



ANÁLISE ESTRUTURAL DINÂMICA EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DE PASSARELAS DEVIDO AO CAMINHAR DE PEDESTRES

Experimental and numerical dynamics structural analysis of footbridges due to pedestrians walking

Irwing Aguiar Ribeiro da Silva (1); José Guilherme Santos da Silva (2)

(1) Aluno de Doutorado, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - RJ, Brasil.

(2) Professor Doutor, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - RJ, Brasil.

E-mail para Correspondência: iwng@msn.com; jgss@uerj.br

Resumo: Este trabalho de pesquisa tem como objetivo investigar o comportamento estrutural dinâmico e avaliar o conforto humano de passarelas pedestres. Deste modo, a estrutura de teste corresponde a uma passarela de pedestres real, localizada na Rua Osvaldo Aranha, rota de grande importância e tráfego muito intenso de veículos ao longo do dia, ao lado do novo Estádio do Maracanã, na cidade do Rio de Janeiro/RJ, Brasil. A passarela investigada apresenta dois vãos contínuos com comprimento igual a 29,5m e 24m, respectivamente, e comprimento total de 53,5m. Inicialmente, para identificar e avaliar o comportamento dinâmico global do modelo foi realizada uma Análise Modal Operacional (OMA). Em seguida, testes de vibração forçada foram desenvolvidos, considerando-se os pedestres caminhando sobre a passarela com diferentes frequências de passos. Na sequência, um modelo de elementos finitos foi desenvolvido com base no uso do programa computacional ANSYS e calibrado a partir dos resultados dos testes experimentais. Finalmente, foi realizada uma avaliação do conforto humano da estrutura, tendo como base os valores das acelerações de pico experimentais e as recomendações de projeto HIVOSS e SÉTRA.

Palavras chaves: Passarelas de pedestres; Monitoração experimental; Conforto humano.

Abstract: This research work aims to investigate the dynamic structural behaviour and assess the human comfort of pedestrian footbridges. This way, the test structure is related to a real pedestrian footbridge, located at the Osvaldo Aranha Street, route of great importance and very heavy traffic of vehicles along the day, next to the new Maracanã Stadium, in the city of Rio de Janeiro/RJ, Brazil. The investigated footbridge presents two spans with length equal to 29.5m and 24m, respectively, and a total length of 53.5m. Initially, aiming to identify and assess the global dynamic structural behaviour of the structural model an Operational Modal Analysis (OMA) was performed. After that, several forced vibration tests were performed on the footbridge, considering the pedestrians walking with different step frequencies. In sequence, a finite element model was developed based on the ANSYS computational program and calibrated based on the results of the experimental tests. Finally, a human comfort assessment was performed, based on the experimental peak accelerations values and the recommendations provided by design guides HIVOSS and SÉTRA.

Keywords: Pedestrian footbridges; Experimental monitoring; Human comfort.

1 INTRODUÇÃO

As passarelas de pedestres estão se tornando estruturas cada vez mais modernas das áreas urbanas. Ao mesmo tempo, os engenheiros estruturais, com sua experiência e conhecimento, juntamente com o uso de materiais e tecnologias recém-desenvolvidos, projetaram passarelas para pedestres com estruturas ousadas. Esses fatos contribuíram para o projeto de passarelas muito esbeltas, sensíveis à excitação dinâmica e, conseqüentemente, mudaram os estados limites de serviço e últimos associados ao seu projeto. A consequência direta dessa tendência de projeto é um aumento considerável nos problemas de vibração excessiva, conforme os trabalhos de Silva (2018), Van Nimmen (2017), Silva et al. (2016), Santos da Silva (2016), Venuti (2016) e Jiménez-Alonso (2016).

Assim, as frequências das ações associadas aos pedestres (caminhada ou corrida) podem coincidir com a frequência fundamental da estrutura (ressonância), e os efeitos dinâmicos não podem ser negligenciados. Sabe-se também que a resposta dinâmica de passarelas de pedestres em ressonância com cargas dinâmicas induzidas pelo homem é consideravelmente amplificada quando comparada à resposta estática. Assim, essas estruturas podem vibrar excessivamente e causar desconforto humano, de acordo com Silva (2018), Silva et al. (2016) e Santos da Silva (2016).

No projeto de passarela, é extremamente importante realizar uma investigação que leve em consideração à interação dinâmica entre as pessoas e a estrutura (interação dinâmica pedestre-estrutura), tendo em conta que essa interação também depende da densidade de pedestres, de forma que resposta estrutural dinâmica possa ser obtida, quando sujeita a cargas de pedestres, segundo Silva (2018), Van Nimmen (2017), Silva et al. (2016), Santos da Silva (2016), Venuti (2016) e Jiménez-Alonso (2016).

Živanović, Pavic e Reynolds (2006) descreveram que a modelagem de elementos finitos (FE) de passarelas é um procedimento comum entre seus projetistas e, com o avanço tecnológico de softwares para esse fim, espera-se que esses modelos possam simular com maior precisão comportamento estático e dinâmico das estruturas. Mesmo assim, é necessário ter em mente que as incertezas de modelagem, como condições de contorno, elementos não estruturais e diferenças entre a estrutura projetada e a construída, sempre existirão. Além disso, o amortecimento modal, parâmetro dinâmico que rege a resposta dinâmica de qualquer estrutura próxima à ressonância, varia de estrutura para estrutura e só pode ser determinado experimentalmente após a construção de passarelas. Assim, é fundamental verificar os modelos de passarelas de pedestres FE após a conclusão de sua construção.

Vale ressaltar que qualquer estrutura é suscetível a efeitos de vibração, desde as usuais em engenharia civil e mecânica até as mais inesperadas. Recentemente, Pieraccini et al (2017) estudaram os efeitos da caminhada de pedestres nas vizinhanças de David de Michelangelo. O problema não é, em princípio, irrelevante, uma vez que se sabe que a estátua foi historicamente afetada por um sistema bem conhecido de rachaduras visíveis nas pernas. Eles concluíram que a presença do público afetou apenas a menor frequência de ressonância, aumentando assim a amplitude média de deslocamento de cerca de 60%.

