

Estudo do comportamento dinâmico de uma passarela de pedestres da cidade de Brasília

Daniel Henrique Moreira Gomes¹, Suzana Moreira Avila², Graciela Nora Doz³

Resumo

O avanço das tecnologias construtivas e o uso de materiais de alta resistência têm possibilitado o projeto de estruturas cada vez mais leves e flexíveis. Dessa forma, essas estruturas são mais sensíveis a vibrações em baixas frequências. Essa tendência tem se apresentado também nos projetos de passarelas de pedestres nos últimos anos. Os carregamentos produzidos por movimentos humanos caracterizam-se por funções periódicas de baixas frequências que podem provocar desconforto e até problemas de segurança, uma vez que essas baixas frequências podem resultar próximas das frequências naturais dessas estruturas. No presente trabalho estuda-se o comportamento dinâmico de uma passarela de pedestres localizada na cidade de Brasília quando submetida às ações humanas de caminhar e correr. Para isso, foi realizada uma avaliação numérica de seu desempenho, utilizando os limites de serviço referentes a vibrações, aplicáveis a passarelas de pedestres, encontrados na literatura.

Palavras-chave: Dinâmica estrutural. Vibrações. Passarelas.

¹ Mestre, Universidade de Brasília (2007). Quadra 56, lote 06, bloco B, apto. 201, Setor Central, Gama - DF, Brasil, CEP 72405-928. E-mail: danielcorreio2005@yahoo.com.br (enviar correspondência a este autor)

² Professora Doutora, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília (UnB). Campus Darcy Ribeiro, Brasília - DF, Brasil, CEP 70910-900. E-mail: suzanavila@uol.com.br

³ Professora Doutora, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília (UnB). Campus Darcy Ribeiro, Brasília - DF, Brasil, CEP 70910-900. E-mail: graciela@unb.br

1 Introdução

Os carregamentos produzidos por movimentos humanos ocorrem essencialmente em baixas frequências, que podem facilmente se aproximar, ou até mesmo coincidir, das frequências naturais das estruturas sobre as quais estejam incidindo, especialmente se forem estruturas leves e flexíveis, com baixo amortecimento, como, por exemplo, passarelas de pedestres. Nesses casos, podem ocorrer problemas de vibrações excessivas.

A proposta do presente trabalho é estudar, através de um modelo computacional no programa Ansys (1995), o comportamento dinâmico de uma passarela de pedestres localizada na cidade de Brasília, quando submetida às ações humanas de caminhar e correr. A passarela em questão apresenta vibrações no sentido vertical que podem ser facilmente sentidas pelos pedestres, de tal forma que adolescentes costumam atravessá-la correndo e em grupo para sentir as vibrações da estrutura.

Histórico de problemas em passarelas

Há milhares de anos as passarelas de pedestres vêm sendo construídas e utilizadas pelo homem para transpor obstáculos da natureza. Hoje em dia, podem-se facilmente encontrar passarelas sobre rios, lagos, vales, estradas, linhas férreas, avenidas, como ligação entre edifícios, dentre outras aplicações.

Nas últimas décadas, vários autores têm se dedicado ao estudo do comportamento de passarelas de pedestres submetidas a vibrações causadas por atividades humanas.

Pimentel (1997) investigou vibrações em passarelas devido a carregamentos induzidos pelo homem. Foram realizados testes experimentais em três passarelas de pedestres para levantar suas propriedades dinâmicas e seus comportamentos em serviço.

Baltar (2000) realizou um estudo com o objetivo de avaliar os níveis de segurança e conforto das principais passarelas de pedestres existentes na cidade de Brasília.

Nakamura (2003) conduziu um estudo experimental em uma passarela de pedestres localizada na cidade de Nasu Shiobara, no Japão. A passarela em questão, denominada Maple Valley Great Suspension Bridge (ou M-bridge), possui um vão central com 320 m e em cada extremidade deste, um vão de 60 m. As vibrações laterais da passarela foram investigadas, verificando-se que a passarela vibrava na frequência do terceiro modo de flexão lateral (assimétrico) de 0,88 Hz e do quarto modo de flexão lateral (simétrico) de 1,02 Hz.

Seiler et al. (2003) realizaram um estudo experimental e numérico sobre uma passarela de pedestres construída há poucos anos na cidade de Forchheim, na Alemanha. O comprimento total da estrutura é de 117,5 m. Foi demonstrado que a estrutura era muito sensível à excitação vertical de pessoas correndo na frequência característica do segundo modo de vibração na direção vertical, de 2,76 Hz.

Zivanovic et al. (2005a) realizaram um estudo sobre uma passarela na cidade de Podgorica, capital de Montenegro. A estrutura possui um vão principal de 78 m de comprimento. A frequência do primeiro modo de flexão vertical da passarela foi determi-

nada experimentalmente como 2,05 Hz. Este fato e a baixa taxa de amortecimento, de apenas 0,28%, encontrada através da análise experimental, foram considerados fatores determinantes para a perceptível vibração da passarela na direção vertical.

2 Modelo matemático das cargas devidas ao caminhar e correr de 1 pessoa

Ao caminhar ou correr, o pedestre produz forças que variam no tempo e no espaço, com componentes nas direções vertical e horizontal (lateral e longitudinal). A mais importante componente é a vertical. Wheeler (1982) apresentou valores médios para a correlação entre os parâmetros que definem os movimentos de caminhar e correr: razão de passo (f), comprimento de passo (sl), velocidade de avanço (fs), coeficiente de impacto (ci) e tempo de contato (ct). Os resultados foram obtidos em testes experimentais. Na Figura 1 são mostrados os gráficos da correlação de Wheeler (1982).

