INTERAÇÃO DINÂMICA PESSOA-ESTRUTURA DE PASSARELAS EM MATERIAL COMPÓSITO

Natasha de Paula Amador da Costa

DISSERTAÇÃO APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Aprovado por:	
	Prof. Raimundo Pereira de Vasconcelos, D.Sc.
	Prof. ^a Michèle Schubert Pfeil, D.Sc.
	Prof. Roberto Leal Pimentel, D.Sc.
	Prof. Wendell Diniz Varela, D.Sc.

MANAUS MAIO DE 2013

Ficha Catalográfica

(Catalogação realizada pela Biblioteca Central da UFAM)

Costa, Natasha de Paula Amador da

C837i

Interação dinâmica pessoa-estrutura de passarelas em material compósito / Natasha de Paula Amador da Costa. - Manaus: UFAM, 2013.

100 f.; il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Universidade Federal do Amazonas, 2013.

Orientador: Prof. D.Sc. Raimundo Pereira de Vasconcelos

Co-orientadora: Profa. D.Sc. Michèle Schubert Pfeil

1. Passarela 2. Dinâmica de estruturas 3. Material compósito I. Vasconcelos, Raimundo Pereira de (Orient.) II. Pfeil, Michèle Schubert III. Universidade Federal do Amazonas IV. Título

CDU (2007): 624.016:531.3(043.3)

A minha Mãe e Irmãos A minha avó Alice (in memoriam) A Jimmy Christiaan Steenmeijer (in memoriam)

Agradecimentos:

A minha mãe Leonice, avó Alice (*in memoriam*), padrasto ("pai") Laércio e irmãos Wanessa, Yuri, Francy, Luís Paulo e Paulo Lohan por todo amor, apoio, incentivo e fé em mim, durante toda a vida e em especial durante os anos em que eu cursei o mestrado, e sem os quais eu nada conseguiria.

Ao melhor amigo e eterno amor Jimmy Christiaan Steenmeijer (*in memoriam*), um dos principais responsáveis por eu estar realizando este trabalho.

Aos meus orientadores Raimundo e Michèle, pela oportunidade, paciência ilimitada, generosidade, incentivo e por acreditarem em mim, mesmo quando eu mesma já não acreditava.

Aos meus queridos amigos Rodolfo e Carlos Rossigali por toda ajuda no FORTRAN e nas questões lógicas da dissertação. A Marcela, Carlos Seruti, Dimas, Andrielli e Iolanda por compartilharem os momentos de desânimo e alegria.

A Diana, Lauria, Juliana, Josélia, Júlia, Melina, Tânia e Shirley, por estarem comigo em todos os momentos de tristeza e felicidade, lágrimas e risadas, pobreza e compras.

A todos os funcionários da UFAM e LABEST que contribuíram para ajudar em tudo o que foi possível durante o mestrado.

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

INTERAÇÃO DINÂMICA PESSOA-ESTRUTURA DE PASSARELAS EM

MATERIAL COMPÓSITO

Natasha de Paula Amador da Costa Maio/2013

Orientadores: Raimundo Pereira de Vasconcelos e Michèle Schubert Pfeil

Programa: Engenharia Civil

A resposta dinâmica teórica de passarelas induzidas por atividades humanas tais como caminhar e correr é tradicionalmente determinada considerando-se estas ações como cargas periódicas móveis. Entretanto no caso de passarelas muito leves, como exemplo aquelas executadas em material compósito, pode ocorrer interação dinâmica entre a estrutura e as pessoas.O estudo da interação estrutura-pessoa é feito neste trabalho com o uso de modelos biodinâmicos com um grau de liberdade extraídos da literatura para situações de pessoa em pé e parada ou caminhando sobre uma superfície rígida. Escrevendo-se as expressões matemáticas das forças de interação pessoa - estrutura desenvolveram-se os sistemas de equações de movimento que acoplam as características dinâmicas da estrutura e da pessoa. A integração numérica das equações do sistema discretizado da estrutura mais pessoa fornece as respostas no domínio do tempo. Com a aplicação do modelo a um sistema com pessoas em pé e paradas observaram-se a redução de frequência natural do sistema e a redução das amplitudes de resposta em vibração livre e forçada em relação à estrutura isolada. Para a aplicação do modelo à situação de pessoa caminhando foi utilizada a passarela em material compósito Aberfeldy, na Escócia, e os resultados comparados às respostas experimentais da literatura. Estes exemplos mostraram que a resposta teórica com interação dinâmica pessoa – estrutura fornece resultados consistentes com a resposta experimental, dependendo, entretanto, do modelo biodinâmico empregado.

Palavras-chave: Passarela, dinâmica, interação estrutura-pessoa, material compósito.

v

Abstract of Thesis presented to UFAM / COPPE-UFRJ as a partial fulfillment of the

requirements for the degree of Master of Science (M. Sc.).

PEDESTRIAN – STRUCTURE DYNAMIC INTERACTION IN FRP COMPOSITE

FOOTBRIDGES

Natasha de Paula Amador da Costa

May/2013

Adivisors: Raimundo Pereira de Vasconcelos e Michèle Shubert Pfeil

Department: Civil Engineering

In traditional dynamic analysis of footbridges the pedestrians are considered as

moving time varying loads in vertical and horizontal directions. This approach is

appropriate for most footbridges systems but for lightweight structures such as composite

footbridges a high degree of human – structure interaction may be expected.

The analysis of the pedestrian – structure dynamic interaction is performed in this

work with the aid of one degree of freedom biodynamic models extracted from the

literature applicable to standing person or to walking person on a rigid surface. After

expressing the interaction forces the motion equations of the coupled system person –

structure were developed by considering one flexural bending mode of the structure as

generalized coordinate. The Runge-Kutta method is employed to integrate the motion

equations. Application of the model to a coupled system with standing persons subjected to

free and forced vibrations yielded to the reduction of the response frequency and the

growth of the apparent damping ratio as compared to the isolated structure.

Aberfeldy FRP composite footbridge was used as an example of structure which displays

dynamic interaction with pedestrians. Theoretical results in terms of acceleration response

were compared to the corresponding experimental measurements during the passage of a

single test subject which adjusted his pacing rate to the natural frequency of the system.

These comparisons showed that the interaction model provided consistent results and that

good correlation depend on the biodynamic model employed.

Keywords: Footbridge, dynamic, interaction pedestrian – structure dynamic, composit

vi

Sumário

Capítulo I: Introdução
I.1 Motivação e Cenário do Problema1
I.2 Objetivos
I.3 Escopo do Trabalho
Capítulo II: Estruturas sob Ação de Carga Móvel Devido a Atividade Humana de
Caminhar 12
II.1 Estudo da Cinemática das Atividades Humanas
II.2 Ação Humana de Caminhar como Carga Móvel Vertical14
II.3 Sensibilidade Humana às Vibrações
II.4 Resposta da Estrutura à Ação do Caminhar de um Pedestre
II.4.1 Aplicação do Modelo de Carga Humana no Meio do Vão
II.4.2 Rainer et al24
II.4.3 Modelo Analítico-Numérico no Domínio do Tempo25
II.4.4 Exemplo de Aplicação26
II.5 Resposta da Estrutura ao Caminhar de muitas Pessoas (Multidão)29
Capítulo III: Modelos Biodinâmicos de Pessoas 31
III.1 Sistemas massa-mola-amortecedor
III.2 Modelos Biodinâmicos para Pessoa em Pé ou Sentada
III.2.1 Modelos Biodinâmicos com Um Grau de Liberdade (GL)32
III.2.2 Modelos Biodinâmicos com Dois GL
III.2.3 Modelos Biodinâmicos com Quatro GL para Pessoas em Pé e Sentadas34
III.2.4 Modelos Biodinâmicos com 15 GL para Pessoa em Pé
III.3 Modelos Biodinâmicos de Um GL para Pessoas Caminhando37
III.3.1 Modelo de Silva e Pimentel (2011)37
III.3.2 Modelos pesquisados por Caprani et al. (2011)40
Capítulo IV: Modelos Analítico-Numéricos da Interação Dinâmica Estrutura-Pessoa 41
IV 1 Modelo Numérico da Interação Dinâmica Estrutura-Pessoa em Pé 41

IV.1.1 Modelo de Estrutura e Equações de Movimento41
IV.1.2 Equações de Movimento do Sistema Acoplado Estrutura-Pessoa em Pé43
IV.2 Modelo de Pessoa Caminhando sobre uma Superfície Rígida
IV.3 Modelo de Interação Estrutura-Pessoa Caminhando
IV.4 Implementação Computacional e Validação Preliminar
Capítulo V: Resultados Modelo de Interação Estrutura-Pessoa em Pé 53
V.1 Comparação Teórico-Experimental
V.2 Estudo Paramétrico
V.2.1 Vibração Livre57
V.2.2 Vibração Forçada59
Capítulo VI: Resultados do Modelo de Interação Estrutura-Pessoa Caminhando 62
VI.1 Introdução
VI.2 Passarela Aberfeldy62
VI.3 Características Modais da Passarela Aberfeldy
VI.4 Resposta Dinâmicas da Passarela Aberfeldy sob Ação de Pedestre Caminhando67
VI.5 Aplicação do Modelo de Carga Móvel no Sistema Passarela Aberfeldy + Pessoa68
VI.6 Modelo de Interação com Modelo Biodinâmico de Pimentel e Silva (2011)71
VI.7 Modelo de Interação com Modelo Biodinâmico adotado por Caprani (2011)73
VI.8 Análise dos Resultados
Capítulo VII: Conclusões e Sugestões 81
Referencias Bibliográficas 84

I.1 Motivação e Cenário do Problema

Provavelmente o registro detalhado mais antigo de colapso de passarela por ação humana ocorreu em 1831 em Broughton, Inglaterra, quando soldados estavam marchando sobre a passarela (Zivanovic, 2005).

