



ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE PASSARELA SOB A AÇÃO DE CARGAS HUMANAS

Dianelys Vega Ruiz

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadores: Carlos Magluta

Ney Roitman

Rio de Janeiro

Março de 2016

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE PASSARELA SOB A AÇÃO DE
CARGAS HUMANAS

Dianelys Vega Ruiz

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Examinada por:

Prof. Carlos Magluta, D.Sc.

Prof. Ney Roitman, D.Sc.

Prof. Eliane Maria Lopes Carvalho, D.Sc.

Prof. Paulo Batista Gonçalves, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MARÇO DE 2016

Ruiz, Dianelys Vega

Análise do comportamento de passarela sob a ação de cargas humanas/ Dianelys Vega Ruiz. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2016.

XVIII, 70 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Carlos Magluta

Ney Roitman

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2016.

Referências Bibliográficas: p. 63-68.

1. Cargas humanas. 2. Frequências naturais 3. Vibrações. I Magluta, Carlos, *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título

*A todos aqueles que se esforçam pelo
conhecimento.*

Agradecimentos

A minha família, pelo amor e apoio incondicional, principalmente a minha mãe Marlene de la Caridad Ruiz Reyes e ao meu pai Angel Luis Vega Hernández, sem deixar de agradecer ao meu padrasto e a minha madrasta. Não conseguiria deixar de mencionar a todos os meus tios, especialmente ao meu tio Lázaro, pela ajuda ao vir para o Brasil.

Aos meus orientadores Ney Roitman e Carlos Magluta, pela oportunidade de trabalhar com eles, pelos valiosos conhecimentos transmitidos, pela orientação e por confiarem na conclusão desta pesquisa.

A todos os amigos do meu país e colegas de trabalho, aqueles que apesar das distâncias sempre continuaram acompanhando e se interessando pelo meu desenvolvimento profissional e pessoal, e especialmente a minha querida amiga sempre presente Liuski Roger.

A todas as pessoas e amigos que me ajudaram e orientaram durante a minha viagem e chegada ao Brasil, bem como durante o processo de matrícula e inscrição no curso.

A todos os meus colegas do mestrado, futuros mestres, que me acompanharam durante o curso, pelas experiências e intercâmbio de conhecimentos, particularmente à minha amiga Melanie, pela convivência e amizade.

Aos alunos da aula de Análise Experimental por colaborarem com os ensaios e, aos restantes amigos e colegas que também participaram voluntariamente, entre eles, Elvis, Mariana, Elton, Yassin, Roymel e especialmente a Laila Saraiva Pereira, pela imensurável disposição e ajuda com questões referentes à dissertação.

Aos meus admiráveis amigos Fernando, Sandra e Juan, pela inolvidável convivência juntos, pelos inúmeros momentos de diversão e por me acolherem sempre que precisei de ajuda nas situações difíceis.

Não poderia deixar de nomear também aos meus amigos Gonzalo Andrés e Luiz, também pela convivência juntos, ajuda com questões da pesquisa e os bons momentos compartilhados.

Ao meu Joan O'Connor, pelo amor, ajuda e recomendações durante a realização da dissertação, bem como às extraordinárias pessoas que conheci através dele como Adilson e família, pela sua hospitalidade e carinho.

Aos técnicos do LABEST, Flávio, Gilberto e Seu Elder, pelo trabalho técnico e colaboração.

À COPPE, pela excelente formação acadêmica, na qual indiscutivelmente contribuíram os professores do PEC através de cada matéria recebida durante o curso, que se tornaram um desafio, mas também uma experiência extraordinária de crescimento intelectual e profissional.

Ao programa PEC-PG e ao CNPq, pela concessão de apoio financeiro.

Finalmente, a todos aqueles que de uma forma ou outra contribuíram na realização desta pesquisa e que possa ter esquecido de mencionar.

*“O desejo profundo da humanidade pelo conhecimento é justificativo suficiente
para nossa busca contínua”*

Stephen Hawking

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE PASSARELA SOB A AÇÃO DE CARGAS HUMANAS

Dianelys Vega Ruiz

Março/2016

Orientadores: Carlos Magluta
Ney Roitman

Programa: Engenharia Civil

Na atualidade, devido aos avanços técnico-científicos, estruturas cada vez mais esbeltas e flexíveis têm sido concebidas, podendo provocar uma redução nas suas frequências naturais. No caso específico das passarelas, o risco de ressonância com o carregamento humano tende a aumentar já que as frequências de excitação desse tipo de carregamento podem se aproximar das frequências naturais dessas estruturas.

O objetivo deste trabalho é a abordagem através de modelo numérico do comportamento dinâmico de uma passarela sob cargas induzidas por pedestres, validado através de medições experimentais, bem como a análise da variação das propriedades modais da estrutura devido à presença de pessoas.

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. A partir dos resultados experimentais o modelo numérico é ajustado, permitindo analisar a resposta da estrutura sob ação de carregamentos induzidos por diferentes quantidades de pessoas.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

BEHAVIOUR ANALYSIS OF FOOTBRIDGE UNDER HUMAN LOAD

Dianelys Vega Ruiz

March/2016

Advisors: Carlos Magluta

Ney Roitman

Department: Civil Engineering

In actuality, due to technical and scientific advances, more slender and flexible structures have been constructed, which could cause a reduction in their natural frequencies. In the specific case of footbridges, the risk of resonance with the human load tends to increase as the excitation frequency of this type of loading can approach the natural frequency of these structures.

The objective of this work is to approach through analytical and numerical model the dynamic behavior of a footbridge under loads induced by pedestrian, validated by experimental measurements, and study changes in structural modal properties due to presence of people.

Experimental tests were conducted on a steel-concrete platform which was instrumented with accelerometers for measuring the structural response and loading platforms for measuring the excitation produced by pedestrians. From the experimental results, the numerical model is adjusted allowing to analyze the response of the structure under the action of loads induced by different people densities.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	V
SUMÁRIO	X
LISTA DE FIGURAS	XII
LISTA DE TABELAS	XV
SÍMBOLOS	XVI
Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Histórico	2
1.3 Objetivos	4
1.4 Conteúdo do trabalho	5
Revisão Bibliográfica	7
2.1 Introdução	7
2.2 Conceitos Básicos e Terminologia	8
2.3 Caracterização da Força de Excitação	10
2.4 Modelos de Força de Excitação	16
2.5 Interação Pessoas-Estrutura	19
2.6 Normas de Projeto	23
Descrição da Estrutura e dos Testes Experimentais	25
3.1 Descrição da estrutura	25
3.2 Instrumentação	27
3.3 Realização de testes experimentais	30
3.3.1 Identificação da estrutura	31
3.3.2 Testes experimentais com pessoas paradas	33
3.3.3 Testes experimentais de pessoas andando	38

Modelagem Numérica e Correlação de Resultados	45
4.1 Modelagem numérica da estrutura	45
4.1.1 Análise das Situações com Pessoas Paradas	47
4.2 Metodologia para Obtenção das Respostas para Pessoas Andando	49
4.2.1 Correlação Experimental - Numérica para Pessoas Andando	50
4.2.2 Estudo Paramétrico de Situações com Pessoas Andando	54
Comentários finais	59
5.1 Recomendações para trabalhos futuros	62
Referências Bibliográficas	63
Espectros de resposta das situações simuladas de pessoas andando	69

Lista de Figuras

- 1.1 Passarelas afetadas pelas vibrações devido ao carregamento humano: (a) Millennium Footbridge em Londres, Inglaterra (**SANDERSON, 2008**); (b) Broughton Bridge após reconstrução em Greater Manchester, Inglaterra (**TILLY, 2011**); (c) Passarela de aço através do Main em Erlach; (d) Ponte Toda na cidade de Toda, Japão; (c,d: **INGÓLFSSON et al., 2012**)
- 2.1 Parâmetros espaciais da caminhada (adaptado de **RACIC et al., 2009**)
- 2.2 Formas típicas da força do passo nas direções: (a) vertical; (b) lateral (c) longitudinal (**ŽIVANOVIĆ et al., 2005**)
- 2.3 Funções típicas de força de corrida e caminhada (**ŽIVANOVIĆ et al., 2005**)
- 2.4 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**)
- 2.5 Instrumentação empregada por **KALA et al. (2010)** para medir a força exercida: (a) Durante a caminhada; (b) Por um pé durante um passo
- 2.6 Instrumentação empregada por **VAN NIMMEN et al. (2014)** na medição da força de reação do piso exercida por indivíduos andando, através de rastreamento de movimento inercial 3D: (a) Esteira instrumentada; (b) Três placas de força integradas na passarela (**VAN NIMMEN et al., 2014**)
- 2.7 Forças de reação do piso obtidas por **VAN NIMMEN et al. (2014)** para o pé esquerdo (linha contínua) e o pé direito (linha descontínua) e normalizadas em relação ao peso do indivíduo (G): (a) Registradas pelas placas de força; (b) Registradas pelas esteiras para uma velocidade do andar de 5 km/h dividida por um fator de 10 e filtradas com um filtro passa-baixa (**VAN NIMMEN et al., 2014**)
- 2.8 Modelo biodinâmico de um grau de liberdade
- 3.1 Estrutura utilizada para a realização de testes experimentais: (a) Vista em perspectiva; (b) Vista superior
- 3.2 Planta baixa e cortes da estrutura (cotas em mm)
- 3.3 Posição dos acelerômetros na estrutura (L: comprimento total da estrutura)

- 3.4 Detalhe de fixação do acelerômetro à estrutura
- 3.5 Instrumentação para medição da força aplicada: (a) Plataforma instrumentada para medição da força aplicada; (b) Anel instrumentado com extensômetros nas faces interna e externa (FAISCA, 2003)
- 3.6 Numeração das plataformas de carga instrumentadas sobre a estrutura
- 3.7 Equipamento usado para a aquisição e processamento de sinais durante os testes
- 3.8 Resultado do ajuste de uma das plataformas de carga
- 3.9 Sinais típicos de uma pessoa pulando: (a) Força na placa; (b) Resposta no tempo; (a) Espectro de frequências; (b) FRF entre os acelerômetros AC2 e AC5
- 3.10 Posições das pessoas sobre a estrutura durante os testes
- 3.11 Fotografias tomadas durante os testes experimentais de algumas das situações ensaiadas mostradas na Tabela 3.3 e Figura 3.10: (a) Caso 1 teste 2; (b) Caso 1 teste 3; (c) Caso 1 teste 5; (d) Caso 2 teste 1; (e) Caso 2 teste 2; (f) Caso 2 teste 3; (g) Caso 2 teste 4; (h) Caso 3 teste 3
- 3.12 Variação da taxa de amortecimento (ϵ) com o incremento do número de pessoas paradas sobre a estrutura: (a) Caso1; (b) Caso2; (c) Caso 3; (d) Caso resumo, juntando os casos 1 e 2
- 3.13 Variação da frequência natural (f_n) com o incremento do número de pessoas paradas sobre a estrutura: (a) Modo 1; (b) Modo 2; (c) Modo 3; (d) Modo 4
- 3.14 Movimento das pessoas andando durante os testes: (a) Situação 1; (b) Situação 2
- 3.15 Fotografias tomadas durante os testes de pessoas andando (referem-se às situações da Figura 3.14). Pessoas andando na situação 1: (a) 1 pessoa; (b) 3 pessoas; (c) 5 pessoas; (d) 11 pessoas. Pessoas andando na situação 2: (e) 3 pessoas; (f) 5 pessoas; (g) 7 pessoas; (h) 9 pessoas
- 3.16 Sinais típicos de resposta da estrutura com uma pessoa andando na situação 1 (a) Aceleração vs. tempo, (b) Espectro de frequências (f_p : frequência de excitação, $sh f_p$: super harmônico da frequência de excitação)
- 3.17 Sinais típicos de resposta da estrutura com uma pessoa andando na situação 2: (a) Aceleração vs. tempo; (b) Espectro de frequências; f_p : frequência de excitação, $sh f_p$: super harmônico da frequência de excitação

- 3.18** 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
- 3.19** Sinais de força nas placas 1, 3 e 5 produzidos pelo andar durante 20 segundos de teste (a) Uma pessoa; (b) 13 pessoas
- 4.1** Modelo simplificado da estrutura adotado na análise de vibração livre (dimensões em mm)
- 4.2** Formas modais obtidas numericamente
- 4.3** Comparação numérica-experimental da resposta da estrutura sob excitação de uma pessoa pulando: (a) No tempo; (b) Na frequência
- 4.4** Comparação numérica-experimental da resposta da estrutura sob ação das pessoas andando na situação 1. Para uma pessoa: (a) Espectro de frequências; (b) Resposta no tempo. Para 11 pessoas: Espectro de frequências; (d) Resposta no tempo
- 4.5** Comparação numérica-experimental da resposta da estrutura sob ação das pessoas andando na situação 2. Para uma pessoa: (a) Espectro de frequências; (b) Resposta no tempo. Para 11 pessoas: (c) Espectro de frequências; (d) Resposta no tempo
- 4.6** Comparação das taxas de amortecimento identificadas experimentalmente (pessoas paradas) com as obtidas numericamente (pessoas andando)
- 4.7** Comparação da resposta da simulação numérica de um indivíduo andando na situação 2 com a experimental: (a) No tempo; (b) Na frequência
- 4.8** Carga exercida por pedestres simulada numericamente: (a) uma pessoa; (b) 5 pessoas; (c) 10 pessoas; (d) 50 pessoas
- 4.9** Comparação dos espectros de frequências obtidos da simulação numérica. Uma pessoa com: (a) 50 pessoas; (b) Fluxo contínuo de pessoas
- 4.10** 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
- A.1** Comparação dos espectros de frequências obtidos da simulação numérica. Uma pessoa com: (a) 5 pessoas; (b) 10 pessoas; (c) 15 pessoas; (d) 20 pessoas; (e) 30 pessoas; (f) 40 pessoas

Lista de Tabelas

- 2.1 Valores médios e desvio padrão da frequência do caminhar (VENUTI & BRUNO, 2009) μ_{fpv} : valor médio da frequência do passo na direção vertical, σ_{fpv} : desvio padrão de μ_{fpv}
- 2.2 Parâmetros da caminhada estimados por TOSO & GOMES (2015)
- 2.3 Coeficientes dinâmicos segundo os diferentes autores (KALA *et al.*, 2010)
- 3.1 Características dos indivíduos participantes dos testes
- 3.2 Parâmetros Modais obtidos experimentalmente (f : modo de flexão, t : modo de torção)
- 3.3 Resumo dos testes realizados e a quantidade de indivíduos participantes
- 3.4 Valores de frequências naturais estimadas experimentalmente para a situação 1 (pessoas entrando e saindo)
- 3.5 Valores de frequências naturais estimadas experimentalmente para a situação 2 (pessoas andando em círculos)
- 4.1 Propriedades mecânicas da seção homogeneizada de aço-concreto usadas para o cálculo
- 4.2 Valores das frequências naturais obtidos numericamente e experimentalmente.
- 4.3 Comparação das frequências numéricas e experimentais das situações com pessoas paradas

Símbolos

A continuação, são listadas algumas das simbologias e notações empregadas durante o texto com os seus significados específicos para facilitar a compreensão do leitor.

A	Área da seção transversal
AC	Acelerômetros
a_{max}	Amplitude máxima de aceleração
c	Coefficiente de amortecimento
\mathbf{c}	Matriz de amortecimento
E	Modulo de elasticidade do aço
F_p	Força dinâmica produzida pelo andar na direção vertical
f	Frequência do caminhar
f_n	Frequência natural em Hz
f_p	Frequência do caminhar na direção vertical
f	Modo de flexão
G^*	Módulo de elasticidade transversal
G	Peso da pessoa
g	Aceleração da gravidade (9,81 m/s ²)
I_r	Momento de Inercia Polar
I_x	Constante de torção
I_y	Inercia em relação ao eixo y
I_z	Inercia em relação ao eixo z
\mathbf{I}	Matriz identidade
i, n	Contadores numéricos
k	Rigidez modal
\mathbf{k}	Matriz de rigidez
l_s	Comprimento do passo
L	Comprimento total da estrutura

m	Massa modal
\mathbf{m}	Matriz de massa
P_{Gnd}	Reação do piso causada pelo andar do pedestre (modelo biodinâmico)
\mathbf{p}	Vetor de força aplicada
$sh f_p$	Super harmônico da força produzida pelo andar
t	Tempo
\mathbf{t}	Modo de torção
u_t	Deslocamento do grau de liberdade referente a um ponto fixo de referência no modelo biodinâmico
\mathbf{v}	Vetor de deslocamento
$\dot{\mathbf{v}}$	Vetor de velocidade
$\ddot{\mathbf{v}}$	Vetor de aceleração
y	Amplitude modal de deslocamento
\dot{y}	Amplitude modal de velocidade
\ddot{y}	Amplitude modal de aceleração
\mathbf{y}	Vetor de amplitudes modais de deslocamento
$\dot{\mathbf{y}}$	Vetor de amplitudes modais de velocidade
$\ddot{\mathbf{y}}$	Vetor de amplitudes modais de aceleração
α	Coefficiente de Fourier do i -ésimo harmônico
α_{pd}	Ângulo de inclinação do pê direito com respeito ao eixo central do caminho
α_{pe}	Ângulo de inclinação do pê esquerdo com respeito ao eixo central do caminho
ε	Taxa de amortecimento
θ_i	Diferença de fase entre o primeiro e o j -ésimo harmônico da força analisado
μ_{fpv}	Valor meio da frequência do passo na direção vertical
v	Valor de deslocamento num instante de tempo t
v_{max}	Amplitude máxima de deslocamento
v_t	Velocidade do andar
\dot{v}	Valor de velocidade num instante de tempo t
\ddot{v}	Valor de aceleração num instante de tempo t
ρ	Densidade do material misto
σ_{fpv}	Desvio padrão da frequência do passo na direção vertical

ϕ	Autovetor de forma modal
w_n	Frequência natural em rad/s
w_s	Largura do passo

Introdução

A movimentação humana, através do ato de caminhar, de correr ou de pular, impõe esforços dinâmicos aos elementos estruturais que em certos casos podem comprometer não apenas a segurança estrutural, mas também o conforto dos usuários, já que os níveis de vibração podem ficar acima do desejável, daí a importância do estudo desse fenômeno.

1.1 Motivação

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

Dentro dos casos mais dramáticos relatados na história de colapso de estruturas devido a cargas dinâmicas induzidas por pessoas tem-se os colapsos da ponte Broughton, perto de Manchester, na Inglaterra em 1831 e a ponte de suspensão Angers através do 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, fechada logo após sua inauguração devido a vibrações laterais excessivas. Esta passarela (*vide* Figura 1.1 a) 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 é a passarela em arco de aço em Erlach, na Alemanha (Figura 1.1 c) durante a travessia de cerca de 300-400 pedestres também apresentou vibrações laterais elevas devido ao sincronismo do passo com a frequência natural da estrutura conforme relatado por INGÓLFSSON *et al.* (2012).

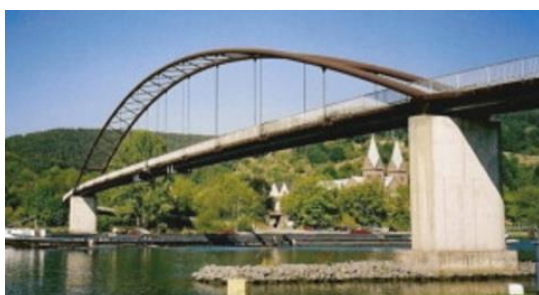
Este mesmo tipo de fenômeno foi constatado em uma ponte estaiada no Japão, em 1989 (NAKAMURA & KAWASAKI, 2006, INGÓLFSSON *et al.*, 2012). Essa ponte liga um estádio de corrida de lanchas a um terminal de ônibus e apresenta elevada densidade de público. Desta forma torna-se fundamental a avaliação mais aprofundada dos efeitos do carregamento gerados por pessoas ao utilizar este tipo de estrutura.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 1.1: Passarelas afetadas pelas vibrações devido ao carregamento humano: (a) Millennium Footbridge, em Londres, Inglaterra (SANDERSON, 2008); (b) Broughton Bridge após reconstrução, Greater Manchester, Inglaterra (TILLY, 2011); (c) Passarela de aço através do Main em Erlach; (d) Ponte Toda na cidade de Toda, Japão; (c,d: INGÓLFSSON *et al.*, 2012)

1.2 Histórico

Provavelmente, o relatório mais antigo de vibrações perceptíveis em passarelas foi feito por STEVENSON (1821). Além disso, o mesmo autor relatou vibrações graves decorrentes de regime de marcha sobre uma ponte, indicando muito cedo a necessidade de considerar cargas dinâmicas induzidas pelo homem no projeto da ponte.

TILDEN (1913) escreveu um excelente artigo na sua época dedicado principalmente para a carga de multidão. No entanto, ele também relatou algumas experiências em que, apesar de não ter dispositivos de medição precisos, tentou quantificar o efeito dinâmico de uma força gerada por uma única pessoa, devido às diferentes atividades.

Provavelmente, um dos primeiros trabalhos de laboratório foi conduzido por REIHER & MEISTER em 1931, sendo referenciado em uma série de artigos tal como ŽIVANOVIĆ *et al.*, (2005). Eles investigaram o efeito de vibrações harmônicas em dez pessoas com diferentes posturas (sentado ou em pé) em uma plataforma de teste conduzido por diferentes amplitudes, frequências e direção de vibrações.

