



XXXVII IBERIAN LATIN AMERICAN CONGRESS
ON COMPUTATIONAL METHODS IN ENGINEERING
BRASÍLIA - DF - BRAZIL

COMPORTAMENTO DINÂMICO DE PASSARELA SOB CARGAS INDUZIDAS POR PEDESTRES ANDANDO

Dianelys Vega

Ney Roitman

Carlos Magluta

dianelys@coc.ufrj.br

roitman@coc.ufrj.br

magluta@coc.ufrj.br

Laboratório de Estruturas e Materiais – PEC/COPPE/UFRJ

Universidade Federal do Rio de Janeiro, Centro de Tecnologia, Bloco I-216, Ilha do Fundão,
CEP: 21941-9726 Rio de Janeiro, Brasil,

Resumo: *As tendências atuais na construção civil conduzem a estruturas cada vez mais esbeltas e flexíveis, se fazendo necessário o estudo das ações dinâmicas devido à redução das suas frequências naturais. Nas passarelas o risco de ressonância com o carregamento humano é um aspecto que deve ser levado em consideração no projeto, já que as frequências devido ao andar dos pedestres podem se aproximar das frequências naturais dessas estruturas. O objetivo deste trabalho é realizar um estudo paramétrico do comportamento dinâmico de passarelas sob ação de pedestres andando. Foram realizados testes experimentais sobre uma plataforma mista de aço e concreto, a qual foi instrumentada com acelerômetros para medir a sua resposta estrutural e plataformas de carga para medir a excitação produzida pelos pedestres. Em paralelo é desenvolvido um modelo numérico para a análise da estrutura sob esse carregamento. A partir dos resultados experimentais o modelo numérico é ajustado, permitindo analisar a resposta da estrutura sob ação de diferentes carregamentos induzidos por pessoas.*

Palavras chave: *passarelas, cargas humanas, frequências naturais, força do passo.*

1 INTRODUÇÃO

As passarelas, foco deste trabalho, de um modo geral são projetadas somente levando-se em consideração a ação de cargas estáticas sem levar em conta os efeitos associados às cargas dinâmicas, podendo apresentar danos estruturais ou vibrações excessivas.

Dentro dos casos mais dramáticos relatados na história de colapso de estruturas devido a cargas dinâmicas induzidas por pessoas têm-se os colapsos da ponte Broughton, perto de Manchester, na Inglaterra em 1831 e a ponte Angers suspensa sobre o Rio Maine, na França, em 1850 (Tilly, 2011).

Existem diversos casos em que as estruturas apresentaram vibrações excessivas, mas que não chegaram ao colapso, dentre eles pode-se citar a Millenium Bridge, em Londres (Sanderson, 2008), fechada logo após sua inauguração devido a vibrações laterais excessivas. Esta passarela atravessa o rio Tamisa, em Londres, foi inaugurada em Junho de 2000, mas logo após teve que ser interditada, só sendo liberada após a instalação de sistemas passivos de vibrações.

Outro caso relatado na literatura foi de uma passarela em arco de aço em Erlach, na Alemanha, durante a travessia de cerca de 300-400 pedestres, também apresentou vibrações laterais elevadas devido ao sincronismo do passo com a frequência natural da estrutura conforme relatado por Ingólfsson *et al.* (2012).

O objetivo deste trabalho é realizar um estudo paramétrico do comportamento de passarela sob ação de cargas humanas do tipo andar. Isso foi realizado através de um modelo analítico-numérico para análise de passarela submetida a cargas induzidas por pedestres andando, sendo este modelo validado através de medições experimentais.

Para atingir este objetivo foram realizados uma série de testes experimentais em uma passarela protótipo situada no Laboratório de Estruturas (LABEST) da COPPE/UFRJ. Com os resultados das medições experimentais o modelo numérico foi calibrado e ajustado, permitindo analisar posteriormente um maior número de casos.

2 CARGAS INDUZIDAS POR PEDESTRES

As forças dinâmicas induzidas por pessoas andando são cargas variáveis no tempo e no espaço, de caráter randômico, não só devido ao fato de que diferentes indivíduos possuem diferentes características físicas, mas também devido ao fato de que um mesmo indivíduo não repete passos idênticos (Racic *et al.*, 2009). Esse aspecto relevante levou à necessidade do aprofundamento do estudo das cargas induzidas pelo andar das pessoas para a descrição de modelos matemáticos mais confiáveis para o projeto estrutural.

Embora os avanços na modelagem de forças induzidas pelo homem nos últimos anos, ainda há incertezas significativas sobre essa questão, particularmente porque os modelos de carregamento de pedestres geralmente consideram a carga dinâmica como uma força externa aplicada à estrutura que pode ser aproximada por um somatório de componentes harmônicos. Outros autores consideram a interação entre as pessoas e a estrutura.

2.1 Conceitos fundamentais e terminologia

Os parâmetros fundamentais da caminhada estão relacionados ao tempo e ao espaço, e são conhecidos, respectivamente, como parâmetros espaciais e temporais e em muitas ocasiões são chamados de parâmetros espaço-temporais. Os parâmetros espaciais

normalmente medidos são: o comprimento da passada, o comprimento do passo e a largura do passo, os quais estão indicados na Fig. 1, enquanto os parâmetros temporais normalmente usados são: a velocidade do caminhar e a frequência do passo (Racic *et al.*, 2009).

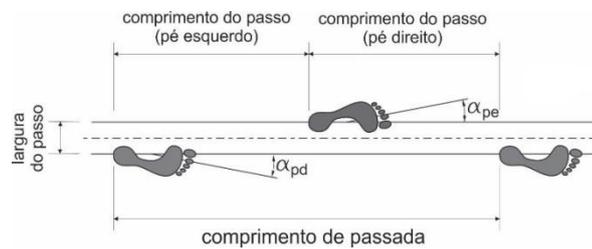


Figura 1: Parâmetros espaciais da caminhada (adaptado de RACIC *et al.*, 2009)

Numerosos autores têm estudado a descrição estatística destes parâmetros. Mais recentemente, em testes experimentais realizados por Toso & Gomes (2015), um pedestre foi colocado para andar em linha reta sobre uma plataforma de força, com ritmo normal. Os sinais foram registrados para 10 passagens repetidas do pedestre. Para cada travessia do pedestre foram medidos os seguintes parâmetros: a velocidade de marcha (v_p), frequência de excitação (f_p), comprimento do passo (l_s) e a largura do passo (w_s), mostrados na Tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros da caminhada estimados por TOSO & GOMES (2015)

	v_p (m/s)	f_p (Hz)	l_s (m)	w_s (m)
Min.	1,19	1,64	0,68	0,28
Max.	1,38	1,97	0,74	0,34
Média	1,3	1,82	0,71	0,31
DP	0,06	0,09	0,03	0,03

v_p = velocidade do andar; f_p = frequência do passo; l_s = comprimento do passo;
 w_s = largura do passo; DP: Desvio Padrão

Uma das variáveis mais comumente investigadas durante a marcha humana é a força de reação do piso. Do ponto de vista da engenharia civil essas são as forças com as quais as pessoas excitam dinamicamente a estrutura. Essa força de reação é igual em magnitude e em direção oposta à força que o corpo exerce sobre a superfície de apoio pelos pés. Esta é medida comumente utilizando plataformas de força.

As plataformas de força são dispositivos projetados para medir as forças exercidas por um corpo sobre a superfície de contato. Quando o pedestre caminha sobre uma plataforma, a força aplicada é medida pelos transdutores de carga, o que gera sinais elétricos que são amplificados e registrados por um sistema de aquisição de dados. Estes sinais permitem avaliar a posição da força e as forças resultantes sobre a plataforma (Toso & Gomes, 2015).

2.2 Caracterização da força produzida pelo andar

Ao caminhar um indivíduo induz forças em três direções: uma na vertical, produzida pelo peso do corpo sobre os pés, e duas na horizontal, nas direções lateral e longitudinal. A força na direção lateral é causada pelo movimento de zig-zag dos pés durante a caminhada e

na direção longitudinal é produzida pelas acelerações e desacelerações do indivíduo quando anda. Não obstante, a maioria dos estudos tem-se focado na medição da força do indivíduo andando na direção vertical, já que essa direção apresenta a maior magnitude de excitação (Venuti & Bruno, 2009).

Uma pesquisa muito abrangente referente as forças humanas induzidas em passarelas foi realizada por Wheeler (1982), que sistematizou o trabalho de outros pesquisadores ligados a diferentes modos de movimento humano desde a caminhada lenta até a corrida. Esse trabalho também relatou a existência da dependência dos parâmetros da caminhada, como comprimento do passo, velocidade do caminhar, pico da força e tempo de contato (o tempo em que um pé está em contato com o solo) com a frequência de excitação. Observou-se ainda que todos esses parâmetros são distintos para diferentes pessoas. A Fig. 2 apresenta as forças verticais obtidas para diferentes tipos de atividades humanas após os estudos realizados por Wheeler (1982).