Além da segurança ao colapso, o conforto do usuário pode ficar comprometido pela excessiva vibração de passarelas, sendo este critério, portanto, de grande relevância na etapa de projeto de tais estruturas. A resposta dinâmica em passarelas devida às ações produzidas por atividades humanas tais como caminhar e correr se deve à prática atual da concepção arquitetônica de estruturas com formas cada vez mais esbeltas e flexíveis.

Podem-se distinguir eventos de vibrações em passarelas nos modos de vibração de flexão vertical e horizontal. Entre os casos mais recentes, e responsáveis pelo desencadeamento de maior atenção técnica ao problema de vibrações em passarelas, estão a Passarela *Solferino* (Figuras I.1), na França, em 1999 (Charles, 2005) e a *Millennium Bridge* (Figuras I.2), em Londres, em 2000 (Willford, 2002), ambas fechadas após sua inauguração para ajustes estruturais, em razão de apresentarem deslocamentos horizontais excessivos provocados por atividades humanas.



Figura I.1 - Solferino Bridge, em Paris - França

(Fonte:<http://500px.com> Acesso em: 10 abr. 2013, 22:21:10)



Figura I.2 – *Millennium Bridge*, em Londres – Inglaterra (Fonte:<http://www.ricksteves.com/images/pledge/insights/millennium_bridge_hr.jpg > Acesso em: 10 abr. 2013, 22:30:50)

Entretanto, outras passarelas já haviam apresentado anteriormente problemas de vibração excessiva em flexão horizontal sem que estudos aprofundados fossem elaborados e divulgados à comunidade científica de modo a evitar outras ocorrências. Em 1975, a Passarela *Auckland Harbour Road Bridge*, na Nova Zelândia, em 1977, a passarela *Queens Park Bridge*, *Chester* (Figura I.3), UK, (Dallard, 2001), e em 1989 a Passarela *Toda Park Bridge* (Figura I.4) no Japão, (Nakamura, 2002) apresentaram o fenômeno de consideráveis deslocamentos horizontais, devido à movimentação de multidão. Observa-se pelas figuras citadas que o fenômeno ocorreu em passarelas com diferentes sistemas estruturais.

Como exemplo de estruturas que apresentam vibrações excessivas em flexão vertical devidas às ações humanas podem ser citadas:

- a passarela na forma de lâmina em catenária (Figura I.5) próxima a Sheffield, Inglaterra;
- a passarela em viga de seção celular de aço (Figura I.6) construída em Podgorica, Montenegro;
- e a passarela *Aberfeldy* (Figura I.7), Escócia, GB.

Em comum estas passarelas apresentam a frequência natural de vibração em flexão vertical na faixa de frequências fundamentais do caminhar humano.

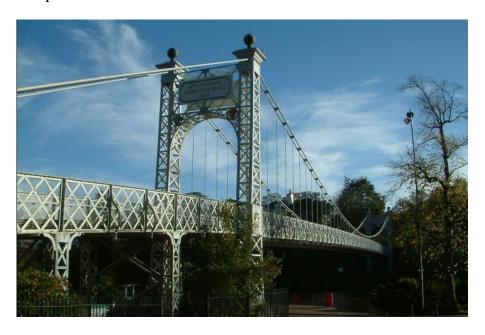


Figura I.3 – Queens Park Bridge, em Chester – Inglaterra

(Fonte: http://www.chesteraccomodation.biz/?page=56&lang=eng Acesso em: 10 abr. 2013, 21:25:15)

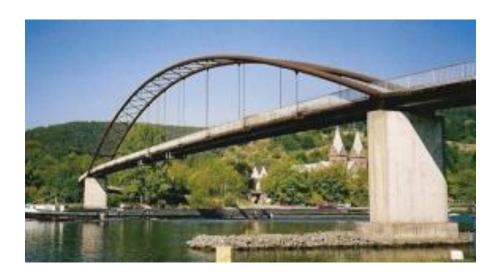


Figura I.4 – *Toda Park Bridge*, Japão (Fonte: Ingdófsson, 2012)



Figura I.5 – Passarela na forma de lâmina em catenária, próxima a Sheffield, Inglaterra (Fonte: Zivanovic, 2006)



Figura I.6 – Passarela em viga de seção celular de aço, em Podgorica, Montenegro (Fonte: Zivanovic, 2006)

A passarela estaiada Aberfeldy, foi construida em material não convencional ao longo do rio Tay em um campo de golfe público em 1992 na Escócia. Esta possui 113,0 metros de comprimento, e conta com duas torres com 18,0 metros onde se ancoram 20 estais cada. Foi executada com perfis pultrudados de GRP – *Glass Reinforced Polyester* - para o tabuleiro e torres e de fibras de aramida revestidas com polietileno (*Kevlar*) para os

estais, como mostra a Figura I.7. Como esta estrutura será alvo de estudo para validação de um modelo de interação dinâmica estrutura-pessoa caminhando proposto neste trabalho, ela será apresentada com maiores detalhes no Capítulo VI deste documento.



Figura I.7 – Passarela Aberfeldy, Escócia, GB

(Fonte: http://www.pwpeics.se/photogallery/Aberfeldy.JPG > Acesso em: 10 abr. 2013, 21:49:45)

E finalmente apresenta-se um exemplo de passarela (Figura I.8) concebida com análise rigorosa prévia de sua resposta dinâmica frente a atividade humana: a passarela *Sun-Yu*, que liga a extremidade sul de Seoul (Coreia) à ilha de Sun-Yu, construída com concreto de alta performance reforçado com fibras de aço e possui o vão principal com cerca de 120 metros. Em razão de ser uma estrutura que apresentava possibilidade de problemas com vibrações durante a travessia de pedestres em seus 1°, 2° e 3° modos de vibração, nela foram instalados atenuadores dinâmicos sincronizados (ADS), a fim de evitar tais efeitos (<http://en.structurae.de/structures/data/index.cfm?id=s0003541> Acesso em: 10 abr. 2013, 23:19:41).



Figura I.8 – Passarela Sun-Yu, em Seoul - Coreia

(Fonte: http://www.panoramio.com/photo/3318406> Acesso em: 10 abr. 2013, 23:30:12)

A metodologia tradicional de análise e verificação estrutural apresenta as ações decorrentes das atividades humanas como cargas estáticas. No caso em que se espera um comportamento dinâmico da estrutura frente a estas atividades humanas representa-se o carregamento por meio de cargas periódicas escritas na forma de séries de Fourier com amplitudes e frequências fundamentais específicas para cada tipo de atividade (caminhar, correr, pular, etc.).

Quanto às exigências de dimensionamento para passarelas, no que diz respeito a efeitos dinâmicos, alguns critérios são estabelecidos para seu adequado desempenho, como suas frequências naturais estarem fora dos limites de frequências críticas pré-determinadas, como constam nas normas técnicas brasileiras: NBR 6118 (2003), NBR 7188 (1982) e NBR 8800 (2003). Contudo em normas internacionais, como EUROCODE 1 (2004), CEB 209 (1991), AFGC (2006) e SETRA (2006), além da faixa de frequência crítica, critérios como aceleração, são usados, a fim de observar questões a cerca do conforto aos usuários.

Para estruturas leves, em que a massa das pessoas é um percentual não desprezível da massa modal da estrutura, forma-se um sistema conjunto estrutura-pessoas no qual pode ocorrer uma interação dinâmica entre as partes. As propriedades dinâmicas de frequência natural e taxa de amortecimento modal deste sistema acoplado diferem daquelas da estrutura original.

Quando se trata do acréscimo de amortecimento à estrutura devido à presença humana, são incontáveis os trabalhos existentes, como Rainer e Pernica (1988), Ebrahimpour *et al.* (1989) e Pimentel e Waldron (1996). E tal fato já consta em Códigos do Canadá, Reino Unido e Dinamarca, que ditam taxas de 12% de amortecimento viscoso, para estruturas densamente povoadas (Pedersen, 2008).

Em um recente trabalho desenvolvido por Pedersen (2008), uma plataforma instrumentada em concreto, foi submetida a um impacto inicial, na presença de quatro sacos de areia com 80,0 kg cada, que posteriormente foram substituídos por quatro pessoas sentadas em diferentes posturas, conforme esquema da Figura I.9.

O resultado do experimento foi um considerável aumento do amortecimento com a presença humana, em relação aos resultados obtidos com sacos de areia. Além disso, ficou evidente que a posição e postura dos indivíduos têm influência nas respostas, do sistema agora acoplado homem-estrutura, como pode ser verificado nos gráficos da Figura I.10.

Em 1997, experimentos realizados por Ellis *et al* (2001) no estádio *Twickenham*, construído em Londres - Inglaterra, mostraram um modo adicional na resposta estrutural, na presença de ocupantes humanos (ver as Figuras I.11). Na estrutura com a presença de pessoas, aparecem novos picos no espectro de frequência, sendo o mais pronunciado em torno de 5,0 Hz, além de outro pico em torno de 18,0 Hz. Evidencia-se assim, a interação homem-estrutura, ou seja, os ocupantes funcionaram como um sistema mecânico acoplado à estrutura.

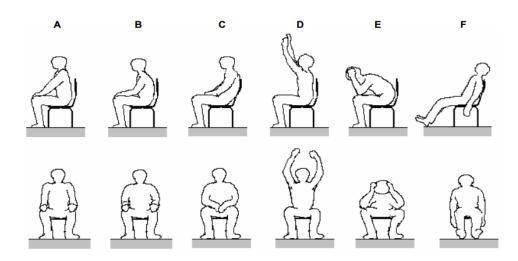


Figura I.9 – Posições e Posturas Humanas diferentes testadas – Vista Lateral e Frontal (Fonte: Pedersen, 2008).