Tentando investigar a percepção humana da vibração sobre pontes da estrada, WRIGHT & GREEN (1959) notaram que as vibrações reais em pontes são muito mais complexas do que as vibrações harmônicas geralmente usadas em investigações de percepção humana.

Uma das primeiras medições de forças induzidas por pedestres foi realizada por HARPER *et al.* (1961), com o objetivo de investigar a fricção e deslizamento de uma superfície de piso. A força horizontal e vertical foi medida a partir de um único passo, usando uma placa de força. A forma geral da história no tempo da força foi posteriormente investigada por outros autores, tais como GALBRAITH & BARTON (1970), BLANCHARD *et al.* (1977), OHLSON (1982), KERR (1998) entre outros. GALBRAITH & BARTON (1970) mediram a força vertical de um único passo em uma placa de alumínio, variando de caminhada lenta a corrida.

Após as pesquisas referentes às forças induzidas por um único passo foram realizadas medições de forças impostas no tempo de caminhada contínua, entre os trabalhos mais relevantes encontram-se os de EBRAHIMPOUR *et al.* (1996), BLANCHARD *et al.* (1977) e RAINER *et al.* (1988).

Para as medições da força BLANCHARD *et al.* (1977) utilizaram uma máquina de marcha, enquanto EBRAHIMPOUR *et al.* (1996) usaram uma plataforma instrumentada com várias plataformas de força. As histórias no tempo medidas foram periódicas com o período igual ao inverso da frequência do passo.

A maioria dos trabalhos anteriormente mencionados foram focados majoritariamente na medição das forças na direção vertical.

Perto do final da década de 1970, técnicas novas e mais confiáveis foram introduzidas para determinar experimentalmente as propriedades dinâmicas de passarelas. Em geral, o amortecimento pode ser obtido usando alguns métodos. Relacionadas com estruturas de engenharia civil encontram-se o método de decaimento logarítmico no domínio do tempo, após a excitação (impulsivo ou harmônica), e a função de resposta em frequência (FRF), método de ajuste no domínio da frequência, os quais são usados frequentemente.

1.3 Objetivos

O objetivo geral desta pesquisa é a caracterização de cargas humanas do tipo andar e sua interação com a estrutura. Isso foi realizado através de um modelo analítico-numérico do comportamento dinâmico de uma passarela sob cargas induzidas por pedestres andando validado através de medições experimentais.

Para atingir o objetivo geral se definem os seguintes objetivos específicos:

- Realizar um estudo do tema de cargas humanas em geral e a sua abordagem no projeto de passarelas de pedestres, assim como a apresentação das teorias mais recentes referentes aos modelos de interação homem-estrutura;
- Obter através de ensaios experimentais valores que permitam estimar a variação da taxa de amortecimento e frequências naturais da estrutura devido à presença de pessoas;
- Descrever matematicamente os modelos de carga humana baseado em resultados experimentais, bem como analisar a influência das pessoas andando na variação dos parâmetros modais;
- Desenvolver um modelo numérico para a análise dinâmica da estrutura sob a ação de pedestres e validá-lo através das medições experimentais;
- Confrontar as normas vigentes referentes ao projeto de estruturas sob cargas humanas com os resultados obtidos nesta pesquisa.

1.4 Conteúdo do trabalho

De forma geral, neste trabalho, como já mencionado anteriormente, realiza-se um estudo do comportamento de uma passarela sob ação de cargas dinâmicas induzidas por pedestres. É realizada uma revisão do estado da arte referente as cargas humanas e, as considerações das normas para o projeto de estruturas submetidas a esse carregamento. São apresentados juntamente alguns resultados alcançados em investigações de autores anteriores e, as teorias mais recentes na abordagem do fenômeno. Além disso, são mostrados os resultados obtidos de uma série de ensaios experimentais realizados nesta pesquisa, bem como as análises e resultados numéricos atingidos.

Assim, o conteúdo da tese foi agrupado por capítulos da seguinte forma:

O capítulo 1 introduz o tema de pesquisa, a motivação, citando fatos históricos que levaram ao estudo do fenômeno das vibrações em passarelas. Contém os objetivos e o conteúdo da pesquisa.

No capítulo 2 são apresentados os conceitos básicos referentes ao tema de cargas humanas, os trabalhos precedentes com relevantes resultados para o tema de pesquisa, os modelos de força mais comumente usados na literatura para a abordagem numérica do problema, o surgimento das tendências de análise através de modelos biodinâmicos e a revisão das normas nacionais e internacionais de projeto. Em paralelo, mostra-se uma revisão bibliográfica em cada aspecto anteriormente mencionado.

No capítulo 3 é apresentada a parte experimental desenvolvida na pesquisa, começando pela descrição da estrutura utilizada, a instrumentação empregada, a descrição dos testes realizados e dos indivíduos participantes, assim como a apresentação de resultados e as análises correspondentes.

No capítulo 4 é apresentado o modelo numérico da estrutura, a fundamentação teórica e as considerações para o cálculo e modelagem. A partir dos resultados apresentados no capítulo anterior, o modelo numérico é ajustado e implementado para a realização de simulações da estrutura sob carregamento humano. Seguidamente são mostradas as análises e discutidos os resultados numéricos.

Finalmente no capítulo 5 são expostos os comentários finais do trabalho, explicadas detalhadamente as interpretações dos resultados numéricos e experimentais, proporcionando uma elucidação das normas atuais de projeto. Também são dadas algumas recomendações para pesquisas futuras.

Revisão Bibliográfica

Neste capítulo é realizada a revisão do estado da arte referente ao tema da pesquisa. Após uma breve introdução são mencionados e explicados os conceitos básicos e a terminologia relacionada ao estudo de cargas induzidas por pedestres. São ilustrados os parâmetros fundamentais que influenciam a caminhada e os seus valores numéricos investigados por diversos autores. Em seguida, é discutido o tema da força exercida pelos pés ao pavimento, mostrando a sua função no tempo e os modelos existentes na literatura. São também mencionados resultados de testes experimentais realizados para medir essa força, assim como as técnicas utilizadas por alguns autores nas medições experimentais. Posteriormente é abordado o tema da interação pessoa-estrutura, onde são apresentados alguns aspectos desse tema. Finalmente é mostrado um resumo das normas de projeto existentes no âmbito internacional e nacional.

2.1 Introdução

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, conforme mostrado mais adiante na seção 2.5.

2.2 Conceitos Básicos 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 Figura 2.1, enquanto os parâmetros temporais normalmente usados são: a velocidade do caminhar e a frequência do passo (RACIC *et al.*, 2009).

Comprimento da passada é a distância entre duas posições sucessivas do mesmo pé na direção do destino durante um ciclo de marcha, comumente medida como a distância entre a posição do calcanhar de um pé até a próxima posição do calcanhar do mesmo pé. O comprimento do passo é a distância entre dois passos consecutivos, ou seja, da posição do calcanhar do pé direito até a posição do calcanhar do pé esquerdo e vice-versa (RACIC *et al.*, 2009). Numerosos autores têm estudado a sua descrição estatística, sendo um valor médio de 0,75 m reportado por KASPERSKI & SAHNACI (2005) e 0,768 m por WHEELER (1982) e RICCIARDELLI *et al.* (2007).

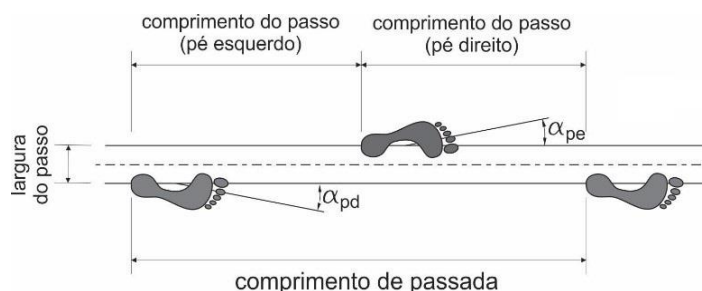


Figura 2.1: Parâmetros espaciais da caminhada (adaptado de RACIC *et al.*, 2009)

A frequência do passo é o número de passos dados em um certo intervalo de tempo, em engenharia civil normalmente expressa em Hertz (Hz). No caso da direção vertical deve ser considerado o número de vezes que os pés fazem contato com o piso, enquanto na lateral

seria o número de vezes que o mesmo pé faz contato, sendo assim o seu valor na direção lateral é igual à metade da direção vertical (RACIC *et al.*, 2009). Na Tabela 2.1 são resumidos os valores obtidos por diferentes autores para a frequência média na direção vertical (μ_{fpv}) e os respectivos desvios padrão (σ_{fpv}).

A descrição estatística confiável de frequências de passo foi dada pela primeira vez por MATSUMOTO *et al.* (1978) que investigou uma amostra de 505 pessoas. Da pesquisa concluíram que as frequências apresentaram uma distribuição normal com uma frequência de excitação média de 2,0 Hz e desvio padrão de 0,173 Hz.

A velocidade do caminhar se define como a taxa de movimento, normalmente expressa em metros por segundo e calculada pelo produto da frequência do passo pelo comprimento do passo (RACIC *et al.*, 2009). Diferentes autores concluíram que esta velocidade apresenta valores compreendidos na faixa 1,08-1,6 m/s (VENUTI & BRUNO, 2009).

Tabela 2.1: Valores médios e desvio padrão da frequência do caminhar (VENUTI & BRUNO, 2009)

μ_{fpv} : valor médio da frequência do passo na direção vertical, σ_{fpv} : desvio padrão de μ_{fpv}

Autores	μ_{fpv} (Hz)	σ_{fpv} (Hz)	Amostras (Quantidade de Pessoas)
BUTZ <i>et al.</i> (2008)	1,84	0,126	-
KERR & BISHOP (2001)	1,9	-	40
MATSUMOTO <i>et al.</i> (1978)	2	0,173	505
PACHI & JI (2005)	2,0-1,83	0,135-0,11	800
RICCIARDELI <i>et al.</i> (2009)	1,835	0,172	116
ANHACI & KARPESKI (2005)	1,82	0,12	251
ŽIVANOVIĆ <i>et al.</i> (2005)	1,87	0,186	1976

Em testes realizados por TOSO & GOMES (2015) com o objetivo de estimar os parâmetros que influenciam a caminhada, um pedestre foi colocado para andar em linha reta sobre uma plataforma de força, com ritmo normal. Os sinais foram registrados para passagens repetidas do pedestre (10 repetições). Para cada travessia do pedestre foram medidos os seguintes parâmetros: a velocidade de marcha (v_t), frequência de excitação (f_p), comprimento do passo (l_s) e a largura do passo (w_s), mostrados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2: Parâmetros da caminhada estimados por TOSO & GOMES (2015)

	v_t (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_t = 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 geralmente utilizadas para avaliar o padrão de forças humanas aplicadas e para ajustar modelos para a interação entre pedestres e estruturas. Estes dispositivos são projetados para medir as forças exercidas por um corpo em uma superfície externa, ou seja, a superfície de contato. Quando o pedestre caminha sobre uma plataforma de força, a força aplicada é detectada 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).

2.3 Caracterização da Força de Excitação

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. 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).

A Figura 2.2 ilustra as funções de força nas diferentes direções. Formas similares a da força vertical mostrada na Figura 2.2(a) foram confirmadas por vários pesquisadores, entre eles GALBRAITH & BARTON (1970), OHLSSON (1982) e KERR (1998).

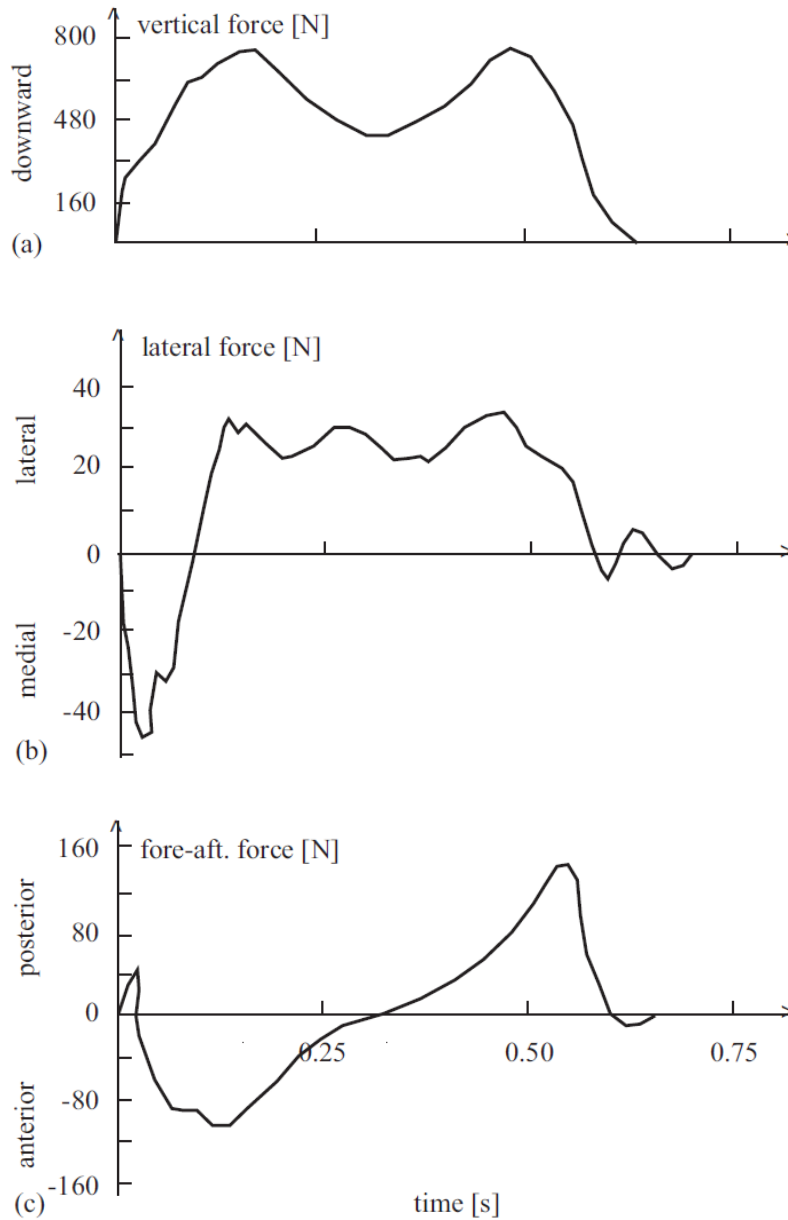


Figura 2.2: Formas típicas da força do passo nas direções: (a) vertical, (b) lateral e (c) longitudinal (ŽIVANOVIĆ *et al.*, 2005)¹

GALBRAITH & BARTON (1970) relataram que a forma da força devido à corrida diferia da forma devido à caminhada já que a referente à corrida, conforme ilustrado na Figura 2.3, apresenta somente um pico.

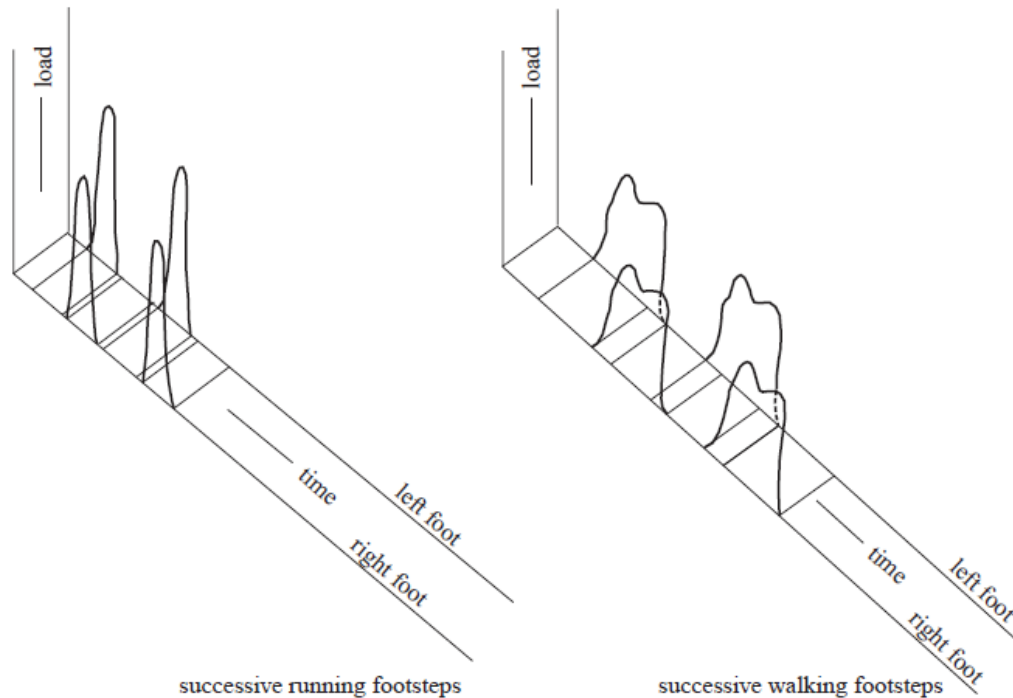


Figura 2.3: Funções típicas de força de corrida e caminhada (ŽIVANOVIĆ *et al.*, 2005)¹

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 Figura. 2.4 apresenta as forças verticais obtidas para diferentes tipos de atividades humanas estudadas por WHEELER (1982).

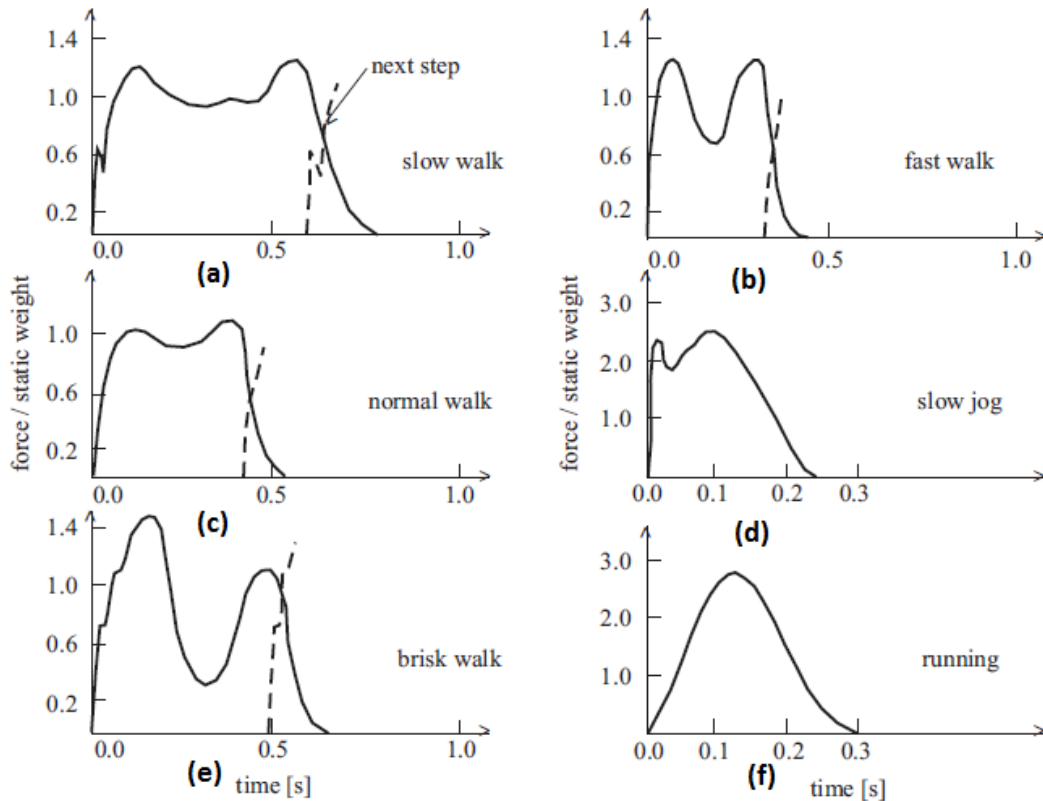


Figura 2.4: Funções de força vertical para diferentes tipos de atividades humanas normalizadas pelo peso da pessoa: (a) Caminhada lenta; (b) Caminhada rápida; (c) Caminhada normal; (d) Corrida lenta; (e) Caminhada ativa; (f) Corrida (ŽIVANOVIĆ *et al.*, 2005)¹

KALA *et al.* (2010) realizaram medições experimentais de forças verticais exercidas durante a caminhada. Nos experimentos foram colocados três sensores com uma base de 0,20 m de diâmetro sobre uma plataforma rígida. A distância entre os eixos dos medidores na direção do movimento foi igual a 0,90 m, a fim de medir as forças aplicadas durante toda a caminhada sobre a plataforma. A Figura 2.5(a) ilustra esses sensores.

Outro objetivo dos experimentos foi examinar a força de transmissão do passo a partir do calcanhar até a ponta do pé para o qual foram usadas outras posições para os sensores, vistas na Figura 2.5(b) (o primeiro medidor para o calcanhar, o segundo para a ponta e o terceiro para o calcanhar da segunda perna).