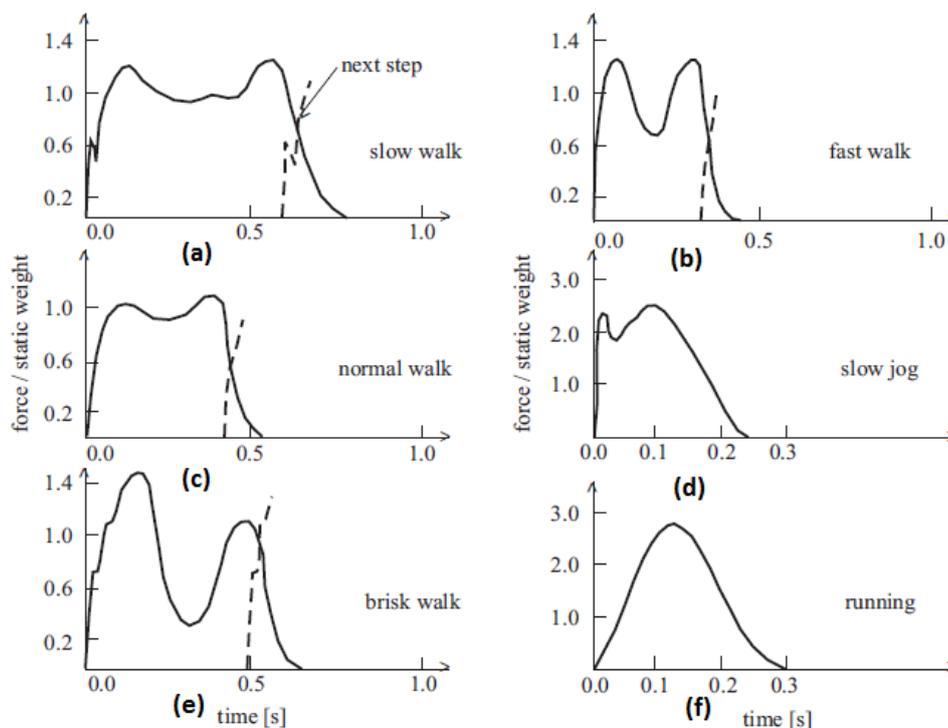


Figura 2: Funções de força vertical para diferentes tipos de atividades humanas normalizadas pelo peso da pessoa: (a) Caminhada lenta; (b) Caminhada rápida; (c) Caminhada normal; (d) Corrida lenta; (e) Caminhada ativa; (f) Corrida (ŽIVANOVIĆ *et al.*, 2005)¹

2.3 Modelo de Força Tradicional

Para se projetar estruturas submetidas às forças dinâmicas se faz necessário modelá-las analiticamente. Na literatura podem ser encontrados dois tipos de modelo: no domínio do

¹ "Reprinted from Journal of Sound and Vibration, 279 Issues 1-2, S. Živanović & A. Pavic, Vibration serviceability of footbridges under human-induced excitation: a literature review, 1-74, Copyright (2005), with permission from Elsevier [License Number: 3798330054709]"

tempo e no domínio da frequência. Embora o primeiro seja mais comum do que o segundo, em ambos os casos a modelagem matemática de forças dinâmicas induzidas pelo homem é uma tarefa bastante complexa, devido aos muitos fatores envolvidos no processo, tais como as diferenças entre indivíduos, os parâmetros que influenciam na caminhada, a influência do número de pessoas e o grau de sincronização, entre outros (Živanović *et al.*, 2005).

Geralmente, dois tipos de modelos no domínio de tempo podem ser encontrados na literatura: os modelos determinísticos e os probabilísticos. O primeiro tipo tem a intenção de estabelecer um modelo de força geral para cada tipo de atividade humana, enquanto o outro leva em conta o fato de que alguns parâmetros que influenciam na força humana, tais como a frequência da atividade, o peso da pessoa, etc., são variáveis aleatórias cuja natureza estatística deve ser considerada em termos de suas funções de distribuição de probabilidade (Racic *et al.*, 2009, Živanović *et al.*, 2005).

O modelo de força determinístico tradicionalmente encontrado na literatura representa a força periódica, $F_p(t)$, por uma série de Fourier (Živanović *et al.*, 2005):

$$F_p(t) = G + \sum_{i=1}^n G\alpha_i \sin(2\pi i f_p t - \Phi_i) \quad (1)$$

Onde G é o peso da pessoa, α_i o coeficiente de Fourier ou fator de carga dinâmica associado ao i -ésimo harmônico, f_p é a frequência da força de excitação, Φ_i é a diferença de fase entre o primeiro e o i -ésimo harmônico, i é o número de ordem do harmônico analisado e n o número total de harmônicos considerados.

Esses modelos de cargas periódicas são baseados no pressuposto de que todos os pedestres produzem exatamente a mesma força e que essa força é periódica. Supõe-se também que a força produzida por um único pedestre é constante ao longo do tempo.

Apesar de esses modelos apresentarem uma boa aproximação das forças induzidas por pedestres, o mais próximo da realidade seria modelar o carregamento tendo em conta essas diferenças.

3 TESTES EXPERIMENTAIS

3.1 Descrição da estrutura

A estrutura utilizada para a realização de testes experimentais, já usada em trabalhos anteriores (Faísca, 2003, Vega *et al.*, 2015, Vega, 2016), é uma passarela protótipo, a qual encontra-se no Laboratório de Estruturas da COPPE (LABEST). A mesma é uma estrutura mista que, consiste de uma laje de concreto armado de dimensões 12,20 m x 2,20 m x 0,10 m e vigas compostas por perfis I metálicos longitudinais e transversais. A passarela é apoiada em quatro pontos, sendo dois em cada extremidade, com um vão livre máximo de 11,5 m de comprimento, o que a torna bem flexível. A Fig. 3 mostra uma vista geral da passarela, enquanto a Fig. 4 apresenta as principais dimensões da estrutura.

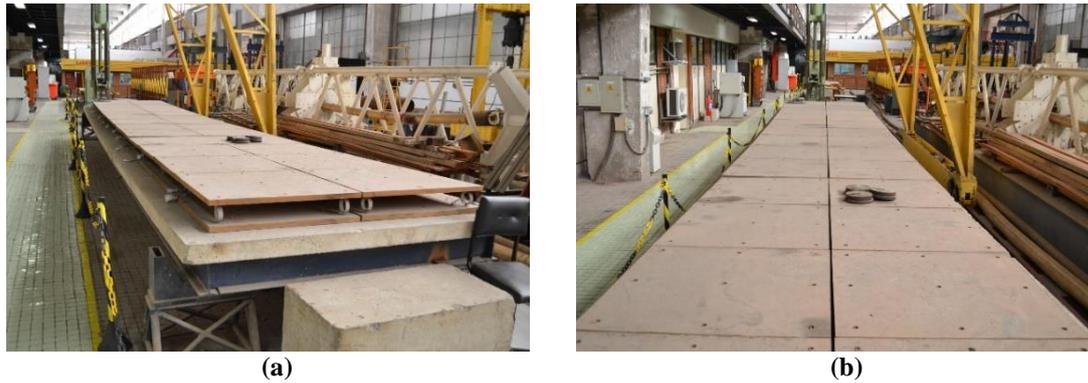


Figura 3: Estrutura utilizada para a realização de testes experimentais: (a) Vista em perspectiva; (b) Vista superior (Vega, 2016)