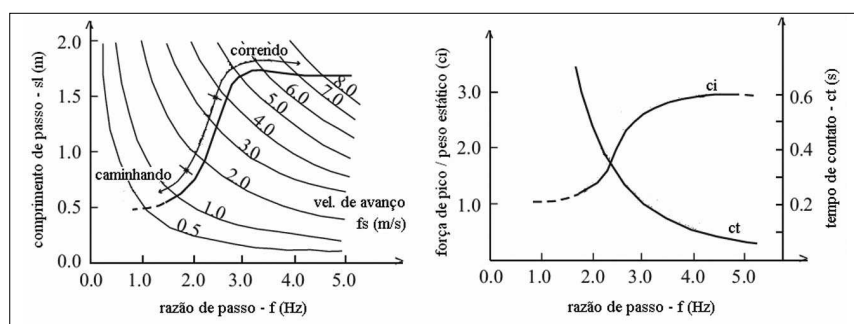


Figura 1: Correlação de parâmetros de Wheeler (1982) para movimentos de caminhar e correr (Zivanovic et al, 2005b)

No CEB (1991) são encontrados valores de referência para as frequências associadas aos principais movimentos humanos, conforme apresenta a Tabela 1.

Tabela 1: Trecho da tabela “Tipos representativos de atividades humanas e suas aplicações para diferentes atividades e tipos de estrutura”, CEB (1991)

Designação	Definição	Frequência fundamental da atividade (Hz)	Atividade real	Taxa da atividade (Hz)
Caminhar	Caminhar, contato contínuo com o	1,6 - 2,4	Caminhar devagar Caminhar normal	$\approx 1,7$ $\approx 2,0$
Correr	Correr, contato descontínuo com o piso.	2,0 - 3,5	Correr lento Correr normal Correr rápido	$\approx 2,1$ $\approx 2,5$ $\approx 3,0$

No presente trabalho foi utilizado o programa PSM (Simulador de Pessoas em Movimento), desenvolvido na Universidade de Brasília para a simulação de cargas verticais produzidas por movimentos de pedestres de caminhar e correr (Estefani, 2000). Este programa utiliza o modelo de carregamento proposto por Wheeler (1982), conforme a Eq. (1).

$$F(t) = F \sin \left(\frac{\pi \times t}{ct} \right) \quad (1)$$

onde $F(t)$ é a função de carregamento variando com o tempo, F representa P_0 (peso da pessoa) $\times ci$ (coeficiente de impacto) e ct é o tempo de contato entre o pé e o piso. A forma da função de carregamento de Wheeler (1982) é mostrada na Figura 2.

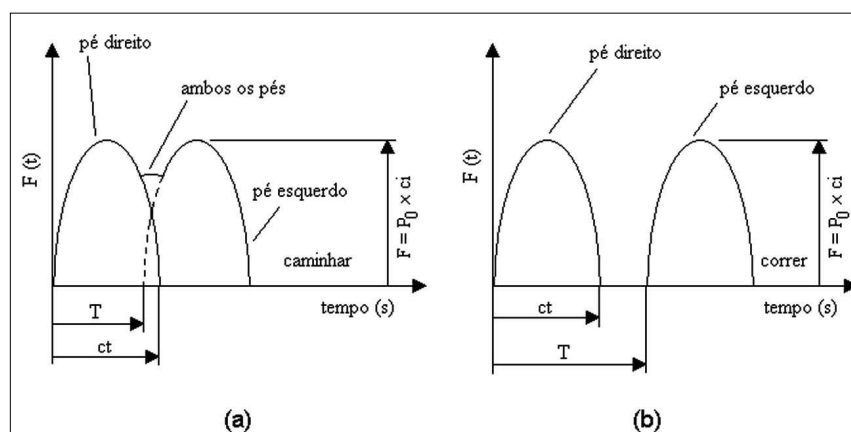


Figura 2: Forma da função de carregamento de Wheeler (1982) para movimentos de (a) caminhar e (b) correr

A função mais difundida para modelagem de cargas humanas pode ser encontrada no CEB (1991). Neste modelo, a função de carregamento vertical do movimento de

caminhar (Fig. 3) é uma função periódica; assim, pode ser expressa por meio de séries de Fourier:

$$F(t) = P_0 + \sum_{i=1}^j \Delta_i P_0 \sin(2i\pi f t - \phi_i) = P_0 + \Delta_1 P_0 \sin(2\pi f t) + \Delta_2 P_0 \sin(4\pi f t - \phi_2) + \dots \quad (2)$$

onde $F(t)$ é a função de carregamento variando com o tempo; P_0 é o peso da pessoa; Δ_i é o coeficiente de Fourier para o harmônico i ; $\Delta_i P_0$ é a amplitude da força do harmônico i ; f é a razão de passo (Hz); ϕ_i é o ângulo de fase do harmônico i com relação ao primeiro harmônico; i é o índice que representa o número do harmônico e j é o número total de harmônicos contribuintes.