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

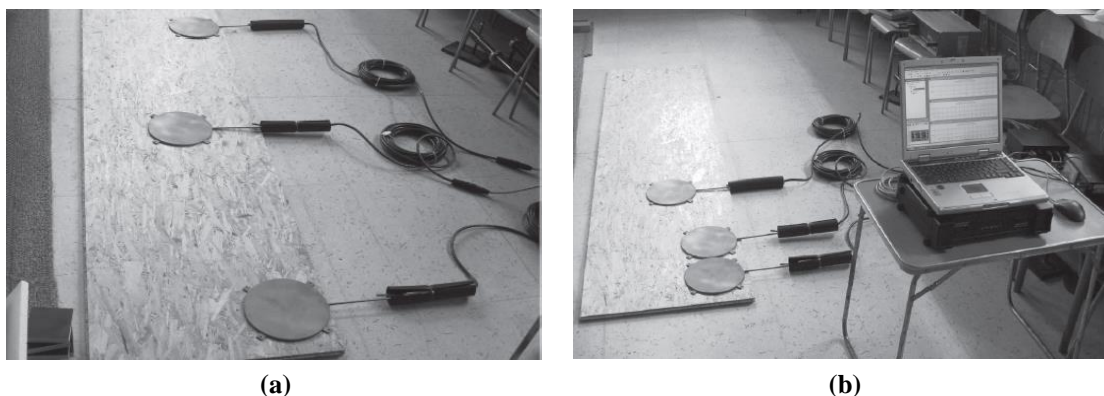


Figura 2.5: Instrumentação empregada por KALA *et al.* (2010) para medir a força exercida: (a) Durante a caminhada, (b) Por um pé durante um passo²

O trabalho realizado por KALA *et al.* (2010) teve como objetivo a medição da força produzida pelo andar para a verificação das conclusões de autores anteriores sobre a forma da força imposta pela caminhada, bem como verificar as abordagens das normas de projeto. No referente as vibrações na direção vertical, foi referido pelo autor que a maioria das normas estão baseadas na consideração de que as cargas induzidas por pedestres podem ser aproximadas por uma função periódica.

Os modelos de força tradicionais disponíveis na literatura, consideram uma força perfeitamente periódica e são caracterizados pelo peso do indivíduo e pela frequência de excitação. Esses modelos têm apresentado tradicionalmente uma boa aproximação das forças reais de caminhada.

VAN NIMMEN *et al.* (2014), analisaram o comportamento de pedestres andando in situ através de rastreamento de movimento inercial 3D. A técnica foi testada pela primeira vez em experimentos de laboratório com registros simultâneos das forças de reação do piso. O movimento registrado do pedestre permite a identificação de variações passo-a-passo, que são normalmente ignoradas na simulação das forças do caminhar. O rastreamento do movimento foi usado posteriormente para registrar o comportamento de caminhada de grupos de pedestres durante medições in situ em uma passarela.

Os experimentos de laboratório incluíram tanto esteira como andar de uma pessoa sobre o piso. As forças de reação do piso foram registradas por uma esteira instrumentada e

² Permission requested to: De Gruyter, Genthiner Straße 13, 10785 Berlin, Germany · (www.degruyter.com)

três placas de força AMTI³ que estavam integradas na passarela (VAN NIMMEN *et al.*, 2014). A instrumentação é mostrada na Figura 2.6 e os resultados obtidos das medições na Figura 2.7.

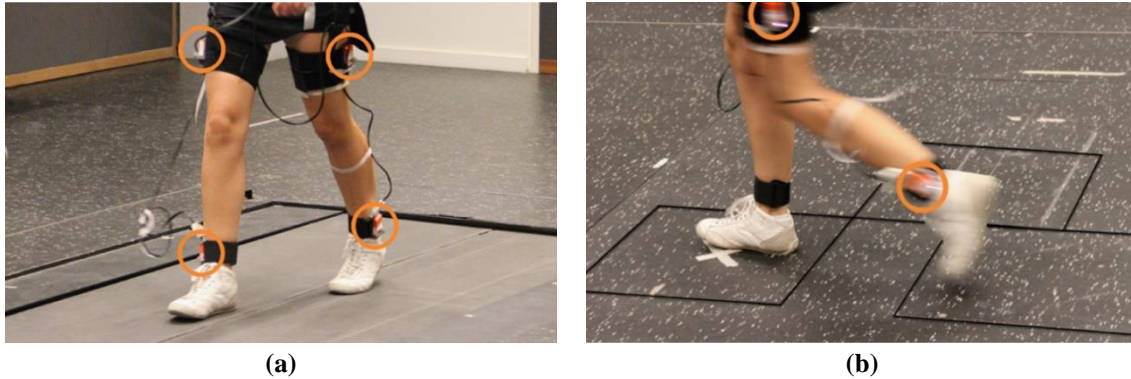


Figura 2.6: Instrumentação empregada por VAN NIMMEN *et al.* (2014) na medição da força de reação do piso exercida por indivíduos andando, através de rastreamento de movimento inercial 3D: (a) Esteira instrumentada; (b) Três placas de força integradas na passarela (VAN NIMMEN *et al.*, 2014)⁴

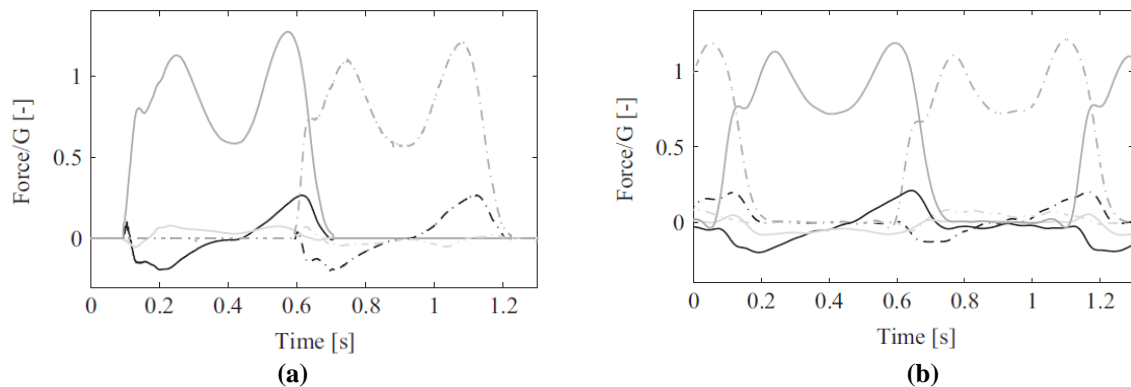


Figura 2.7: Forças de reação do piso obtidas por VAN NIMMEN *et al.* (2014) para o pé esquerdo (linha contínua) e o pé direito (linha descontinua) e normalizadas em relação ao peso do indivíduo (G): (a) Registradas pelas placas de força; (b) Registradas pelas esteiras para uma velocidade do andar de 5 km/h dizimada por um fator de 10 e filtradas com um filtro passa-baixa (VAN NIMMEN *et al.*, 2014)⁴

Após as medições de laboratório, VAN NIMMEN *et al.* (2014) realizaram experimentos in situ em uma passarela onde o comportamento de grupos de pedestres e a resposta estrutural foram registrados simultaneamente. Os autores realizaram simulações

³ Do inglês: *Advanced Mechanical Technology Inc* (AMTI)

⁴ "Reprinted from *Journal of Sound and Vibration*, 333 Issue 20, K. Van Nimmen, G. Lombaert, I. Jonkers, G. De Roeck, P. Van den Broeck, Characterisation of walking loads by 3D inertial motion tracking, 5212-5226, Copyright (2016), with permission from Elsevier [License Number: 3799600955898]"

numéricas usando um modelo de força tradicional e um modelo de força generalizado passo-a-passo. O modelo numérico da estrutura foi calibrado e as taxas de amortecimento identificadas in situ através de testes de vibração livre com pessoas paradas. Os resultados mostraram que as forças assumidas perfeitamente periódicas conduzem a uma super estimativa da resposta estrutural. A melhor concordância entre as respostas medidas e as simulações numéricas foi encontrada quando foi utilizado o modelo de força generalizado passo-a-passo.

2.4 Modelos de Força de Excitação

Para se projetar estruturas submetidas as forças dinâmicas se faz necessário modelá-las analiticamente. Na literatura podem ser encontrados dois tipos de modelo: no domínio do tempo e no domínio da frequência. Embora o primeiro seja mais comum do que o segundo, razão pelo qual este último será o apresentado neste capítulo, em ambos os casos a modelagem matemática de forças dinâmicas induzidas pelo homem é uma tarefa bastante complicada, devido aos seguintes fatores definidos por ŽIVANOVIĆ *et al.* (2005):

- Existem muitos tipos diferentes de forças induzidas pelo homem e estas mudam não apenas no tempo, mas também no espaço (por exemplo, caminhada e corrida);
- As forças são dependentes de vários parâmetros;
- A força dinâmica gerada por uma única pessoa, é difícil de modelar matematicamente;
- A influência do número de pessoas, bem como o seu grau de sincronização é difícil de caracterizar;
- Há fortes indícios de que as forças de excitação são dadas em função do movimento das passarelas.

Geralmente, dois tipos de modelos de 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).

Em qualquer caso, os modelos no domínio do tempo para caminhada e corrida são baseados na hipótese de que os dois pés produzem exatamente a mesma força e, que a força é periódica.

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):

$$F_p(t) = G + \sum_{i=1}^n G \alpha_i \sin(2\pi i f_p t - \phi_i) \quad (2.1)$$

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

Várias medidas foram tomadas a fim de quantificar os coeficientes α_i , essenciais para este modelo de carga. Os resultados de tais medições são mostrados na Tabela 2.3. Todos esses testes, os quais foram realizados de forma a quantificar os fatores de carga, foram realizados por medidas de força, diretos ou indiretos sobre superfícies rígidas (KALA *et al.*, 2010).

BLANCHARD *et al.* (1977) propôs um valor para o coeficiente de carga dinâmica $\alpha = 0,257$ em um modelo baseado na ressonância com o primeiro harmônico, considerando o peso da pessoa $G = 700$ N (70 kg). Dez anos depois, BACHMANN & AMMANN (1987) sugeriram valores para os coeficientes de Fourier referentes aos cinco primeiros harmônicos da força vertical, bem como para a força horizontal. Os resultados indicaram que o primeiro harmônico da carga dinâmica vertical era 37 % da carga estática vertical e, que o primeiro harmônico da carga dinâmica horizontal era 3,9 % da carga estática vertical (KALA *et al.*, 2010).

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

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

Tabela 2.3: Coeficientes dinâmicos segundo os diferentes autores (KALA *et al.*, 2010)

Autores		Tipo de atividade-direção da força	Frequência do caminhar
BLANCHARD <i>et al.</i> (1977)	$\alpha_1 = 0.257$	andar-vertical	4.0-5.0
BACHMANN & AMMANN (1987)	$\alpha_1 = 0.4 - 0.5, \alpha_2 = \alpha_3 = 0.1$	andar-vertical	2.0 - 2.4
DALLARD <i>et al.</i> (2001)	$\alpha_1 = 0.37, \alpha_2 = 0.1, \alpha_3 = 0.12, \alpha_4 = 0.04, \alpha_5 = 0.08$	andar-vertical	2.0
	$\alpha_1 = 0.039, \alpha_2 = 0.01, \alpha_3 = 0.043, \alpha_4 = 0.012, \alpha_5 = 0.015$	andar-transversal	1.0
	$\alpha_{1/2} = 0.037, \alpha_1 = 0.204, \alpha_{3/2} = 0.026, \alpha_2 = 0.083, \alpha_{5/2} = 0.024$	andar-longitudinal	2.0
RAINER <i>et al.</i> (1988)	$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$	dependentes da frequência	-
BACHMANN & AMMANN (1987)	$\alpha_1 = 0.4 - 0.5, \alpha_2 = \alpha_3 = 0.1$	andar-vertical	2.0 - 2.4
	$\alpha_1 = \alpha_3 = 0.1$	andar-transversal	1.0
	$\alpha_{1/2} = 0.1, \alpha_1 = 0.2, \alpha_2 = 0.1$	andar-longitudinal	2.0
KERR (1988)	$\alpha_1, \alpha_2 = 0.07, \alpha_3 = 0.06$	correr-vertical	2.0-3.0
YOUNG (2001)	$\alpha_1 = 0.07, \alpha_3 = 0.06$	andar-vertical	-
YOUNG (2001)	$\alpha_1 = 0.37(f_p - 0.95) \leq 0.5$	andar-vertical	<i>average</i> α
	$\alpha_2 = 0.054 + 0.0044f_p$		
	$\alpha_3 = 0.026 + 0.0050f_p$		
	$\alpha_4 = 0.010 + 0.0051f_p$		
SETRA (2006)	$\alpha_1 = 0.4, \alpha_2 = \alpha_3 = 0.1$	andar-vertical	-
	$\alpha_{1/2} = \alpha_{3/2} = 0.05, \alpha_1 = \alpha_2 = 0.01$	andar-transversal	
	$\alpha_{1/2} = 0.04, \alpha_1 = 0.2, \alpha_{3/2} = 0.03, \alpha_2 = 0.01$	andar-longitudinal	
BACHMANN (1995)	$\alpha_1 = 1.8/1.7, \alpha_2 = 1.3/1.1, \alpha_3 = 0.7/.5$	pulo-vertical	2.0 - 3.0
	$\alpha_1 = 1.9/1.8, \alpha_2 = 1.6/1.3, \alpha_3 = 1.1/.8$	pulo alto-vertical	2.0 - 3.0
	$\alpha_1 = 0.17/0.38, \alpha_2 = 0.1/0.12, \alpha_3 = 0.04/0.02$	quicando-vertical	1.6 - 2.4
	$\alpha_1 = 0.5$	quicando-transversal	0.6
YAO <i>et al.</i> (2002)	$\alpha_1 = 0.7, \alpha_2 = 0.25$	quicando-vertical	0.6

Nota: Os valores não apresentados na tabela não foram fornecidos pelo autor

2.5 Interação Pessoas-Estrutura

OHLSSON (1982) e ŽIVANOVIĆ *et al.* (2005) relataram que, a amplitude do espectro de uma força medida sobre uma superfície rígida difere daquela medida em uma estrutura flexível. Os autores relatam que a amplitude do espectro em torno da frequência natural da estrutura é menor quando a estrutura é mais flexível, e indicam que é importante considerar a interação pessoas-estrutura.

Na atualidade é amplamente aceito que existe algum tipo de interação homem-estrutura em passarelas submetidas a atividades humanas. A interação entre os seres humanos e estruturas geralmente ocorre em estruturas esbeltas em que o nível de vibração é potencialmente elevado (SACHSE *et al.*, 2004, ŽIVANOVIĆ *et al.*, 2005).

Em geral, existem dois aspectos dessa questão, o primeiro considera mudanças nas propriedades dinâmicas da estrutura, principalmente no amortecimento e frequência natural, e o segundo diz respeito ao grau de sincronização de movimento entre os pedestres, bem como entre os pedestres e a estrutura. Ambos os fenômenos atualmente ainda não são bem compreendidos e várias pesquisas relacionadas a esses temas tem sido realizadas nos últimos anos (SACHSE *et al.*, 2004).

As cargas geradas por atividades humanas em estruturas de engenharia civil não só conseguem excitar a estrutura, mas também podem alterar as propriedades modais da mesma (SACHSE *et al.*, 2004). Portanto, para realizar um projeto rigoroso de estruturas excitadas por atividades humanas as propriedades modais do sistema dinâmico homem-estrutura devem ser levadas em consideração. Como existem poucas informações confiáveis disponíveis na literatura sobre esta questão, a maioria dos procedimentos de projeto de engenharia civil não levam em consideração a influência de ocupantes humanos sobre a dinâmica do sistema de vibração.

O corpo humano é considerado como um sistema altamente amortecedor, com base em investigações de vários autores, tais como LENZEN (1966), POLENSEK (1975), RAINER & PERNICA (1981), EBRAHIMPOUR *et al.* (1989), GRIFFIN (1990), BISHOP *et al.* (1993), ELLIS (1994), PIMENTEL & WALDRON (1996), FALATI (1999), BROWNJOHN (1999), SACHSE *et al.* (2004); BUTZ *et al.*, (2008), entre outros.

ŽIVANOVIĆ *et al.* (2005), indicaram que a partir de testes de pedestres realizados na ponte do Millennium por WILLFORD (2002), foi advertido que a multidão andando aumenta o amortecimento da estrutura no sentido vertical.

Segundo SACHSE *et al.* (2004) foi reportado por RAINER & PERNICA (1985) o caso de um piso de um edifício com frequência fundamental de vibração de 6,25 Hz que com a presença de um e dois ocupantes teve a taxa de amortecimento acrescida de 0,55 % a 1,4 % e 2,25 %, respectivamente.

Uma forma de modelagem amplamente aceita durante um longo período de tempo foi a de considerar os ocupantes como massas adicionais à estrutura (WALLEY, 1959, ALLEN & RAINER, 1975, OHLSSON, 1982, EBRAHIMPOUR *et al.*, 1989). Naturalmente, essa forma simples de modelar as pessoas leva a uma diminuição da frequência natural da mesma. No entanto, esta questão é controversa, já que de acordo com SACHSE (2002) os ocupantes frequentemente, mas não sempre, reduzem as frequências naturais de estruturas civis.

Em 1991, após medidas de respostas dinâmicas feitas no estádio de *Twickenham*, ELLIS & JI (1997) concluíram que os ocupantes humanos de uma estrutura estavam agindo mais como um sistema dinâmico do tipo massa-mola-amortecedor do que apenas como massa adicional, já que as pessoas também contribuíam com rigidez e amortecimento para o sistema. Porém, a presença de multidão tem a capacidade de diminuir ou aumentar a frequência natural, assim como de fazer aparecerem novos modos de vibração (SACHSE *et al.*, 2004).

Diferentes autores têm apresentado modelos biodinâmicos para representar a ação de pedestres, entre eles BROWNJOHN (1999), FALATI (1999) e SACHSE *et al.* (2004). Tais modelos consideram que o indivíduo atua como um sistema massa-mola-amortecedor acoplado à estrutura e, conseqüentemente, modifica as suas propriedades dinâmicas, como frequências naturais e amortecimento. O modelo mais simples encontrado na literatura é o representado por um grau de liberdade, mostrado na Figura 2.8. As propriedades dinâmicas da pessoa referentes a massa, rigidez e amortecimento são representadas nesse modelo por m , c e k , P_{Gnd} é a reação do piso causada pelo andar do pedestre e u_t é o deslocamento do grau de liberdade referente a um ponto fixo de referência.

As propriedades dinâmicas do corpo humano são de difícil obtenção devido às diferenças entre características de indivíduos, porém, já existe na literatura estimativa para esses parâmetros obtidos através de testes experimentais (DA SILVA *et al.*, 2013, TOSO *et al.*, 2016).

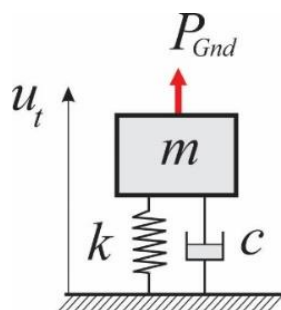


Figura 2.8: Modelo biodinâmico de um grau de liberdade

DA SILVA *et al.* (2013) comparou medições experimentais realizadas em um protótipo de passarela com os resultados obtidos aplicando um modelo de força aplicada e um modelo de interação proposto por SILVA & PIMENTEL (2011). Como esperado o modelo de interação apresentou resultados mais coerentes com as medições experimentais. Quando é incluído o modelo biodinâmico como parte do sistema estrutural uma redução da frequência fundamental de vibração acontece e um aumento do amortecimento é observado (DA SILVA *et al.*, 2013).

No trabalho realizado por TOSO *et al.* (2016), uma campanha de teste é apresentada para a obtenção de parâmetros para um modelo biodinâmico de um único grau de liberdade, que representa a ação de um pedestre andando na direção vertical. As medidas foram realizadas em uma plataforma de força, as entradas foram as amplitudes de aceleração espectrais dos três primeiros harmônicos ao nível da cintura dos sujeitos de teste e, as amplitudes correspondentes dos três primeiros harmônicos da força de reação vertical do piso. Os acelerômetros foram ligados a cintos adaptados que foram colocados na cintura dos indivíduos. Os autores empregaram um algoritmo de otimização baseado no gradiente para resolver as equações da dinâmica. Um conjunto de indivíduos participaram dos testes para assegurar a variabilidade entre indivíduos. Expressões de regressão e uma rede neural artificial (RNA) foram utilizados para relacionar os parâmetros biodinâmicos com a frequência de excitação e a massa corporal dos pedestres.

Após a obtenção dos parâmetros biodinâmicos um protótipo da passarela foi utilizado, e os testes de pedestres foram conduzidos para verificar o modelo biodinâmico proposto. Em termos de comportamento estrutural da passarela, a multidão de pedestres contribuiu para uma mudança nas propriedades dinâmicas da estrutura analisada. As acelerações verticais medidas mostraram a adequação do modelo numérico para a representação dos efeitos de caminhar de pedestres em uma estrutura. O autor reportou um decremento na frequência natural e um incremento no amortecimento global.