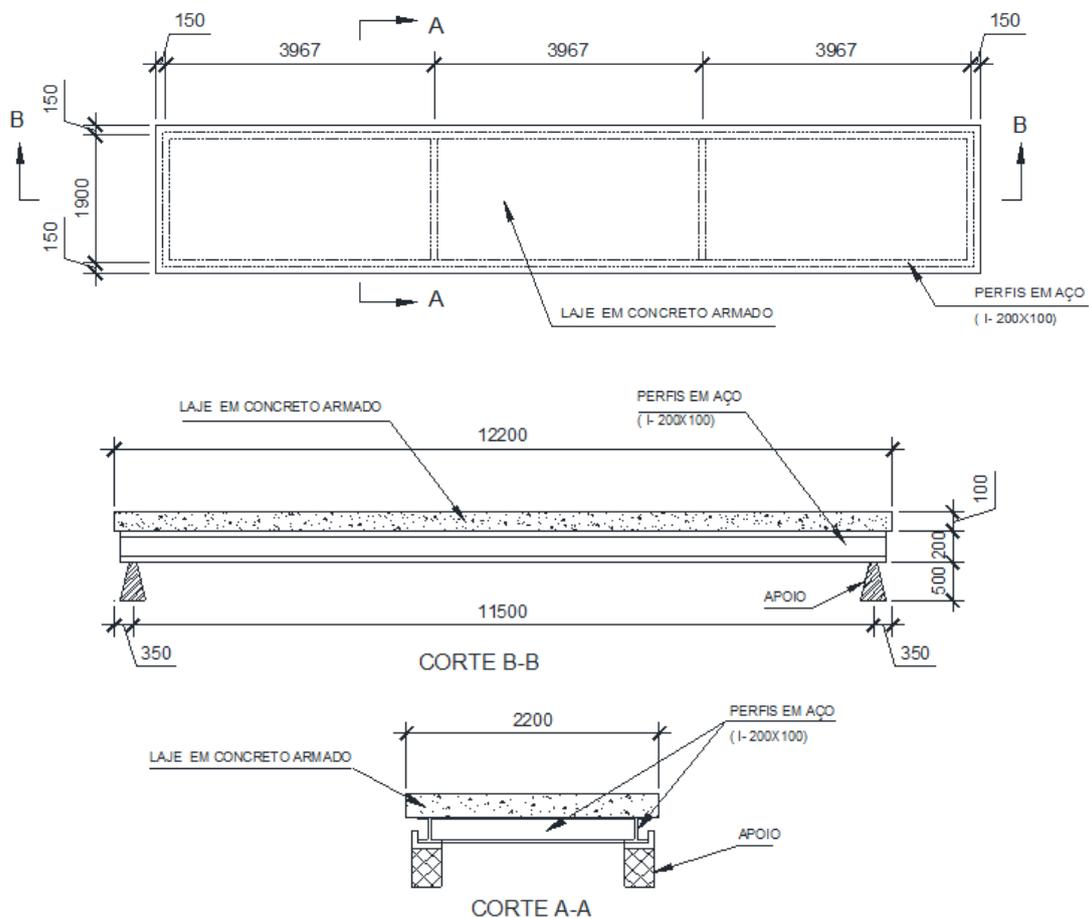


Figura 4: Planta baixa e cortes da estrutura (cotas em mm) (Vega, 2016)

3.2 Sistema de instrumentação, aquisição e processamento de dados

Para a realização dos testes experimentais foi necessário empregar um sistema de instrumentação que permitisse a aquisição dos sinais de força aplicados diretamente à estrutura assim como a sua resposta estrutural sob excitação produzida pelo andar das pessoas.

Foram utilizados seis acelerômetros resistivos com capacidade de 1 g (sendo g o valor correspondente à aceleração da gravidade $9,81 \text{ m/s}^2$) para medir a resposta dinâmica. A instrumentação foi idealizada com o objetivo de medir os dois primeiros modos de flexão e de torção da estrutura. Na Fig. 5 mostra-se um esquema simplificado das posições dos acelerômetros ao longo da passarela, representados pelas siglas AC. Estes foram colados na base dos perfis I longitudinais, permitindo captar as acelerações da estrutura na direção vertical. Na Fig. 6 se apresenta o detalhe da fixação dos acelerômetros aos perfis.

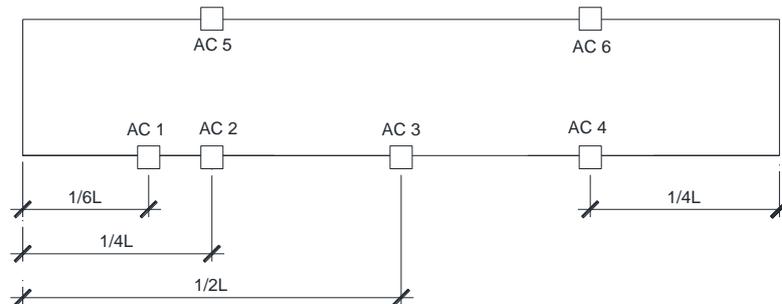


Figura 5: Posição dos acelerômetros na estrutura, L: comprimento total da estrutura

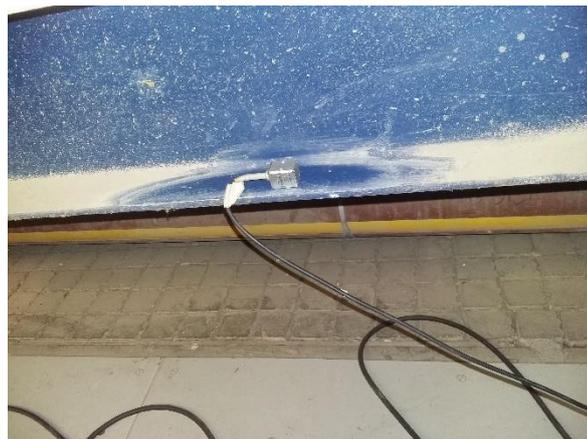


Figura 6: Detalhe de fixação do acelerômetro à estrutura (Vega, 2016)

A medição da força de excitação foi realizada através da utilização de plataformas de carga instrumentadas, as quais medem a carga vertical aplicada sobre a estrutura. Cada plataforma é composta por duas chapas de madeira, com dimensões de $0,90 \text{ m} \times 0,90 \text{ m}$ interligadas através de nove anéis metálicos com diâmetro externo de $89 \times 10^{-3} \text{ m}$ e espessura da parede de $5,3 \times 10^{-3} \text{ m}$. Estes anéis foram instrumentados com extensômetros elétricos de resistência (EER) conforme mostrado na Fig. 7.

O conjunto é composto por 26 plataformas que se encontram sobre toda a superfície da estrutura e permitem obter o valor da força aplicada. Na Fig. 8 é mostrado um esquema da numeração das plataformas para a sua calibração e controle durante os testes.



Figura 7: Instrumentação para medição da força aplicada: (a) Plataforma instrumentada para medição da força aplicada (Vega, 2016); (b) Anel instrumentado com extensômetros nas faces interna e externa (Fáisca, 2003)

2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26
1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25

Figura 8: Numeração das plataformas de carga instrumentadas sobre a estrutura

A instrumentação foi constituída de 32 sensores, os quais foram condicionados, filtrados e aquisitados através do sistema de aquisição de dados. Este sistema permite controlar os parâmetros dos ensaios tais como as constantes de calibração, o número de canais ativos, a frequência de corte, a frequência de amostragem, etc... A Fig. 9 mostra uma vista do equipamento utilizado nos ensaios.



Figura 9: Equipamento usado para a aquisição e processamento dos sinais durante os testes (Vega, 2016)

As plataformas foram calibradas separadamente, colocando pesos conhecidos sobre elas. Foram carregadas com pesos de 100 N até alcançar 500 N e logo em seguida descarregadas, repetindo este procedimento três vezes. Com as leituras das deformações e o valor de cada peso utilizado, foi possível estabelecer uma correlação entre essas grandezas e obter a constante de calibração para cada plataforma, permitindo assim, estimar a precisão na

leitura das cargas aplicadas. Posteriormente foram testadas novamente com pessoas paradas sobre elas, cujos pesos foram medidos anteriormente em uma balança de precisão. Uma pessoa ficava parada durante alguns segundos sobre a placa e dava um passo para outra placa, assim as leituras foram aferidas e as constantes reajustadas até conseguir erros menores do que 5 % nas leituras dos pesos das pessoas. Dada a dificuldade do processo de calibração e a sensibilidade que apresentaram os sensores não foi possível alcançar percentagens de erro menores.

Para a análise dos resultados dos testes experimentais foram utilizados dois programas computacionais desenvolvidos no Laboratório de Estruturas (LABEST) da COPPE/UFRJ. Um programa que permite a obtenção das frequências naturais através da estimativa do espectro dos sinais medidos e outro programa, desenvolvido por BUCHER (2001), para estimar os parâmetros modais. Este último é baseado na técnica “*Short Time Frequency Technique*” (STFT).

3.3 Descrição dos ensaios realizados

A identificação desta estrutura foi realizada em trabalho anterior (Vega *et al.*, 2015) de duas formas: excitação manual, ou seja, impondo-se um deslocamento vertical na estrutura e deixando-a vibrar livremente e, com impactos de uma pessoa pulando sobre ela. O ponto de excitação foi aproximadamente a $\frac{1}{4}$ do comprimento da passarela.