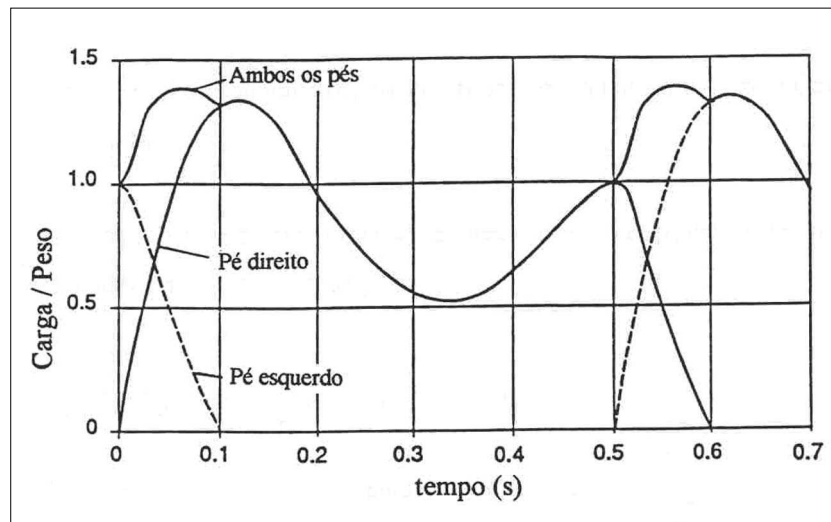


Figura 3: Função de carregamento para uma pessoa caminhando (CEB, 1991)

A função de Wheeler (1982) é uma forma mais simplificada de representar os movimentos humanos e atende aos objetivos deste trabalho. O programa PSM (Estefani, 2000) calcula as forças verticais produzidas pelo movimento de uma ou mais pessoas caminhando ou correndo no mesmo sentido ou em sentido contrário sobre a passarela. Assim, as forças são calculadas conforme sua variação no tempo e no espaço (Fig. 4), e são transmitidas para os nós da estrutura de acordo com as Eqs. (3) e (4) abaixo.

$$F_i(t) = \frac{F(t) \times \delta_j}{L_{i,j}} \quad (3)$$

$$F_j(t) = \frac{F(t) \times \delta_i}{L_{i,j}} \quad (4)$$

onde $F(t)$ é a carga gerada por pedestres num ponto da estrutura num dado instante de tempo; $F_i(t)$ é a parcela da carga $F(t)$ distribuída para o nó i ; $F_j(t)$ é a parcela da carga $F(t)$ distribuída para o nó j ; δ_i é a distância da carga $F(t)$ ao nó i ; δ_j é a distância da carga $F(t)$ ao nó j e $L_{i,j}$ é a distância entre os nós i e j .

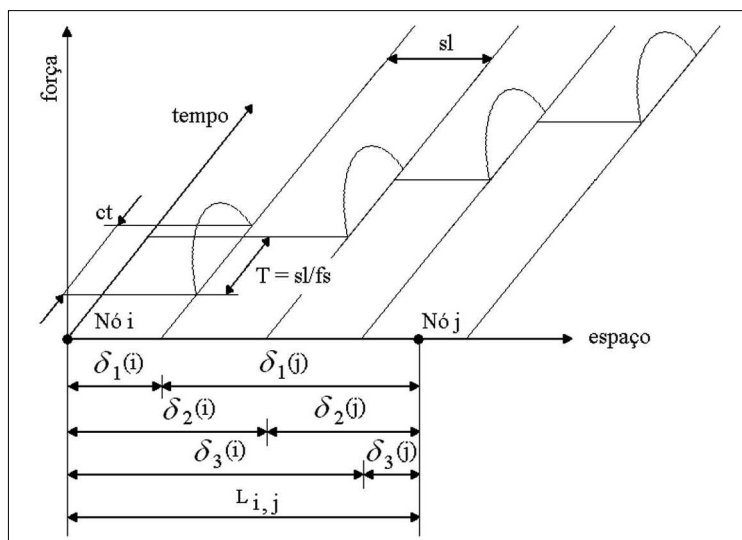


Figura 4: Cálculo dos carregamentos dinâmicos pelo programa PSM (Estefani, 2000)

As cargas geradas, conforme descrito acima, são distribuídas para os nós do banzo inferior de uma das treliças planas da estrutura. Assim, o movimento é realizado com uma excentricidade, com relação ao centro da passarela.

3 Limites de serviço para passarelas

As recomendações existentes atualmente em algumas normas e em trabalhos de alguns autores que pesquisaram intensamente o assunto procuram estabelecer limites máximos para as acelerações e deslocamentos das estruturas.

O CEB (1991) adota o valor limite para a aceleração vertical dado pela Eq. (5).

$$a_{vert,lim} = 0,5 \text{ m/s}^2 (5\%g) \quad (5)$$

O EUROCODE 5 (1997) também traz recomendações a respeito do desempenho de passarelas de pedestres em serviço. As acelerações limites na direção vertical, $a_{vert,lim}$ e horizontal, $a_{hor,lim}$, deverão satisfazer aos seguintes critérios, dados pelas Eqs. (6) e (7):

$$a_{vert,lim} = 0,7 \text{ m/s}^2 \text{ para } f_{l,vert} < 5 \text{ Hz} \quad (6)$$

$$a_{hor,lim} = 0,2 \text{ m/s}^2 \text{ para } f_{l,hor} < 2,5 \text{ Hz} \quad (7)$$

onde $f_{l,vert}$ e $f_{l,hor}$ são as primeiras frequências de vibração nas direções vertical e horizontal.

Segundo Aashto (1997), passarelas com frequências fundamentais inferiores a 3 Hz devem ser evitadas.

Pimentel (1997) comparou os limites de aceleração dados pelas normas BS 5400 (1978), Ontario Bridge Code (1991), ISO 10137 (1992) e o trabalho de Kobori e Kajikawa (1974), conforme mostra a Figura 5.