Duas campanhas de testes foram levadas a cabo na Universidade de *Sheffield* em um protótipo de passarela construído para esse fim. Cada campanha era baseada em testes modais da estrutura vazia e com pessoas caminhando sobre ela. Nesses testes num primeiro cenário entre 2 e 15 pessoas atravessavam a estrutura andando, e em um segundo cenário andando em círculos. Os parâmetros modais foram obtidos para a estrutura ocupada através do ajuste das FRF no ponto de mobilidade (SHAHABPOOR *et al.*, 2016).

A estrutura utilizada nesse estudo foi uma passarela de concreto pré-tensionado de 11,20 m x 2,00 m x 0,275 m construída especialmente para esses testes no laboratório de estruturas da Universidade de *Sheffield*. As frequências naturais do primeiro e segundo modos de vibração vertical para a estrutura vazia foram de 4,44 Hz e 16,80 Hz, respectivamente, e as taxas de amortecimento de 0,6-0,7 % para o primeiro modo e 0,4 % para o segundo.

As medições experimentais com a estrutura ocupada indicaram variações nas frequências naturais e nas taxas de amortecimento. As variações máximas observadas para o cenário de pessoas andando em círculos sobre a estrutura foram alcançadas com 10 pessoas (número máximo analisado nesse teste). Nesse caso o valor da frequência natural do primeiro modo foi de 4,5 Hz e da taxa de amortecimento foi de 3,4 %. Para o segundo modo a frequência natural e a taxa de amortecimento foram, respectivamente, 16,975 Hz e 0,99 %. No cenário de pessoas só atravessando a estrutura as variações máximas para o 1º modo foram obtidas com 15 pessoas, sendo obtidos o valor da frequência natural de 4,485 Hz e da taxa de amortecimento de 2,91 %. Para o 2º modo o valor máximo de frequência foi de 16,935 Hz para 10 pessoas e taxa de amortecimento de 0,79 % para 15 pessoas (SHAHABPOOR *et al.*, 2016).

Com esses resultados podemos corroborar com valores numéricos a contribuição notável das pessoas no aumento da taxa de amortecimento da estrutura, mas em relação às frequências naturais o valor pode aumentar ou diminuir.

2.6 Normas de Projeto

Neste item apresenta-se um resumo de algumas normas de projeto afim de dar uma ideia dos principais conceitos envolvidos nos projetos de passarelas.

Hoje em dia, há dois conceitos que estão presentes nas diretrizes de projeto para condições de serviço referente a vibrações em passarelas. O primeiro requer um cálculo da resposta dinâmica efetiva da passarela e a verificação dos limites aceitáveis para os usuários. A segunda abordagem é baseada na tentativa de evitar que frequências naturais da estrutura estejam em faixas de frequências coincidentes com as frequências típicas de excitação induzidas pelo homem (ŽIVANOVIĆ *et al.*, 2005).

Um exemplo fundamental da primeira abordagem é a BS⁵5400: Parte 2, historicamente, este é o primeiro código de projeto que tratou expressamente a questão de funcionalidade em vibração em passarelas (ŽIVANOVIĆ *et al.*, 2005). O código afirma que, se a frequência natural fundamental de vibração para uma ponte descarregada na direção vertical excede 5 Hz e para uma ponte carregada na direção horizontal 1,5 Hz, a exigência de serviço em questão de vibração é considerada satisfeita. Por outro lado, se a frequência fundamental de vibração vertical é menor ou igual a 5 Hz, a aceleração vertical máxima em qualquer parte da passarela deve ser limitada. Essa máxima aceleração vertical deve ser calculada assumindo que a carga dinâmica aplicada por um pedestre possa ser representada por uma carga pontual harmônica, movimentando-se através do vão principal da ponte.

Na EN⁶1990 é afirmado que os critérios de conforto para pedestres devem ser definidos em termos de aceleração máxima aceitável para qualquer parte da estrutura e recomenda esses valores máximos para as diferentes direções de vibração. (KALA *et al.*, 2010).

⁵ Abreviatura do inglês: *British Standards* (BS)

⁶ Abreviatura do inglês: *European Standards* (EN)

A ISO 10137 recomenda que as situações de projeto devem ser selecionadas, dependendo do tráfego de pedestres a ser admitido na passarela durante a sua vida útil, e recomenda que a força dinâmica $F(t)$ seja expressa no domínio da frequência por uma série de Fourier (KALA *et al.*, 2010).

The Ontario Highway Bridge Design Code requer um cálculo da resposta dinâmica de uma passarela devido à simulação de uma força de excitação, semelhante ao BS 5400, *i.e.*, uma força senoidal movendo-se com 180 N de amplitude e frequência de excitação igual a frequência fundamental ou 4 Hz, o que for menor (ŽIVANOVIĆ *et al.*, 2005).

AASHTO (1997) conclui que o intervalo do primeiro ao terceiro harmônico de pessoas andando que atravessam passarelas para pedestres encontra-se na faixa de 2 a 8 Hz, com a frequência fundamental entre 1,6 e 2,4 Hz. Por conseguinte, as passarelas com frequências fundamentais inferiores a 3 Hz devem ser evitadas. Para passarelas de pedestres com baixa rigidez, amortecimento e massa, e em áreas onde ocorrem as atividades de correr e pular, a frequência fundamental mínima deve ser de 5 Hz, evitando assim a ressonância da estrutura com o primeiro e segundo harmônicos.

A NBR 6118 (2007) recomenda que para garantir o comportamento satisfatório de estruturas sujeitas a vibrações a frequência natural da estrutura supere ao menos 20 % o valor da frequência de excitação. Para o caso de passarelas de pedestres considera-se a faixa da frequência de excitação de 1,6 a 4,5 Hz.

Descrição da Estrutura e dos Testes Experimentais

Neste capítulo são descritos os testes experimentais realizados, os quais se dividem em dois grupos: testes com pessoas em pé e andando. O objetivo dos testes é medir a força aplicada diretamente à estrutura na direção vertical e a sua resposta estrutural, a fim de analisar experimentalmente o comportamento dinâmico da passarela. Inicialmente é proporcionada uma descrição da estrutura onde foram realizados esses testes, a instrumentação empregada e os pré-testes de calibração das plataformas de carga. É mostrado também o sistema de aquisição de dados usado durante os testes e os programas e técnicas para o processamento dos arquivos de dados experimentais. Além disso são apresentados os sinais típicos e alguns dos resultados obtidos. Outros resultados serão mostrados no capítulo posterior através da comparação com resultados numéricos.

3.1 Descrição da estrutura

A estrutura utilizada para a realização de testes experimentais 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 Figura 3.1 mostra uma vista geral da passarela, enquanto a Figura 3.2 apresenta as principais dimensões da estrutura.

Segundo FAISCA (2003) a estrutura foi projetada para suportar uma carga de 7,4 kN/m², o que equivale aproximadamente ao seu peso próprio somado à carga acidental de 4,9 kN/m², que é um valor próximo ao equivalente estático sugerido pela *U.S. Standards and Building Code* (ANSI, 1982).



Figura 3.1: Estrutura utilizada para a realização de testes experimentais: (a) Vista em perspectiva; (b) Vista superior

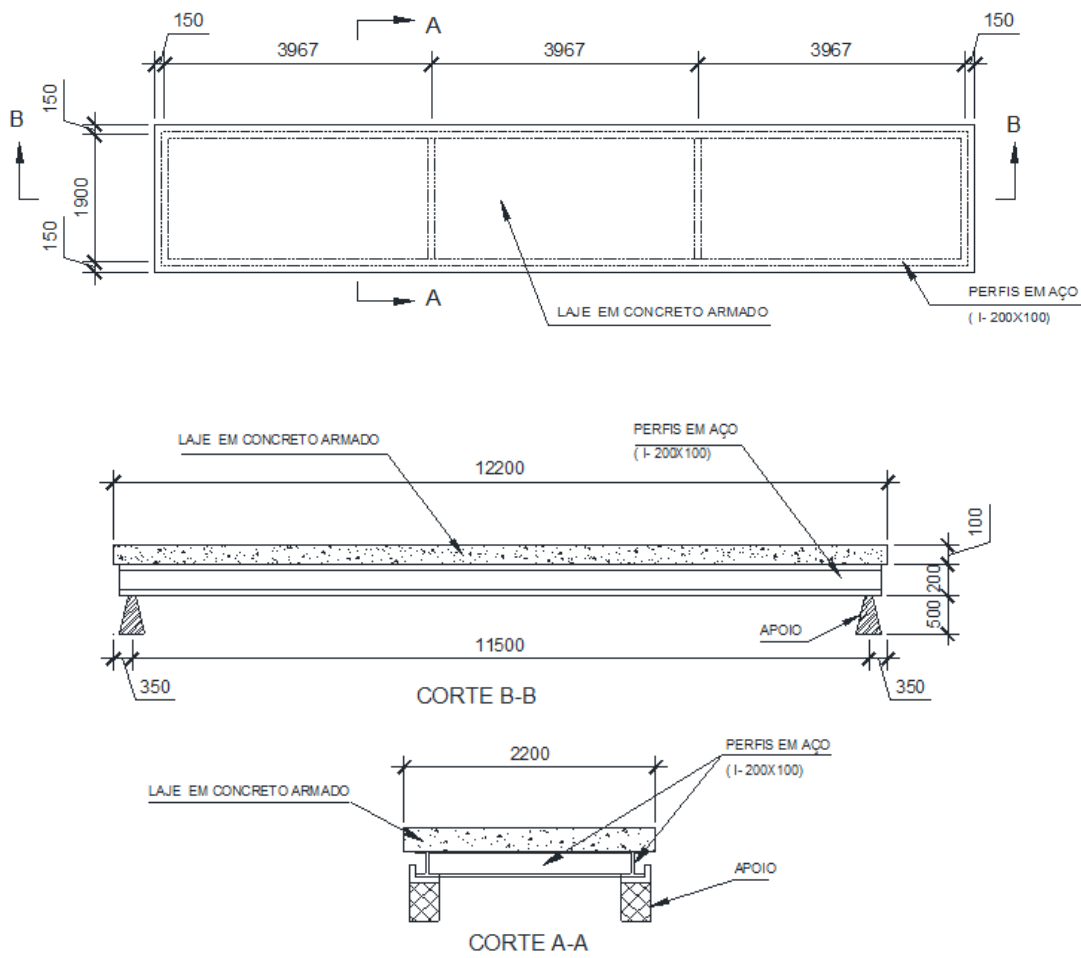


Figura 3.2: Planta baixa e cortes da estrutura (cotas em mm)

3.2 Instrumentação

Para a realização dos testes nas atividades de saltos e de andar foi necessário empregar um sistema de instrumentação que permitisse a aquisição dos sinais de força aplicados à estrutura assim como a sua resposta estrutural sob excitação dinâmica.

Para medir a resposta estrutural foram utilizados seis acelerômetros resistivos com capacidade de 1 g (sendo g o valor correspondente à aceleração da gravidade $9,81 \text{ m/s}^2$). A instrumentação foi idealizada com o objetivo de medir os dois primeiros modos de flexão e de torção da estrutura. Na Figura 3.3 se apresenta um esquema simplificado das posições dos acelerômetros ao longo da passarela, que estão representados pelas siglas AC. Estes foram colados na base dos perfis I longitudinais, permitindo captar as acelerações da estrutura na direção vertical. Na Figura 3.4 mostra-se o detalhe da fixação dos acelerômetros aos perfis.

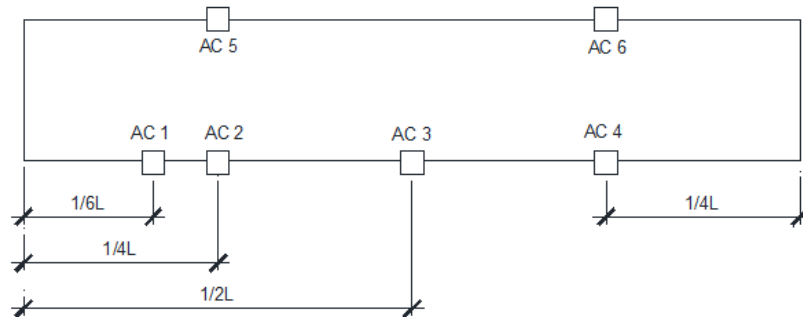


Figura 3.3: Posição dos acelerômetros na estrutura (L: comprimento total da estrutura)



Figura 3.4: Detalhe de fixação do acelerômetro à estrutura

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, com dimensões de 0,90 m x 0,90 m interligadas através de nove anéis metálicos com diâmetro externo de 89×10^{-3} m e espessura da parede de $5,3 \times 10^{-3}$ m. Estes anéis foram instrumentados com extensômetros elétricos de resistência (EER) conforme mostrado na Figura 3.5(b).

As chapas são constituídas de um material denominado MDF⁷. Esse tipo de material foi empregado por ser leve e apresentar rigidez elevada. Foram realizados testes experimentais para a estimativa das frequências naturais dessas chapas e nesses testes, observou-se que as primeiras frequências naturais se encontram bem acima das da estrutura e dos primeiros super-harmônicos da frequência de excitação das atividades realizadas, não interferindo nos resultados dos testes (FAISCA, 2003).

Os anéis foram dimensionados considerando-se duas situações extremas: (i) ter sensibilidade para permitir a medição das cargas geradas por um único indivíduo; (ii) ter capacidade de resistir a uma carga dinâmica gerada por um grupo de até três pessoas sobre cada conjunto (FAISCA, 2003). Detalhe do anel é mostrado na Figura 3.5(b).

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 Figura 3.6 é mostrado um esquema da numeração das plataformas para a sua calibração e controle durante os testes.

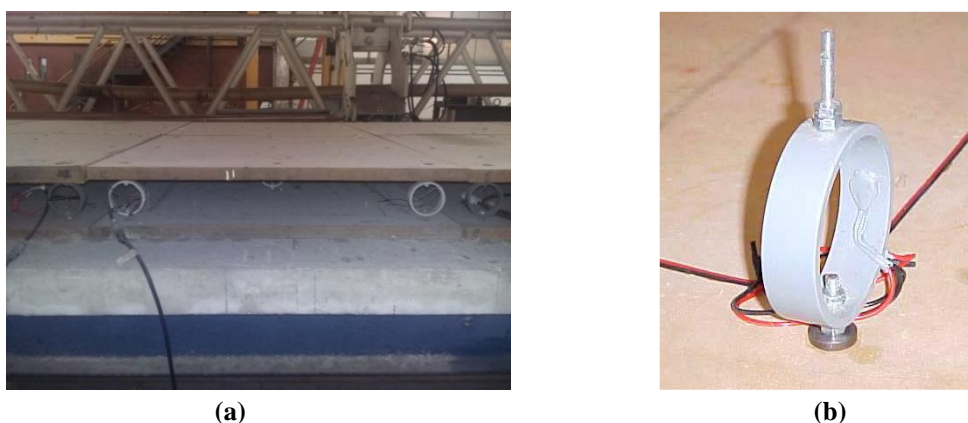


Figura 3.5: Instrumentação para medição da força aplicada: (a) Plataforma instrumentada para medição da força aplicada; (b) Anel instrumentado com extensômetros nas faces interna e externa (FAISCA, 2003)

⁷ Do inglês: *Medium-Density Fiberboard*

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 3.6: 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 Figura 3.7 mostra uma vista do equipamento utilizado nos ensaios.



Figura 3.7: Equipamento usado para a aquisição e processamento de sinais durante os testes.

As 26 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. Na Figura 3.8 é mostrado um resultado típico da calibração de uma das plataformas de carga com o valor da constante de calibração obtida através de correlação linear.

Posteriormente à calibração, as placas 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.

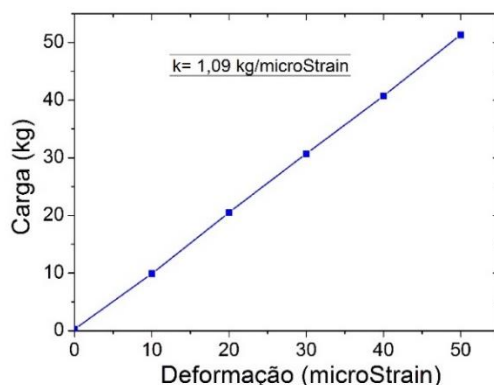


Figura 3.8: Resultado do ajuste de uma das plataformas de carga

3.3 Realização de testes experimentais

Foram realizados dois grandes grupos de testes experimentais: um primeiro com pessoas paradas sobre a estrutura e um segundo grupo com pessoas andando. A estrutura foi submetida a excitação dinâmica no caso do primeiro grupo através de pulos de uma pessoa, e no caso do segundo com a força dinâmica devido ao andar das pessoas. O objetivo dos testes com pessoas paradas é analisar a influência das pessoas na variação dos parâmetros modais e o das pessoas andando é estudar o carregamento aplicado e o comportamento da estrutura com a variação do número de pessoas.

Para a análise dos resultados dos testes experimentais foram utilizados dois programas computacionais desenvolvidos no Laboratório de Estruturas (LABEST) da COPPE/UFRJ utilizando-se LABVIEW. 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).

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 3.1 é mostrado um resumo das características dos participantes durante os testes.

Tabela 3.1: 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

3.3.1 Identificação da estrutura

Primeiramente foi realizada a identificação da estrutura. Os dois tipos de excitação utilizados para determinar os parâmetros modais foram: 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.

Na Tabela 3.2 mostram-se os parâmetros modais obtidos nesses primeiros testes, 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 Figura 3.9(d). Cada teste foi repetido três vezes, dessa forma, para os resultados mostrados na Tabela 3.2, foram consideradas um total de 9 amostras para a estimativa dos valores médios e desvios padrão, adotando as leituras de 3 acelerômetros.

Tabela 3.2: Parâmetros Modais obtidos experimentalmente (*f*: modo de flexão, *t*: modo de torção)

Tipo de excitação	Frequências naturais (Hz)			
	Modo 1 (<i>f</i>)	Modo 2 (<i>t</i>)	Modo 3 (<i>f</i>)	Modo 4 (<i>t</i>)
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

Na Figura 3.9 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 Figura 3.9(c) onde se observam os quatro picos de acelerações correspondentes aos quatro primeiros modos de vibração.

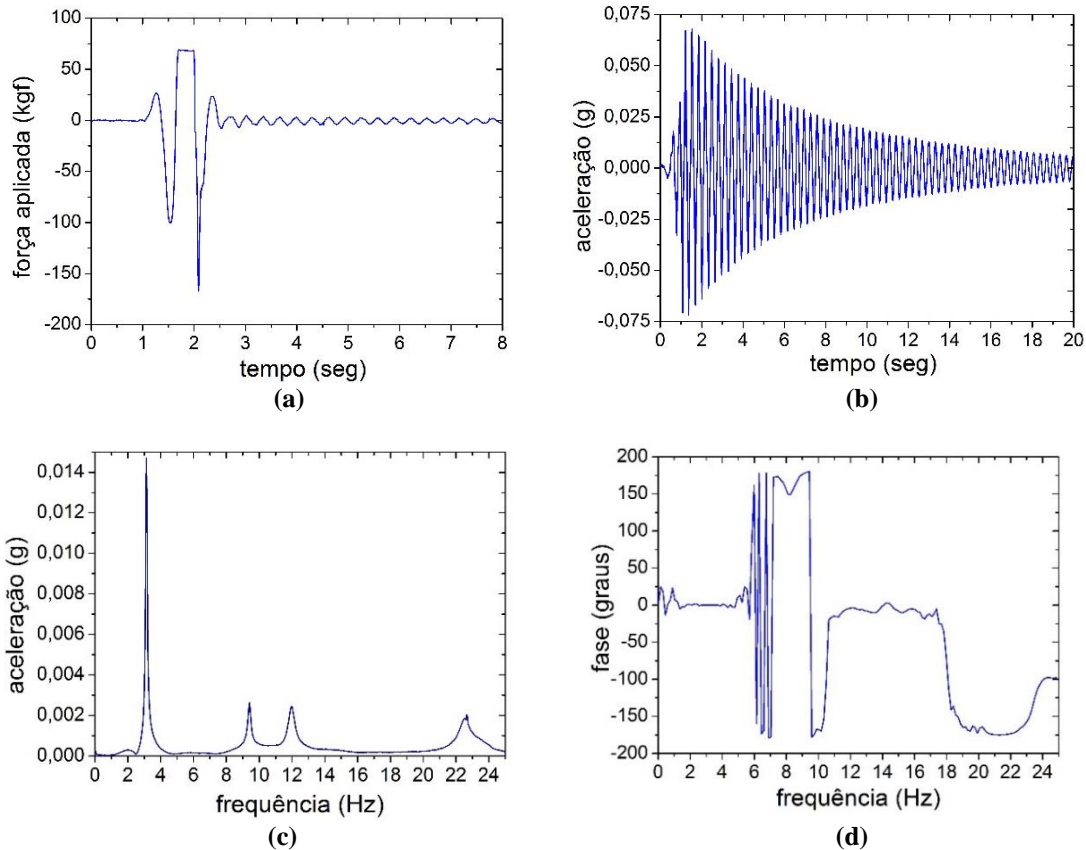


Figura 3.9: Sinais típicos de uma pessoa pulando: (a) Força na placa; (b) Resposta no tempo; (c) Espectro de frequências; (d) FRF entre os acelerômetros AC2 e AC5

Dos testes realizados conclui-se que os valores devidos à excitação com uma pessoa pulando são muito próximos aos obtidos com excitação manual, ou seja, a presença de uma pessoa parada praticamente não alterou 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. Dessa forma, os valores de amortecimento indicados na Tabela 3.2 serão considerados como os valores de amortecimento da estrutura original sem pessoas sobre ela.