Os valores devidos à excitação com uma pessoa pulando foram muito próximos aos obtidos com excitação manual, ou seja, a presença de uma pessoa parada praticamente não altera a frequência natural da estrutura. Para o caso com excitação manual, não foi possível estimar o amortecimento da estrutura devido às baixas amplitudes das respostas. Sendo assim, os valores de amortecimento e frequências naturais da estrutura foram considerados como os obtidos com uma pessoa pulando sobre ela.

Na Tabela 3 mostram-se os parâmetros modais obtidos por Vega *et al.* (2015), onde f indica modo de flexão e t de torção, identificados através das fases entre acelerômetros paralelos para cada frequência natural conforme exemplo indicado na Fig. 10(d). Cada teste foi repetido três vezes, dessa forma, para os resultados mostrados na Tabela 2, foram consideradas um total de 9 amostras para a estimativa dos valores médios e desvios padrão, adotando as leituras de 3 acelerômetros.

Na Fig. 10 são mostrados os sinais típicos de força e resposta de uma pessoa pulando. Um espectro de frequências de um sinal característico dos testes realizados durante a identificação da estrutura é mostrado na Fig. 10(c) onde se observam os quatro picos de acelerações correspondentes aos quatro primeiros modos de vibração.

Tabela 2: Parâmetros Modais obtidos experimentalmente por Vega *et al.* (2015)
(f : modo de flexão, t : modo de torção)

Tipo de excitação	Frequências naturais (Hz)			
	Modo 1 (f)	Modo 2 (t)	Modo 3 (f)	Modo 4 (t)
Manual	3,15±0,01	9,43±0,01	12,06±0,01	22,63±0,01
Pulos	3,12±0,02	9,42±0,02	11,98±0,01	22,60±0,06
	Taxa de amortecimento (%)			
Pulos	0,6±0,01	0,7±0,00	1,5±0,01	1,2±0,01

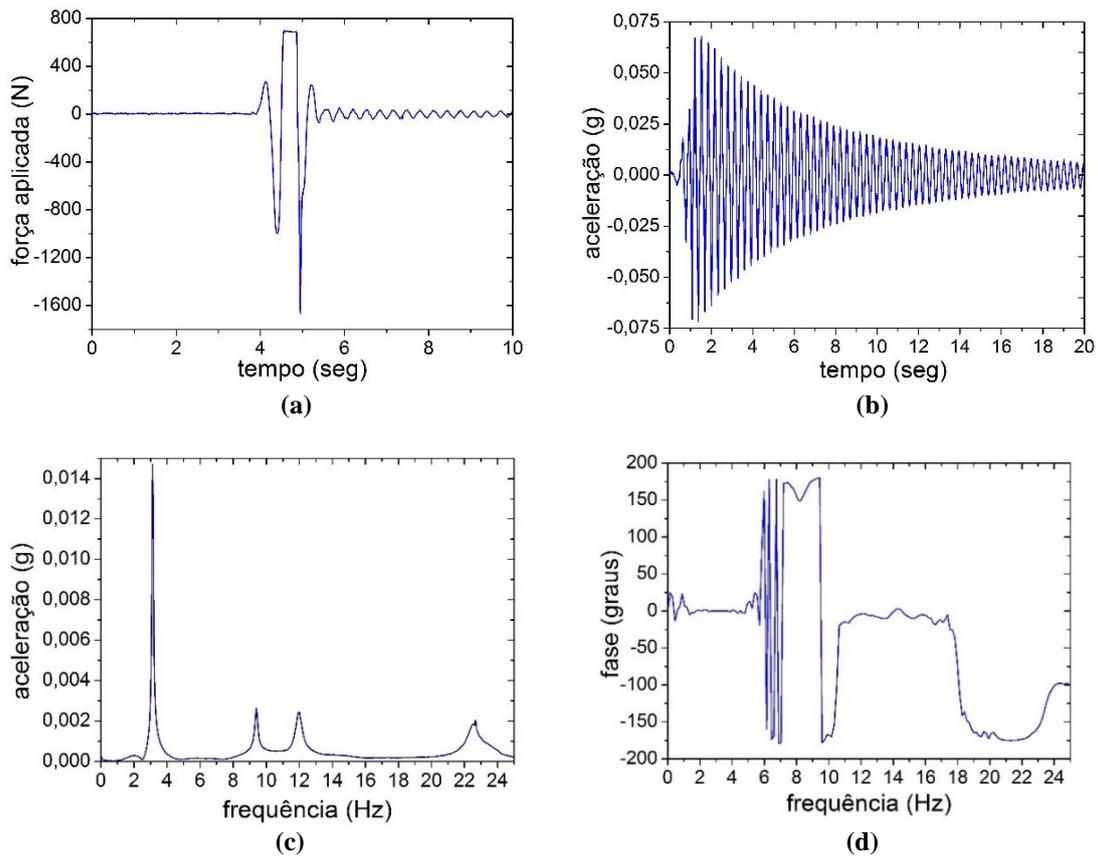


Figura 10: Sinais típicos de uma pessoa pulando: (a) Força na placa; (b) Resposta no tempo; (c) Espectro de frequências; (d) FRF entre acelerômetros paralelos

Nos testes experimentais participaram um total de 13 pessoas, as quais apresentavam um peso médio de 751,8 N e um desvio padrão de 124,4 N. Na tabela 3 é mostrado um resumo das características dos participantes durante os testes.

Tabela 3: Características dos indivíduos participantes dos testes

Indivíduo	Sexo	G (N)	Calçado
1	f	533,0	sapatilha
2	f	670,2	sapatilha
3	m	768,57	tênis
4	m	890,9	tênis
5	m	665,4	tênis
6	m	848,6	tênis
7	m	993,1	tênis
8	m	765,3	tênis
9	m	930,5	tênis
10	f	874,3	sapatilha
11	f	399,5	sandália
12	m	720,6	tênis
13	m	713,8	tênis

G: peso do indivíduo

Posteriormente realizaram-se testes com pessoas andando sobre a estrutura. O objetivo dos testes foi medir a força aplicada pelo andar das pessoas e a resposta da estrutura para correlacionar e ajustar posteriormente o modelo numérico. Foram escolhidas duas situações de análise: na primeira, os indivíduos atravessavam a passarela uma única vez enquanto, na segunda eles davam voltas em círculo. Na Fig. 11 são mostradas de forma esquemática essas duas situações e, na Fig. 12, são mostradas duas fotografias tomadas durante os ensaios correspondentes a três pessoas andando nessas situações.

A posição excêntrica do carregamento indicada na Fig. 11 garantiu que o modo de torção fosse excitado. Em cada teste os participantes foram solicitados a andar um atrás do outro, como mostrado na Fig. 12, começando por uma pessoa e, incrementando de uma em uma até que atingisse o número desejado para o ensaio. Foi adotada uma frequência de aquisição de 100 Hz, garantido assim que fosse captado o maior nível de detalhes do carregamento.

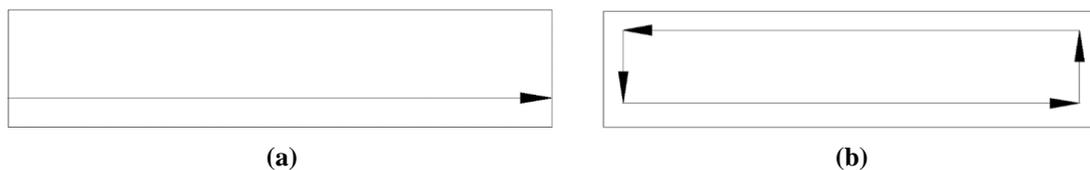


Figura 11: Movimento das pessoas andando durante os testes: (a) Situação 1; (b) Situação 2



Figura 12: Teste com três pessoas andando sobre a estrutura (a) Situação 1 (b) Situação 2

No caso da situação 1 as estimativas das frequências naturais não apresentaram suficiente precisão devido ao fato de que o tempo que os indivíduos permaneciam sobre a passarela era bastante curto, não obstante, os testes foram válidos para a calibração do modelo numérico. Sendo assim, os resultados mais precisos foram obtidos para a situação 2 com pessoas andando em círculos, porque o tempo de análise foi maior. Como pode ser observado na Tabela 5, os valores para os quatro primeiros modos mantiveram-se praticamente constantes até nove pessoas. Um aspecto relevante é que, para cada um dos testes realizados, as pessoas continuaram excitando os quatro primeiros modos de vibração.

Um espectro de frequência típico para cada situação com uma pessoa andando é mostrado na Fig. 13.