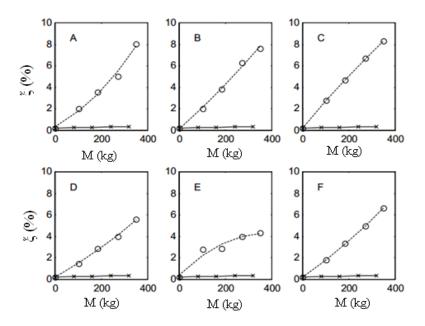


Figura I.10— Variação da resposta de Amortecimento do Piso, com acréscimo de massa (M), e para posturas distintas de A a F (o), comparado aos Sacos de Areia (+) (Fonte: Pedersen, 2008).

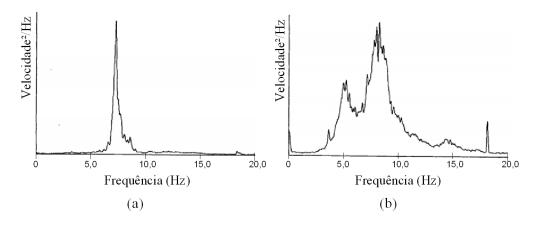


Figura I.11 – Respostas Estádio *Twickenham* (a) Estádio Vazio e (b) Estádio Ocupado por uma Multidão (Fonte: Ellis e Ji, 2001).

Quanto às respostas em frequência do sistema estrutura-pessoas, investigações experimentais realizadas por Litter (1998) *apud* Sachse (2003), em uma arquibancada retrátil com 99 assentos, forneceram as frequências naturais de dois modos de vibração horizontais e um vertical, com e sem a presença de pessoas, e estas em posições diferentes. O resultado foi que, com a presença de pessoas, os modos originais da estrutura sofreram mudanças significativas, com alterações em suas frequências, de acordo com a posição em que os indivíduos se encontravam (ver Tabela I.1). Observa-se na Tabela I.1 que para os

modos de flexão vertical e de torção as frequências do sistema estrutura mais pessoas são menores do que para estrutura isolada. Já para o modo de flexão horizontal do sistema estrutura mais pessoas em pé houve um pequeno acréscimo de frequência natural em relação ao da estrutura isolada.

Tabela I.1: Frequências Naturais Arquibancada Retrátil (Litter 1998, apud Sachse, 2003).

Configurações	Modo de Flexão Horizontal (Hz)	Modo de Torção (Hz)	Modo de Flexão Vertical (Hz)	
Estrutura Vazia	3,05	3,66	13,6	
Ocupantes em Pé	3,30	3,54	9,16	
Ocupantes Sentados	1,70	1,83	9,03	

A partir destas observações é notório que ao considerar a presença humana como apenas uma massa adicional à da estrutura, negligenciam-se as reais influências da interação homem-estrutura, quanto às frequências naturais, amortecimento e demais propriedades modais.

I.2 Objetivos

Este trabalho tem por objetivo geral: Abordar por meio de modelo analítico-numérico a interação dinâmica pessoa-estrutura em passarelas. Para o modelo do corpo humano adota-se um sistema massa-mola-amortecedor, com um grau de liberdade, atuando de forma interativa com a estrutura, representada por um modelo unifilar de elementos de pórtico plano.

Os objetivos específicos do trabalho podem ser escritos como:

- ➤ Realizar uma revisão na literatura do efeito em estruturas sob ação de carga móvel devido à ação de pessoas caminhando, bem como de modelos biodinâmicos que representam as características dinâmicas de pessoas em pé e de pessoas caminhando;
- Desenvolver modelos analítico-numéricos da interação estrutura-pessoa (em pé e parada e caminhando); as equações de movimento resultantes serão integradas numericamente ao longo do tempo para fornecerem a resposta de

uma estrutura de passarela submetida a carregamento proveniente de atividades humanas, considerando todas as nuances do conceito de interação;

Apresentar, analisar e discutir os resultados dos modelos de interação pessoa-estrutura em comparação com medições experimentais de Pedersen (2006) para o caso de pessoa parada e da Passarela *Aberfeldy*, realizada por Pimentel (1997), para a situação de pessoa caminhando.

I.3 Escopo do Trabalho

Esta dissertação está organizada da seguinte forma:

O Capítulo II trata do histórico do estudo de vibrações induzidas por atividades humanas, dissertando sobre sua cinemática, seus efeitos como carga móvel, e apresentando a formulação matemática responsável por sua representação. Conta também com aspectos a cerca da sensibilidade humana às vibrações em estruturas, bem como, à resposta em termos de aceleração da estrutura para um pedestre, descrevendo três métodos de obtenção: Aplicação do modelo de carga humana no meio do vão, de Rainer *et al.* e um modelo analítico-numérico de uma pessoa caminhando como um modelo de carga. Finalizando com um exemplo de aplicação dos três métodos de obtenção da resposta da estrutura abordados e cita a resposta da estrutura quanto a carregamento de multidão.

O *Capítulo III* refere-se a uma revisão de modelos biodinâmicos de pessoas presentes na literatura, com diferentes graus de liberdade para pessoas em pé e/ou sentadas. Conta também com modelos biodinâmicos de pessoas caminhando.

No *Capítulo IV* discorre-se sobre a formulação matemática, através das equações de movimento do sistema acoplado estrutura-pessoa em pé e caminhando. Além da implementação e validação preliminar da formulação desenvolvida em um programa computacional em linguagem FORTRAN, para obtenção de respostas no domínio do tempo.

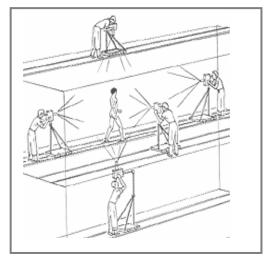
No *Capítulo V* são apresentadas as respostas do modelo de interação estrutura-pessoa em pé, começando por validar o modelo através de uma comparação teórico-experimental. Com posterior estudo paramétrico, com análises em vibração livre e forçada.

No *Capítulo VI* são apresentadas as respostas do modelo de interação estrutura-pessoa caminhando, com diversos modelos biodinâmicos aplicados ao modelo da passarela *Aberfeldy*. A análise das respostas se dará em função de comparações teórico-experimentais.

ESTRUTURAS SOB AÇÃO DE CARGA MÓVEL DEVIDO A ATIVIDADE HUMANA DE CAMINHAR

II.1 Estudo da Cinemática das Atividades Humanas

Estudos dos movimentos humanos foram registrados por pintores renascentistas como Leonardo Da Vince em seus desenhos e pinturas. Durante o século XIX, foram desenvolvidos métodos de medir a cinemática e a cinética do movimento, os quais foram aplicados na análise do caminhar humano, permitindo a aplicação de princípios de mecânica às análises biológicas e biomecânicas. Dentre as técnicas desenvolvidas no século XIX, citam-se estudos de Eadweard Muybridge (fotógrafo inglês considerado o pai da fotografia sequencial) para registros dos padrões de movimento de pessoas e animais, como pode ser observado na Figura II.1. Em 1883 Marey e Demeny (*apud* Baker, 2007) desenvolveram métodos de instrumentação e quantificação de parâmetros para análise da marcha humana. Braüne e Fischer, exploradores da fotogrametria analítica, foram os primeiros a fazer a reconstrução tridimensional do movimento humano, como mostrado na Figura II.2.



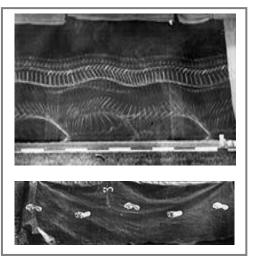


Figura II.1 – Captação de imagens para mapear o caminhar humano (Fonte: Marey e Demeny, 1887 *apud* Baker, 2007)

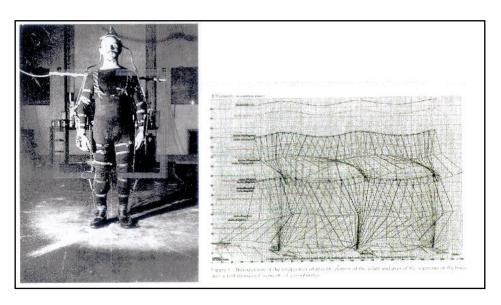


Figura II.2 – Modelo Tridimensional do movimento humano de Braüne e Fischer (Fonte: Braüne e Fischer, 1987 *apud* Baker, 2007)

Em 1981 Inman *et al* descreveram o movimento translacional do corpo humano através da sequência de períodos de contato dos pés com a superfície e de elevação dos pés, conforme ilustrado na Figura II.3, Dessa forma o *passo* é caracterizado como o contato do pé, seguido do contato do pé colateral, e o termo *passada* significa o intervalo entre dois contatos sequenciais do mesmo pé, conforme Figura II.4 (Perry, 2005).

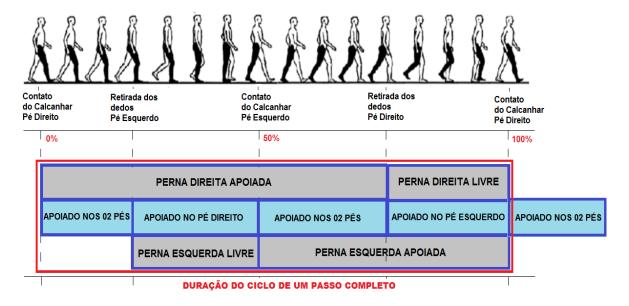


Figura II.3 – Ciclo de Marcha (Fonte: Adaptado de Inman et al, 1981, apud Varela, 2004)



Figura II.4 – Representação do Passo e da Passada (Fonte: Perry, 2005)

II.2 Ação Humana de Caminhar como Carga Móvel Vertical

As atividades humanas de relevância em estruturas de passarelas são caminhar e correr, ambas com variação de intensidade no tempo e espaço. E quanto a seus efeitos, dois aspectos são essenciais para uma completa compreensão: sua natureza periódica e difícil caracterização determinística, em razão da natureza singular de indivíduo para indivíduo. A descrição matemática das forças devidas às atividades humanas se baseia em análises de resultados obtidos a partir de ensaios experimentais com o uso de plataformas ou esteiras instrumentadas com células de carga, através das quais são medidas as reações do piso, correspondentes às ações causadas pela movimentação humana.