3.3.2 Testes experimentas com pessoas paradas

Nessa etapa, foi realizada uma série de testes cujo principal objetivo foi determinar como as pessoas influenciavam na variação das propriedades dinâmicas da estrutura. De forma geral, os ensaios consistiam em excitar a estrutura com pulos de uma pessoa que executava a atividade sempre no mesmo lugar e a diferença entre os testes consistia no número de pessoas paradas sobre a estrutura. Para esses selecionaram-se diferentes posições das pessoas sobre a passarela, de tal forma que ficassem espalhadas para os dois primeiros casos, e concentradas próximas ao meio do vão para o caso 3. Essas posições são mostradas no esquema simplificado da Figura 3.10 com suas respectivas localizações (A, B, C, D, E e F). As cotas no esquema estão referidas ao comprimento total da estrutura, e coincidem com as posições dos acelerômetros.

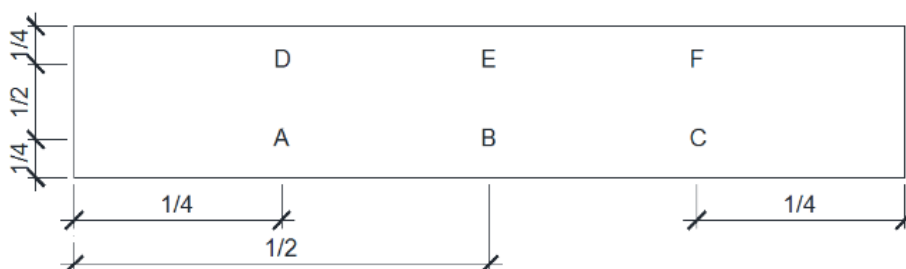


Figura 3.10: Posições das pessoas sobre a estrutura durante os testes

Durante os testes, a pessoa posicionada em A, realizava a excitação através de um único salto e todos permaneciam parados até que a estrutura parasse de vibrar. Na Tabela 3.3 são mostrados todos os casos realizados durante os testes com pessoas em pé, sendo que as posições da tabela estão referidas às da Figura 3.10, e na Figura 3.11 são mostradas algumas dessas situações com fotografias tomadas durante os testes.

Tabela 3.3: Resumo dos testes realizados e a quantidade de indivíduos participantes

Casos	Testes	Quantidade de pessoas	A	B	C	D	E	F
<i>1</i>	1	1	1					
	2	2	1	1				
	3	3	1	1	1			
	4	4	1	1		1	1	
	5	6	1	1	1	1	1	1
<i>2</i>	1	3	1	2				
	2	5	1	2	2			
	3	7	1	2		2	2	
	4	11	1	2	2	2	2	2
	5	12	2	2	2	2	2	2
<i>3</i>	1	5	1	2			2	
	2	7	1	3			3	
	3	9	1	4			4	



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)



(g)



(h)

Figura 3.11: Fotografias tomadas durante os testes experimentais de algumas das situações ensaiadas mostradas na Tabela 3.3 e Figura 3.10: (a) Caso 1 teste 2; (b) Caso 1 teste 3; (c) Caso 1 teste 5; (d) Caso 2 teste 1; (e) Caso 2 teste 2; (f) Caso 2 teste 3; (g) Caso 2 teste 4; (h) Caso 3 teste 3

As frequências naturais e taxas de amortecimento (valores médios e desvios padrão) obtidos para cada um dos testes são apresentados em forma de gráficos nas Figuras 3.12 e 3.13.

Os valores de taxa de amortecimento mostrados na Figura 3.12, apresentam a variação desse parâmetro em função do número de pessoas sobre a estrutura para os quatro primeiros modos de vibração. Na Figura 3.12(d) mostra-se uma condensação dos resultados. Nesta figura os casos 1 e 2 foram aglomerados pelo fato de serem similares.

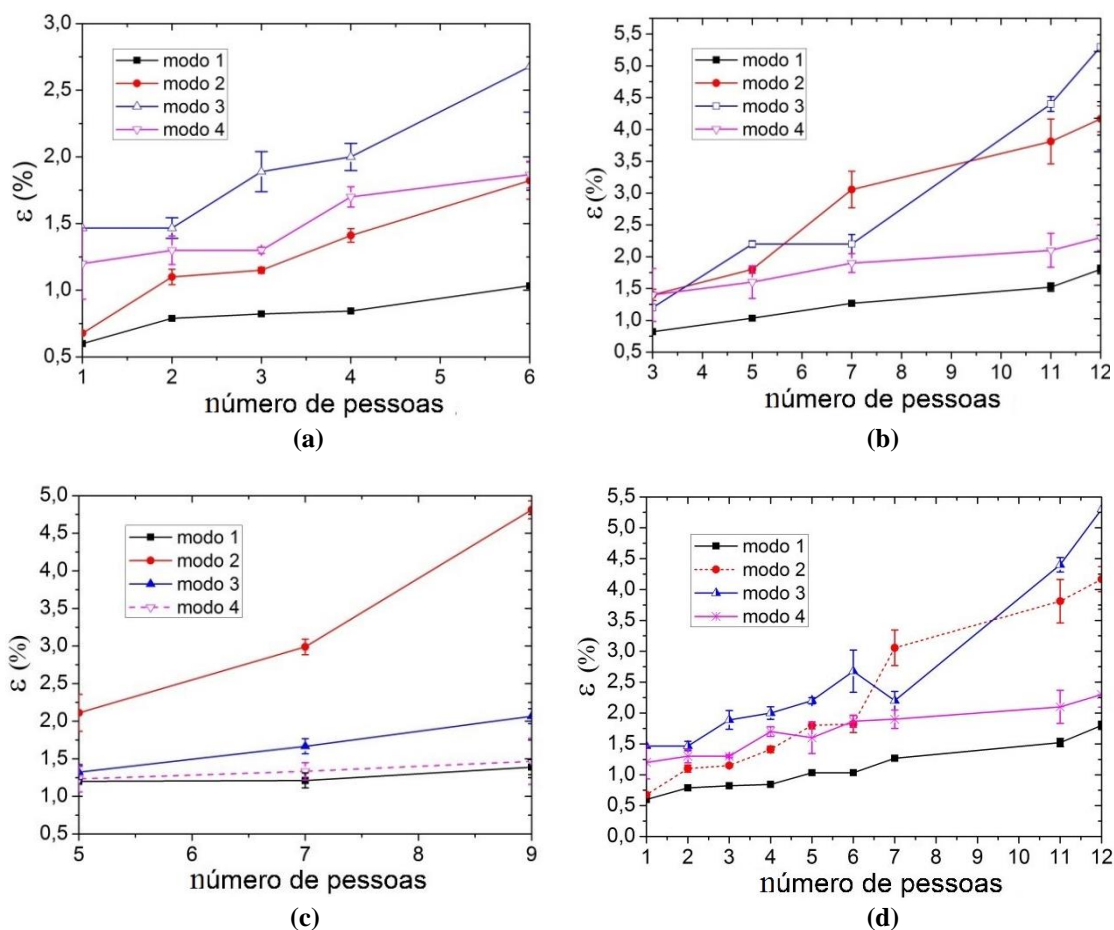


Figura 3.12: Variação da taxa de amortecimento (ε) com o incremento do número de pessoas paradas sobre a estrutura: (a) Caso 1; (b) Caso 2; (c) Caso 3; (d) Caso resumo, juntando os casos 1 e 2

Conforme esperado o amortecimento tende a crescer à medida que aumenta o número de pessoas sobre a estrutura e, coerentemente, aumenta mais para um ou outro modo dependendo das posições das pessoas. Por exemplo, para o caso 3 onde as pessoas encontravam-se mais próximas do meio, o modo 3 (2º de flexão) foi o menos favorecido em amortecimento, já que no meio do vão a amplitude modal correspondente é zero. No caso do

modo 2 (1º de torção) aconteceu o contrário, este foi o mais favorecido porque as maiores amplitudes são nessa posição. Esses resultados verificam a hipótese que considera que as pessoas atuam como um sistema massa-mola-amortecedor (ELLIS & JI, 1997, BROWNJOHN,1999, FALATI,1999, SACHSE *et al.*, 2004). Deve-se realçar que o caso 3 foi uma situação criada apenas para mostrar o aumento do amortecimento devido à densidade de pessoas, já que essa situação na prática, em geral, não é real.

No gráfico (d) os pontos que não são coerentes com o aumento são simplesmente devido ao fato que, para nessas quantidades de pessoas, acontece a mudança de um caso para outro, onde as pessoas não se encontravam nas mesmas posições.

Por outro lado, os valores obtidos para as frequências naturais são apresentados nos gráficos da Figura 3.13. Cada um dos gráficos representa um modo de vibração e descreve a variação do parâmetro para cada um dos três casos devido à presença de pessoas. As frequências apresentaram os maiores desvios para o modo 4.

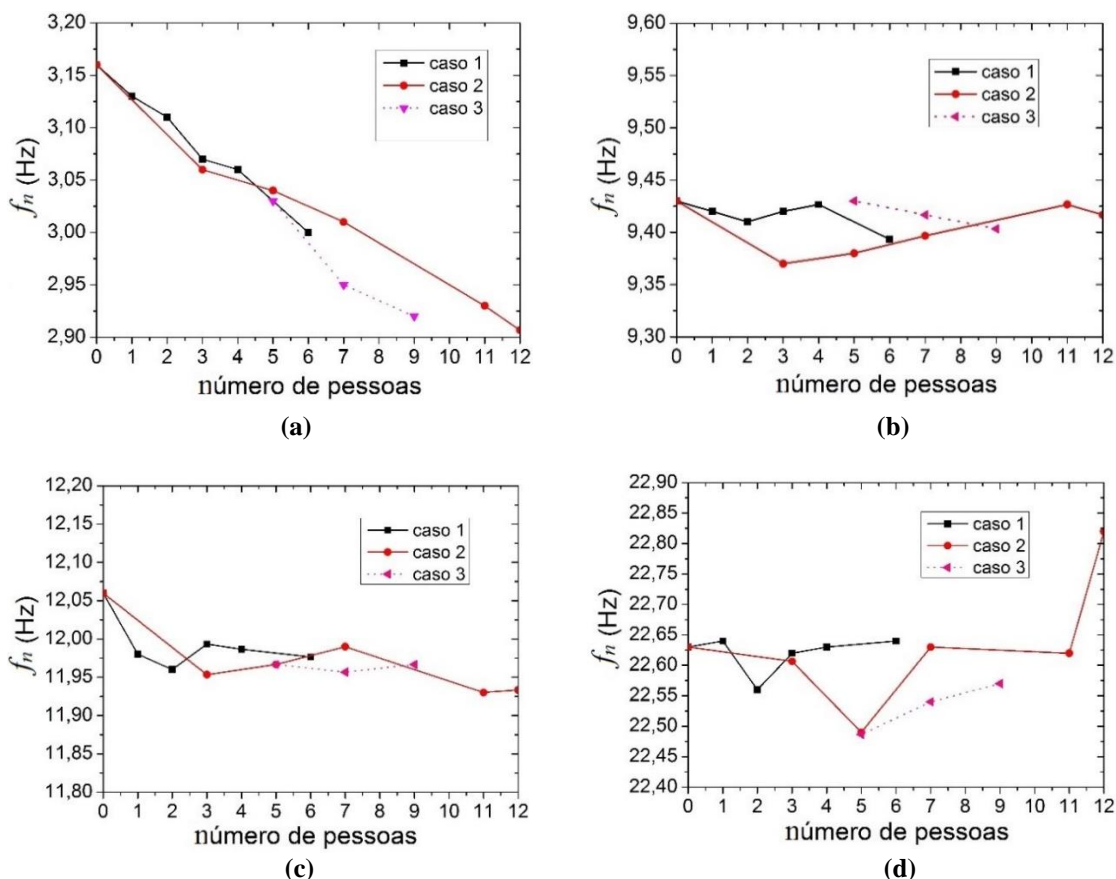


Figura 3.13: Variação da frequência natural (f_n) com o incremento do número de pessoas paradas sobre a estrutura: (a) Modo 1; (b) Modo 2; (c) Modo 3; (d) Modo 4

Nota-se no gráfico da Figura 3.13(a) que o primeiro modo de vibração apresenta uma tendência clara de diminuição da frequência natural com o acréscimo de pessoas. Nos restantes modos de vibração observa-se que a variação não segue um padrão determinado. Esse resultado é corroborado por ELLIS & JI (1997) que também verifica situação na qual os ocupantes nem sempre reduzem as frequências naturais dos modos mais altos.

3.3.3 Testes experimentais de pessoas andando

A realização de testes com pessoas andando tem como objetivo analisar o carregamento induzido por estas sobre a estrutura e uma tentativa de inferir o valor da taxa de amortecimento para pessoas andando.

Nesses testes a estrutura foi excitada com o andar das pessoas, as cargas aplicadas foram medidas pelas plataformas de carga e a resposta da estrutura foi medida pelos acelerômetros de forma semelhante que nos testes anteriores. Como uma das finalidades é utilizar as cargas medidas como entrada no modelo numérico foi adotada uma frequência de aquisição de 100 Hz, garantido assim que fosse captado o maior nível de detalhes do carregamento.

Foram escolhidas duas situações de análise: na primeira, os indivíduos atravessavam a passarela uma única vez enquanto, na segunda eles davam voltas em círculo, estas situações são ilustradas de forma esquemática na Figura 3.14.

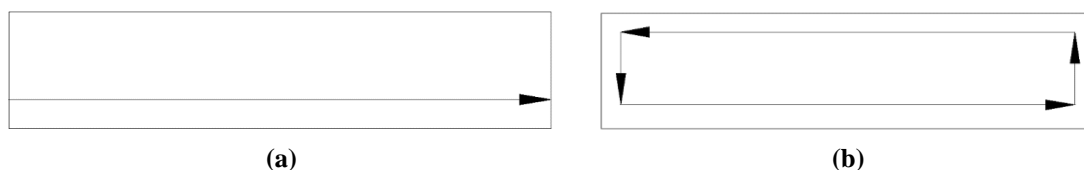


Figura 3.14: Movimento das pessoas andando durante os testes: (a) Situação 1; (b) Situação 2

Observa-se nestas figuras que os indivíduos eram solicitados a andar fora do centro garantindo assim que o modo de torção fosse excitado. O ensaio envolveu vários indivíduos, estes eram solicitados a andar um atrás do outro começando por uma pessoa e, incrementando de uma em uma até que atingisse o número desejado para o ensaio. Na Figura 3.15 são mostradas várias fotografias tomadas durante os testes para as pessoas andando nas situações 1 e 2.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)



(g)



(h)

Figura 3.15: Fotografias tomadas durante os testes de pessoas andando (referem-se às situações da Figura 3.14). Pessoas andando na situação 1: (a) 1 pessoa; (b) 3 pessoas; (c) 5 pessoas; (d) 11 pessoas. Pessoas andando na situação 2: (e) 3 pessoas; (f) 5 pessoas; (g) 7 pessoas; (h) 9 pessoas

Para estimar os espectros de frequências de cada sinal obtido experimentalmente foi utilizado o mesmo intervalo de tempo de tal forma que permitisse realizar uma comparação entre as respostas, por exemplo, no caso das pessoas andando em círculo o trecho analisado foi de 40 segundos, selecionando sempre esse intervalo no meio do tempo total do sinal. No caso das pessoas entrando e saindo (situação 1) foi utilizado um intervalo tal que permitisse utilizar o trecho de tempo no qual a quantidade total de pessoas do teste estivesse sobre a passarela. Na Figura 3.16 são mostrados sinais típicos de resposta nos domínios do tempo e da frequência para uma pessoa andando na situação 1 e na Figura 3.17 esses mesmos gráficos para a situação 2. Nas Figuras 3.16(b) e 3.17(b) são indicados os picos associados às frequências de excitação e aos modos próprios da estrutura.

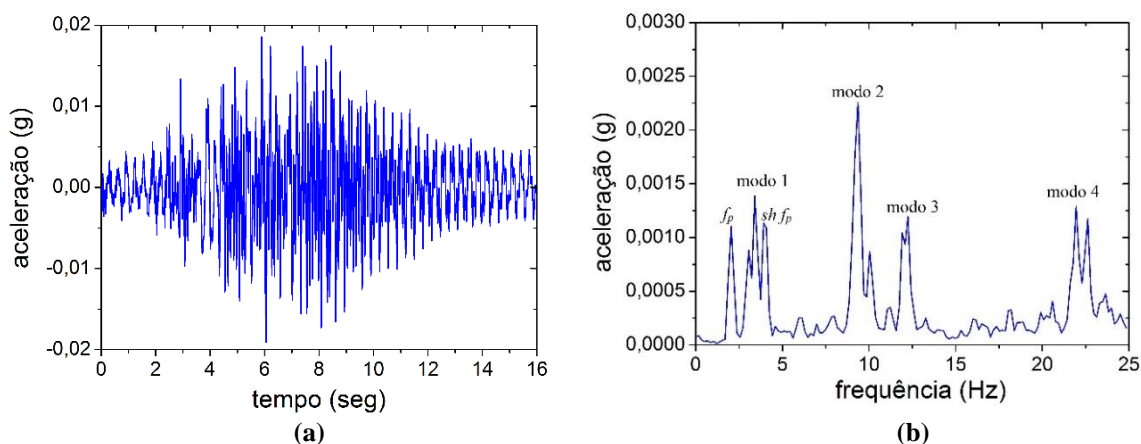


Figura 3.16: Sinais típicos de resposta da estrutura com uma pessoa andando na situação 1
 (a) Aceleração vs. tempo; (b) Espectro de frequências; f_p : frequência de excitação, $sh f_p$: super harmônico da frequência de excitação

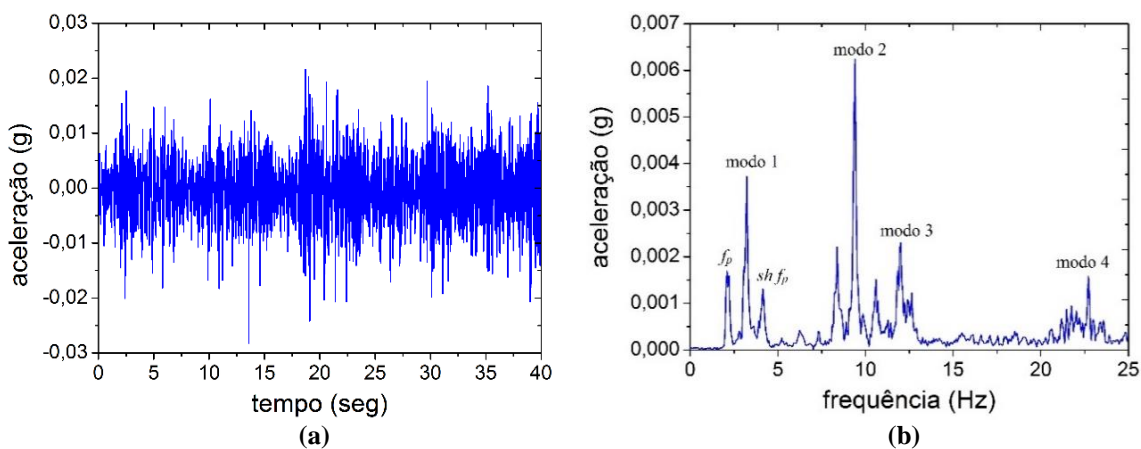


Figura 3.17: Sinais típicos de resposta da estrutura com uma pessoa andando na situação 2
 (a) Aceleração vs. tempo; (b) Espectro de frequências; f_p : frequência de excitação, $sh f_p$: super harmônico da frequência de excitação

Os valores das frequências naturais obtidas para cada um dos testes realizados com pessoas andando são mostrados nas Tabelas 3.4 e 3.5. Nessas tabelas observa-se que os valores de frequências naturais para esses testes não seguem um padrão determinado, apresentam algumas variações aleatórias. Essas variações são mais significativas para a situação 1, devido a que o tempo em que todas as pessoas do teste ficaram andando sobre a estrutura foi muito pequeno, pelo qual não foi possível a determinação do parâmetro com exatidão. Porém, os resultados mais precisos obtiveram-se para a situação 2 com pessoas andando em círculos, porque o tempo de análise é maior. Como pode ser observado na Tabela 3.5, os valores para os três primeiros modos praticamente mantiveram-se constantes até 7 pessoas. Um aspecto relevante é que, para cada um dos testes realizados, as pessoas continuaram excitando os quatro primeiros modos de vibração.

Tabela 3.4: Valores de frequências naturais estimadas experimentalmente para a situação 1 (pessoas entrando e saindo)

Pessoas	Frequências naturais (Hz)			
	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4
1	3,20	9,24	12,09	22,4
3	3,15	9,45	12,02	22,23
5	3,09	9,28	11,93	22,8
7	2,99	9,33	11,91	22,35
9	3,23	9,38	12	22,41
11	3,05	9,35	11,99	22,57
13	3,21	9,33	11,93	22,49

Tabela 3.5: Valores de frequências naturais estimadas experimentalmente para a situação 2 (pessoas andando em círculos)

Pessoas	Frequências naturais			
	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

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 de pessoas andando em círculos 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 Figura 3.18, onde pode-se observar que existe uma tendência para a diminuição das amplitudes de deslocamento para cada modo de vibração com o aumento do número de pessoas. No gráfico (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.