Tabela 5: Valores de frequências naturais estimadas experimentalmente para a situação 2

Pessoas	Frequências naturais (Hz)			
	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4
1	3,2	9,33	12	22,66
3	3,2	9,35	12,02	22,16
5	3,21	9,35	12,02	22,45
7	3,2	9,33	12	22,39
9	3,22	9,4	11,81	22,55
11	3,11	9,4	11,81	22,28
13	3,17	9,46	11,9	22,44

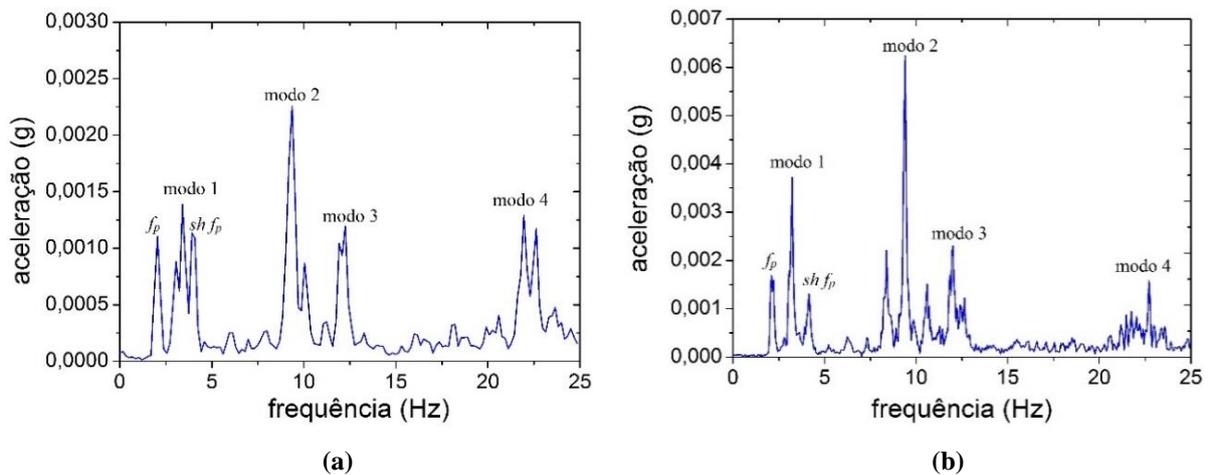


Figura 13: Espectro de frequências típico de uma pessoa andando: (a) Situação 1 (b) Situação 2
 f_p : frequência de excitação, $sh f_p$: super harmônico da frequência de excitação

As amplitudes máximas de deslocamento e aceleração foram estimadas através dos espectros de frequências e normalizadas em relação ao peso das pessoas em cada teste. Isso foi realizado só para o caso da situação 2 que permite analisar um intervalo de tempo maior com todas as pessoas em atividade durante o teste e oferece resultados com maior precisão. Esses resultados são apresentados na Fig. 14, onde se pode observar que existe uma tendência de diminuição das amplitudes de deslocamento para cada modo de vibração com o aumento do número de pessoas. No gráfico da Fig. 14(b) é observado que, para até três pessoas sobre a passarela, o primeiro modo de vibração e a frequência do caminhar apresentam aproximadamente as mesmas amplitudes, mas, a partir deste ponto, as maiores amplitudes de deslocamento estão associadas à frequência do caminhar. O segundo harmônico da força de excitação também apresenta uma contribuição importante para a resposta da estrutura. Quanto às acelerações, o modo 2 manteve-se como o mais relevante em todos os testes. Esse efeito será analisado com maior profundidade através de simulação numérica.

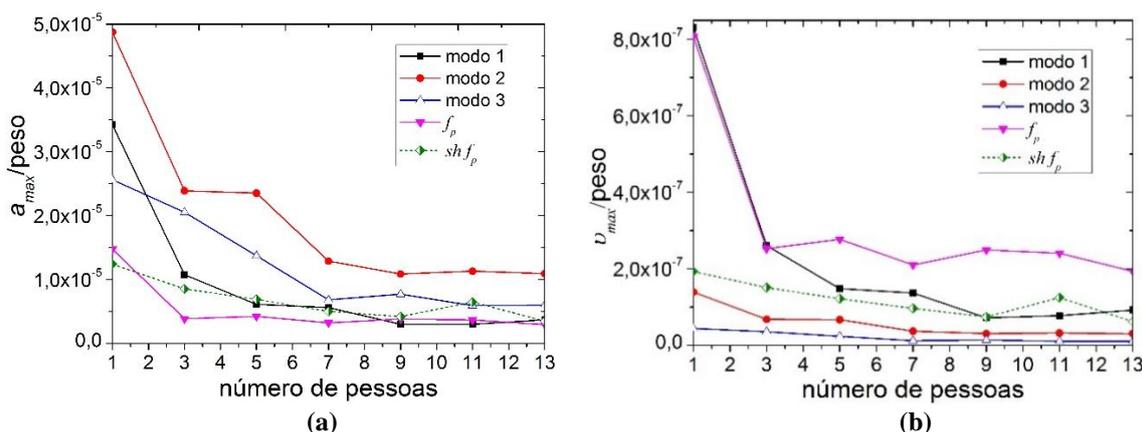


Figura 14: Amplitudes experimentais máximas normalizadas em relação ao peso total das pessoas participantes em cada teste vs. número de pessoas: (a) Acelerações (a_{max}); (b) Deslocamento (v_{max}); f_p : frequência de excitação, $sh f_p$: super harmônico da frequência de excitação

Segundo as normas e recomendações de projeto de passarelas sob ação do pedestre, a força dinâmica exercida pelas pessoas pode ser representada por um sinal harmônico através de alguns poucos termos de uma série de Fourier, como visto no item 2.3. Esta ideia baseia-se no fato de que praticamente quando um indivíduo retira o pé de uma passada já existe outro pisando no mesmo local, permitindo assim que a força resultante seja um somatório das passadas de diversas pessoas. No entanto, quando tem poucas pessoas andando sobre a estrutura esse somatório não é o mais adequado. Por exemplo, quando só um indivíduo encontra-se atravessando a passarela, o carregamento tende a ser como uma força de impacto associada a cada passada distribuída ao longo do tempo e do espaço. Desta forma, o somatório é válido quando a densidade de pessoas na passarela é bastante elevada. Esta questão será analisada mais profundamente através de simulação numérica.

4 MODELO NUMÉRICO

4.1 Análise modal da estrutura

Primeiramente foi desenvolvido um modelo numérico para a análise de vibração livre da passarela a fim de estimar os seus parâmetros modais. A estrutura foi modelada em elementos finitos em um programa desenvolvido na COPPE/UFRJ por SARAIVA *et al.* (2015), na ferramenta MATLAB. Dessa forma, a estrutura empregada para os ensaios experimentais foi modelada usando um modelo simplificado composto de 62 elementos de pórtico espacial e 39 nós, considerando apoios simples nos quatro nós das extremidades. Na Fig. 15 é mostrado um esquema simples do modelo discretizado adotado.

Para o cálculo das propriedades mecânicas, a estrutura foi considerada como uma seção mista de aço e concreto e foram usadas as propriedades equivalentes da seção homogeneizada, tanto em relação ao plano x-y, quanto em relação ao z-y (Vega *et al.*, 2015).

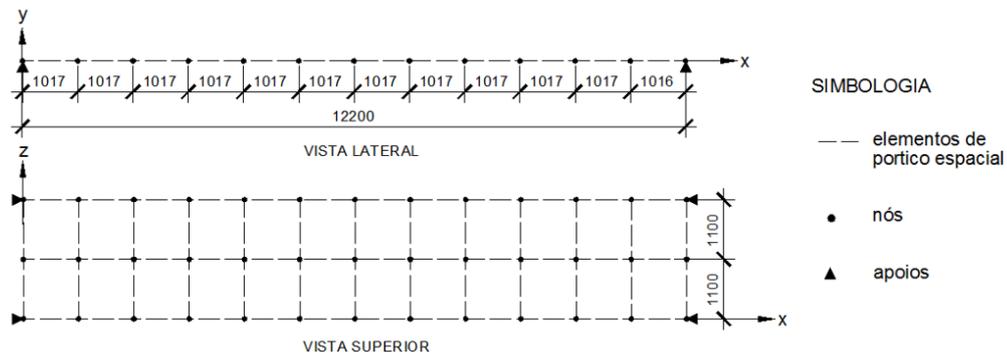


Figura 15: Modelo simplificado da estrutura adotado na análise de vibração livre (dimensões em mm)

As formas modais e frequências naturais obtidas da modelagem são mostradas na Fig. 16, os modos foram visualizados através de um programa para visualização de dados desenvolvido também no LABEST, COPPE-UFRJ. Conforme pode ser vista nesta figura os 1º e 3º modos são associados à flexão, enquanto os 2º e 4º aos modos de torção.