Entre as primeiras medições estão as de Halper *et al.* (1961, *apud* Racic *et al.* 2009), que com o uso de uma plataforma instrumentada estudaram o atrito e o deslizamento de pisos. O mesmo tipo de ensaio agora com a finalidade da captação das histórias de força vertical no tempo devido a um pedestre caminhando sobre plataforma rígida, foram realizados por Ohlsson (1982), Rainer, Pernica e Allen (1988), Battista e Roitman (1990), Alves (1990) e Kerr (1998). Ensaios com variações no número de indivíduos, seus pesos e comprimento das plataformas instrumentadas foram realizados por Roitman *et al* (2002).

Tuan e Saul (1986), Ebrahimpur *et al.* (1989) e Varela (2004) a partir de ensaios experimentais, destacam a influência de aspectos como idade, condições físicas, característica do movimento e postura, além do instante de contato com os pés na estrutura, no carregamento humano aplicado na superfície. Uma revisão abrangente dos ensaios para medição de forças devidas a atividades humanas pode ser encontrada em Racic *et al.* (2009)

A Figura II.5 ilustra em linha grossa cheia a variação da força vertical do caminhar ao longo do tempo obtida em uma medição típica. Em linha cheia fina e em linha tracejada são mostradas as parcelas de forças referentes a cada um dos pés durante o tempo de

contato com a superfície que, combinadas, fornecem a força total. Observa-se em cada instante de tempo correspondente ao início de um passo, um pico de força originado do impacto do calcanhar na superfície.

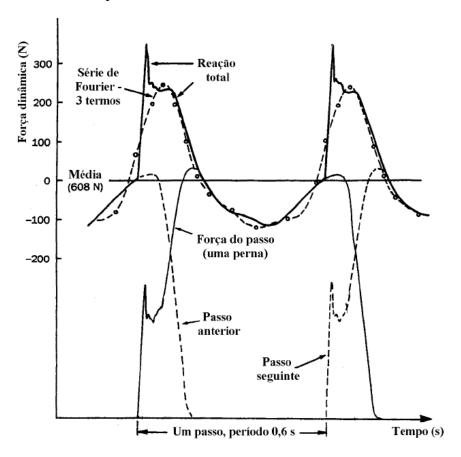


Figura II.5 – Força de Contato de um passo e Reação do Piso (Fonte: Ohlsson, 1982 *apud* Varela, 2004)

Observa-se na Figura II.5 o caráter periódico da força vertical que justifica o modelo de força determinístico tradicional, que consiste em uma série de Fourier com três ou quatro termos. Nesta série há uma parcela fixa, representativa do peso G da pessoa, e uma flutuante, devida aos três harmônicos, ou seja, as componentes estática e dinâmica da força, respectivamente. Dessa forma tem-se:

$$F(t) = G + \sum_{j=1}^{nh} G.\alpha_{j}.sen(j.2\pi.f_{pp}.t - \phi_{j})$$
(II.1)

onde:

• *nh* = número de harmônicos adotados para o cálculo da força;

- *j* = número do j-ésimo harmônico;
- α_i = coeficiente do j-ésimo harmônico;
- f_{pp} = frequência fundamental da atividade humana (do passo do caminhar)
- ϕ_j = diferença de fase entre o j-ésimo e o primeiro harmônico harmônico da frequência fundamental.

A Figura II.5 mostra graficamente em linha traço ponto a força representada pela série de Fourier com três termos em comparação com a força medida experimentalmente em linha cheia. Observa-se que o modelo da série de Fourier com três termos representa bem a variação da força exceto pelo impacto do calcanhar.

Devido ao caráter singular de cada indivíduo, quanto ao peso, condições físicas, maneira de caminhar, tipo de calçado, influências culturais, encontra-se na literatura uma faixa de variação para os coeficientes harmônicos (α_j) e ângulos de fase (ϕ_j) . A Tabela II.1 apresenta os valores obtidos por diversos autores. Para α_I algumas referências apresentam um valor único enquanto outros indicam funções das frequências f_{pp} do passo. Em relação aos coeficientes α_2 e α_3 a maioria dos autores apresenta um valor constante.

Os ensaios realizados por Kerr (1998) contaram com 40 indivíduos caminhando com o mesmo passo sobre plataforma instrumentada, com uma frequência de passo controlada por um metrônomo, que variava de 1,0 a 3,0 Hz. A Figura II.6 mostra os valores de α_I e α_2 obtidos para os diferentes ensaios realizados. Observa-se uma significativa dispersão dos resultados para α_2 enquanto α_I apresenta uma clara tendência de acréscimo com o aumento de f_{pp} , também com certa dispersão . A Figura II.6a ilustra ainda a curva ajustada a valores médios de α_I cuja equação em função da frequência do passo está mostrada na Tabela II.1. Quanto ao segundo e terceiro harmônico, o valor médio encontrado foi de aproximadamente 0,06.

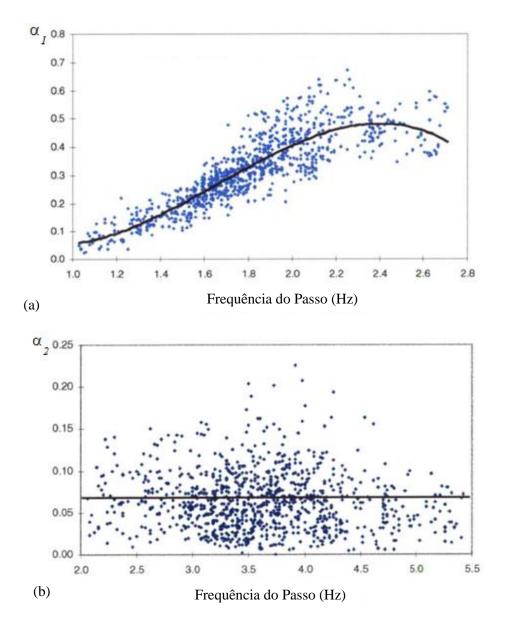


Figura II.6 – Resultados em termos de α_1 (Figura a) e α_2 (Figura b) dos ensaios realizados por Kerr (1998) e curvas de ajuste

Tabela II.1: Coeficientes da série de Fourier para carga dinâmica propostas por vários autores

Referência	Coeficientes da carga dinâmica				Número de Pessoas	Frequência do Passo f_{pp}
Referencia	$\alpha_{\scriptscriptstyle 1}$	$\alpha_{\scriptscriptstyle 2}$	$\alpha_{_3}$	$lpha_{\scriptscriptstyle 4}$	(n)	(Hz)
AISC (1997)	0,83 exp (-0,35 if_{pp} ; com i =1, 2, 3,4 para α_1 , α_2 , α_3 , α_4 , respectivamente ou ainda:				1	1,60 - 2,20
	0,50	0,20	0,10	0,05		
BS 5400 (1995) e ONT (1983)	0,257	-	-	-	qualquer	qualquer
BACHMANN <i>et al</i> (1995) e CEB (1983)	0,40	0,10	0,10	-	qualquer	1,60 - 2,40
COPPE (1990, 1991 e 1997)	0,34	0,10	0,10	-	qualquer	1,60 - 2,00
	0,25 - 0,20 log (n)	-	-	-	<u>< 10</u>	andar natural
	0,05	-	-	-	> 10	1,50 ou andar espontâneo
	0,18 - 0,05 log (n)	-	-	-	<u>< 10</u>	1,50 (*)
EBRAHIMPOUR	0,25 - 0,08 log (n)	-	-	-	<u>< 10</u>	1,75 (*)
et al (1996)	0,17	-	-	-	> 10	2,00 (*)
	0,34 - 0,09 log (n)	-	-	-	<u>< 10</u>	2,00 (*)
	0,25	-	-	-	> 10	2,00 (*)
	0,51 - 0,09 log (n)	-	-	-	<u><</u> 10	2,50 (*)
	0,42	-	=	-	> 10	2,50 (*)
KERR (1998)	$\alpha_{1} = -0.2649 f_{pp}^{3} + 1.3206 f_{pp}^{2} - 1.7597 f_{pp} + 0.7613$ $\alpha_{2} = \alpha_{3} = 0.06$				1	1,70 - 2,10
	$0.16 \text{ se } 3 \text{ Hz} < f_0 < 4 \text{ hz}$					
WYATT (1982)					qualquer	qualquer
	$(0,4) \times (1,4 - 0.25 \text{ fo}) \text{ se } 4\text{Hz} < f_0 < 4.8 \text{ Hz}$					
(1702)	$0.08 \text{ se } f_0 > 4.8 \text{ Hz}$ $f_0 \notin \text{a frequência fundamental da estrutura}$					
	f_0 e a frequencia fundamental da estrutura $Pessoa = 600N$					
YOUNG (2001)	$0,41 (f_{pp} - 0,95) > 0,56$		$0,033 + 0,0065 f_{pp}$	$0,013 + 0,0065 f_{pp}$	qualquer	1,00 - 2,80

^(*) valores de α_1 para outras frequências entre 1,5 e 2,5 Hz podem ser obtidos por interpolação linear

II.3 Sensibilidade Humana às Vibrações

Um dos principais critérios de dimensionamento de estruturas de passarela, no tocante ao seu comportamento dinâmico, está atrelado à sensibilidade humana às vibrações. Sensibilidade essa, muito difícil de determinar quantitativamente devido a variabilidade de percepção de indivíduo para indivíduo.