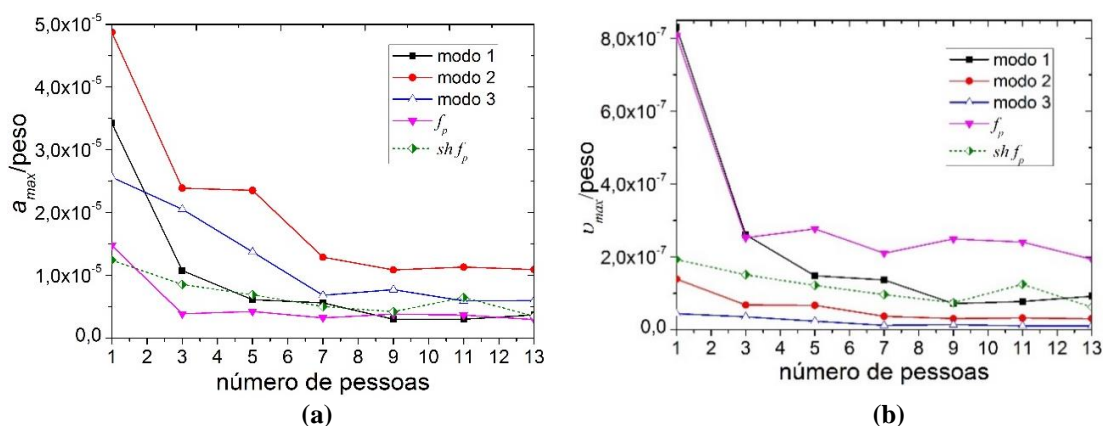
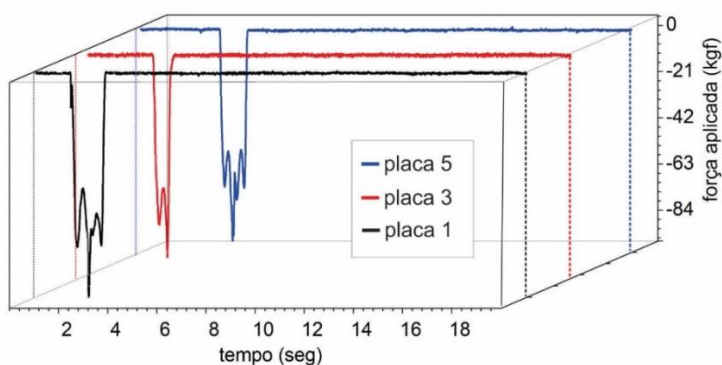


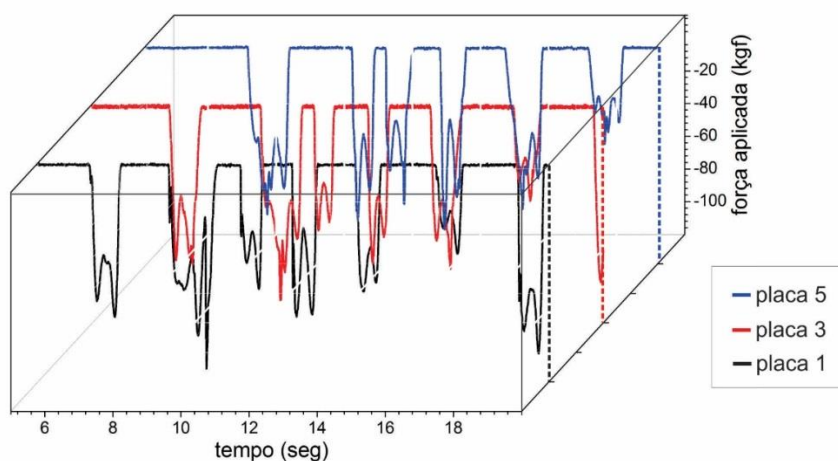
Figura 3.18: Amplitudes experimentais máximas normalizadas em relação ao peso total das pessoas participantes em cada teste vs. número de pessoas: (a) Acelerações (a_{max}); (b) Deslocamento (v_{max}); f_p : frequência de excitação, $sh f_p$: super harmônico da frequência de excitação

Segundo as normas e recomendações de projeto de passarelas sob ação do pedestre, como visto no capítulo 2, a força dinâmica exercida pelas pessoas pode ser representada por um sinal harmônico através de alguns poucos termos de uma série de Fourier. 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. Para tentar exemplificar este fato, a Figura 3.19(a) apresenta os sinais de força aplicada em algumas passadas por uma pessoa que foi digitalizada durante um dos experimentos em três placas consecutivas, enquanto no caso (b) são mostradas as respostas das mesmas placas quando 13 indivíduos estavam andando. Observando as forças ao longo do tempo pode ser visto que para o caso de um indivíduo, estas praticamente não vão se superpor, enquanto na presença de um número considerável de pessoas acontece uma superposição das forças ao longo do tempo e o sinal tende a se comportar como uma função harmônica. Essa questão será analisada também através de resultados numéricos no próximo capítulo.



(a)



(b)

Figura 3.19: Sinais de força nas placas 1, 3 e 5 produzidos pelo andar durante 20 segundos de teste
(a) Uma pessoa; (b) 13 pessoas

Com os resultados obtidos dos testes experimentais com pessoas em pé paradas sobre a estrutura, foi verificado que o acréscimo de amortecimento está diretamente relacionado com o aumento da densidade de pessoas. Outro parâmetro modificado pela presença das pessoas foi a frequência natural que, para o primeiro modo teve uma tendência clara para a diminuição, mas para os restantes modos de vibração não mostrou uma variação consistente, esse fato confirma que os indivíduos têm a capacidade de modificar os parâmetros modais da estrutura e, com isso, a sua resposta estrutural.

No caso das pessoas andando, a situação é bem mais complexa uma vez que envolve outros fatores, tais como a variabilidade da função de carga devido ao andar, bem como a posição das pessoas sobre a estrutura, o que conduz a uma maior diversidade de resultados. No entanto, ficou bastante claro nos resultados obtidos que este tipo de carregamento pode excitar vários modos de vibração e que esta resposta pode ser predominante quando envolve poucos participantes. Outro fato que também ficou evidente está relacionado à falta de sincronismo da atividade conduzindo a amplitudes de resposta inferiores do que o simples somatório das atividades de cada uma das pessoas.

Mais um aspecto relevante é que, para o caso de estruturas flexíveis como a analisada nesta pesquisa, o segundo modo de torção apresentou maiores amplitudes de acelerações, ou seja, além de ser o primeiro modo o mais importante para o projeto, dependendo da estrutura os modos mais altos também precisam ser levados em consideração.

Modelagem Numérica e Correlação de Resultados

Neste capítulo são apresentadas a modelagem numérica utilizada para representar a estrutura, a abordagem para gerar as cargas induzidas pelo andar das pessoas e a análise do comportamento da estrutura. Deve-se destacar que todos os resultados obtidos numericamente foram validados através das medições experimentais.

Primeiramente foi desenvolvido um modelo numérico para a análise de vibração livre da passarela a fim de estimar os seus parâmetros modais, tanto da estrutura simples, quanto da estrutura com pessoas paradas sobre ela. Posteriormente foi desenvolvida uma metodologia que permite ler as cargas geradas nos testes e através da integração no tempo das equações de movimento, obter as respostas da estrutura, em termos de deslocamento, velocidade ou aceleração. Finalmente foi realizado um estudo paramétrico que permite gerar carregamentos induzidos por várias pessoas, permitindo assim analisar o comportamento da estrutura sob ação de cargas humanas induzidas por um elevado número de pessoas.

4.1 Modelagem numérica da estrutura

Para a análise de vibração livre 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 Figura 4.1 é mostrado em um esquema simples o modelo discretizado adotado.

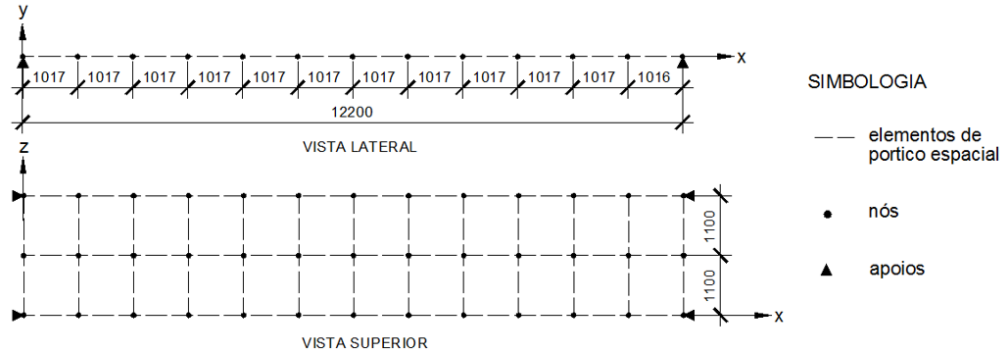


Figura 4.1: Modelo simplificado da estrutura adotado na análise de vibração livre (dimensões em mm)

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. Na Tabela 4.1 são mostrados os valores empregados para o cálculo no programa, tanto para os elementos longitudinais, como transversais. Os elementos longitudinais foram considerados paralelos ao eixo x e os elementos transversais paralelos ao eixo z.

Tabela 4.1: Propriedades mecânicas da seção homogeneizada de aço-concreto usadas para o cálculo

Elem.	E (N/m ²)	I _x (m ⁴)	I _y (m ⁴)	I _z (m ⁴)	I _r (m ⁴)	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	G* (N/m ²)
Long.	2,00E+11	3,33E-05	4,20E-02	1,32E-04	4,20E-02	1,75E-02	17450	7,69E+10
Trans.	2,00E+11	1,68E-04	4,20E-02	3,33E-05	4,20E-02	2,33E-05	17450	7,69E+10

E: Módulo de elasticidade do aço; I_x: Inercia em relação ao eixo x; I_y: Inercia em relação ao eixo y; I_z: Inercia em relação ao eixo z; I_r: Momento de Inercia Polar; A: Área da seção transversal; ρ: Densidade do material misto; G*: Módulo de elasticidade transversal

A Tabela 4.2 apresenta as frequências naturais obtidas numericamente para os quatro primeiros modos de vibração comparadas aos valores obtidos experimentalmente, sendo que para estes últimos são indicados também os desvios padrão obtidos de 3 testes.

Tabela 4.2: Valores das frequências naturais obtidos numericamente e experimentalmente

	Frequências naturais (Hz)			
	Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 4
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

As formas modais de cada frequência natural obtidas da modelagem são mostradas na Figura 4.2, 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 a flexão, enquanto os 2º e 4º aos modos de torção, coincidente com os resultados experimentais.

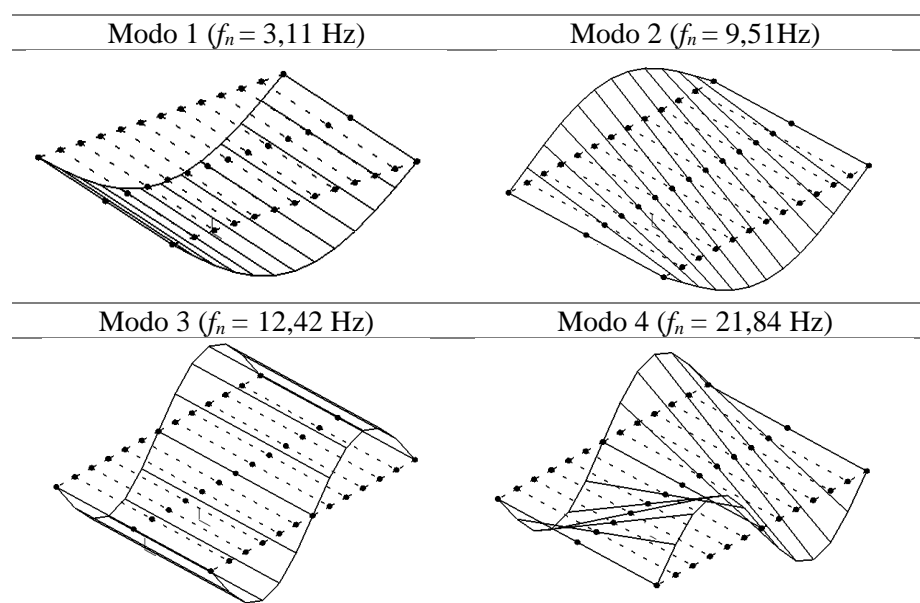


Figura 4.2: Formas modais obtidas numericamente

Analisando-se a Tabela 4.2 e a Figura 4.2 conclui-se que o modelo numérico pode ser considerado suficientemente ajustado aos resultados experimentais, já que este consegue representar adequadamente a estrutura.

4.1.1 Análise das Situações com Pessoas Paradas

De todos os testes experimentais realizados foram escolhidas aleatoriamente algumas situações com pessoas paradas para serem simuladas numericamente. Foram avaliadas três situações com a presença de 4, 6 e 11 pessoas paradas sobre a estrutura para correlacionar com os testes 4 e 5 do caso 1 e teste 4 do caso 2, descritos nas Figura 3.10 e Tabela 3.3 da seção 3.3.2 do capítulo anterior.

As pessoas foram modeladas como massas concentradas adicionadas à estrutura. Os pesos das mesmas foram obtidos experimentalmente através das leituras das placas onde estas encontravam-se paradas e, foram concentrados nos nós mais próximos das suas posições durante os testes. Na Tabela 4.3 são mostrados os resultados dessa modelagem comparados com os valores experimentais obtidos para cada uma dessas situações, e os respectivos desvios de 3 testes para esses últimos.

Tabela 4.3: Comparação das frequências numéricas e experimentais das situações com pessoas paradas

Modos	Frequências naturais (Hz)					
	4 pessoas		6 pessoas		11 pessoas	
	Numérico	Experimental	Numérico	Experimental	Numérico	Experimental
1°	3,02	3,06 ± 0,00	3,00	3,01 ± 0,00	2,90	2,91 ± 0,00
2°	9,38	9,43 ± 0,02	9,35	9,39 ± 0,03	9,19	9,42 ± 0,08
3°	12,2	11,99 ± 0,01	12,04	11,98 ± 0,02	11,69	11,93 ± 0,03
4°	21,63	22,63 ± 0,02	21,49	22,64 ± 0,02	21,17	22,79 ± 0,02

Observa-se que os valores das frequências naturais associadas ao primeiro modo de vibração obtidas numericamente e experimentalmente apresentam uma tendência de diminuição em ambos casos, indicando que a consideração das pessoas como massas concentradas no modelo numérico é válida para representar o modo fundamental de vibração quando as pessoas se encontram paradas.

Da tabela pode ser observado também que, conforme esperado, as frequências naturais apresentam maiores variações conforme se consideram mais pessoas paradas sobre a passarela.

A modelagem das pessoas apenas como massas concentradas adicionadas à estrutura leva à diminuição numérica das frequências naturais de todos os modos, isso é devido ao fato de que a rigidez e o amortecimento que as pessoas introduzem na estrutura não estão sendo levados em consideração (SACHSE *et al.*, 2004). Conforme mencionado no capítulo 2, de acordo com ELLIS & JI (1997), BROWNJOHN (1999), PIMENTEL & WALDRON (1996), FALATI (1999), SACHSE *et al.* (2004); BUTZ *et al.* (2008), entre outros pesquisadores, para representar adequadamente as frequências naturais seria necessário introduzir no modelo numérico esses parâmetros.

Analisando-se a Tabela 4.3 também se conclui que o modelo numérico, além das simplificações, pode ser considerado ajustado aos resultados experimentais para o caso de pessoas paradas sobre a estrutura, já que representa os três primeiros modos de maneira satisfatória.

4.2 Metodologia para Obtenção das Respostas para Pessoas

Andando

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

$$\phi^T \mathbf{m} \phi \ddot{\mathbf{y}}(t) + \phi^T \mathbf{c} \phi \dot{\mathbf{y}}(t) + \phi^T \mathbf{k} \phi \mathbf{y}(t) = \phi^T \mathbf{p}(t) \quad (4.1)$$

onde \mathbf{m} , \mathbf{c} e \mathbf{k} representam as matrizes de massa, amortecimento e rigidez respectivamente 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 (4.1).

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:

$$\phi^T \mathbf{m} \phi = \mathbf{I} \quad (4.2)$$

$$\phi^T \mathbf{c} \phi = 2\varepsilon_n w_n \quad (4.3)$$

$$\phi^T \mathbf{k} \phi = w_n^2 \phi^T \mathbf{m} \phi \quad (4.4)$$

Introduzindo as equações (4.2) a (4.4) 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:

$$\ddot{y}_i(t) + 2\varepsilon_i w_i \dot{y}_i(t) + w_i^2 y_i(t) = \phi_i^T \mathbf{p}(t) \quad (4.5)$$

Através das forças medidas experimentalmente e da integração da equação (4.5) pelo método de *Runge Kutta*, obtém-se os vetores $\ddot{\mathbf{v}}$, $\dot{\mathbf{v}}$ e \mathbf{v} , de aceleração, velocidade e deslocamento, respetivamente, nas posições dos acelerômetros, para os quatro primeiros modos de vibração analisados. O valor de ϕ usado nessa equação foi o correspondente à posição de cada acelerômetro, obtido por interpolação dos vetores de formas modais, calculados na análise de vibração livre e normalizados em relação a matriz de massa.

Cada arquivo de força experimental é representado por uma matriz de $tp \times np$, onde, tp é o número total de pontos adquiridos durante o teste e, np o número de placas, neste caso 26. O termo $\mathbf{p}(t)$ é o vetor de força que contém os valores de força em cada instante de tempo t nas 26 placas.

O termo direito da equação 4.5 ($\phi_i^T \mathbf{p}(t)$) é o produto do vetor de força correspondente a cada placa pelo valor do autovetor ϕ no meio da placa, obtido por interpolação dos vetores de formas modais, normalizados em relação à matriz de massa para cada modo de vibração analisado. Dessa forma a parcela a direita da equação resulta em um vetor de força que recebe a força total aplicada sobre a estrutura para cada valor de t .

Os valores da taxa de amortecimento (ε_i) da equação 4.5 foram os valores obtidos experimentalmente dos testes com pessoas paradas e no caso das frequências naturais (w_i) os valores provenientes da análise da vibração livre.

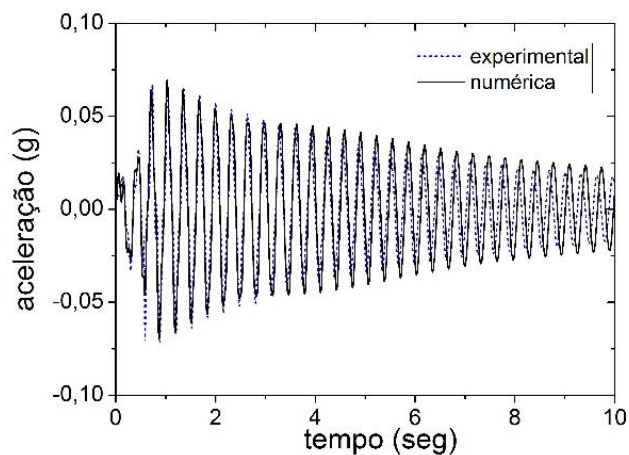
Empregando essa metodologia foi possível obter as respostas numéricas da estrutura através de um programa de integração no tempo usando os arquivos de forças dos ensaios experimentais.

4.2.1 Correlação Experimental - Numérica para Pessoas Andando

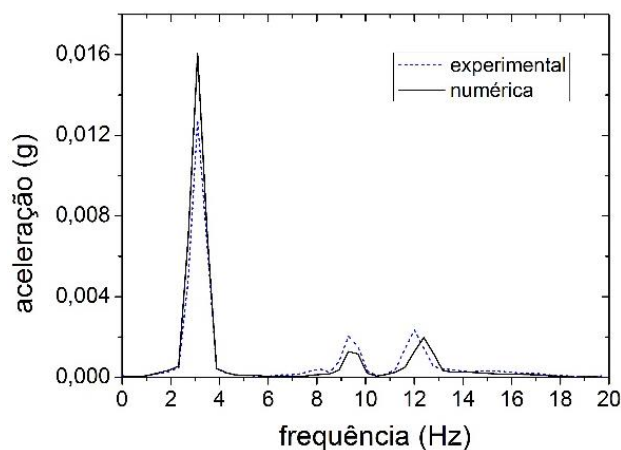
Antes de utilizar o carregamento medido experimentalmente no programa numérico estes foram processados e filtrados usando um filtro média móvel. Isto se fez necessário já que estes sinais apresentavam um certo nível de ruído.

Primeiramente, o modelo foi testado com um arquivo de força de uma pessoa pulando. O intervalo de integração utilizado foi de 0,001 segundos e o tempo de análise de 40 segundos.

Na estimativa dos espectros de frequência foram adotadas 20 amostras do sinal. Analisaram-se apenas os três primeiros modos de vibração, já que o quarto modo praticamente não foi captado pelo modelo numérico. Na Figura 4.3(a) é mostrada a comparação entre as respostas obtidas numericamente e experimentalmente no domínio de tempo, enquanto a Figura 4.3(b) apresenta esta comparação no domínio da frequência. Nesses gráficos observa-se que as respostas numéricas e experimentais são bastante similares.