Portanto, considerando o crescente número de problemas de vibração excessivos relatados em passarelas de pedestres, com base em uma estrutura real localizada na cidade do Rio de Janeiro / RJ (Silva, 2018), este estudo tem como objetivo subsidiar o desenvolvimento de uma metodologia de análise, ainda em andamento e que será baseada em representação humana por modelos biodinâmicos, para investigar o comportamento dinâmico desse tipo de estrutura quando submetido ao passeio pedestre.

Dessa forma, inicialmente, para identificar e avaliar o comportamento estrutural dinâmico global do modelo estrutural (frequências naturais, formas de modos de vibração e razões de amortecimento), foi realizada uma análise modal operacional (OMA: Operational Modal Analysis, em inglês) na passarela investigada. Em seguida, considerando cinco situações de excitação dinâmica correspondentes ao andar humano com diferentes frequências de passos, foram realizados vários testes experimentais de vibração na passarela investigada.

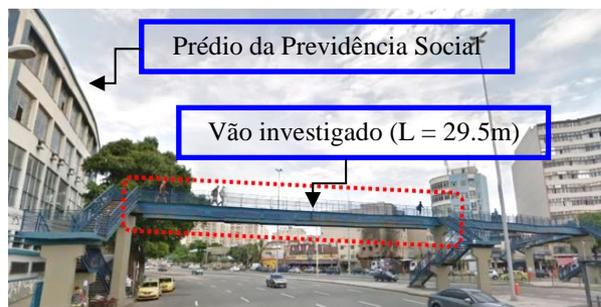
Na sequência, um modelo de elementos finitos foi desenvolvido com base no programa ANSYS (2007) Resultados experimentais, obtidos com base no monitoramento experimental dinâmico da passarela, foram utilizados para a calibração deste modelo. Finalmente, com base nas comparações entre os resultados do monitoramento experimental (acelerações de pico) e as orientações fornecidas pelos guias de projeto HIVOSS (2008) e SÉTRA (2006), foi realizada uma avaliação de conforto humano.

2 PASSARELA DE PEDESTRES INVESTIGADA

O modelo estrutural analisado está relacionado a uma passarela de pedestres, localizada na Rua Osvaldo Aranha, via de grande importância e também com tráfego intenso de veículos ao longo do dia, próximo ao novo Estádio do Maracanã, na cidade do Rio de Janeiro / RJ. Brasil (Silva, 2018). Composta por elementos de concreto armado e também de aço, a passarela apresenta dois vãos contínuos com comprimento igual a 29,5 m e 24 m, respectivamente, totalizando um comprimento de 53,5 m, ver Figura 1. O vão investigado está localizado ao lado do prédio da Previdência Social e apresenta um comprimento total igual a 29,5m. Essa extensão foi reforçada com perfis de aço soldados ao fundo das vigas de aço longitudinais originais da passarela de pedestres, ver Figuras 1 e 2.



a) Vista superior da passarela



b) Vista lateral do modelo estrutural

Figura 1. Passarela mista (aço-concreto) localizada próximo ao novo Estádio do Maracanã

O projeto da passarela foi fornecido pela Coordenação Geral de Projetos (CGP) da Prefeitura do Rio de Janeiro (Silva, 2018). Deve-se enfatizar que, originalmente, havia uma coluna de concreto que dividia o vão estudado ($L = 29,5\text{m}$), ver Figura 2. No entanto, o CGP não confirmou a real razão da não existência desta coluna de concreto após a conclusão do projeto. Dessa forma, na opinião do autor, o reforço estrutural seria uma consequência desse fato (Silva, 2018), veja as Figuras 2 e 3. Deve-se notar que o modelo estrutural apresenta infraestrutura e mesoestrutura com base em seções de concreto armado e a superestrutura é formada por seções de aço, veja as Figuras 1 a 3. Na sequência, os detalhes estruturais da seção transversal típica da passarela e também das vigas metálicas de reforço são apresentados na Figura 3.

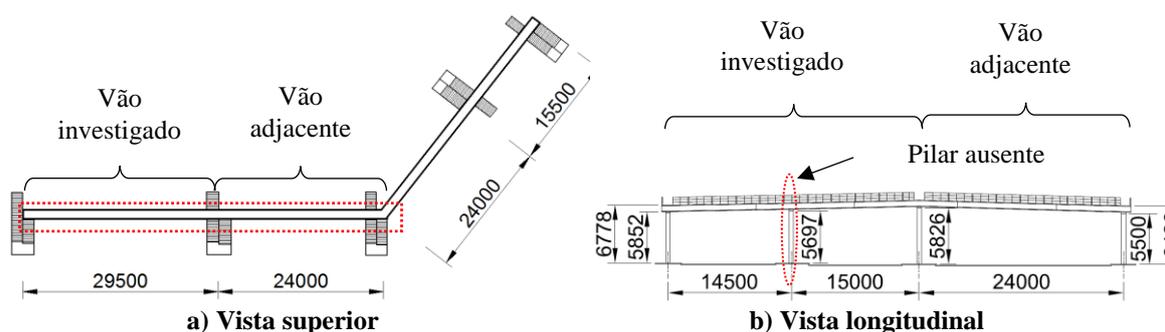


Figura 2. Projeto estrutural da passarela de pedestres (Dimensões em mm)