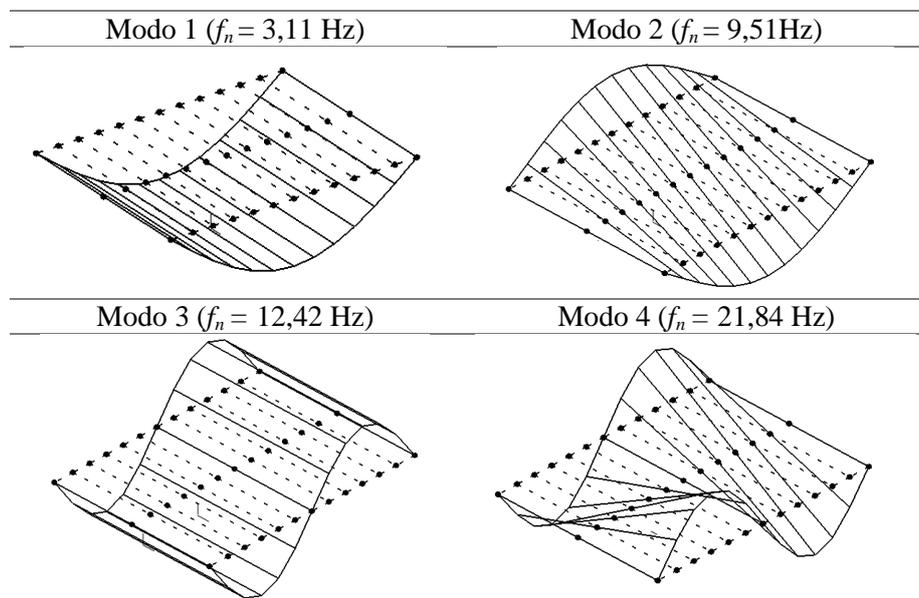


Figura 16: Modos de vibração e frequências naturais associadas obtidas numericamente

O modelo numérico pode ser considerado suficientemente ajustado aos resultados experimentais, já que este consegue representar adequadamente a estrutura. Para melhor apreciação do leitor na Tabela 6 é mostrada a comparação numérica-experimental das frequências naturais.

Tabela 6: Valores das frequências naturais obtidos numericamente e experimentalmente

	Frequências naturais (Hz)			
	Modo 1(f)	Modo 2(t)	Modo 3(f)	Modo 4(t)
Experimentais	3,15±0,01	9,43±0,01	12,06±0,00	22,63±0,00
Numéricas	3,11	9,51	12,42	21,84

4.1 Metodologia para integração no tempo

A partir das frequências naturais e das formas modais obtidas pode-se obter a equação de movimento da dinâmica (Clough & Penzien, 1995):

$$\phi^T \mathbf{m} \phi \ddot{\mathbf{y}}(t) + \phi^T \mathbf{c} \phi \dot{\mathbf{y}}(t) + \phi^T \mathbf{k} \phi \mathbf{y}(t) = \phi^T \mathbf{p}(t) \quad (2)$$

onde \mathbf{m} , \mathbf{c} e \mathbf{k} representam, respectivamente, as matrizes de massa, amortecimento e rigidez e $\ddot{\mathbf{y}}$, $\dot{\mathbf{y}}$ e \mathbf{y} os vetores de amplitudes de aceleração, velocidade e deslocamento na direção da força aplicada $\mathbf{p}(t)$.

A ortogonalidade das formas modais permite simplificar as equações de um sistema de n graus de liberdade dadas por (2).

Sendo ϕ a matriz de formas modais de um sistema qualquer $n \times n$ normalizada em relação a matriz de massa, e ϕ^T a sua trasposta, tem-se que:

$$\phi^T \mathbf{m} \phi = \mathbf{I} \quad (3)$$

$$\phi^T \mathbf{c} \phi = 2\varepsilon_n w_n \quad (4)$$

$$\phi^T \mathbf{k} \phi = w_n^2 \phi^T \mathbf{m} \phi \quad (5)$$

Introduzindo as equações (3), (4) e (5) na equação geral do sistema para cada modo de vibração i , desde $i=1$ até $i=n$, esta pode ser escrita de forma alternativa por:

$$\ddot{y}_i(t) + 2\varepsilon_i w_i \dot{y}_i(t) + w_i^2 y_i(t) = \phi_i^T \mathbf{p}(t) \quad (6)$$

Os valores da taxa de amortecimento (ε_i) da equação 6 foram obtidos experimentalmente dos testes com pessoas paradas (Vega *et al.*, 2015) e no caso das frequências naturais (w_i) os valores provenientes da análise da vibração livre.

Sendo $\mathbf{p}(t)$ a força medida experimentalmente no centro das placas e ϕ_i^T o valor do autovetor no meio da placa, integrando a equação (6) pelo método de Runge Kutta, obtem-se as amplitudes modais de aceleração, velocidade e deslocamento nas posições dos acelerômetros, para os quatro primeiros modos de vibração analisados, e consequentemente, os vetores de aceleração, velocidade e deslocamento.

Os carregamentos medidos experimentalmente foram processados e filtrados antes de serem utilizados na integração, usando um filtro média móvel. Isto se fez necessário já que estes sinais apresentavam um certo nível de ruído.

4.2 Correlação numérica-experimental

O modelo foi testado primeiramente com um arquivo de força de uma pessoa pulando, e posteriormente foram correlacionadas cada uma das situações com pessoas andando, tanto para os casos da situação 1 (atravessando a passarela) como da situação 2 (andando em círculos). A estimativa dos possíveis valores da taxa de amortecimento para pessoas andando foi realizada através da comparação dos espectros de frequência. O intervalo de integração utilizado foi de 0,001 segundos e o tempo de análise de 40 segundos.

Na Fig. 17 é mostrada a correlação entre os espectros experimentais e os obtidos da integração numérica para uma pessoa pulando e uma pessoa andando. As taxas de amortecimento estimadas para pessoas andando são mostradas na Fig. 18, em comparação com as de pessoas paradas já obtidas em estudo anterior por Vega *et al.* (2015).

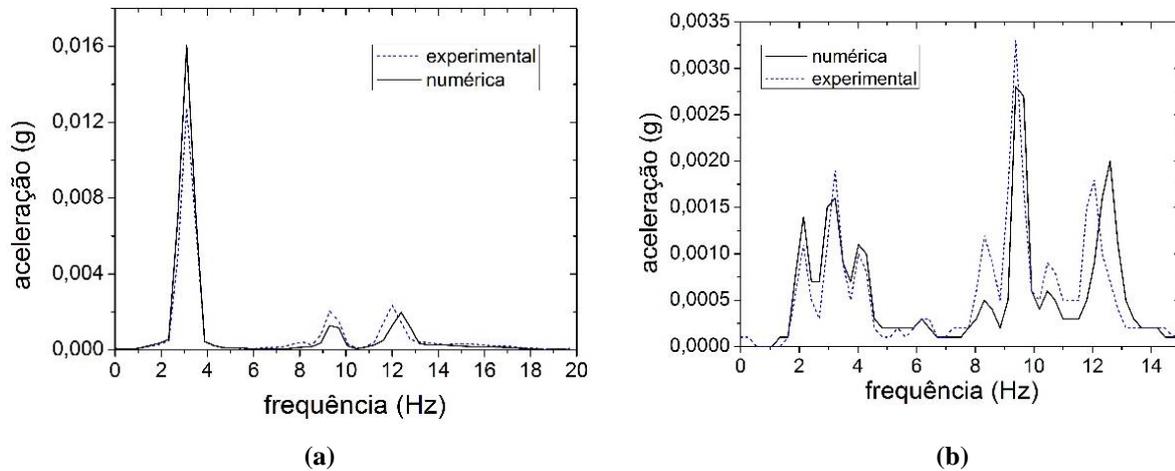


Figura 17: Correlação numérica-experimental (a) Uma pessoa pulando (b) Uma pessoa andando na situação 2

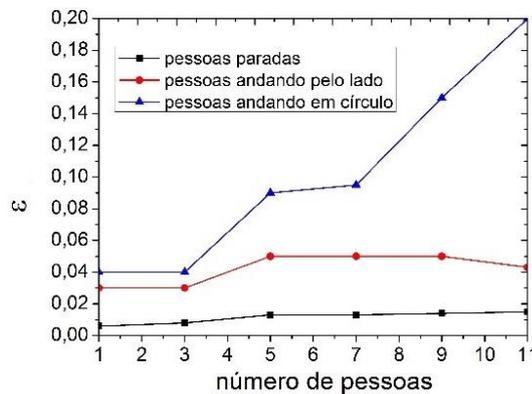


Figura 18: Comparação das taxas de amortecimento identificadas experimentalmente (pessoas paradas) com as estimadas numericamente (pessoas andando)

Nos gráficos da Fig. 17 verifica-se que, o programa numérico está suficientemente ajustado, já que os resultados obtidos numericamente estão bem similares às respostas medidas pelos acelerômetros durante os testes. Foram comparadas só as três primeiras frequências do espectro, já que o 4^o modo apresentou amplitudes muito baixas no modelo numérico. A pequena defasagem observada nos picos do espectro está dada pelas diferenças entre as frequências experimentais e as obtidas numericamente através da análise de vibração livre, usadas na integração.