(a)



(b)

Figura 4.3: Comparação numérica-experimental da resposta da estrutura sob excitação de uma pessoa pulando: (a) No tempo; (b) Na frequência

Após a validação do modelo com teste de pulso, realizou-se a correlação de cada uma das situações medidas experimentalmente, tanto para os casos das pessoas andando na situação 1 (atravessando a passarela) como na 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.

Na Figura 4.4 são mostradas as comparações numéricas-experimentais, nos domínios do tempo e da frequência, para os casos de uma e 11 pessoas andando na situação 1, e na Figura 4.5 os mesmos resultados para a situação 2. Nessas figuras são mostrados os resultados numéricos para a taxa de amortecimento ajustada.

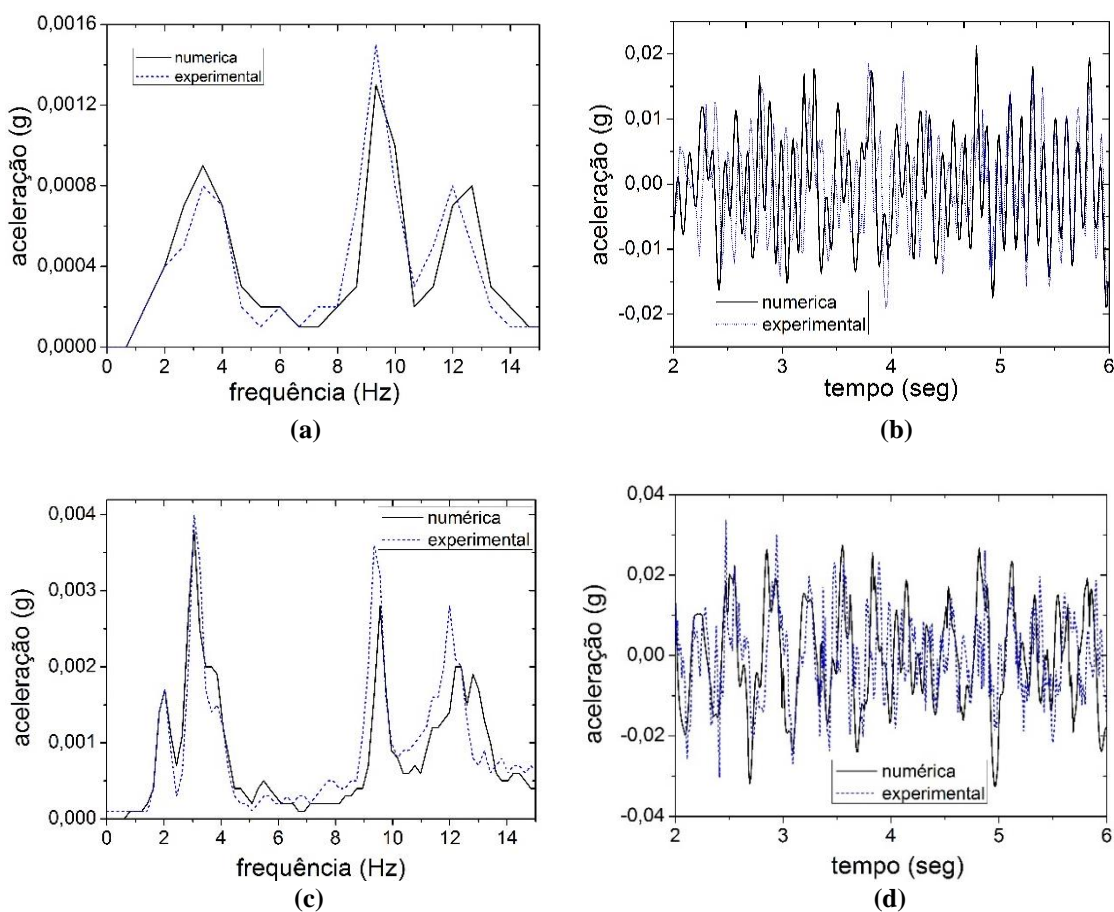


Figura 4.4: Comparação numérica-experimental da resposta da estrutura sob ação das pessoas andando na situação 1. Para uma pessoa: (a) Espectro de frequências; (b) Resposta no tempo. Para 11 pessoas: (c) Espectro de frequências; (d) Resposta no tempo

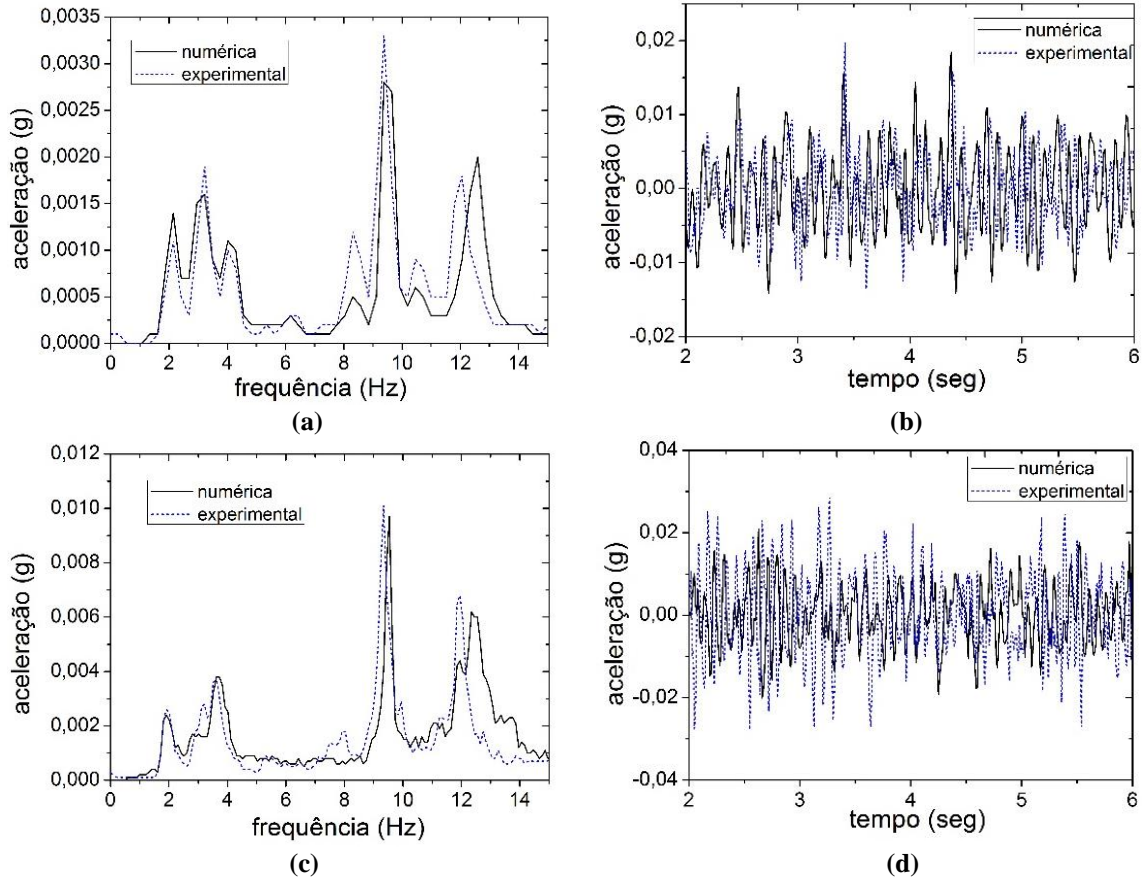


Figura 4.5: Comparação numérica-experimental da resposta da estrutura sob ação das pessoas andando na situação 2. Para uma pessoa: (a) Espectro de frequências; (b) Resposta no tempo. Para 11 pessoas: (c) Espectro de frequências; (d) Resposta no tempo

Dos resultados mostrados nos gráficos, verifica-se que, o programa numérico está suficientemente ajustado, já que os resultados obtidos numericamente estão bem similares às respostas medidas nos acelerômetros durante os testes. Nos picos de frequência correspondentes ao terceiro modo, em cada um dos espectros das Figura 4.4 e 4.5, observa-se uma pequena defasagem entre o numérico e o experimental. Esse efeito talvez possa estar relacionado ao fato das frequências naturais terem sido obtidas numericamente através da análise de vibração livre, e neste caso as pessoas foram modeladas apenas como massas concentradas, o que introduz uma pequena diferença na resposta.

Na Figura 4.6 é apresentada a variação da taxa de amortecimento em função do número de pessoas. Nesta figura são mostrados os valores obtidos experimentalmente para pessoas paradas e obtidas numericamente para o caso de pessoas andando sendo que estes últimos foram os valores alcançados para ajustar os resultados numéricos aos experimentais. Apesar de não se poder concluir com exatidão sobre esses valores numéricos devido aos

ruídos observados nos sinais de força e à sensibilidade do processo, é possível mostrar uma tendência da variação da taxa de amortecimento em função da atividade e do número de pessoas.

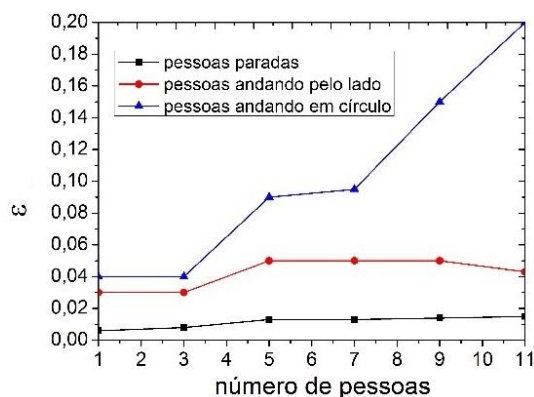


Figura 4.6: Comparação das taxas de amortecimento identificadas experimentalmente (pessoas paradas) com as obtidas numericamente (pessoas andando)

Os valores do amortecimento estimados através da metodologia apresentada mostram uma tendência clara de aumento do amortecimento quando as pessoas estão andando em relação à situação das pessoas paradas. No gráfico da Figura 4.6 para o 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. Isso pode ser explicado pelo fato de que as pessoas andando em círculos permanecem um maior intervalo de tempo sobre a passarela, o que poderia levar a que a sua influência no amortecimento da estrutura seja mais significativa.

4.2.2 Estudo Paramétrico de Situações com Pessoas Andando

Conforme mostrado no item anterior, 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 que permitam analisar o comportamento dinâmico da estrutura sob ação de qualquer número de pessoas andando sobre ela.

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 de 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. Escolheu-se essa situação porque permite um maior tempo de análise, e 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.

Na Figura 4.7 é mostrada a comparação experimental-numérica da resposta da estrutura para uma pessoa, com as características mencionadas acima, dando 3 voltas em círculos.

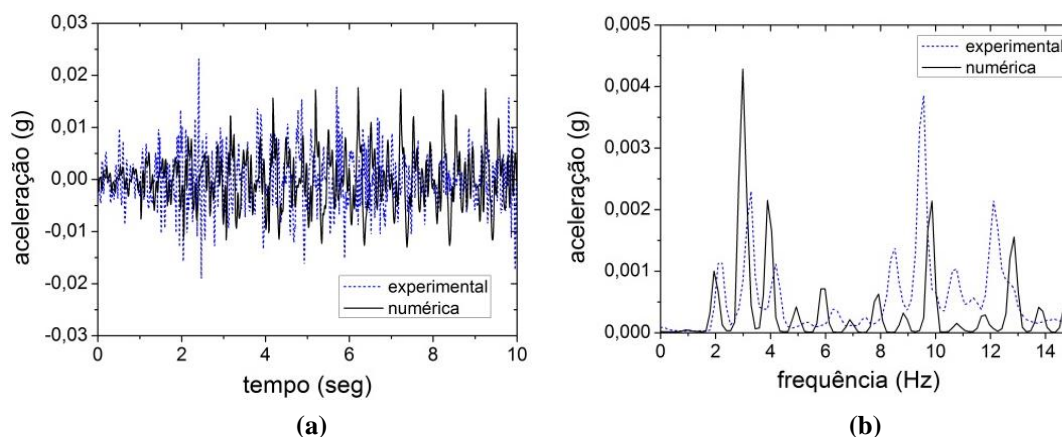


Figura 4.7: Comparação da resposta da simulação numérica de um indivíduo andando na situação 2 com a experimental: (a) No tempo; (b) Na frequência

Nota-se na Figura 4.7 que os sinais numérico e experimental são similares. As diferenças observadas são devido ao fato de que numericamente foi adotada a mesma função para descrever cada passo e na realidade esses passos variam entre si. Segundo os resultados de VAN NIMMEN *et al.* (2014) as forças assumidas perfeitamente periódicas conduziram à amplificação da resposta da estrutura em relação às forças reais da caminhada.

Após a simulação do caso com um indivíduo foram gerados carregamentos para outros grupos de pessoas. Nessa análise se manteve fixa a taxa de amortecimento adotada para o caso de uma pessoa andando, já que o objetivo é analisar apenas a influência do número de pessoas como carga sobre a estrutura. Com o fim de entender o comportamento estrutural em função da densidade de pessoas andando, simularam-se diferentes carregamentos.

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 estender 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 Figura 4.8 são mostrados os sinais de força gerados numericamente para os casos de 1, 5, 10 e 50 pessoas. Pode ser observado nesses gráficos as funções ao longo do tempo, sendo mais similar com um sinal harmônico para o caso de 50 pessoas, ou seja, para grandes densidades de pessoas.

Na Figura 4.9(a) são comparados os espectros de frequência da simulação numérica de uma pessoa com 50 pessoas andando, e na Figura 4.9(b) de uma pessoa com a situação de fluxo contínuo. As comparações com as restantes situações simuladas são mostradas no Anexo A.

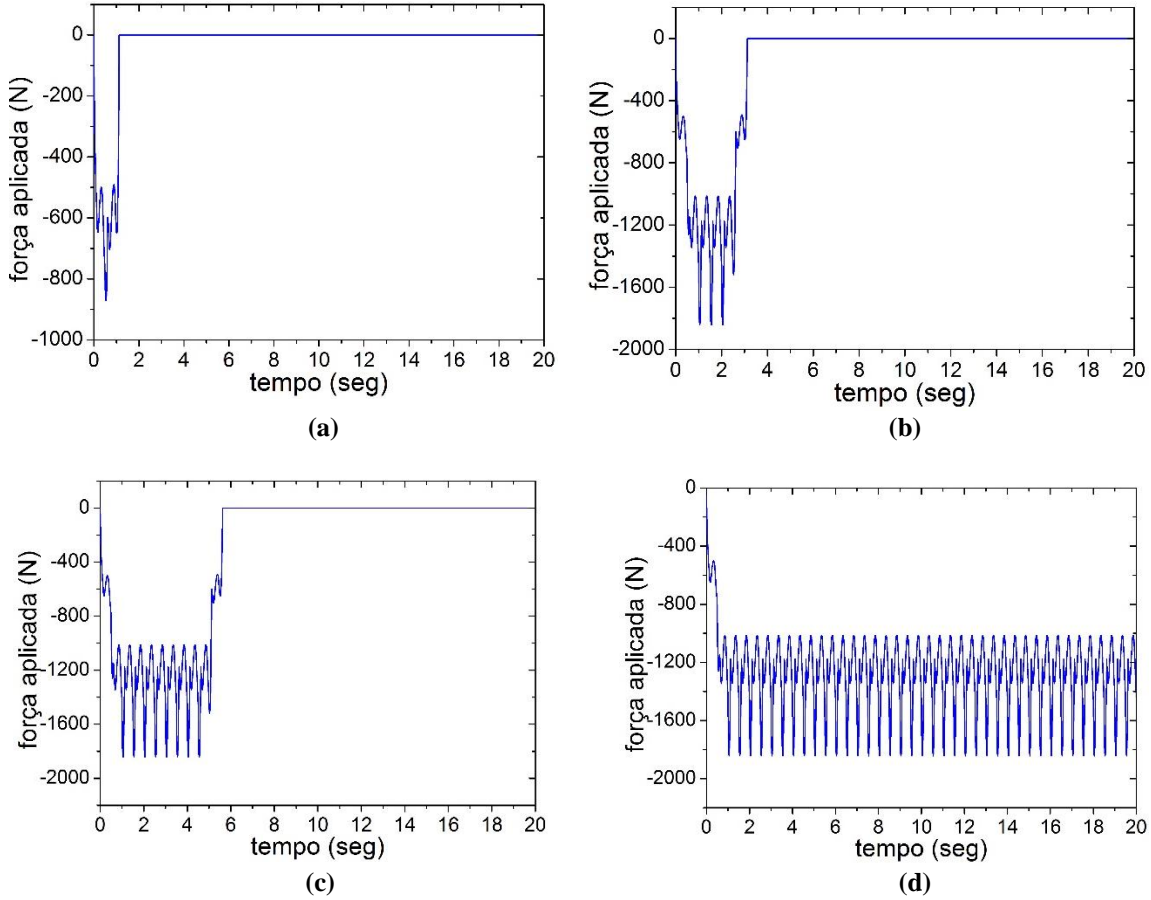


Figura 4.8: Carga exercida por pedestres simulada numericamente: (a) uma pessoa; (b) 5 pessoas; (c) 10 pessoas; (d) 50 pessoas

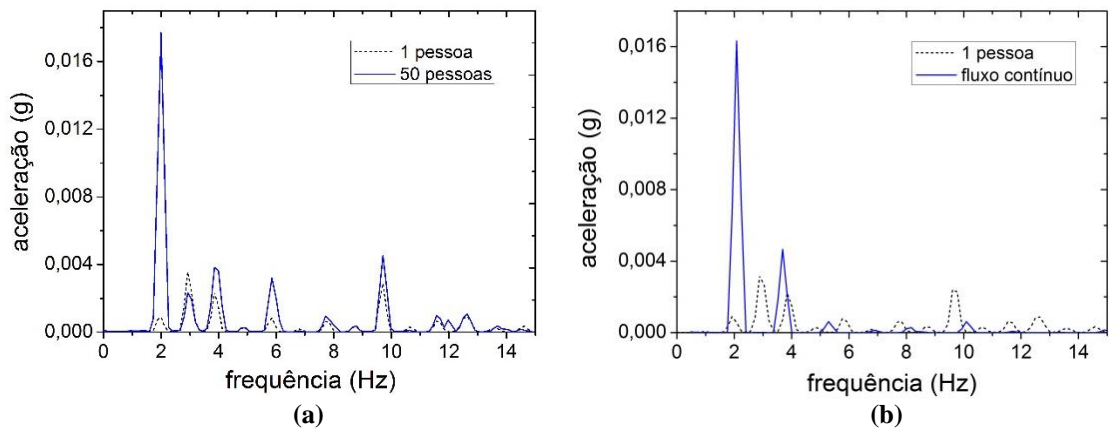


Figura 4.9: Comparação dos espectros de frequências obtidos da simulação numérica. Uma pessoa com: (a) 50 pessoas; (b) Fluxo contínuo de pessoas

Observando os espectros da Figura 4.9, 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.

Nas Figuras 4.10(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.

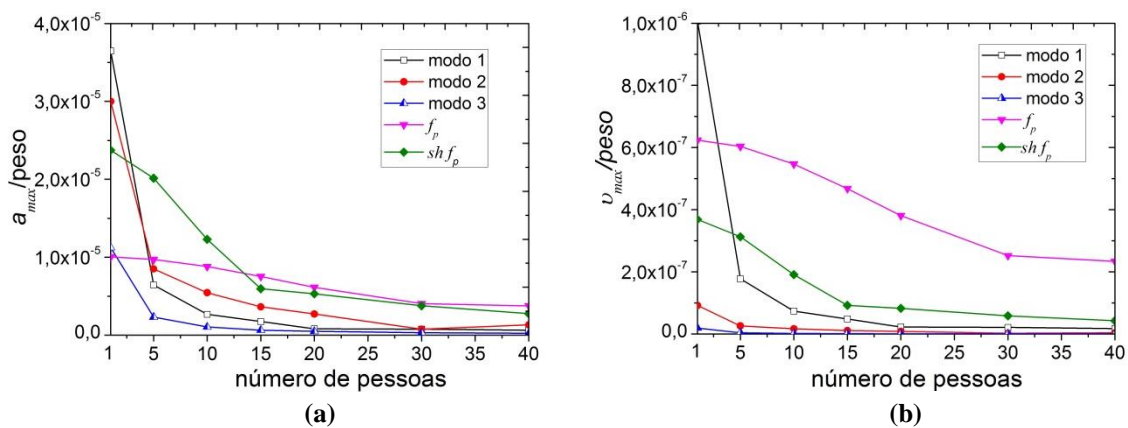


Figura 4.10: Amplitudes numéricas máximas normalizadas em relação ao peso total das pessoas de cada simulação vs. número de pessoas (a) Acelerações (a_{max}); (b) Deslocamentos (v_{max}); f_p : frequência de excitação, $sh f_p$: super harmônico da frequência de excitação

Na Figura 4.10(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.

Por outro lado, em termos de aceleração, 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.