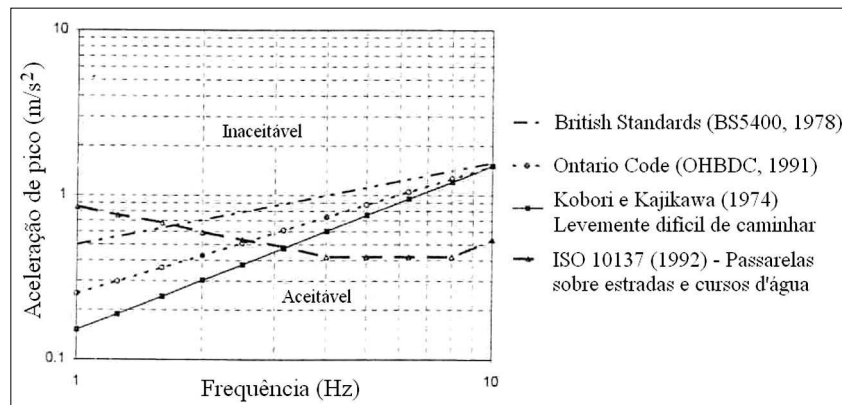


Figura 5: Comparação entre limites de valores de aceleração (Pimentel, 1997)

Zivanovic et al. (2005b) citam alguns critérios de serviço propostos por pesquisadores ou normas (Tab. 2).

Tabela 2: Critérios citados por Zivanovic et al. (2005b)

Autor/Norma	Limite
Mason e Duncan – Pedestres sobre pontes rodoviárias (1962)	$f_{l,vert} \geq 4 \text{ Hz}$ $a_{vert,lim} = 0,15 \text{ m/s}^2 (1,5\%g)$
Hong Kong Structures Design Manual for Highways and Railways (2002)	$a_{hor,lim} = 0,15 \text{ m/s}^2 (1,5\%g)$
Japanese Design Code for Footbridges	$f_{l,vert} \neq 1,5 - 2,3 \text{ Hz}$

Blanco et al. (2005) também citam alguns critérios de serviço para passarelas de pedestres, mostrados na Tabela 3.

Tabela 3: Critérios citados por Blanco et al (2005)

Autor/Norma	Limite
ISO 2631 – Vibração em pisos	$a_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a^2(t) dt} = 0,707 a_{max} (m/s^2)$ Para $f_{l,vert} = 1 - 5 \text{ Hz}$: $a_{RMS,vert,lim} = 0,43 m/s^2 (4,3\%g)$ $a_{vert,lim} = 0,61 m/s^2 (6,1\%g)$ Para $f_{l,hor} = 1 - 2 \text{ Hz}$: $a_{RMS,hor,lim} = 0,17 m/s^2 (1,7\%g)$ $a_{hor,lim} = 0,24 m/s^2 (2,4\%g)$
Ontario Bridge Code (1983)	$a_{vert,lim} \leq 0,25 f_0^{0,18} (m/s^2)$
Hugo Bachmann (2002)	$a_{vert,lim} \leq 0,5 m/s^2 (5\%g) \text{ a } 1 m/s^2 (10\%g)$ $a_{hor,lim} \leq 0,1 m/s^2 (1\%g) \text{ a } 0,2 m/s^2 (2\%g)$
Michael Wilford (2002)	$a_{vert,lim} = 0,7 m/s^2 (7\%g)$ $a_{hor,lim} = 0,02 m/s^2 (0,2\%g)$
Stoyan Stoyanoff (2002)	$a_{vert,lim} = 0,7 m/s^2 (7\%g)$ $a_{hor,lim} = 0,2 m/s^2 (2\%g)$

4 Análise de modelo numérico

4.1 Descrição da estrutura

A passarela de pedestres analisada neste trabalho está situada sobre a Estrada Parque de Indústria e Abastecimento (EPIA), trecho Cruzeiro Novo/Ceasa, na cidade de Brasília.

A passarela (Fig. 6 e 7) possui quatro vãos inclinados de 51,2 m de comprimento e quatro vãos horizontais, dos quais dois têm 31,3 m e dois, 34,1 m de comprimento. Os vãos são ligados por estruturas circulares, denominadas “cogumelos”, constituídas de uma laje circular apoiada sobre um pilar de concreto armado. A estrutura dos vãos da

passarela é formada por duas treliças planas em aço ligadas uma à outra por travessas em aço. A largura da passarela é de 2,4 m e sua cobertura é confeccionada em placas arqueadas de argamassa armada; o piso é composto por placas de concreto armado pré-fabricadas e apoiadas sobre as travessas que ligam as treliças planas; o corrimão e o guarda-corpo são formados por barras de seções tubulares em aço.

A ligação dos vãos inclinados e horizontais nos cogumelos é realizada por meio de solda em chapas chumbadas sobre os cogumelos. Cada vão inclinado possui, à distância de 8,5 m da extremidade no nível da rua, dois pilares de concreto que apóiam cada um dos banzos inferiores das treliças. A ligação entre banzo e pilar ocorre por meio de uma chapa metálica com ganchos metálicos chumbados no pilar e soldados no banzo.