Na Fig. 18 observa-se que os valores do amortecimento estimados numericamente mostram uma tendência de aumento quando as pessoas estão andando em relação à quando estão paradas. No caso das pessoas andando em círculos, observam-se valores de amortecimento maiores do que os obtidos quando as pessoas estão entrando e saindo da passarela. Este efeito pode ser explicado pelo fato de que as pessoas na situação 2 permanecem mais tempo sobre a passarela, o que pode levar a que a sua influência no amortecimento da estrutura seja maior.

4.3 Estudo paramétrico de situações com pessoas andando e análise de resultados

O modelo numérico desenvolvido se mostrou bem ajustado aos resultados experimentais, porém observou-se que para 13 pessoas andando sobre a estrutura os quatro primeiros modos de vibração continuaram sendo excitados. Para tentar entender melhor o comportamento da estrutura com uma maior densidade de pessoas, simularam-se numericamente carregamentos humanos de diferentes quantidades de pessoas.

Para gerar a função de carga humana implementou-se no programa numérico uma rotina que permite criar uma matriz de carga similar às matrizes de dados experimentais que descrevem as forças nas placas. Para isso primeiramente foram selecionadas, dos testes experimentais, as diferentes funções de força e normalizadas em relação ao peso do indivíduo, obtendo dessa forma funções padronizadas dos passos das pessoas. Dessas funções foi selecionado um passo e introduzido no programa, através do qual se fez possível realizar modificações, tais como esticar ou encurtar o sinal do passo, variar o tempo de superposição (tempo em que os dois pés encontram-se exercendo força sobre a estrutura) e variar o peso do indivíduo, gerando assim a função de força desejada. Mantendo esse passo fixo foram geradas as matrizes de força que descrevem o carregamento do indivíduo ao longo do tempo, baseado no formato dos arquivos de força experimentais.

Com essa implementação, realizaram-se as análises posteriores, usando carregamentos de pessoas andando em círculos, de igual forma que nos testes experimentais. Adotou-se um passo fixo, correspondente ao de um indivíduo de 70 kg de peso e 1,70 m de altura aproximadamente, baseado nas formas e parâmetros dos passos exercidos pelos indivíduos durante os testes.

Definiu-se uma situação teórica de pessoas entrando uma atrás da outra a cada 0,5 segundos e andando em círculos. Para uma análise mais precisa durante a simulação, duplicou-se o número de voltas com relação ao experimental, para aumentar o tempo de duração do sinal. Foram simulados carregamentos para 1, 5, 10, 20, 30, 40 e 50 pessoas andando sobre a estrutura.

Além dos carregamentos mencionados, simulou-se também uma situação de fluxo contínuo de pessoas andando durante 100 segundos. Esse número elevado de pessoas, apesar de representar uma situação de multidão bastante pouco provável na realidade, serve para mostrar o comportamento da estrutura quando ocupada por multidões.

Na Fig. 19 é mostrada a carga aplicada em uma placa por uma e 50 pessoas andando, criada numericamente.

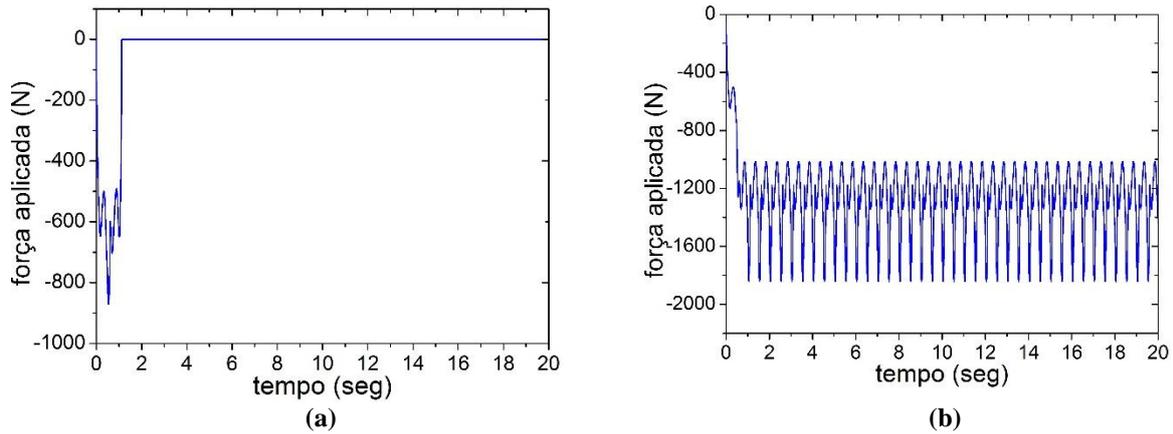


Figura 19: Carga exercida por pedestres simulada numericamente: (a) uma pessoa; (b) 50 pessoas

Pode ser observado na Fig. 19 acima que o sinal é mais similar com um sinal harmônico para o caso de 50 pessoas, ou seja, para grandes densidades de pessoas. No caso de uma pessoa o sinal é do tipo força de impacto ao longo do tempo.

Na Fig. 20(a) são comparados os espectros de frequência da simulação numérica de uma pessoa com 50 pessoas andando, e na Fig. 20(b) de uma pessoa com a situação de fluxo contínuo.

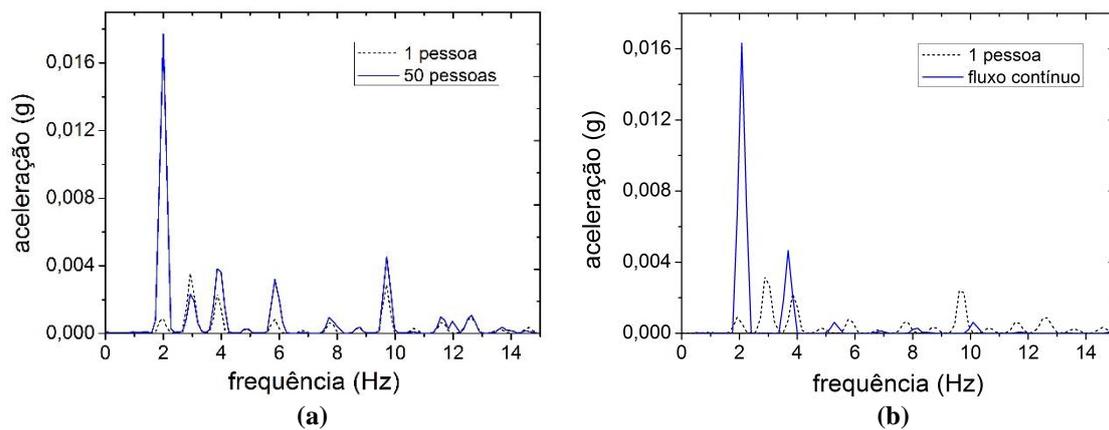


Figura 20: Comparação dos espectros de frequências obtidos da simulação numérica para Uma pessoa com: (a) 50 pessoas; (b) Fluxo contínuo de pessoas

Observando os espectros da Fig. 20, verifica-se que à medida que aumenta o número de pessoas andando sobre a estrutura as frequências naturais deixam de ser excitadas e a frequência fundamental de vibração passa a ser a frequência do caminhar, ou seja, as vibrações passam a ser do tipo forçadas com frequência igual à frequência do carregamento de excitação, como apresentado pela maioria das normas de projeto. Esse efeito é bem mais relevante para o caso de fluxo contínuo de pessoas, onde os picos do espectro correspondentes às frequências naturais praticamente desapareceram.

Para interpretar melhor o efeito explicado anteriormente nas Fig. 21(a) e (b) são mostradas, respectivamente, as amplitudes máximas de acelerações e deslocamentos para as situações com até 40 pessoas, normalizadas em relação ao peso total das pessoas para cada

caso simulado. Essas amplitudes foram obtidas através do espectro de resposta considerando um sinal de 60 segundos com 20 amostras.