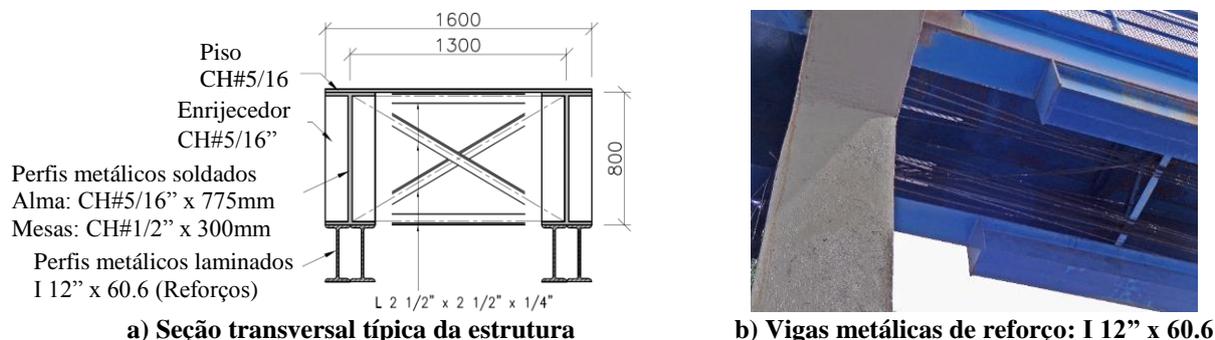


Figura 3. Seção transversal típica e vigas metálicas de reforço da passarela

3 MODELO EM ELEMENTOS FINITOS

Nesta pesquisa, um modelo numérico-computacional foi desenvolvido a fim de representar, de maneira mais realista, o comportamento estrutural da passarela de pedestres investigada. Tal modelo foi utilizado na análise modal e na vibração forçada de pedestres, onde foi avaliado o comportamento dinâmico da estrutura. Com o objetivo de calibrar o modelo numérico a partir de resultados experimentais (análise modal), o modelo de elementos finitos foi atualizado com tais resultados.

O modelo computacional tridimensional, desenvolvido para a análise dinâmica da passarela de pedestres, foi gerado utilizando as técnicas habituais de refinamento de malhas presentes nas simulações do método dos elementos finito (MEF) e implementadas pelo software de análise estrutural ANSYS (2007).

Em seguida, a Figura 4 mostra o modelo estrutural da passarela de pedestres sob análise, onde pode ser verificada a discretização da malha de elementos finitos e suas características. As vigas longitudinais de aço, vigas metálicas de reforço e o piso das estruturas foram modelados com base no uso de elementos finitos de casca SHELL63 (Ansys, 2007) que possuem capacidade de flexão e membrana, seis graus de liberdade em cada nó direções nodais x, y e z e rotações sobre os eixos x, y e z nodal). Por outro lado, o sistema de contraventamento foi representado por elementos finitos de viga BEAM44 (Ansys, 2007), elementos uniaxiais com capacidades de tensão, compressão, torção e flexão e seis graus de liberdade em cada nó.

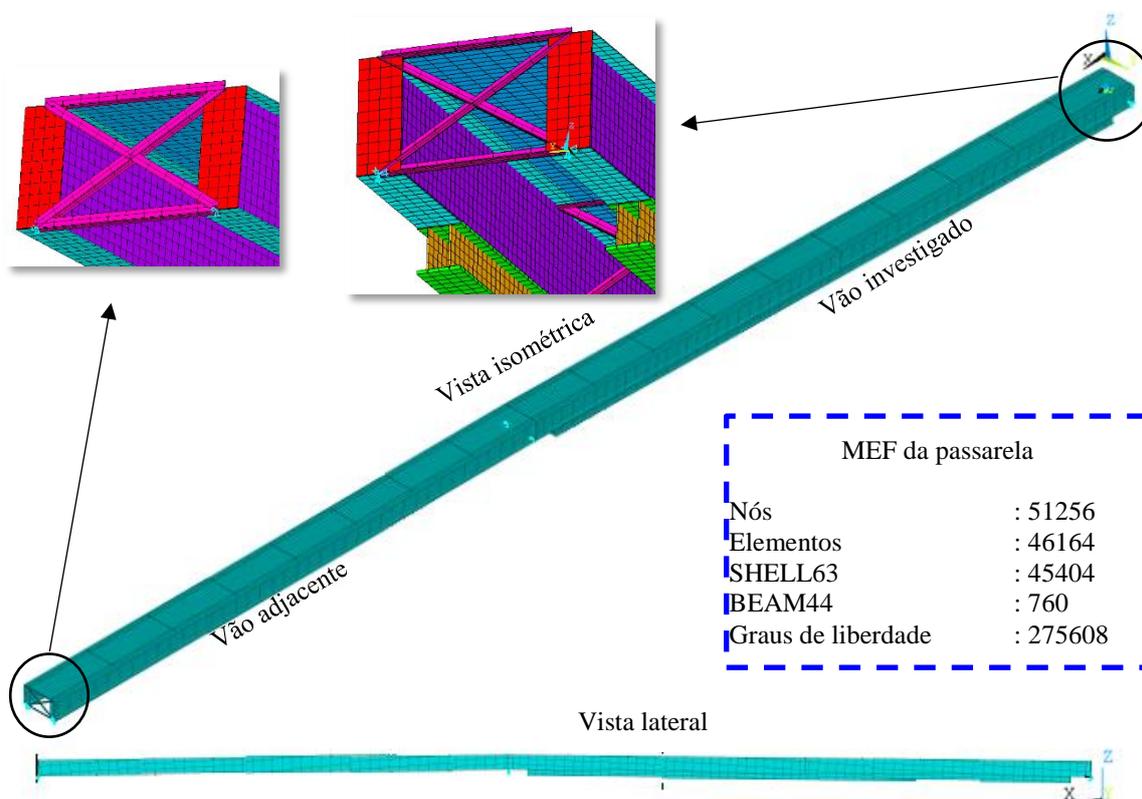


Figura 4. MEF da passarela de pedestres em aço-concreto analisada

O amortecimento foi modelado em termos de taxas de contribuição, ou taxas de amortecimento modais, Clough e Penzien (1993), usando a matriz de amortecimento Rayleigh.

4 ANÁLISE MODAL NUMÉRICA

Nesta seção, o problema de autovalor associado a uma análise de vibração livre é resolvido a partir do programa computacional Ansys (2007). O objetivo é identificar as frequências naturais do modelo computacional e seus respectivos modos de vibração com as propriedades reais da estrutura. Após a análise dos autovalores e autovetores do modelo numérico em elementos finitos, a diferença será descrita em relação aos resultados experimentais obtidos.

Na sequência, a Tabela 1 mostra os valores de frequência e a Figura 5 identifica os modos de vibração. É possível observar a predominância da flexão e torção combinadas nos dois primeiros modos para o vão estudado e o adjacente respectivamente. Por outro lado, o terceiro e o quarto modos de vibração têm predominância de flexão para os respectivos vãos, mencionados anteriormente.