Nesse contexto, as vibrações transmitidas ao corpo humano são classificadas em vibrações de corpo inteiro e de extremidades ou segmentais. A primeira se caracteriza por baixas frequências e altas amplitudes, na faixa de 1,0 a 80,0 Hz, e a segunda de 6,30 a 1250,0 Hz. Em situações de ressonância, ou seja, quando a frequência natural do corpo humano se equivale à frequência de excitação, a direção do movimento tem influência específica na sensibilidade humana podendo causar, entre outros, desconforto e mal-estar (Wasserman, 1987). Assim as frequências de ressonância dos diversos segmentos do corpo humano são mostradas na Figura II.7.

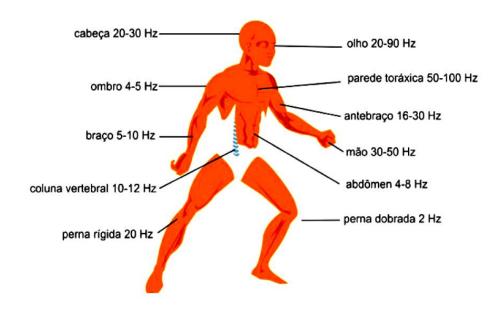


Figura II.7 – Frequências de Ressonância do Corpo Humano (Fonte: Wasserman, 1987).

Em termos gerais, os fatores envolvidos na sensibilidade, bem como, os níveis de intensidade de vibrações perceptíveis pelo homem são mostradas na Tabela II.2.

Tabela II.2: Fatores determinantes de Sensibilidade e Intensidade da Percepção Humana às Vibrações (baseado em CEB, 1991)

Sensibilidade		Intensidade		
Posição da Pessoa	Sentada		Deslocamento	
	Em Pé	Amplitudes	Velocidade	
	Deitado		Aceleração	
Direção de Incidência da Vibração em relação à Espinha Dorsal		Frequência de Vibração		
Atividade realizada no momento da vibração	Estacionário	Tempo de	Limite de Percepção	
	Caminhada	Exposição à	Limite de Perturbação	
	Corrida	Vibração	Limite de Segurança	
Idade e Sexo da Pessoa		Tipo de Amortecimento da Estrutura		

Segundo Zivanovic (2005), Reiher e Meister (1946) desenvolveram uma escala que permite descrever o nível de percepção e aceitabilidade humana de vibrações permanentes. A escala calibrada em função das frequências e amplitudes de deslocamento foi definida através de ensaios experimentais, onde um grupo de indivíduos em pé ficou submetido a vibrações permanentes, com uma variação de frequência de 1,0 Hz a 100,0 Hz acompanhadas de amplitudes variando de 0,01mm a 10,0 mm. Contudo, Lenzen em 1966, (Zivanovic, 2005), após estudar o comportamento de dois pisos em laboratório e de 49 diferentes tipos de pisos de edificações projetados para diversas ocupações, concluiu que modificando a escala original Reiher e Meister, ela poderia ser utilizada para sistemas de pisos com amortecimento menores que 5%. A escala é mostrada na Figura II.8.

Quando se trata dos parâmetros a serem considerados para determinação da resposta máxima de estruturas de passarela, quanto à atividade humana, a aceleração tem papel de destaque, sendo, portanto, o principal fator de avaliação de níveis aceitáveis de resposta tanto para o dimensionamento das estruturas, quanto para o conforto de seus usuários.

Goldman (1948) apud Varela (2004) apresentou uma escala em termos de aceleração, a partir dos níveis de sensibilidade humana às vibrações em relação ao tempo de exposição, como pode ser observado na Figura II.9. Como será discutido mais adiante, elevados níveis de aceleração ou deslocamento, além de prejudicar o conforto do pedestre podem também induzir a uma alteração ou perturbação do caminhar do pedestre. Entretanto, não foram encontradas na literatura, critérios para limitar os níveis de vibração com esta finalidade.

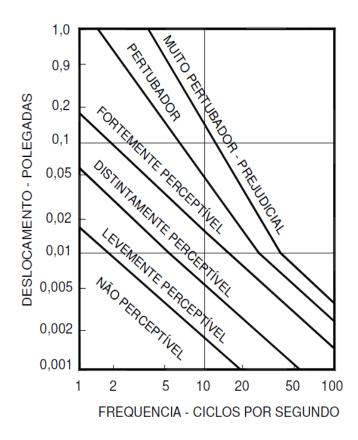


Figura II.8 – Escala de Nível de Percepção e Aceitabilidade Humana às Vibrações de *Reiher e Meister*, adaptada por *Lenzen* (Fonte: Zivanovic, 2005).

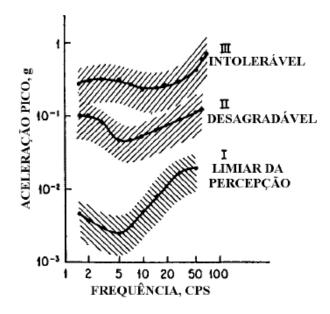


Figura II.9 – Acelerações pico, médias em várias frequências, perceptíveis às pessoas (I); desagradável (II); intoleráveis (III). Exposições de 5 a 20 minutos. As áreas hachuradas são um desvio padrão para cada lado da média. Dados médios de sete fontes (Fonte: Goldman, 1948 *apud* Varela, 2004).

II.4 Resposta da Estrutura à Ação do Caminhar de um Pedestre

Existem inúmeros procedimentos para o cálculo aproximado da resposta máxima das estruturas submetidas a atividades humanas, expressa através da determinação de sua aceleração máxima.

As divergências entre os vários métodos se dão principalmente, quanto aos critérios para consideração das funções correspondentes à força, bem como seu procedimento de aplicação na estrutura. Tal efeito se dá em razão da complexidade em se padronizar e quantificar as características humanas, para uma modelagem mais realística da força, bem como para distribuí-las na estrutura quanto à atividade exercida, como caminhar, correr e pular.

Outro ponto a ser considerado é a premissa das passarelas em que se deseja determinar a aceleração máxima, se comportando como vigas biapoiadas, ou seja, sujeitas apenas a esforços de flexão e corte, que para tanto, possuam uma frequência fundamental predominante.

Este item apresenta dois métodos analíticos para o cálculo aproximado da resposta máxima da estrutura: o método da aplicação da carga humana no meio do vão e o de Rainer *et al* (1988). Apresenta também a solução numérica no domínio do tempo da equação de movimento da estrutura sob ação do caminhar de uma pessoa, e um exemplo de aplicação dos três métodos.

II.4.1 Aplicação do Modelo de Carga Humana no Meio do Vão

Considera-se uma estrutura de passarela submetida a um carregamento harmônico representativo do caminhar humano, contudo, sem que o mesmo desenvolva deslocamento ao longo da estrutura, ou seja, é realizada uma simulação de um indivíduo "andando" no meio do vão da passarela, sem sair do lugar. Admite-se que a frequência do "caminhar" é igual à da estrutura ω.

Para o cálculo aproximado da resposta máxima da estrutura é necessário realizar determinadas considerações tais como:

• Estrutura de Passarela com um grau de liberdade y, ou seja, vibrando no modo fundamental de vibração em flexão vertical;

• Com as propriedades generalizadas de massa *m*, amortecimento viscoso *c* e rigidez *k* pode-se escrever a equação de movimento:

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + ky = F(t) \tag{II.2}$$

A força de excitação F(t) é dada pelo harmônico fundamental da série de Fourier (Equação II.1) sendo que w_{pp} é a frequência de excitação devido à atividade humana ω_p, e α coeficiente de Fourier do harmônico representativo da atividade simulada pela força harmônica, G, é o peso da pessoa, e F(t), a força harmônica, no instante t:

$$F(t) = G.\alpha.sen.\omega_{nn}t \tag{II.3}$$

Segundo Clough (1986), a resposta permanente da estrutura devido ao movimento gerado pela força harmônica é:

$$y = \frac{G.\alpha}{k} \cdot \frac{1}{(1-\beta^2) + (2.\xi\beta^2)} \cdot \left[(1-\beta^2) sen.\omega_{pp} t - 2\xi\beta \cos\omega_{pp} t \right]$$
 (II.4)

onde:

- $\beta = \frac{\omega_{pp}}{\omega}$ relação da frequência de excitação e a frequência angular da estrutura;
- $\frac{G}{k} = y_{st}$ deslocamento estático vertical no meio do vão da passarela devido ao peso de uma pessoa;
- ξ Taxa de Amortecimento da Passarela.

Ainda segundo Clough (1986), a resposta dinâmica permanente máxima é:

$$y_{\text{max}} = \alpha. y_{\text{st}}.FAD \tag{II.5}$$

sendo que FAD é o fator de Amplificação Dinâmico dado por:

$$FAD = \frac{1}{\left[\left(1 - \beta^2\right)^2 + 4.\xi^2 \beta^2\right]^{\frac{1}{2}}}$$
 (II.6)

Para a premissa assumida de ressonância tem-se o fator $\beta = 1$:

$$FAD = \frac{1}{2\xi} \tag{II.7}$$

A partir do deslocamento máximo no meio do vão da passarela, é determinada a aceleração máxima, como se segue:

$$y_{\text{max}} = -\frac{G.\alpha}{k} \cdot \frac{1}{2\xi} \tag{II.8}$$

$$a_{\text{max}} = 4.\pi^2.f^2.y_{st}.\alpha.FAD = \frac{4.\pi^2.f^2}{2\xi}y_{st}.\alpha$$
 (II.9)

Este modelo pode também ser aplicado considerando-se algum harmônico superior da força que esteja em ressonância com a estrutura.