Figura 6: Fotos da passarela sobre a Epia: (a) vão inclinado, (b) vão horizontal

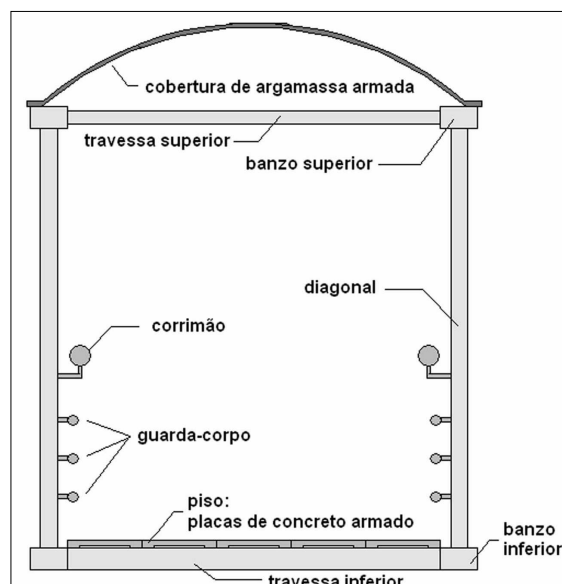


Figura 7: Seção Transversal da Passarela sobre a Epia

4.2 Modelo em elementos finitos

Um vão inclinado típico da passarela foi modelado em elementos finitos no programa Ansys (1995), conforme mostra a Figura 8.

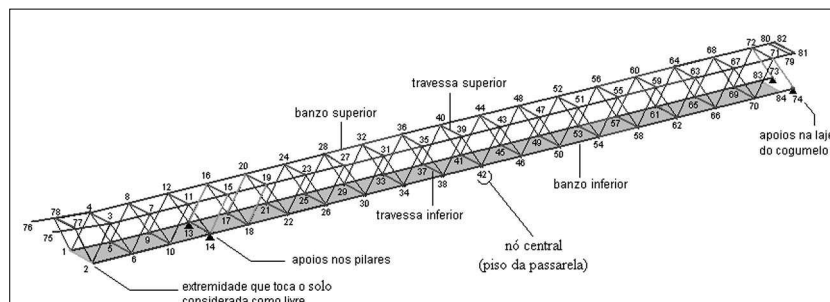


Figura 8: Discretização de um vão inclinado da passarela

Todas as peças estruturais metálicas foram modeladas como elementos de pórtico espacial do tipo BEAM4. O piso foi discretizado utilizando-se elementos de casca do tipo SHELL63 e a cobertura foi considerada como massa distribuída sobre os banzos superiores. O corrimão e o guarda-corpo foram modelados como massas concentradas nos nós inferiores das treliças planas, com elementos do tipo MASS21. A taxa de amortecimento foi estimada em 0,4%. Este valor foi estimado com base em valores médios da literatura (CEB, 1991), levando-se também em conta que as placas de concreto não estão ligadas às treliças da passarela, mas apenas encaixadas nas travessas inferiores. Portanto, acredita-se que o valor escolhido, que se encontra um pouco abaixo do recomendado, foi adotado a favor da segurança. O vão inclinado foi considerado como simplesmente apoiado em dois pilares intermediários e em um cogumelo. A extremidade da passarela que toca o solo foi considerada livre, pois não existe um apoio efetivo para a estrutura neste ponto.

4.3 Análise modal da passarela – vibrações livres

Após a modelagem de um vão inclinado da passarela no programa Ansys (1995), foi realizada uma análise de vibrações livres, com a qual foram determinados as frequências naturais e os modos de vibração. Os três primeiros modos de vibração estão apresentados na Tabela 4. Observa-se que as primeiras frequências naturais nas direções vertical e horizontal lateral encontram-se no intervalo crítico, menor do que 5 Hz.

Tabela 4: Análise de vibrações livres de um vão inclinado da passarela sobre a EPIA

Modo de Vibração	Frequência (Hz)	Descrição do Modo de Vibração	Vista do Modo de Vibração
1	2,00	1º modo de flexão lateral (c/ torção)	
2	2,89	2º modo de flexão lateral	
3	2,99	1º modo de flexão vertical	

4.4 Análise em vibrações forçadas

A passarela em estudo apresenta vibrações perceptíveis na direção vertical, como no caso estudado por Seiler et al. (2003). Este fato é conhecido pelas pessoas que frequentam a área e utilizam a passarela. Durante as visitas realizadas pelos autores ao local foram observados grupos de aproximadamente dez estudantes correndo sobre a estrutura com a intenção de fazê-la vibrar. Nesses casos a passarela vibrava perceptivelmente.

Por esse motivo, foram considerados nesta análise grupos de até vinte pedestres se movendo sobre a passarela. Este é um número incomum, mas foi considerado com o intuito de observar-se o comportamento da passarela num caso extremo, mesmo que a probabilidade de ocorrência seja pequena. A sincronia entre a frequência de passo dos pedestres justifica-se pela observação de que em alguns casos existe neles o intuito de provocar, propositalmente, oscilações elevadas.

Considerou-se no primeiro grupo de simulações o movimento de pedestres caminhando num mesmo sentido sobre a passarela com uma frequência de 1,8 Hz, valor escolhido por se encontrar dentro do intervalo médio de frequências para o movimento humano de caminhar, segundo o CEB (1991). A velocidade dos pedestres foi 1,2 m/s e o peso de cada um foi considerado como 800 N.

Nas simulações realizadas com 1, 5, 10 e 20 pedestres caminhando no mesmo sentido sobre a passarela adotou-se o tempo de separação entre um pedestre e outro como 0,556 s. Apresentam-se na Figura 9(a) as acelerações máximas na direção vertical no nó 42 (nó central), que pode ser visto na discretização da Figura 8. A Figura 9(b) mostra alguns dos principais critérios de serviço encontrados na literatura pesquisada.