Tabela 1. Frequências naturais da passarela: análise numérica (MEF)

| Modo de vibração | Frequência (Hz) | Fenômeno físico | Amplitude máxima |
|------------------|-----------------|-----------------|------------------|
| 1 | 1.99 | Torção e flexão | Vão 1 (29.5m) |
| 2 | 3.70 | Torção e flexão | Vão 2 (24m) |
| 3 | 3.83 | Flexão | Vão 1 (29.5m) |
| 4 | 6.05 | Flexão | Vão 2 (24m) |

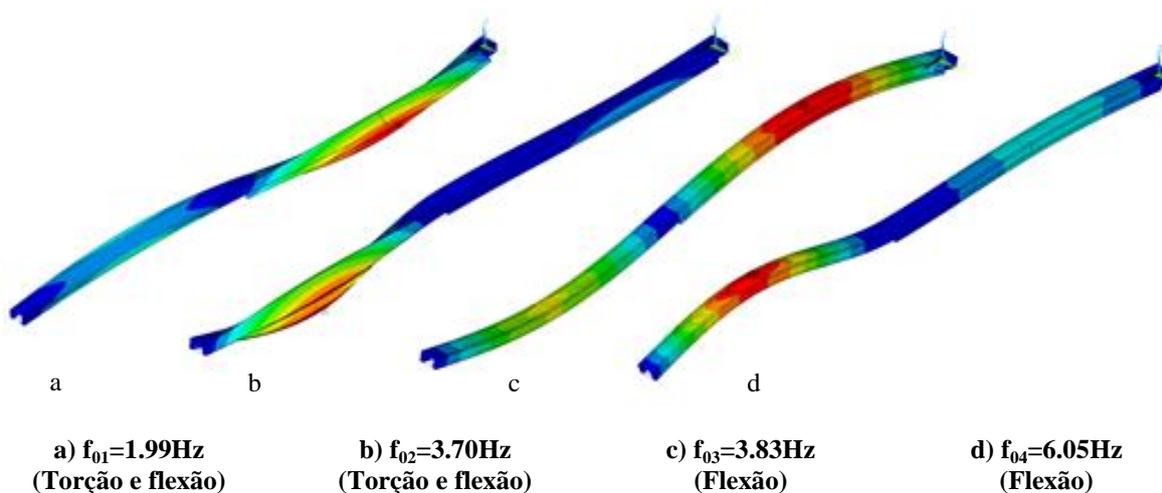


Figura 5. Modos de vibração da passarela: análise numérica (MEF)

As frequências naturais são de extrema importância para este trabalho de pesquisa, uma vez que o objetivo é analisar o conforto humano e a resposta da estrutura quando é aplicada uma carga dinâmica devido ao caminhar de pedestres, uma vez que a proximidade da frequência natural fundamental da passarela com a faixa de frequência da caminhada humana é uma das causas mais comuns de problemas de vibração.

5 MONITORAMENTO EXPERIMENTAL DINÂMICO

Nesta investigação, o monitoramento experimental dinâmico da passarela de pedestres investigada foi realizado com base em dois testes diferentes. Inicialmente, foram realizadas as medidas de análise modal operacional na estrutura, com base no uso de um acelerômetro digital USB (Digiducer: modelo 333D01), utilizando o aplicativo

Signal Scope instalado em um dispositivo IOS. O sistema foi conectado por um cabo ao dispositivo para realizar a leitura, gravação e exibição dos valores da resposta dinâmica estrutural experimental no domínio do tempo ou no domínio da frequência através do aplicativo Signal Scope, ver Figura 6.

Por outro lado, deve-se enfatizar que, para os testes de vibração humana, considerando a caminhada de pedestres no piso da passarela, a resposta estrutural dinâmica foi medida com base no uso de um acelerômetro 603C01 PCB Piezotronics, usando um analisador dinâmico de sinais CoCo-80X, ver Figura 6.

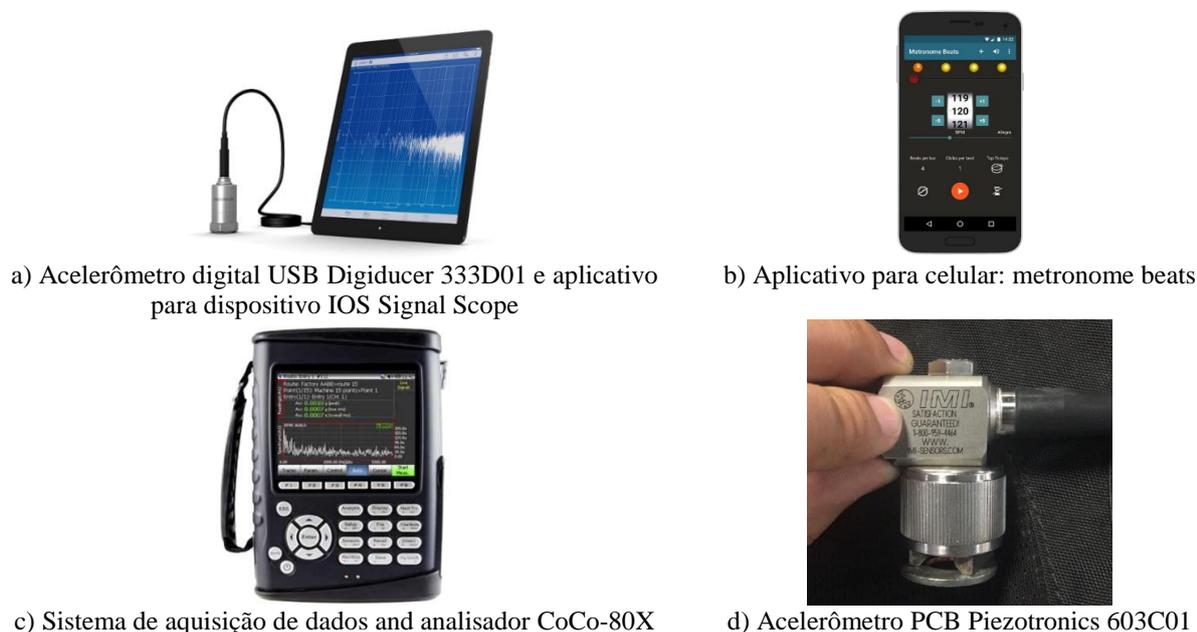


Figura 6. Monitoramento experimental dinâmico: sistema de aquisição de dados e acelerômetros