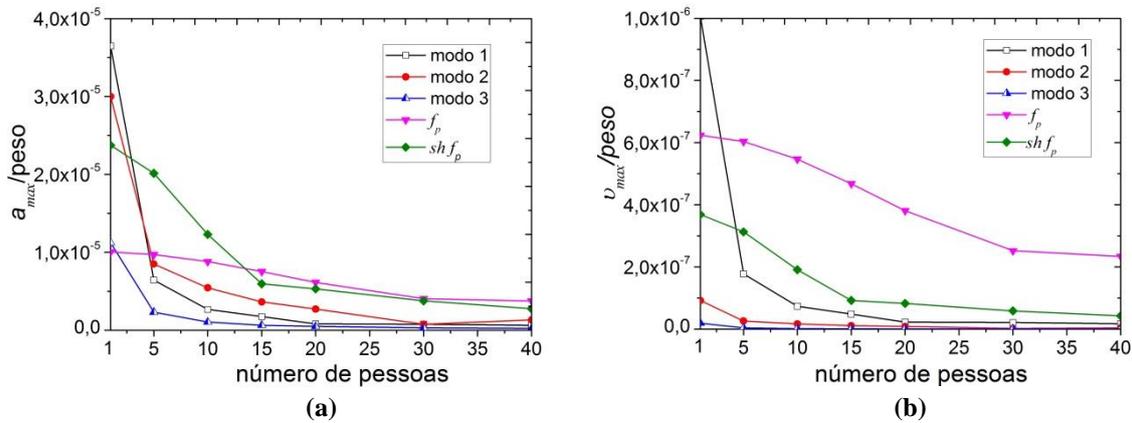


Figura 21: Amplitudes numéricas máximas normalizadas em relação ao peso total das pessoas de cada simulação vs. número de pessoas (a) Acelerações (a_{max}); (b) Deslocamentos (v_{max}); f_p : frequência de excitação, $sh f_p$: super harmônico da frequência de excitação

Na Fig. 21(a), pode ser observado que o segundo modo e o primeiro super-harmônico da força de excitação são também relevantes para as vibrações, superando inclusive ao primeiro modo conforme cresce o número de pessoas. Esse resultado é corroborado com os testes experimentais, onde o segundo modo de vibração da estrutura apresentou as maiores acelerações.

Por outro lado, na Fig. 21(b) observa-se que para poucas pessoas, em termos de deslocamento, as amplitudes associadas à frequência natural do primeiro modo de vibração são preponderantes. Já a partir de 5 pessoas, as amplitudes associadas à frequência de excitação e ao primeiro super-harmônico passam a ser maiores.

5 COMENTÁRIOS FINAIS

As análises numéricas realizadas mostraram que a densidade de pessoas andando sobre a estrutura influencia a resposta dinâmica, podendo-se chegar às seguintes observações:

Para passarelas onde a densidade de pessoas circulantes é baixa é conveniente focar a atenção durante o projeto dinâmico nas primeiras frequências naturais, já que a estrutura deverá ser mais excitada nessas frequências. Nos casos de passarelas com altas densidades de pessoas circulantes a frequência de excitação começa a assumir uma maior importância, já que tanto os deslocamentos como as acelerações da estrutura, nessa frequência apresentam as maiores amplitudes.

A simplificação proposta pela maioria das normas de considerar a carga de excitação como uma carga harmônica aproximada por uma série de Fourier próxima ao primeiro modo de vibração parece, segundo os resultados obtidos, só fazer sentido quando se tem uma elevada densidade de pessoas, mesmo assim pode não cobrir todas as situações de projeto. Os testes realizados na passarela de estudo mostraram que, com uma densidade de pessoas menor, como mais comumente acontece na prática, as amplitudes de respostas estão

associadas às frequências naturais da estrutura, sendo que somente quando a densidade aumenta as amplitudes associadas as frequências do carregamento passa a ser predominante na resposta;

Apesar de serem mais importantes para o projeto o primeiro e o segundo harmônico da frequência de excitação por produzirem os maiores deslocamentos, as acelerações devido à frequência natural do 2^o modo foram bastante significativas, o que pode comprometer as exigências de serviço em questão de conforto de usuários. Desta forma, os resultados obtidos apontam na necessidade de que os projetos deste tipo de estrutura sejam realizados de maneira mais elaborada, uma vez que as simplificações apresentadas nas normas podem estar conduzindo a valores pouco realistas.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bucher, H. F., 2001, *Metodologias para a aplicação de técnicas tempo-frequência em dinâmica estrutural e ao método dos elementos de contorno*. Tese* de D.Sc., COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Clough, W., & Penzien, J., 1995, *Dynamics of structures*. 3 ed. Berkeley, CA, USA: Computers & Structures, Inc.

Dallard, P., Fitzpatrick, T., & Flint, A., *et al.*, 2001, “London Millennium Bridge: Pedestrian-Induced Lateral Vibration”, *Journal of Bridge Engineering*, ASCE, vol.6, n.6, pp. 412-417.

Faisca, R.G., 2003, *Caracterização de cargas dinâmicas geradas por atividades humanas*. Tese* de D.Sc., COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.

Ingólfsson, E.T., Georgakis, C.T., & Jönsson, J., 2012, “Pedestrian-induced lateral vibrations of footbridges: A literature review”, *Engineering Structures*, vol.45 (Dec), pp. 21-52.

Pfiel, W., & Pfiel, M., 2008. *Estruturas de aço-Dimensionamento pratico*, 8 ed., LTC.

Racic, V., Pavic, A., & Brownjohn, J. M. W., 2009. “Experimental identification and analytical modelling of human walking forces: Lecture Review”, *Journal of Sound and Vibration*, vol. 326, pp. 1-49.

Roitman, N., Faísca, R.G., & Magluta, C., 2002. “Comparação Numérica-experimental da Resposta de uma Estrutura Submetida ao Carregamento de Multidão”. In: *XX Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural*. TRB0248. Brasília DF, Brasil.

Sachse, R., 2002, *The influence of human occupants on the dynamic properties of slender structures*. Ph.D. dissertation, University of Sheffield, UK.

Sachse, R., Pavic, A., & Reynolds, P., 2004. “Parametric study of modal properties of damped two-degree-of-freedom crowd–structure dynamic systems”, *Journal of Sound and Vibration*, vol. 274, pp. 461–480.

Sanderson, K., 2008, “Millennium Bridge wobble explained”, *Nature* [0028-0836].

Sanhaci, C., & Kasperski M., 2005. “Random loads induced by walking”. In: *Proceedings 6th International Conference on Structural Dynamics EURODYN’05*. Paris, France.

Saraiva, L. P., Magluta, C., & Roitman, N., 2015, Análise dinâmica de edifícios submetidos à excitação de base In: *Proceedings of the XXXVI Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering*, Ney Augusto Dumont (Editor), ABMEC, Rio de Janeiro, RJ, Brazil, Nov. 22-25.

Santos, C. M., 2011. *Avaliação do comportamento dinâmico de uma passarela submetida a carregamentos induzidos por pedestres*. Tese* de M.Sc., COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Tilly, G., 2011, “Dynamic behaviour and collapses of early suspension bridges”. In: *Proceedings of the ICE - Bridge Engineering* [1478-4637], vol.164, pág:75 -80.

Toso, M.A., & Gomes, H.M., 2015, “Pedestrian-structure dynamic interaction based in kinetic and kinematic parameters”, *The 22nd International Congress on Sound and Vibration*. Florence, Italy, 12-16, Jul.

Vega, D., Magluta, C., & Roitman, N., 2015, “Análise de cargas humanas e a sua interação com a estrutura” In: *Proceedings of the XXXVI Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering*, Ney Augusto Dumont (Editor), ABMEC, Rio de Janeiro, RJ, Brazil, Nov. 22-25.

Vega, D. R., 2016, *Análise do comportamento de passarela sob a ação de cargas humanas*. Dissertação de M.Sc., COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.

Venuti, F., & Bruno, L., 2009, “Crowd-structure interaction lively footbridges under synchronous lateral excitation: a literature review”, *Physics of Life Reviews*, vol.6, pp. 176-206.

Wheeler, J., 1982, Prediction and control of pedestrian induced vibration in footbridges. *Journal of the Structural Division*, ASCE, 2045-65.

Willford, M., 2002, “Dynamics actions and reactions of pedestrians”. In: *Proceedings of the International Conference on the Design and Dynamic Behavior of Footbridges*, pp. 66–73, Paris, France, Nov.

Živanović, S., Pavić, A., & Reynolds, P., 2005, “Vibration serviceability of footbridges under human-induced excitation: a literature review”, *Journal of Sound and Vibration*, vol. 279, n. 1-2, pp. 1-74.

Živanović, S., Pavić, A., & Reynolds, P., *et al.*, 2005 “Dynamic analysis of Lively footbridges under everyday pedestrian traffic”. In: *Proceedings 6th International Conference on Structural Dynamics EUROLYN'05*, Paris, France.