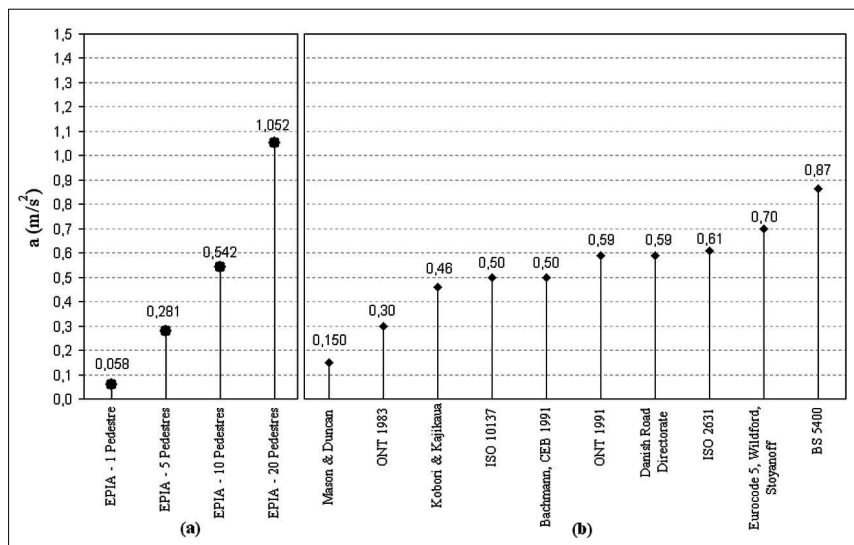


Figura 9: (a) Acelerações máximas na excitação vertical à frequência de 1,8 Hz; (b) limites de serviço.

O movimento de um pedestre sobre a passarela provoca uma aceleração vertical máxima de $0,058 \text{ m/s}^2$, atendendo a todos os principais limites de serviço encontrados na literatura, como mostra a Figura 9. Um grupo de cinco pedestres provoca a aceleração vertical máxima de $0,281 \text{ m/s}^2$ e, neste caso, um limite de serviço é superado. Dez pedestres em movimento causam uma aceleração vertical máxima de $0,542 \text{ m/s}^2$ e cinco limites de serviço são ultrapassados. Considerando-se vinte pedestres, a aceleração vertical máxima registrada é de $1,052 \text{ m/s}^2$ e, neste caso, todos os limites de serviço são alcançados e superados.

Considerou-se, no segundo grupo de simulações, pedestres correndo num mesmo sentido sobre a passarela com uma frequência de 2,99 Hz (valor da primeira frequência de vibração vertical da passarela), com velocidade de 5,1 m/s. O peso de cada pedestre foi considerado como 800 N. Realizaram-se simulações com 1, 5, 10 e 20 pedestres e adotou-se como tempo de separação entre pedestres o valor de 0,334 s. As acelerações verticais máximas da estrutura são apresentadas na Figura 10(a). A Figura 10(b) mostra alguns dos principais critérios de serviço sugeridos na literatura.

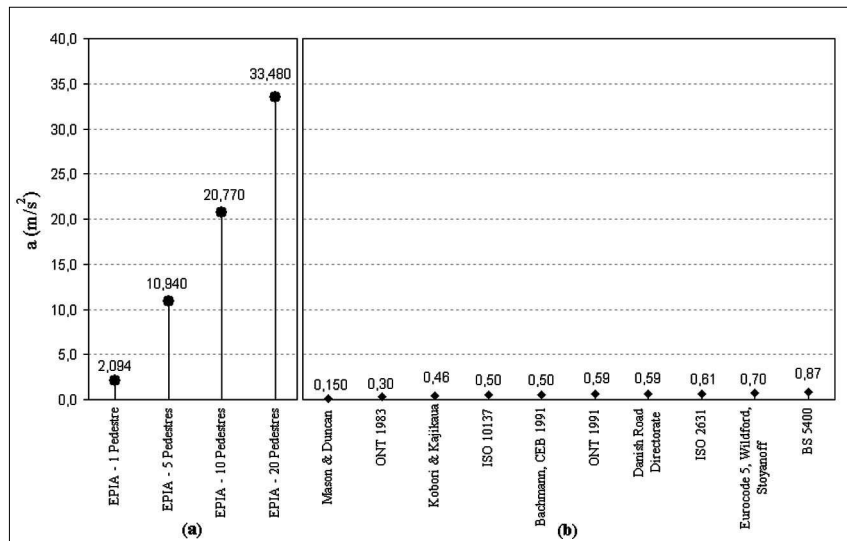


Figura 10: (a) Acelerações máximas na excitação vertical à frequência de 2,99 Hz; (b) limites de serviço

Observa-se na Figura 10(a) que para o caso de um pedestre atravessando a passarela, a aceleração vertical máxima registrada é de 2,094 m/s^2 e, neste caso, todos os limites de serviço são superados. O mesmo acontece nas demais simulações, sendo que com vinte pedestres a aceleração vertical máxima é de 33,480 m/s^2 .

A máxima amplitude de deslocamento vertical observada nessa simulação foi de 95,9 mm, como mostra a Figura 11.