Uma breve especificação técnica sobre equipamentos, sensores e software é apresentada em sequência:

- Analisador de Sinais Dinâmicos CoCo-80X, 2 canais, 0,48 Hz a 102,4 kHz com 54 estágios, 24 bits, 1,71 kg incluindo bateria;
- 2 acelerômetros ICP de cisalhamento em cerâmica, 100 mV / g, 0.5 a 10kHz, saída superior, conexão de 2 pinos, calibração credenciada com um ponto ISO 17025, 51 gramas;
- SignalScope Pro para iOS da Faber Acoustical com analisador de sistema dual-channel e reconhecimento de sensibilidade do Digiducer;
- 1 acelerômetro de cisalhamento piezoelétrico de cerâmica USB 333D01, 4,3% FSV / g, 2 Hz a 8 kHz, saída superior, 131 gramas;

Os testes de vibração de caminhada humana realizados na passarela de pedestres através do monitoramento experimental dinâmico (estrutura e pedestres), tem como objetivo avaliar a resposta estrutural dinâmica (conforto humano), além de fornecer suporte para a calibração da modelagem numérica da interação dinâmica pedestre-pedestre, baseado no uso de sistemas biodinâmicos, ainda em desenvolvimento. Na

seqüência, a Tabela 2 e a Figura 7 apresentam um resumo dos testes experimentais realizados.

Tabela 2. Resumo do monitoramento experimental dinâmico: testes de vibração forçada

| Teste | Caminhada | Frequência do passo (f_p in Hz) | Frequência (BPM) |
|-------|--------------------------|------------------------------------|------------------|
| 1 | Lenta (1 Pedestre) | 1.60 | 96 |
| 2 | Normal (1 Pedestre) | 2.00 | 120 |
| 3 | Rápida (1 Pedestre) | 2.45 | 147 |
| 4 | Ressonância (1 Pedestre) | 1.90 | 114 |
| 5 | Randômica (8 Pedestres) | Randômica | - |

É justo mencionar que, a fim de controlar a sincronização da frequência de pedestres ao caminhar sobre o piso da passarela, com o objetivo de identificar os valores de frequência de passos nos experimentos, um metrônomo foi usado para cada teste. O metrônomo produz pulsos de som controlados com duração regular e sua unidade representativa é o “BPM” (batimentos por minuto). Desta forma, cada batida de som está relacionada com o contato do passo com a estrutura durante a caminhada de pedestres. Finalmente, deve-se enfatizar que o pedestre, em cada um dos testes experimentais, andou apenas ao longo do eixo longitudinal do piso da passarela.



a) Vibração livre

b) Caminhada lenta

c) Caminhada normal



d) Caminhada rápida

e) Caminhada em ressonância

f) Caminhada randômica

Figura 7. Monitoramento experimental dinâmico da passarela de pedestres “in situ”

5.1 Análise modal operacional

A OMA foi executada (testes de vibração livre: veja a Figura 7), baseada no monitoramento experimental dinâmico (ver Seção 4), a partir de um único salto de pedestre no meio do vão sobre o eixo longitudinal. Neste ponto da estrutura, as acelerações na direção vertical foram registradas no domínio do tempo com uma taxa de amostragem de 2,56 kHz por um tempo suficiente para que toda a energia do salto fosse dissipada. Dessa forma, a Figura 8 mostra os resultados experimentais, obtidos no domínio da frequência, com o objetivo de identificar as frequências naturais que produzem os principais picos de transferência de energia da resposta estrutural dinâmica da passarela.

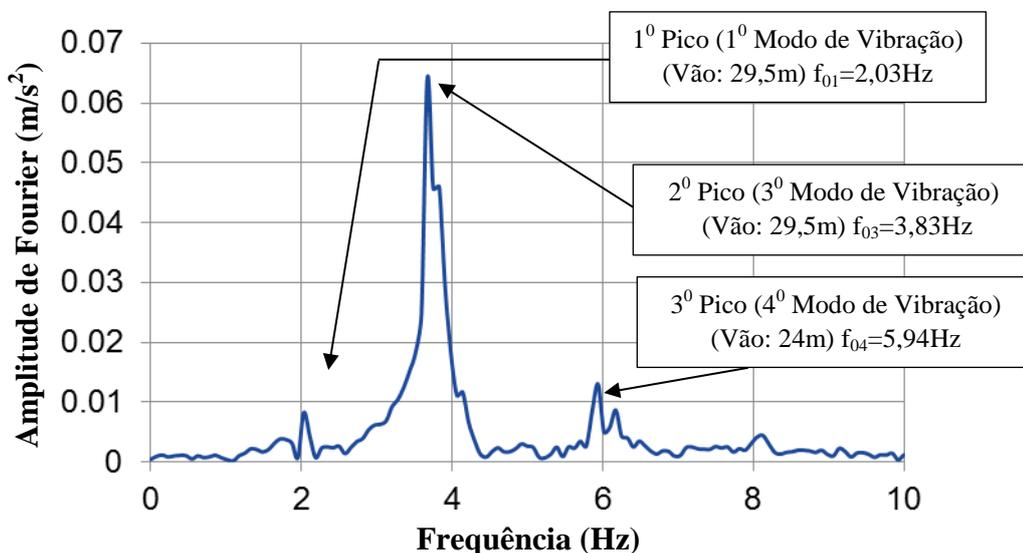


Figura 8. Identificação das frequências naturais na seção central da passarela

Com base nos resultados mostrados na Figura 8, aceleração no domínio da frequência obtida pela Transformada Rápida de Fourier (FFT), pode-se observar que a maior contribuição da transferência de energia para o modelo estrutural (pico mais alto) corresponde ao modo de vibração vertical com frequência valor de 3,83 Hz (igual a $f_{03} = 3,83\text{Hz}$, ver Tabela 2 e Figura 7) relacionado com o vão investigado ($L = 29,5\text{m}$). O pico com a segunda maior contribuição é referente à frequência de 5,94 Hz correspondente à flexão vertical ($-0,02\%$ de $f_{04} = 6,05\text{ Hz}$, ver Tabela 2 e Figura 7), associada ao vão adjacente ($L = 24\text{m}$). Também é possível observar outra contribuição de pico de transferência de energia relacionada à resposta dinâmica da passarela, correspondente ao modo de vibração de torção, que corresponde a terceira maior contribuição com valor de frequência de 1,99 Hz (igual a $f_{01} = 1,99\text{ Hz}$, ver Tabela 2 e Figura 7), relacionado ao vão investigado ($L = 29,5\text{m}$). Comparando os valores de frequência natural da passarela obtidos com base no monitoramento dinâmico experimental e também na modelagem numérica, pode-se verificar uma excelente concordância entre esses resultados (numéricos e experimentais). Este fato indica uma representação numérica adequada do modelo estrutural para o estudo proposto, sem