Comentários finais

O comportamento dinâmico de passarelas sob cargas induzidas por pedestres, bem como estimativas da influência das pessoas na variação dos parâmetros modais da estrutura continuam apresentando uma série de dúvidas e os resultados experimentais e numéricos obtidos vem contribuir para sanar parte dessas questões.

Primeiramente, no referente aos ensaios experimentais realizados, deve-se mencionar que a instrumentação empregada permitiu a aquisição das forças aplicadas e da resposta da estrutura com uma precisão aceitável, não obstante, pode ser melhorada em trabalhos futuros, principalmente as medições das forças.

Dos testes realizados com pessoas em pé paradas sobre a estrutura verificou-se que, com o acréscimo do número de pessoas, aumenta o valor da taxa de amortecimento, corroborando a ideia que existe uma interação entre as pessoas e a estrutura, onde estas contribuem significativamente para o amortecimento do sistema. Deve-se ressaltar que, apesar de não se poder considerar para finalidade de projeto o acréscimo do amortecimento, esse efeito é benéfico para a segurança estrutural.

No que tange às frequências naturais, deve-se destacar que estas também se modificaram com a presença de pessoas paradas sobre a estrutura. O primeiro modo de vibração apresenta uma tendência clara de diminuição da frequência natural com o acréscimo de pessoas. Nos demais modos de vibração observa-se que a variação não segue um padrão determinado. Esse resultado é corroborado por ELLIS & JI (1997) que também verifica situação na qual os ocupantes nem sempre reduzem as frequências naturais dos modos mais altos.

Outro detalhe significativo referente ao nível de vibrações que deve se destacar é que, apesar das normas darem maior importância ao primeiro modo de vibração, os modos mais altos também devem ser levados em consideração, principalmente se a estrutura é

flexível e a densidade de tráfego de pedestres não é muito elevada. No caso da passarela analisada, mostrou-se que o segundo modo apresentou os maiores valores de aceleração.

A determinação experimental da taxa de amortecimento da estrutura com pessoas andando tornou-se bem mais complexa devido às características do sinal, fazendo-se só possível a estimativa de uma tendência através da correlação com modelos numéricos.

Para o caso das pessoas entrando e saindo da passarela (situação 1) não se tem precisão suficiente para a determinação dos parâmetros modais. Isto se deve ao fato do tempo de permanência dos pedestres na passarela ser muito pequeno. De qualquer forma esses testes serviram para aferir o modelo numérico.

Por outro lado, no caso das pessoas andando em círculos (situação 2) foi possível a determinação desses parâmetros com maior precisão. As frequências naturais não se mostraram tão variáveis quanto para o caso de pessoas paradas, o que parece indicar que as pessoas, nesse caso, se comportam mais como uma carga dinâmica aplicada do que como um sistema massa-mola-amortecedor.

A modelagem numérica das pessoas paradas, considerando os indivíduos como massas concentradas nos nós, conseguiu estimar adequadamente as frequências naturais para o modo fundamental de vibração vertical, mas para os demais seria necessário verificar a contribuição da rigidez destes acoplados à estrutura.

O método de integração numérica implementado mostrou-se como uma ferramenta eficiente na análise, já que as respostas da estrutura obtidas através do programa, apresentaram boa correlação com os sinais de resposta dos acelerômetros. O modelo numérico também permitiu estimar uma tendência das possíveis variações da taxa de amortecimento da estrutura com a presença de pessoas andando. Apesar dos sinais experimentais de força apresentarem certo nível de ruído, dificultando a estimativa dos seus valores, observou-se uma tendência do aumento do amortecimento quando as pessoas estão andando em relação aos valores obtidos quando estão em pé. Esse efeito pode ser devido ao fato de que os pedestres não sincronizaram os seus movimentos ao movimento da estrutura, não obstante, um estudo mais aprofundado do fenômeno é requerido.

Por outro lado, a forma de representação matemática do carregamento humano no programa também resultou em uma ferramenta eficaz para a análise numérica da estrutura sob cargas humanas exercidas por diferentes quantidades de pessoas, apesar de utilizar a

forma de força de um único passo padrão para representar todos os passos ao longo do tempo, sendo que na realidade estes são variáveis e bem mais complexos. Deve-se ressaltar que, apesar dessas diferenças, os resultados analisados através de espectros de frequência e de resposta no tempo, para algumas situações de ensaio simuladas numericamente, foram bastante similares às respostas experimentais.

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. Para o caso analisado isso acontece até aproximadamente com 3 pessoas andando sobre a passarela, onde os deslocamentos dinâmicos são maiores. 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;

- No referente às normas de projetos dinâmico de passarelas é conveniente ressaltar que a simplificação proposta pela maioria delas 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 pequena densidade de pessoas, como mais comumente acontece na prática, as amplitudes de respostas estão associadas as 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 2º modo foram bastante significativas, o qual compromete 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.

5.1 Recomendações para trabalhos futuros

Após a análise e revisão dos resultados e dos comentários finais descritos anteriormente, pode-se sugerir algumas recomendações para pesquisas futuras:

- Utilização de outro sistema de instrumentação para medir as forças aplicadas das pessoas sobre a estrutura;
- Realizar um maior número de testes experimentais, bem como aumentar o tempo de execução do ensaio, de tal forma que permita estimar de forma mais precisa os parâmetros modais da estrutura para pessoas andando;
- Gerar numericamente carregamentos induzidos por pessoas tendo em conta as diferenças da força do passo para diferentes indivíduos e mais rigorosamente para um mesmo indivíduo, bem como estudar e propor novas formas de modelar matematicamente as forças induzidas por pessoas andando;
- Implementar uma ferramenta para análise numérica da estrutura através de modelo de interação pessoa-estrutura, onde as pessoas possam ser modeladas como um sistema massa-mola-amortecedor;
- Investigar através de resultados numéricos e experimentais a densidade de pessoas a partir da qual as frequências naturais da estrutura deixam de ser relevantes para as vibrações.

Referências Bibliográficas

AASHTO, 1997, American Association of State Highway and Transportation Officials. *Guide Specifications for Design of Pedestrian Bridges*.

ALLEN, D.E., RAINER, J.H., 1975, Floor vibration, *Division of Building Research*, NRCC. Canadian Buildin Digest (CBD) 173, Ottawa, Canada.

ARAGÃO FILHO, L. A. C. M., 2008, *Identificação de estruturas em operação através de análise modal híbrida*, Tese* de D.Sc., COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.

BACHMANN, H., AMMANN, W., 1987, Vibrations in Structures-Induced by Man and Machines, *Structural Engineering Documents*, Vol. 3e, International Association of bridge and Structural Engineering (IABSE), Zurich.

BACHMANN, H., PRETLOVE, J., RAINER, H., 1995, “Dynamic forces from rhythmical human body motions”. In: *Vibration Problems in Structures: Practical Guidelines*, Birkhauser, Appendix G, Birkhauser Verlag, Basel, Switzerland.

BLANCHARD, J., DAVIES, B. L., SMITH, J. W., 1977, “Design criteria and analysis for dynamic loading of footbridges”. In: *Proceedings of the DOE and DOT TRRL Symposium on Dynamic Behaviour of Bridges*, pp. 90–106, Crowthorne, UK.

BILLAH, K., SCANLAN R., 1991, “Resonance, Tacoma Narrows Bridge Failure, and Undergraduate Physics Textbooks” *American Journal of Physics* v. 59, n. 2, pp. 118-124.

BISHOP, N. W. M., WILLFORD, M., PUMPHREY, R., 1993, “Multi-person excitation of modern slender staircases”, In: *Engineering for crowd safety*, pp. 399-408, London, UK, March 1993. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier Science.

BROWNJOHN, J. M. W., 1999, “Energy dissipation in one-way slabs with human participation”. In: *Proceedings of the Asia-Pacific Vibration Conference 99*, Nanyang Technological University, Singapore, pp.155-60.

BROWNJOHN, J. M. W., 2001, “Energy dissipation from vibrating floor slabs due to human-structure interaction”, *Shock and Vibration*, v. 8, pp. 315–323.

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.

BUTZ, C., FELDMANN, M., HEINEMEYER, C., *et al.*, 2008, *Advanced load models for synchronous pedestrian excitation and optimized design guidelines for steel footbridges (SYNPEX)*. In: Technical Report RFS-CR 03019, Research Fund for Coal and Steel.

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

COSTA, N. P. A., 2013. *Interação dinâmica pessoa-estrutura de passarelas em material compósito*. Tese* de M.Sc, COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.

DALLARD, P., FITZPATRICK, T., FLINT, A., *et al.*, 2001, “London Millennium Bridge: Pedestrian-Induced Lateral Vibration”, *Journal of Bridge Engineering*, ASCE, v.6, n.6, pp. 412-417.

DA SILVA, H. T., BRITO, H. M. B. F., PIMENTEL, R. L., 2013, “Modeling of crowd load in vertical direction using biodynamic model for pedestrians crossing footbridges”, *Canadian Journal of Civil Engineering*, v.40, pp. 1196-1204.

EBRAHIMPOUR, A., SACK, R. L., VAN KLEEK, P. D., 1989, “Computing crowd loads using a nonlinear equation of motion”. In: *Proceeding of the 4th International Conference on Civil and Structural Engineering*, v.2, pp. 47-52.

EBRAHIMPOUR, A., HAMAM, A.I, SACK R.L., *et al.*, 1996, “Measuring and modeling dynamics loads imposed by moving crowds”, *Journal of Structural Engineering*, v.122, n.12, pp. 1468-1474.

ELLIS, B. R., JI, T., 1997, “Human–structure interaction in vertical vibrations”. In: *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Structures and buildings*, v.122, n.1, pp. 1-9.

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

FALATI, S., 1999. *The contribution of non-structural components to the overall dynamic behaviour of concrete floor slabs*. Ph.D. dissertation, University of Oxford, Oxford, UK.

GALBRAITH, M.V., BARTON, F.W., 1970, “Ground loading from footsteps”, *Journal of Acoustic Society of America*, v.48, pp. 1288-1292.

GRIFFIN, M. J., 1990, *Handbook of human vibration*. London, UK, Academic Press.

GOLDMAN, D.E., 1948, *A review of subjective responses to vibratory motion of the human body in the frequency range 1 to 70 cycles per second*, Report NM-004-001, Naval Medical Research Institute, Washington, USA.

HARPER, F.C., 1961, *The forces applied to the floor by the foot in walking*. In: W.J. Warlow, B.L. Clarke (Eds.), Department of Scientific and Industrial Research (DSIR), HMSOr.

INGÓLFSSON, E.T., GEORGAKIS, C.T., JÖNSSON, J., 2012, “Pedestrian-induced lateral vibrations of footbridges: A literature review”, *Engineering Structures*, v.45 (Dec), pp. 21-52.

KALA, J., BAJER, M. , BARNAT, J., 2010, “Experimental approach of the single pedestrian-induced excitation”, *Slovak Journal of Civil Engineering*, v.18, n.4 (Dec), pp. 14-20.

KASPERSKI, M., SAHNACI, C., 2005, Random loads induced by walking. In: *Proceedings 6th international conference on structural dynamics EURODYN*, Paris.

KERR, S., 1998, *Human Induced Loading on Staircases*. PhD dissertation, Mechanical Engineering Department, University College London, UK.

KERR, S., BISHOP, N., 2001. “Human induced loading on flexible staircases”. *Engineering Structures*, v. 23, pp. 37-45.

LENZEN, K. H., 1966. “Vibration of steel joist-concrete slab floors”, *Engineering Journal*, American Institute of Steel Construction (AISC), v.3 (July), pp. 133-6.

LEONARD, D.R., 1966, *Human tolerance levels for bridge vibrations*. In: TRRL Report n. 34, Road Research Laboratory.

MATSUMOTO, Y., NISHIOKA, T., SHIOJIRI, H., *et al.*, 1978, “Dynamic design of footbridges”. In: *IABSE Proceedings*, n. 17/78, pp. 1-15.

NAKAMURA, S., KAWASAKI, T., 2006, “Lateral vibration of footbridges by synchronous walking”, *Journal of Constructional Steel Research*, v.62, n.11, pp. 1148-1160 .

NEWLAND, D. E., 2003. “Pedestrian excitation of bridges recent results”. In: *Tenth International Congress of Sound and Vibration*, Stockholm, Sweden.

NIGAM, S. P., MALIK, M., 1987. “A study on a vibratory model of a human body”, *Journal of Biomechanical Engineering*, v.109, n. 2, pp. 148-53.

OHLSSON, S., 1982. *Floor vibrations and human discomfort*. Ph.D. dissertation. Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden.

PACHI, A., JI, T., 2005, “Frequency and velocity of people walking”. *The Structural Engineer*, v.83, pp. 36-40.

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

PIMENTEL, R. L., WALDRON, P., 1996. “Validation of the numerical analysis of a pedestrian bridge for vibration serviceability applications”. In: *Proceedings of the International Conference on Identification in Engineering Systems*, pp. 648-657, Swansea, UK.

POLENSEK, A., 1975. “Damping capacity of nailed wood-joint floors”, *Journal of Wood Science* v.8, n. 2, pp. 141-151.

POSTLETHWAITE, F., 1944, Human susceptibility to vibration, *Engineering*, v. 157, pp. 61–63.

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*, v. 326, pp. 1-49.

RAINER, J. H., PERNICA, G., 1981. “Damping of a floor sample”. In: *The Second Speciality Conference on Dynamic Response of Structures: Experimentation, Observation, Prediction and Control*, 859-73, Atlanta, Georgia, USA.

RAINER, J.H., PERNICA, G., 1985. *Vibration characteristics of a floor sample*. In: NRCC-24298, National Research Council of Canada, Division of Building Research, Ottawa, Canada.

RAINER, J., PERNICA, G., ALLEN, D., 1988. “Dynamic loading and response of footbridges”, *Canadian Journal of Civil Engineering*, v.15, pp. 66–71.

RICCIARDELLI, F., BRIATICO, C., INGOLFSSON, E., *et al.*, 2007. “Experimental validation and calibration of pedestrian loading models for footbridges”. In: *Proceedings of the International Conference on Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures EVACES*.

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*, v. 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.

SETRA, 2006. Footbridges, Assessment of vibrational behavior of footbridges under pedestrian loading, *Technical guide SETRA*, Paris, France.

SHAHABPOOR, E., PAVIC, A., RACIC, V., 2016, “Identification of mass–spring–damper model of walking humans”, *Structures*, v.5, pp. 233–246.

SMITH, J.W., 1969. *The Vibration of Highway Bridges and the Effects on Human Comfort*, Ph.D. dissertation, University of Bristol, Bristol, UK.

STEVENSON, R., 1821., “Description of bridges of suspension”, *Edinburgh Philosophical Journal*, v.5, n.10, pp. 237–256.

TILDEN, C.J., 1913, “Kinetic effects of crowds”. In: *Proceedings of ASCE* , v.39, n.3, pp. 325–340.

TILLY, G., 2011, “Dynamic behaviour and collapses of early suspension bridges”. In: *Proceedings of the ICE - Bridge Engineering [1478-4637]*, v.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.

TOSO, M.A., GOMES, H.M, DA SILVA F.P., *et al.*, 2016, “Experimentally fitted biodynamic models for pedestrian–structure interaction in walking situations”, *Mechanical Systems and Signal Processing* ,590–606, pp. 72-73.

VAN NIMMEN, K., LOMBAERT, G., JONKERS, I., *et al.*, 2014, “Characterisation of walking loads by 3D inertial motion tracking”, *Journal of Sound and Vibration*, v.333, pp. 5212–5226.

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.

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

WALLEY, F., 1959, St James’s park bridge. In: *Proceedings of the Institution of Civil Engineers* 12 (6257), pp. 217–222.

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.

WRIGHT, D.T., GREEN, R., 1959, *Human sensitivity to vibration*. In: Report No. 7, Queen’s University, Kingston, Ontario, Canada.

YAO, S., WRIGHT, J., PAVIC, A., *et al.*, 2002. “Forces generated when bouncing or jumping on a flexible Structure”. In: *Proceedings of the International Conference on Noise and Vibration*, v.2, pp. 563–572, Leuven, Belgium.

YOUNG, P., 2001, “Improved floor vibration prediction methodologies”. In: *Proceedings ARUP’S Seminar on Structural Vibration and Structure-borne Noise: Current Developments in Assessment and Design*, London.

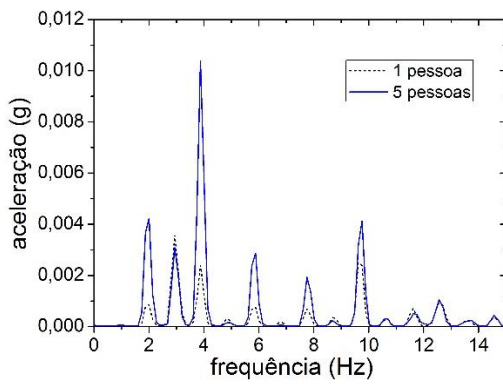
ŽIVANOVIĆ, S., PAVIĆ, A., REYNOLDS, P., 2005, “Vibration serviceability of footbridges under human-induced excitation: a literature review”, *Journal of Sound and Vibration*, v. 279, n. 1-2, pp. 1-74.

ŽIVANOVIĆ, S., PAVIC, A., REYNOLDS, P., *et al.*, 2005 “Dynamic analysis of Lively footbridges under everyday pedestrian traffic”. In: *Proceedings 6th International Conference on Structural Dynamics EURODYN’05*, Paris, France.

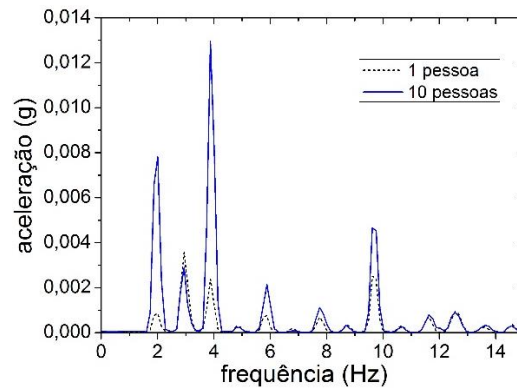
Anexo A

Espectros de resposta das situações simuladas de pessoas andando

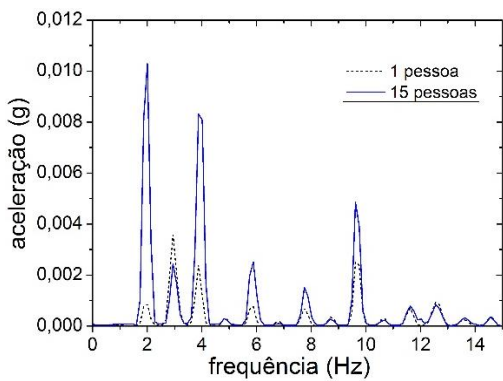
Seguidamente são mostradas as respostas obtidas da simulação numérica de carregamentos induzidos por pessoas andando. Os gráficos mostram a comparação dos espectros de frequência de uma pessoa andando com as restantes situações que não foram mostradas durante o Capítulo 4.



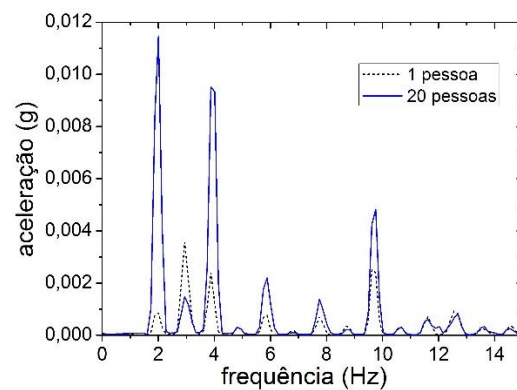
(a)



(b)



(c)



(d)

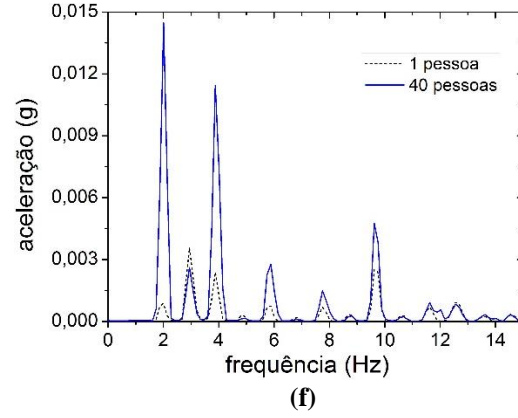
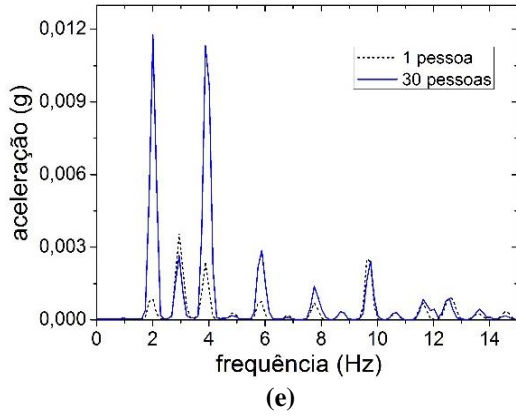


Figura A.1: Comparação dos espectros de frequências obtidos da simulação numérica. Uma pessoa com: (a) 5 pessoas; (b) 10 pessoas; (c) 15 pessoas; (d) 20 pessoas; (e) 30 pessoas; (f) 40 pessoas