Este procedimento fornece um resultado superestimado, uma vez que, não considera a carga se movendo ao longo do vão e nem o efeito do número limitado de passos necessários ao pedestre para atravessar o vão.

II.4.2 Rainer et al. (Rainer, Pernica e Allen, 1988)

Este método considera a mobilidade da carga em toda a passarela e não sua aplicação apenas no meio do vão.

Dessa forma a formulação que determina a aceleração máxima, é tomada a partir de um fator de amplificação dinâmico que leva em conta o deslocamento da carga ao longo do vão, representada pela Equação II.10.

$$a_{\text{max}} = 4.\pi^2.f^2.y_{st}.\alpha.\Phi \text{ [m/s}^2]$$
 (II.10)

onde:

Φ - fator de amplificação dinâmico, obtido a partir do gráfico da Figura II.10.

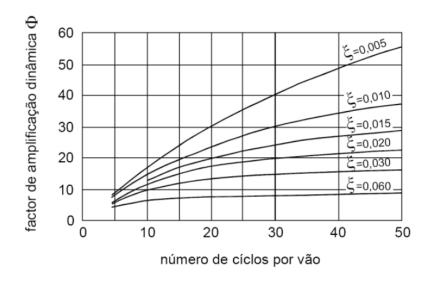


Figura II.10 – Gráfico para determinar o Fator de Amplificação Dinâmico Φ para viga biapoiada (Fonte: adaptado de Rainer, Pernica e Allen, 1988).

O valor correspondente à abscissa do gráfico da Figura II.10 é o número de ciclos por vão, que é obtido pelo produto entre a ordem do harmônico em análise e o número de passos necessários para percorrer todo o vão da passarela.

II.4.3 Modelo Analítico-Numérico no Domínio do Tempo

Para obter a resposta no domínio do tempo de uma passarela discretizada em elementos finitos sob a ação de um ou mais pedestres caminhando sobre a mesma pode-se aplicar o método da superposição modal. A equação de movimento para um grau de liberdade generalizado é escrita na forma da Equação II.2 a ser integrada no domínio do tempo através do método de Runge-Kutta e F(t) é a força modal a ser atualizada em cada instante de tempo em função da posição da pessoa e da magnitude da força vertical dada pela Equação II.1.

Para o cálculo da força modal determina-se a cada instante t a posição do ponto k de contato pessoa-estrutura no elemento e (ver Figura II.11) em função da velocidade v e da frequência do caminhar f_{pp} :

$$x = vt = lf_{pp}t \tag{II.11}$$

onde *l* é o comprimento do passo.

A força aplicada no ponto k é transportada em um vetor de forças nodais equivalentes $\mathbf{F_e}$ nas extremidades do elemento e utilizando-se a matriz \mathbf{H} de funções de interpolação:

$$\mathbf{F}_{\mathbf{a}} = \mathbf{H}^{\mathrm{T}} F(t) \tag{II.12}$$

onde é o H é vetor de interpolação:

$$\mathbf{H} = \left[L \left(2\xi^3 - 3\xi^2 + 1 \right) \quad L \left(\xi^3 - 2\xi^2 + \xi \right) \quad \left(-2\xi^3 + 3\xi^2 \right) \quad L \left(\xi^3 - \xi^2 \right) \right] \tag{II.13}$$

para $\xi = \frac{x}{L}$ em que x é a posição da pessoa caminhando no interior de um elemento de comprimento L.

A força modal é obtida com

$$P_{j} = \mathbf{\Phi}_{ej}^{T} \mathbf{F}_{e} = \mathbf{\Phi}_{ej}^{T} \mathbf{H}^{T} F(t)$$
 (II.14)

onde Φ_e contém os componentes associados aos nós de extremidade do elemento e do autovetor do problema de vibrações livres.

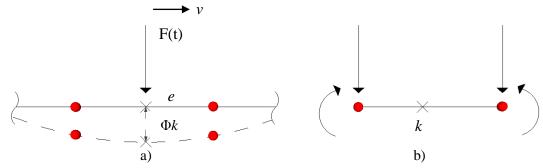


Figura II.11 – (a) Força aplicada na estrutura pela pessoa caminhando; (b) Forças equivalentes nodais

II.4.4 Exemplo de Aplicação

Como exemplos de respostas em termos de acelerações no meio do vão os métodos descritos nos Itens II.4.1. a II.4.3 são aplicados a uma passarela reta em viga biapoiada concebida com seção mista aço-concreto desenvolvida por Pfeil e Vasconcelos (2006), cujo perfil transversal está mostrado na Figura II.12, e possuindo as seguintes características:

- Comprimento: 35,0 metros;
- Massa: 64,05 toneladas;
- Frequência natural associado ao primeiro modo de vibração em flexão vertical: f₁=2,0 Hz;
- Taxa de Amortecimento: $\xi=0.5\%$;
- Propriedades geométricas da seção mista homogeneizada: Área=783,0 cm²,
 Momento de Inércia de Área=2,17 x 10⁻² m⁴;
- Módulo de Elasticidade: E=210,0 GPa.

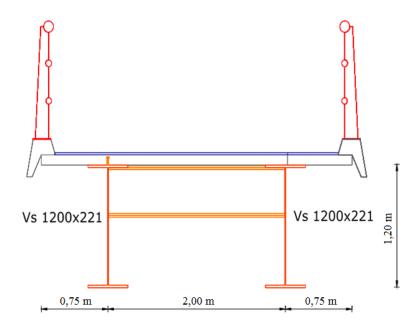


Figura II.12 – Seção Transversal da solução em Viga Mista Aço-Concreto (Fonte: Pfeil e Vasconcelos, 2006)

A força móvel vertical corresponde a uma pessoa de peso igual a 750 N caminhando em ressonância (f_{pp} =2,0 Hz) com a passarela, com comprimento do passo igual a 0,8 metros, velocidade do caminhar de 1,60 m/s e considerando apenas o 1° harmônico da força com α_I =0,4.

A Figura II.13 apresenta a resposta em termos de aceleração no meio do vão da passarela ao longo do tempo obtida com a solução descrita no Item II.4.3. Observa-se que o valor máximo é igual a 0,48 m/s².

A Tabela II.3 mostra os resultados de aceleração máxima obtidos pelos três métodos citados. Para o método de Rainer *et al* (1988) estima-se com o gráfico da Figura II.10, o

fator de amplificação dinâmico (Φ) igual a 52. Observa-se que a solução numérica fornece o mesmo valor que aquele obtido pelo método de Rainer *et al* (1988) enquanto que o método do Item II.4.1 indica um valor muito superior, como era esperado.

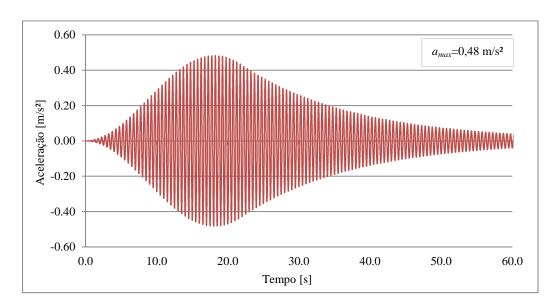


Figura II.13 – Resposta em Aceleração no meio do vão com uso da solução analítico-numérica (Item II.4.3)

Tabela II.3: Fatores determinantes para os três métodos de cálculo da Aceleração Máxima no meio do vão devido a um pedestre caminhando em ressonância com a estrutura.

Método	y _{st} (m)	FAD	ф	y _{max} (m)	a _{max} (m/s²)
Aplicação da Carga no meio do Vão	147,0x10 ⁻⁶	100,0	-	588, 0x10 ⁻³	0,93
Rainer et al (1988)	147,0x10 ⁻⁶	-	52	-	0,48
Analítico- Numérico	147,0x10 ⁻⁶	-	-	-	0,48

II.5 Resposta da Estrutura ao Caminhar de muitas Pessoas (Multidão)

Com o modelo analítico-numérico descrito no Item II.4.3 pode-se simular a resposta de uma passarela devido a passagem de muitas pessoas sobre ela. Isto foi efetuado por Pfeil e Vasconcelos (2006) para o exemplo de passarela do Item II.4.4, por meio da geração aleatória através do método de Monte Carlo das seguintes variáveis:

- Número de pessoas que atravessam a passarela;
- Peso de cada pessoa;
- Frequência do passo;
- Comprimento do Passo;
- Sentido do Caminhar;
- Tempo de entrada na passarela.

Como o objetivo da simulação é obter-se a estatística de extremos de aceleração, todos os cenários gerados consideram afastamento longitudinal entre pessoas igual a 2,0 metros, resultando em uma densidade igual a 0,52 pessoas/m².

A Figura II.143 ilustra o resultado de uma simulação em termos de aceleração da estrutura no meio do vão, cujo valor máximo é igual a 1,26 m/s². Para um universo de 2000 eventos chegou-se ao valor médio (esperado) das acelerações máximas igual a 1,40 m/s². Dividindo-se estes valores pela aceleração máxima (igual a 0,49 m/s²) produzida na estrutura por um pedestre de 750 N caminhando em ressonância nesta estrutura chega-se a um fator igual a 2,9. Este fator costuma ser denominado *fator de grupo* nas normas de projeto que tratam a resposta máxima de uma passarela sob ação de multidão caminhando como sendo igual à resposta devida à ação de um pedestre em ressonância multiplicada pelo fator de grupo que, naturalmente depende da densidade de pessoas.