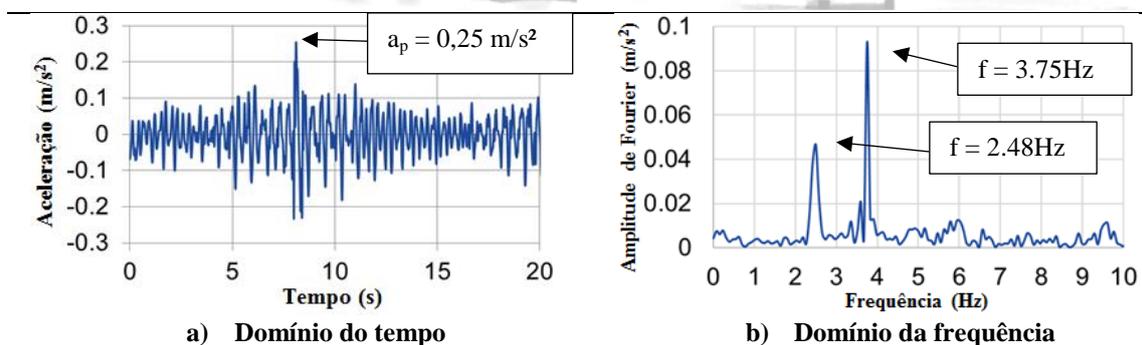


Figura 11. Teste experimental 3 (caminhada rápida $f_p=2,45$ Hz): seção central ($L = 29,5$ m)

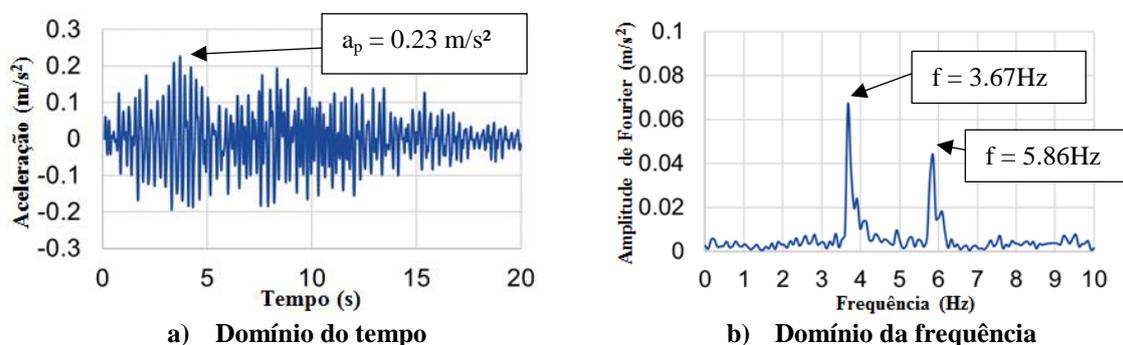


Figura 12. Teste experimental 4 (caminhada em ressonância $f_p=1,9$ Hz): seção central ($L = 29,5$ m)

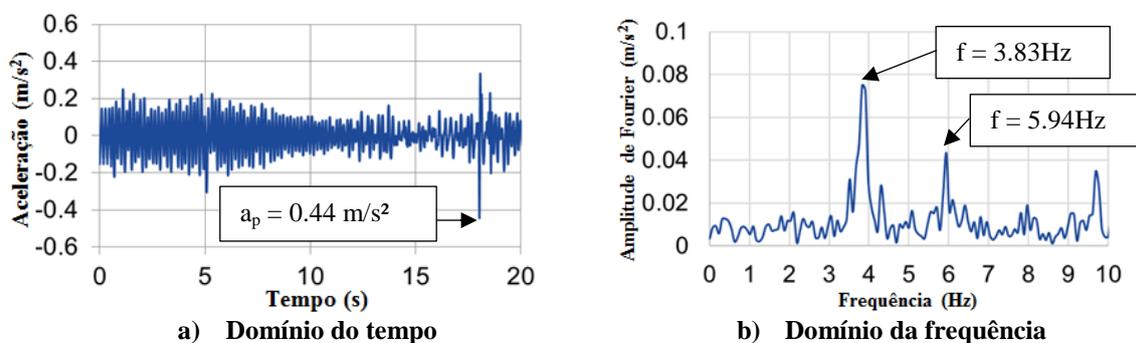


Figura 13. Teste experimental 5 (caminhada randômica $f_p=1,9$ Hz): seção central ($L = 29,5$ m)

Deve-se observar que o valor da aceleração de pico obtido na caminhada de ressonância foi menor quando comparado aos demais testes experimentais. No entanto, analisando o projeto estrutural da passarela investigada, pode-se verificar que existem seções estruturais do piso que apresentam rigidez estrutural significativamente menor (sem sistema de contraventamento), ao longo do eixo longitudinal da passarela. Dessa forma, observou-se que quando a caminhada lenta, normal e rápida foi considerada nos testes, o pedestre pisou na região do piso com menor rigidez estrutural, muito próximo ao acelerômetro. Este fato produziu valores ligeiramente maiores de aceleração de pico, devido às características do passo do pedestre (frequência, velocidade e distância do passo).



Analisando a resposta estrutural dinâmica da passarela investigada, com base em um ponto de vista qualitativo, em geral, parece que o pico mais significativo de transferência de energia corresponde à contribuição da terceira frequência natural do modelo estrutural estudado, associado ao terceiro modo de vibração [$L = 29,5\text{m}$: $f_{03} = 3,83\text{ Hz}$ (Flexão), ver a Tabela 1 e a Figura 5], ver Figuras 9 a 13.