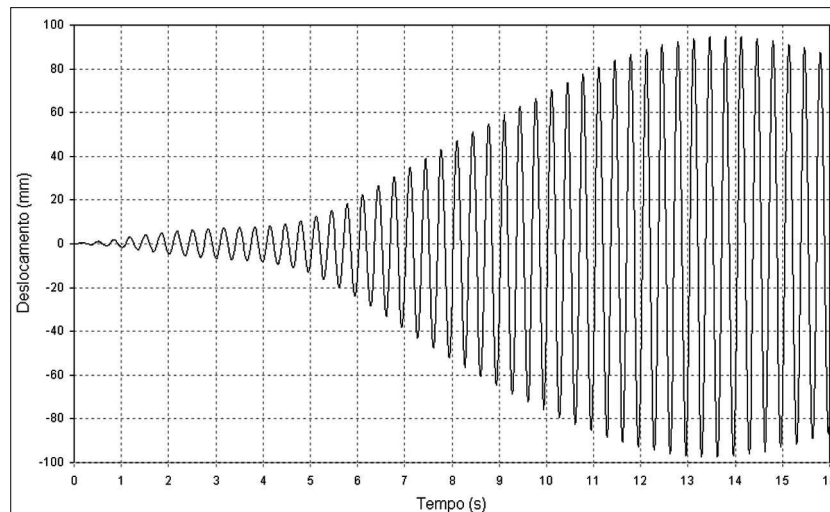


Figura 11: Deslocamento vertical - 20 pedestres - frequência de 2,99 Hz.

Observa-se, pois, que pedestres correndo com uma frequência igual à do primeiro modo de flexão vertical podem induzir a aumentos significativos na resposta da passarela, ocasionando o fenômeno da ressonância.

5 Conclusões

No presente trabalho, realizou-se a análise dinâmica de uma passarela de pedestres localizada na cidade de Brasília, utilizando-se o programa Ansys (1995). Os resultados obtidos na análise de vibrações livres indicaram que as primeiras frequências naturais da passarela nas direções vertical e horizontal lateral encontram-se no intervalo crítico, abaixo de 5 Hz, sugerido pela literatura. A análise de vibrações forçadas para carregamentos provocados pelos movimentos humanos de andar e correr, típicos de uma estrutura como esta, mostrou que os limites de serviço indicados na literatura não são verificados em várias situações analisadas.

As simulações extremas, realizadas com vinte pedestres se movendo sobre a passarela constituem casos pouco prováveis. Porém, pelo fato de terem sido observados grupos provocando vibrações propositas, essas simulações foram incluídas para que fosse observado o comportamento da estrutura.

Conclui-se, portanto, que a estrutura analisada pode apresentar vibrações excessivas em algumas situações. Dessa forma, é interessante a realização de um estudo com a finalidade de contornar este problema, seja pelo enrijecimento da passarela, ou seja, pela instalação de um sistema de controle estrutural.

Referências

- American Association of State, Highway and Transportation Officials. (1997). *Guide Specifications for Design of Pedestrian Bridges*. AASHTO.
- ANSYS. Revision 5.4 (1995). *ANSYS User's Manual*, EUA.
- Baltar, A. C. U. C. V. (2000). *Vibrações Induzidas por Atividades Humanas em Passarelas*. Dissertação de Mestrado, Publicação DM 007A/00, Universidade de Brasília. Brasília.
- Blanco, C. M.; Bouillard, P.; Bodarwé, E.; Ney, L. (2005). Structural Dynamic Design of a Footbridge Under Pedestrian Loading. 9th *SAMTECH Users Conference*.
- British Standards Institution (1978). *Steel, Concrete and Composite Bridges, Part 2: Specification for Loads: Appendix C: Vibration Serviceability Requirements for Foot and Cycle Track Bridges. BS5400*. London.
- Comité Euro-International du Béton (1991). *Bulletin D'Information n° 209. Vibration Problems in Structures. Practical Guidelines.*, CEB 1991.
- Estefani, C.; Brito, J. L.; Doz, G. N. (2000). Passarela de pedestres: análise das vibrações induzidas. *Segundo Congresso Internacional sobre o Comportamento de Estruturas Danificadas (DAMSTRUC 2000)*, Rio de Janeiro, Brasil.

European Committee for Standardization (1997). *Design of Timber Structures – Part 2: Bridges*, EUROCODE 5, Brussels.

Nakamura, S. Field Measurements of Lateral Vibration on a Pedestrian Suspension Bridge (2003). *The Structural Engineer*, 81 (22), p. 22-26.

Ontario Ministry of Transportation (1991). *Ontario Highway Bridge Design Code*. ONT. Toronto.

Pimentel, R. L. (1997). *Vibrational Performance of Pedestrian Bridges Due to Human-Induced Loads*. PhD Thesis, University of Sheffield, UK.

Seiler, C.; Occhiuzzi, A.; Spizzuoco, M.; Serino, G. (2003). Dynamical Stress Analysis Due to Moving Loads on Footbridges. *XXXII Convegno Nazionale dell'Associazione IIS Sollecitazioni*, Salerno, Set.

Wheeler, J. E. (1982). Prediction and Control of Pedestrian Induced Vibration in Footbridges. *ASCE, Journal of the Structural Division*, v. 108, n. ST9, p. 2045-2065.

Zivanovic, S.; Pavic, A.; Reynolds, P. (2005a). Dynamic Analysis of Lively Footbridge under Everyday Pedestrian Traffic. *EURODYN 2005: The Sixth European Conference on Structural Dynamics*, Paris. Sep.

Zivanovic, S.; Pavic, A.; Reynolds, P. (2005b). Vibration Serviceability of Footbridges Under Human-Induced Excitation: A Literature Review. *Journal of Sound and Vibration*, 279, p. 1-74.