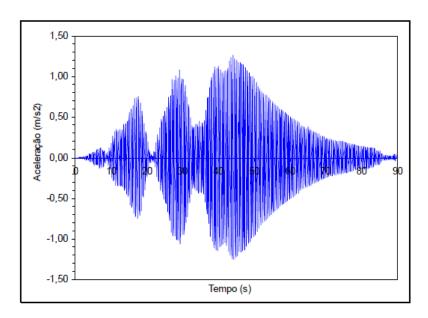


Figura II.14 – Resposta em aceleração vertical no meio do vão da passarela devida à passagem de 51 pessoas, correspondendo a um cenário simulado (Fonte: Pfeil e Vasconcelos, 2006)

MODELOS BIODINÂMICOS DE PESSOAS

Este capítulo apresenta uma revisão na literatura de modelos biodinâmicos, que fornecem as propriedades modais de pessoas em diferentes configurações e atividades, como para pessoas em pé e/ou sentadas e caminhando e/ou correndo.

III.1 Sistemas massa-mola-amortecedor

As propriedades do corpo humano relevantes ao estudo biodinâmico são de difícil obtenção em razão da diferença existente entre características de indivíduo para indivíduo. Dessa forma, o modelo biodinâmico mais simples e geral do corpo humano é composto por um grau de liberdade, e possui massa, rigidez e amortecimento, conforme mostrado na Figura III.1.

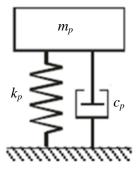


Figura III.1 – Modelo Biodinâmico de um Ser Humano com Um Grau de Liberdade.

Este modelo com um grau de liberdade tem aproximações satisfatórias com resultados experimentais realizados diante a aplicação de forças harmônicas em plataformas rígidas instrumentadas, na presença de indivíduos sobre as mesmas. Assim as características dinâmicas do corpo humano são obtidas com a captação da resposta do sistema homem-plataforma, em forma de sinais de frequência de resposta, que relacionados com o modelo de corpo humano, chega-se por ajuste, às massas aparentes e valores de rigidez e amortecimento deste (Wei e Griffin, 1998).

O corpo humano, contudo, não é um sistema monolítico, e sim uma associação de várias partes distintas em características entre si. Dessa forma, adotá-lo como um modelo biodinâmico com apenas um grau de liberdade, limita a quantificação de seus elementos heterogêneos. Por conseguinte, vários autores realizaram pesquisas acerca da elaboração de modelos biomecânicos mais completos e complexos do ponto de vista dinâmico, com mais de um grau de liberdade, como: Qassem *et al.*(1994) e Boileau *et al.*(1996).

III.2 Modelos Biodinâmicos para Pessoa em Pé ou Sentada

III.2.1 Modelos Biodinâmicos com Um Grau de Liberdade (GL)

Quando se trata de modelos biodinâmicos amortecidos de pessoas paradas, alguns dos pioneiros em pesquisas foram Foschi e Gupta (1987), porém os trabalhos mais referenciados (ver Tabela III.1) são os realizados por Falati (1999), que adota a massa modal do modelo como um terço da massa total de um indivíduo, e Brownjohn (1999), que criou um modelo biodinâmico com um grau de liberdade, a partir do modelo da ISO 7962 (1987) com quatro graus de liberdade, acompanhado de ponderações experimentais. Na Tabela III.1 são apresentadas as propriedades dos modelos equivalentes a um GL dos modelos da ISO 7962 (1987) e Nigam e Malik (1987). Estes modelos completos, com as propriedades de seus graus de liberdade individuais, são apresentados nos Itens III.2.3 e Itens III.2.4.

Tabela III.1: Características de Modelos Amortecidos com Um Grau de Liberdade de um Ser Humano em Pé (baseado em Sachse, 2003)

Modelo	Propriedades Espaciais	Propriedades Modais	
Falati (1999)	$m_p = m_T/3 = 25,0 \text{ kg}$	$f_{\rm p}$ =10,43Hz $\xi_{\rm p}$ =50%	
	$k_p = 107,0 \text{ kN/m}$		
	$c_p=1,636 \text{ kNs/m}$	Sp 2070	
Brownjohn (1999)	$m_{p}=m_{T=}80,0 \text{ kg}$	£ 40H-	
	$k_{p}=82,0 \text{ kN/m}$	$f_{\rm p}\!\!=\!\!4,\!9~{ m Hz}$ $\xi_{\rm p}\!\!=\!\!37\%$	
	$c_p=1,946 \text{ kNs/m}$		
ISO 7962 (1987)	$m_p=75.0 \text{ kg}$	$f_{\rm p}\!\!=\!\!4,\!33~{\rm Hz}$	
	$k_p=55,4 \text{ kN/m}$	ур 1,00 112	
Nigam e Malik (1987)	m _p =74,9 kg	$f_{\rm p}\!\!=\!\!4,\!40~{\rm Hz}$	
	$k_p = 57,2 \text{ kN/m}$	<i>J</i> p = 1,40 112	

III.2.2 Modelos Biodinâmicos com Dois GL

Para os modelos com dois GL aplicados a estruturas civis, usam-se representantes biomecânicos de corpo inteiro, que devem levar em conta questões importantes como (Sachse, 2003):

- O corpo humano é um sistema muito complexo, dinâmico não-linear e que tem propriedades que diferem entre pessoas diferentes (variabilidade interpessoal) e entre os próprios indivíduos (variabilidade intrapessoal) (ISO 5982, 1981; Griffin, 1990);
- As vibrações verticais de corpo inteiro sejam de pé ou sentado são dominadas por um modo muito amortecido. Este modo tem uma frequência natural entre 4,0 e 6,0 Hz e sua taxa de amortecimento tem valores variando de 20% até 50%;
- As propriedades do corpo humano dependem fortemente da magnitude de vibração.
 No entanto, os níveis de vibração encontrados em estruturas civis são consideravelmente menores do que aqueles empregados para construir modelos biodinâmicos (Griffin, 1990).

E neste contexto as pesquisas indicam que a postura da pessoa e a direção das vibrações consideradas têm relevância para caracterização de suas propriedades dinâmicas Assim, as propriedades para os modelos com dois GL apresentados na Figura III.2, da ISO 5982 (1981) estão mostradas na Tabela III.2.

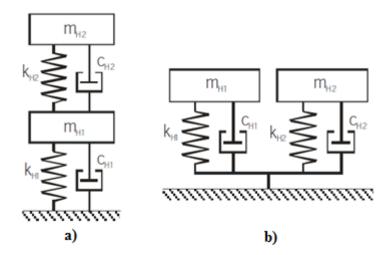


Figura III.2 – Modelo Biodinâmico com Dois Graus de Liberdade: a) Posição em Pé e b) Posição Sentado (Fonte: Sachse, 2003).

Tabela III.2: Características dos Modelos Biomecânicos de um Ser Humano sujeito a vibrações verticais (ISO 5982, 1981 *apud* Sachse, 2003)

Modelo	Propriedades Espaciais	Propriedades Modais	
ISO 5982, 1981 2GL - Pessoa Sentada	m_{p1} =69,0 kg	$f_{\rm pl}\!=\!5.0{ m Hz} \ \xi_{\rm pl}\!=\!36\%$	
	$k_{p1} = 68,0 \text{ kN/m}$		
	$c_{p1}=1,54 \text{ kNs/m}$	2h1 - 2 1.0	
	$m_{p2} = 6.0 \text{ kg}$	£ -10 1Hz	
	$k_{p2}=24,0 \text{ kN/m}$	$f_{ m p2}\!\!=\!\!10,\!1{ m Hz} \ \xi_{ m p2}\!\!=\!\!25\%$	
	$c_{p2} = 0.19 \text{ kNs/m}$	Sp2 20 70	
ISO 5982, 1981 2GL - Pessoa em Pé Parada	m_{p1} =62,0 kg	$f_{\rm pl}$ =5,0Hz $\xi_{\rm p_l}$ =37%	
	$k_{pl} = 62,0 \text{ kN/m}$		
	$c_{\rm pl}$ =1,46 kNs/m	261 21/0	
	$m_{p2}=13.0 \text{ kg}$	$f_{\mathrm{p2}}\!\!=\!\!12,\!5\mathrm{Hz}$ $\xi_{\mathrm{p2}}\!\!=\!\!46\%$	
	$k_{p2}=80,0 \text{ kN/m}$		
	$c_{p2} = 0.93 \text{ kNs/m}$	5p2 1070	

III.2.3 Modelos Biodinâmicos com Quatro GL para Pessoas em Pé e Sentadas

Um modelo usado em inúmeros trabalhos é o adotado pela ISO 7962 (1987), que foi desenvolvido a partir de dados experimentais de 50 pessoas com massa de aproximadamente 75,0 kg, nas posturas sentada e em pé, que sobre estruturas instrumentadas planas e rígidas, foram submetidas a vibrações senoidais, com amplitudes de aceleração de 2,0 a 4,0 m/s². Os parâmetros do modelo são apresentados na Tabela III.3, correspondentes a seus graus de liberdade, tendo por frequência e rigidez equivalentes a um sistema de um GL, os valores de f_{eq} =4,33 Hz e K_{eq} =5,54x10⁴ N/m respectivamente. O modelo é ilustrado na Figura III.3.

Tabela III.3: Parâmetros do Modelo ISO 7962:1987 (ISO 7962, 1987).