Vale destacar que a resposta dinâmica da passarela foi modificada quando se considerou o efeito de interação dinâmica pedestre-estrutura e que essa interação tende a modificar as frequências naturais da estrutura, principalmente quando a frequência de pedestres é altamente sincronizada, ver as Figuras 9 a 12.

Esta conclusão torna-se evidente quando os Testes 1 a 4 são investigados, nos quais a frequência dos passos para pedestres foram sincronizados com base no uso de um metrônomo, ver Figura 6 e Figuras 9 a 12. Nestas situações de carga, parece que a terceira frequência natural da estrutura [$L = 29,5\text{m}$: $f_{03} = 3,83\text{ Hz}$ (Flexão), ver Tabela 1 e a Figura 5], foi modificada claramente com base no efeito de interação dinâmica da passarela, veja as Figuras 9 a 12.

Por outro lado, no caso do Teste 5 (Figuras 7 e 13), no qual 8 pedestres caminham livremente na passarela, aleatoriamente, sem sincronizar a frequência de passos com um metrônomo, a predominância da resposta dinâmica do sistema é governada exclusivamente pela terceira frequência natural [$L = 29,5\text{m}$: $f_{03} = 3,83\text{ Hz}$ (Flexão), ver Tabela 1 e a Figura 5], e depois disso, a quarta frequência natural [$L = 29,5\text{m}$: $f_{04} = 5,94\text{ Hz}$ (Flexão) ; Tabela 1 e a Figura 5]. Nesta situação, as frequências naturais da passarela não foram modificadas pelo efeito de interação dinâmica pedestre-estrutura, ver Figura 13.

Finalmente, é importante enfatizar que, quando o Teste 3 foi considerado (veja Figuras 7 e 11), o segundo maior pico de transferência de energia foi associado à frequência de excitação induzida exclusivamente pela caminhada de pedestres ($f_p = 2,48\text{ Hz}$), veja Figura 11. Além disso, é importante salientar que o pico de transferência de energia relacionado ao modo de vibração de torção não está presente nas Figuras 9b a 13b, devido ao fato de que o pedestre, em cada um dos testes experimentais, andou apenas ao longo do eixo longitudinal do piso da passarela.

6 ANÁLISE DO CONFORTO HUMANO

Nesta seção do artigo, os níveis de conforto humano da passarela são investigados. Guias tradicionais de projeto (HIVOSS, 2008, e SÉTRA, 2006), recomendam um coeficiente de redução de ações dinâmicas induzidas por pedestres chamado “ ψ ”, que varia de um intervalo de 0 a 1 [ψ : 0-1], de acordo com o risco de ressonância entre a frequência de excitação (pedestres) e a frequência natural da passarela. Este coeficiente tem valores diferentes de zero para um dado intervalo de frequências, particularmente em cada guia de projeto.

A passarela investigada apresenta um valor de frequência natural igual a 3,83 Hz [$L = 29,5\text{m}$: $f_{03} = 3,83\text{ Hz}$ (flexão), ver Tabela 1 e a Figura 5], associada à faixa de frequência com risco máximo de ressonância relacionada ao segundo harmônico do

carregamento dinâmico. Nesta situação, o coeficiente ψ assume o valor máximo e a avaliação do conforto humano é necessária (HIVOSS, 2008, e SÉTRA, 2006).

Dessa forma, a Tabela 3 mostra os valores máximos de aceleração obtidos pelo monitoramento experimental dinâmico realizado e a avaliação do conforto humano com base nas faixas de classificação propostas pelos guias de projeto (HIVOSS, 2008, e SÉTRA, 2006). Portanto, quando os valores experimentais de aceleração obtidos nos Testes 1 a 4 foram considerados na análise, o conforto humano da passarela foi classificado como “máximo”. Por outro lado, essa classificação foi considerada como “média”, quando as acelerações do Teste 5 foram investigadas.

Tabela 3. Avaliação do conforto humano

| Testes Experimentais | | | | HIVOSS (2008) | | | SÉTRA (2006) | | |
|----------------------|-------------|------------------------------|--------------------|-------------------|------------------------------|--------------------|-------------------|------------------------------|--------------------|
| Teste | Caminhada | a_p (m/s ²) | Classe de conforto | Classe de tráfego | a_p (m/s ²) | Classe de conforto | Classe de tráfego | a_p (m/s ²) | Classe de conforto |
| 1 | Lenta | 0.24 | Máximo | - | - | - | - | - | - |
| 2 | Normal | 0.28 | Máximo | - | - | - | - | - | - |
| 3 | Rápida | 0.25 | Máximo | - | - | - | - | - | - |
| 4 | Ressonância | 0.23 | Máximo | - | - | - | - | - | - |
| 5 | Randômica | 0.44 | Médio | TC2 | 0.74 | Médio | II | 2.47 | Mínimo |

Deve-se ressaltar que os resultados fornecidos pelo Teste 5 foram efetivamente comparados com os guias de projeto (HIVOSS, 2008, e SÉTRA, 2006), devido ao fato da densidade de pedestres por m², considerando o efeito do segundo harmônico da multidão, neste teste experimental, foi igual a 0,2 pedestre/m², correspondendo à classe TC2 (HIVOSS, 2008) e próximo da categoria II (SÉTRA, 2006), que apresenta um valor igual a 0,8 pedestre/m², a melhor correlação de valores de aceleração foi observada quando comparados o Teste 5 e o HIVOSS (2008), e a diferença entre os valores de aceleração em relação à recomendação SÉTRA (2006) se deve à densidade de pedestres para a classe estudada (Categoria II).

No entanto, é importante ressaltar que, em várias observações feitas no local da passarela, durante o acompanhamento experimental, e também com base nas entrevistas realizadas com os participantes dos ensaios experimentais (pedestres), observou-se que a maioria das pessoas que cruzou a estrutura se sentiu desconfortável com os níveis excessivos de vibração da passarela investigada.

Por fim, os autores gostariam de enfatizar que esta investigação continuará com base no desenvolvimento de um modelo matemático, com o objetivo de simular numericamente a interação dinâmica de estrutura e de pedestres, considerando o uso de modelos biodinâmicos de pessoas. Dessa forma, os resultados dos testes de vibração de pedestres também podem ser validados e representados por simulações MEF. Esses modelos simulam as características dinâmicas dos pedestres (massa, rigidez e amortecimento) e têm sido usados como uma alternativa eficiente para avaliar melhor o



conforto humano, em vez do tradicional modelo “somente de força” amplamente utilizado para análise dinâmica de passarelas.