Dynamic behaviour study of a footbridge in the city of Brasília

Abstract

The advance of constructive technologies and use of high resistance materials have made possible the design of lighter and flexible structures. These structures are more sensible to low frequency vibrations, characteristic of footbridges. Loads produced by human movements are characterized by periodic functions of low frequencies that can cause discomfort and security problems, if these low frequencies occur next to the natural frequencies of these structures. In the present work the dynamic behaviour of one footbridge located in the city of Brasília is studied, when submitted to the human loads caused by walking and running movements. For this purpose, a numerical evaluation of its behaviour was carried out using the serviceability limits of vibration in footbridges, found in the literature.

Key words: Structural dynamics. Vibrations. Footbridges.

1 Introduction

Loads produced by human movements occur essentially in low frequencies, that can easily become close, or even coincide with the natural frequencies of the structures on which they are happening, especially in the case of light and flexible structures, with low damping, as, for example, footbridges. In these cases extreme vibrations can occur. The present work's proposal is to study, through a computational model in Ansys (1995), the dynamic behaviour of one footbridge located in the city of Brasília, when submitted to the human actions of walking and running.

2 History of footbridge problems

Footbridges have been constructed for thousands of years to pass over nature's obstacles. Nowadays, footbridges can easily be found on rivers, lakes, valleys, roads, railways, avenues, as link between buildings, among other applications.

In the last decades, some authors have studied the behaviour of footbridges submitted to vibrations caused by induced loads of human motion.

Pimentel (1997) investigated vibrations in footbridges due to induced loads from human movements. Experimental tests in three footbridges were carried out in order to raise its dynamic properties and to verify its behaviour in service.

Baltar (2000) lead a study to evaluate the main security and comfort levels of footbridges in the city of Brasília.

Other experimental and numerical studies of vibrations in footbridges are found in Nakamura (2003), Seiler et al. (2003) and Zivanovic et al. (2005a).

3 Mathematic model for loads due to walking and running of 1 person

When walking or running, pedestrians produce forces that vary in time and space, with components in the vertical and horizontal (lateral and longitudinal) directions. The most important component is the vertical. Wheeler (1982) presented average values for the correlation between the parameters that define the movements of walk and run (Fig. 1). In the CEB (1991), values of reference for the frequencies associated to the main human movements are found, as presented in Table 1. In the present work, a program developed in the University of Brasilia was used for the simulation of pedestrian's movements of walking and running (Estefani, 2000). This program uses the model of Wheeler (1982), as shown in Figure 2.

4 Serviceability limits for footbridges

The design guidelines and design recommendations of some authors, seek to establish maximum acceleration and displacement limits for these structures. The CEB (1991), EUROCODE 5 (1997) and AASHTO (1997) bring recommendations regarding the performance of footbridges. Pimentel (1997) compared the acceleration limits given by the codes BS 5400 (1978), Ontario Bridge Code (1991), ISO 10137 (1992) and the work of Kobori and Kajikawa (1974), as shown in Figure 5. Zivanovic et al. (2005b) and Blanco et al. (2005) show some serviceability limits, as presented in Tables 2 and 3.

5 Numerical model analysis

5.1 Structural description

The footbridge shown in Figures 6 and 7 is formed by four inclined metallic spans of 51,2 m and four horizontal spans, being two of these of 31,3 m and the other two of 34.1 m. The spans are connected by circular structures, called mushrooms, consisting of a reinforced concrete plate supported on a reinforced concrete pile. The width of the footbridge deck is 2,4 m. Footbridge covering is built up of reinforced mortar shells. The deck is built up of reinforced concrete plates and handrails are of steel tubular bars.

5.2 Finite element model

A typical inclined span of the footbridge was modelled in Ansys (1995), as shown in Figure 8. All metallic structural parts had been modelled with BEAM4 elements. The deck was modeled using SHELL63 elements and covering was considered as mass distributed over metallic plain trusses. Handrails had been modelled as concentrated

masses on the inferior nodes of the plain trusses, with MASS21 elements. The damping rate was estimated in 0,4%. The inclined span was considered as simply supported on two intermediate piles and a mushroom.

5.3 Modal analysis – free vibrations

The first three modes of the footbridge are presented in Table 4. It is observed that the first natural frequencies in vertical and horizontal lateral directions meet in the critical interval, lesser than 5 Hz.

5.4 Forced vibration analysis

Simulations were carried through on the footbridge model with pedestrians crossing it with frequencies of 1,8 Hz and 2,99 Hz (this last one related to the first vertical mode), with synchronous movements (less favorable situation).

In the first simulation group were considered pedestrians walking on the footbridge with a frequency of 1,8 Hz, value that is within the average frequency interval for human movement of walk, according to CEB (1991). In the twenty pedestrians' case, the maximum vertical acceleration registered is $1,052 \text{ m/s}^2$ and all the serviceability limits are surpassed (Fig. 9). It is considered, in the second simulation group, pedestrians running with frequency of 2,99 Hz (value of the first vertical mode frequency). In the simulation with twenty pedestrians, the maximum vertical acceleration registered is $33,480 \text{ m/s}^2$ (Fig. 10). The maximum displacement amplitude observed is 95,9 mm, as presented in Figure 11. It is observed that pedestrians running with the frequency of the first vertical mode can induce significant increase in the footbridge vibration, causing resonance phenomenon.

6 Conclusions

In this paper, a dynamic analysis was led one a footbridge located in the city of Brasilia, using Ansys (1995). The results obtained in the free vibration analysis indicated that first natural frequencies in vertical and horizontal lateral directions meet in the critical interval, below 5 Hz, suggested in literature. Forced vibration analysis for human loads caused by walking and running movements, typical of a structure as this one, showed that literature serviceability limits are not verified in some situations.