intervariabilidade quanto a intravariabilidade do passo pedestres sobre a estrutura, observa-se que as passarelas de pedestres que se encontram nas faixas de frequência dos harmônicos do caminhar humano, porém, não ressonantes com a frequência média do caminhar (2 Hz) (BACHMANN & AMMANN, 1987) apresentam valores de acelerações de pico superiores aos valores obtidos através dos métodos determinísticos.

Isto ocorre, porque o método analítico probabilístico considera que a frequência do passo segue uma distribuição normal e, conseqüentemente, um percentual dos pedestres poderia vir a gerar carregamentos ressonantes com a estrutura. Ou seja, ao considerar a aleatoriedade da frequência do passo (f_p) e comprimento do passo (l_p) dos pedestres (intervariabilidade e intravariabilidade do passo dos pedestres), passarelas com frequências naturais diferentes do valor médio da frequência do passo do pedestre (2 Hz) irão experimentar acelerações de pico mais elevadas do que aquelas calculas considerando-se somente o valor médio da frequência de excitação (2 Hz).

Agradecimentos

Os autores deste trabalho de pesquisa agradecem ao suporte financeiro fornecido pelas Agências de Fomento à Pesquisa do país: CAPES, CNPq e FAPERJ.

Referências

- ANSYS. Advanced Analysis Techniques Guide. ANSYS Inc., 2017.
- BACHMANN, H.; AMMANN, W. Vibrations in structures induced by man and machines, Structural Engineering Document 3e, IABSE: International Association for Bridges and Structural Engineering, p. 1-176, 1987.
- HAUSDORFF, J.M.; ZEMAN, L.; PENG Y.C.; GOLDBERGER, A.L. Maturation of gait dynamics: stride-to-stride variability and its temporal organization in children. *Journal of Applied Physiology*, Vol. 86, N^o 3, p. 1040-1047, 1999.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION ISO-2631/2: Evaluation of human exposure to whole-body vibration. Part 2: Continuous and shock-induced vibration in buildings (1 to 80 Hz), Switzerland. 1989.
- MOREIRA, L.S.S. Resposta estrutural dinâmica e análise do conforto humano de passarelas de pedestres mistas (aço-concreto). Dissertação de Mestrado (Em desenvolvimento). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil (PGECIV). Universidade do estado do Rio de Janeiro (UERJ), p. 1-150, Rio de Janeiro/RJ, Brasil, 2023.
- MURRAY, T.M.; ALLEN, D.E.; UNGAR, E.E.; DAVIS, D.B. Steel design guide series 11: Vibrations of steel-framed structural systems due to human activity. 2nd Edition. 1st Printing. Chicago, USA. AISC: AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION, 2016.
- PIMENTEL, R.L.; PAVIC, A.; WALDRON, P. Evaluation of design requirements for footbridges excited by vertical forces from walking. *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 28, N^o 5, p. 769-776, 2001.
- RAINER, J.H.; PERNICA, G.; ALLEN, D.E. Dynamic loading and response of footbridges. *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 15, N^o 1, p. 66-71, 1988.
- SETAREH, M. Evaluation and assessment of vibrations owing to human activity. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings*, Vol. 165; p. 219-231, 2012.
- SHAHABPOOR, E., PAVIC, A.; RACIC, V. Identification of walking human model using agent-based modelling. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 103, p. 352-367, 2018.
- SOUZA, J.M.S. Análise da resposta dinâmica de passarelas de pedestres considerando-se uma modelagem probabilística do caminhar humano. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil (PGECIV). Universidade do estado do Rio de Janeiro (UERJ), p. 1-177, Rio de Janeiro/RJ, Brasil, 2012.
- ŽIVANOVIĆ, S. Benchmark footbridge for vibration serviceability assessment under the vertical component of pedestrian load. *Journal of Structural Engineering*, Vol. 138, N^o 10, p. 1193-1202, 2012.
- ŽIVANOVIĆ, S. Probability-based estimation of vibration for pedestrian structures due to walking, PhD Thesis, Department of Civil and Structural Engineering, University of Sheffield, England, UK, 2006.