7 CONCLUSÕES

O principal objetivo deste trabalho de pesquisa foi desenvolver um estudo baseado no monitoramento dinâmico experimental e modelagem numérica, a fim de identificar, caracterizar e avaliar o comportamento estrutural dinâmico de passarelas de pedestres. Para isso, foi realizada análise de conforto humano de uma passarela de pedestres composta de aço-concreto, existente, localizada na cidade do Rio de Janeiro / RJ, Brasil. A seguir, são descritas as principais conclusões.

Segundo a análise modal operacional, a contribuição máxima do pico de transferência de energia relacionada à resposta estrutural dinâmica da passarela analisada está associada ao modo de vibração vertical com frequência igual a 3,83 Hz [$L = 29,5\text{m}$: $f_{03} = 3,83\text{ Hz}$]. O pico de transferência de energia com a segunda maior contribuição está relacionado à frequência correspondente à forma do modo de flexão vertical com frequência igual a 5,94 Hz [$L = 24\text{m}$: $f_{04} = 5,94\text{Hz}$]. O pico com a terceira maior contribuição, mas muito menor que o primeiro e o segundo, corresponde ao modo de vibração de torção com uma frequência de 2,03 Hz [$L = 29,5\text{ m}$: $f_{01} = 2,03\text{ Hz}$].

Conforme observado nos testes Experimentais de Vibração Forçada, os valores máximos de aceleração (picos de aceleração) relativos à seção central do vão investigado ($L = 29,5\text{ m}$), respectivamente, são iguais a $0,24\text{ m/s}^2$ ($a_p = 0,24\text{ m/s}^2$; caminhada lenta: 1 pedestre); $0,28\text{ m/s}^2$ ($a_p = 0,28\text{ m/s}^2$; caminhada normal: 1 pedestre); $0,25\text{ m/s}^2$ ($a_p = 0,25\text{ m/s}^2$; caminhada rápida: 1 pedestre); $0,23\text{ m/s}^2$ ($a_p = 0,23\text{ m/s}^2$; ressonância: 1 pedestre) e $0,44\text{ m/s}^2$ ($a_p = 0,44\text{ m/s}^2$; caminhada aleatória: 8 pedestres).

No âmbito da avaliação do conforto humano, os valores de aceleração de pico, observações feitas no local da passarela e também várias entrevistas com os participantes dos testes experimentais, permitiram concluir que a passarela investigada se torna desconfortável para os pedestres, conforme se eleva a densidade de tráfego.

Finalmente, os autores gostariam de enfatizar sua compreensão da necessidade de um estudo baseado na avaliação do efeito da interação dinâmica pedestre-estrutura, considerando-se testes experimentais e modelagem numérica, utilizando modelos biodinâmicos representativos para simular os pedestres, a fim de contribuir com uma avaliação mais realista do comportamento estrutural dinâmico e avaliação do conforto humano de passarelas sujeitas à caminhada de pedestres.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro para este trabalho fornecido pela CAPES da Fundação Brasileira de Ciência, CNPq e FAPERJ.

REFERÊNCIAS

Silva IAR., 2018. *Experimental monitoring and numerical modelling to evaluate the pedestrian-structure dynamic interaction effect on the dynamic response of pedestrian*



foot-bridges (In development). PhD thesis, Civil Engineering Post-graduate Programme, PGECIV. State University of Rio de Janeiro, UERJ. Rio de Janeiro/RJ, Brazil.

Silva IAR, Debona GL, Santos da Silva JG., 2016. Design evaluation of the serviceability limit states of footbridges when subjected to the dynamic action of pedestrians walking. *XXXVII Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering (CILAMCE 2016)*, pp. 182-201.

Santos da Silva JG, Burgos RB, Duarte IFB, Debona GL., 2016. Vibration Analysis and Human Comfort Evaluation of Steel-Concrete Composite Footbridges Based on the Modelling of the Pedestrian-Structure Dynamic Interaction Effect. *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*. ISSN: 2248-9622. Vol. 6, Issue 11 (Part 5), pp.38-45.

Van Nimmen K, Lombaert G, De Roeck G, Van den Broeck P., 2017. The impact of vertical human-structure interaction on the response of footbridges to pedestrian excitation. *Journal of Sound and Vibration*, ISSN 0022-460X, Vol. 402, pp. 104-121.

Venuti F, Racic V, Corbetta A., 2016. Modelling framework for dynamic interaction between multiple pedestrians and vertical vibrations of footbridges. *Journal of Sound and Vibration*, ISSN 0022-460X, Vol. 379, pp. 245-263.

Jiménez-Alonso JF, Sáez A, Caetano E, Magalhães F., 2016. Vertical crowd-structure interaction model to analyse the change of the modal properties of a footbridge. *Journal of Bridge Engineering*, ISSN: 1084-0702, Vol. 21(8), Content ID C4015004.

Živanović S, Pavic A and Reynolds P., 2006. Modal testing and FE model tuning of a lively footbridge structure, *Engineering Structures*, Vol. 28, No. 6, pp. 857-868.

Pieraccini M, Betti M, Forcellini D, Devis D, Papi F, Bartoli G, Facchini L, Corazzi R, Kovacevic CV., 2017. Radar detection of pedestrian-induced vibrations of Michelangelo's David. *Plos ONE* 12(4): e0174480.

ANSYS Swanson Analysis Systems, Inc., P. O. Box 65, Johnson Road, Houston, PA, 15342-0065, 2007. Release 11.0, SP1 UP20070830, ANSYS, Inc. is a UL registered ISO 9001:2000 Company. *Products ANSYS Academic Research*.

HIVOSS, 2008. Human Induced Vibration of Steel Structures. *Design of Footbridges Guideline. Research Fund for Coal and Steel*.

SÉTRA Footbridge, 2006. Assessment of Vibrational Behaviour of Footbridge Under Pedestrian Loading, Technical guide. *Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes*, Paris, France.

Clough RW, Penzien J., 1993. *Dynamics of Structures*. McGraw-Hill, 634p.