Parâmetros do Modelo						
Massa (kg)	Rigio	dez (N/m)	Amortecimento (N.s/m)			
$m_1=8,24$	$k_1=22,0x10^8$	$k_1*=36,0x10^7$	$c_1 = 748,1$			
$m_2 = 8,05$	$k_2=20,13x10^4$	$k_2^* = 65,0 \times 10^9$	$c_2 = 578,0$			
$m_3 = 44,85$	$k_3 = 88,56 \times 10^3$	k_3 *= 52,34x10 ⁴	$c_3 = 2.984,0$			
$m_4=13,86$	$k_4 = 3,47 \times 10^3$	k_4 *= 69,30x10 ³	c ₄ =901,8			

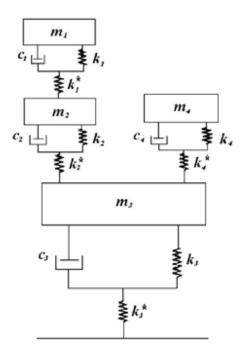


Figura III.3 – Modelo Biodinâmico Humano com Quatro Graus de Liberdade (Fonte: ISO 7962, 1987).

III.2.4 Modelos Biodinâmicos com 15 GL para Pessoa em Pé

A Figura III.4 apresenta um modelo discreto que representa o corpo humano na posição de pé, com 15 GL (Nigam e Malik, 1987). Este modelo usa inúmeras hipóteses simplificadoras tais como:

- Adota as várias partes do corpo como segmentos elipsoidais;
- A massa dos segmentos do modelo é a média da densidade de massa do corpo inteiro, aplicada às dimensões de cada segmento individual;
- A direção vertical de vibrações é predominante;
- Para a determinação dos valores de rigidez de cada segmento são consideradas elipsoides truncadas em suas extremidades superior e inferior;

Considerando aproximações estatísticas aplicadas a resultados experimentais e ajustes numéricos, os autores determinaram para uma pessoa com massa de 74,9 kg, valores de rigidez para cada segmento do corpo humano como pode ser observado na Tabela III.4 em correspondência com a Figura III.4. O modelo não aborda nenhum valor para representação de amortecimento.

Para os valores de rigidez expostos e por meio de cálculos de associações de molas em série e em paralelo, não levando em consideração os valores representativos dos membros superiores por encontrarem-se soltos, obteve-se um valor de rigidez equivalente do modelo, de K_{eq}= 57,2 kN/m. E ainda seguindo a linha de caracterização das propriedades equivalentes do modelo, aplicando a formulação básica de dinâmica para determinação da frequência natural, relacionando massa e rigidez, chegou-se ao valor correspondente a frequência fundamental equivalente do modelo de 15 GL, de f_p=4,4 Hz.

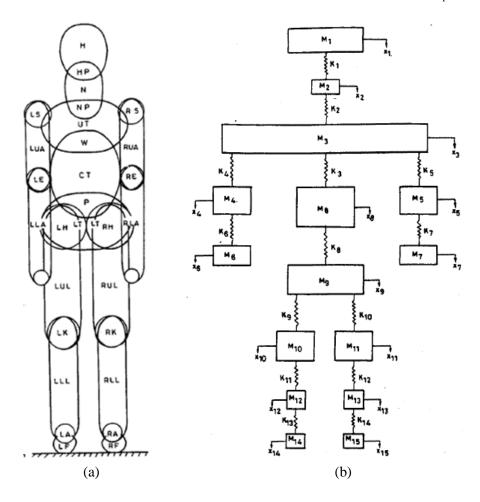


Figura III.4 – Modelo Biodinâmico Humano com 15 Graus de Liberdade – Representado por (a) Segmentos elipsoidais, (b) Sistema mecânico massa-mola (Fonte: Nigan e Malik, 1987)

Tabela III.4: Valores de rigidezes (*kN/m*) para cada segmento do corpo humano para um modelo com 15 GL (Fonte: Nigan e Malik, 1987).

\mathbf{K}_{1}	K_2	K_3	K_4 , k_5	K_6,k_7	K_8	K_9, k_{10}	K_{11}, k_{12}	K ₁₃ ,k ₁₄
680,5	1392,0	584,2	152,1	98,1	555,1	130,5	68,9	958,0

III.3 Modelos Biodinâmicos de Um GL para Pessoas Caminhando

III.3.1 Modelo de Silva e Pimentel (2011)

Modelos biodinâmicos de pessoas caminhando ainda são pouco pesquisados, e dentre os trabalhos de maior relevância, pode-se citar, Silva e Pimentel (2011), que propôs um modelo biodinâmico com um GL, através da correlação de resultados experimentais e modelo analítico numérico, vide Figura III.5.

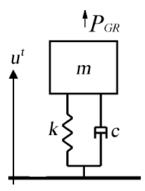


Figura III.5 – Modelo com 1GL: excitado por carga harmônica (Fonte: Silva, 2011)

Nas cinturas dos indivíduos participantes da pesquisa, centro de gravidade estimado (ver a Figura III.6), foi acoplado um acelerômetro cujo sinal forneceu, após análise no domínio da frequência, os três primeiros harmônicos da aceleração vertical deste enquanto caminhava. Os indivíduos caminharam sobre um piso rígido. Os ensaios foram realizados com várias pessoas e inúmeras vezes, a fim de medir a variabilidade do caminhar do mesmo indivíduo e de indivíduo para indivíduo. Dessa forma os testes foram feitos com 33 pessoas, sendo 19 homens e 14 mulheres, com idade entre 20 e 40 anos, e que caminharam com sapatos de solado macio, de acordo com os seguintes critérios:

- O ritmo de passo natural de cada indivíduo foi respeitado;
- A caminhada foi realizada em um piso rígido por uma distância de 15 metros em linha reta;
- A atividade começava e terminava, com os indivíduos em repouso;
- O tempo do percurso durava aproximadamente 16 segundos;
- E cada indivíduo repetia o percurso 10 vezes.

Também foram medidos os deslocamentos do ponto de fixação do acelerômetro na cintura de dois indivíduos, e acelerações através de uma câmera de vídeo fixa localizada

atrás do pedestre, enquanto este caminhava em uma esteira ergométrica. A velocidade do caminhar era natural à pessoa, que possuía um tecido preto em suas costas de modo a possibilitar a captação das imagens apenas do acelerômetro que se encontrava encoberto por um tecido vermelho. Após o tratamento e conversão das imagens em quadros de mapa de bits, as das imagens assumiam a configuração apresentada na Figura III.7.

As forças também foram medidas experimentalmente em placas instrumentadas com células de carga e ligadas a um computador através de um sistema de aquisição de dados.



Figura III.6 – Indivíduo caminhando com um acelerômetro acoplado em seu centro de gravidade aproximado (Fonte: Silva e Pimentel, 2011)





Figura III.7 – Imagem capturada por trás de um pedestre sobre um esteira ergométrica e sua conversão para imagem do tipo 1-bit (Fonte: Silva e Pimentel, 2011)

De posse dos três primeiros picos de aceleração medidos experimentalmente no centro de gravidade aproximado dos indivíduos, como dados de entrada e dos três primeiros picos de reação de força do piso como dados de saída, foram resolvidos sistemas de equações, para determinar os parâmetros de um modelo biodinâmico para cada indivíduo nas 10 repetições do percurso de caminhada. Assim obteve-se o resultado de m_p , c_p e k_p do modelo de um GL de cada individuo para cada trajetória.

Partindo da consideração dos três harmônicos de força para a determinação do sistema de equações a partir dos dados experimentais, Silva e Pimentel (2011) usaram, como coeficientes de Fourier, valores médios provenientes das equações desenvolvidas por Kerr (1998), como se segue (ver Tabela II.1):

$$\alpha_1(f_p) = -0.27 f_p^3 + 1.32 f_p^2 - 1.76 f_p + 0.76$$

$$\alpha_2 = 0.07$$

$$\alpha_3 = 0.06$$
(III.1)

Do tratamento do número de amostras e representatividade das médias obtidas de m_p , c_p e k_p e efetuando uma série de combinações de modo que a margem de erro fosse em torno de 10 % para a massa (m_p) e amortecimento (c_p) e 15 % para rigidez (k_p) . E considerando uma correlação direta entre as propriedades modais dos indivíduos obtidas experimental e teoricamente, Silva e Pimentel (2011), chegaram a um sistema de equações de regressão, para determinação das propriedades dinâmicas de uma pessoa caminhando, conforme Equação III.2. Considerando M como massa da pessoa, f_{pp} como frequência fundamental do passo, m_p como massa, k_p rigidez e c_p amortecimento do modelo biodinâmico com um GL.

$$m_p = 97,082 + 0,275M - 37,518 f_{pp}$$

$$c_p = 29,041 m_p^{0.883}$$

$$k_p = 30351,744 - 50,261 c_p + 0,035 c_p^{2}$$
(III.2)

Por exemplo, para uma pessoa com 80,0 kg caminhando com frequências (f_{pp}) variando entre 1,6 e 2,4 Hz chega-se aos resultados mostrados nas Figuras III.8.

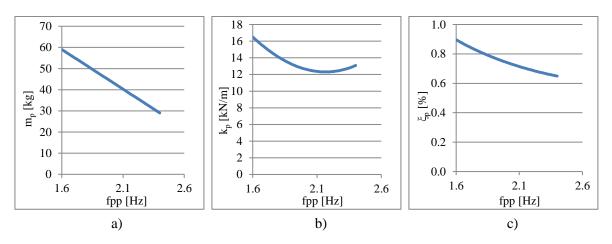


Figura III.8 – (a) Massa modal; (b) Rigidez modal e (c) Taxa de Amortecimento pessoa caminhando.

III.3.2 Modelos pesquisados por Caprani et al. (2011)

Caprani *et al.*(2011) realizaram uma extensa revisão na literatura de biomecânica envolvendo várias atividades humanas tais como andar, pular e correr.

Para atividade humana de caminhar o autor identificou na literatura modelos compostos de pêndulo invertido e amortecedor em sua base para representar o movimento do centro de massa do pedestre. Entretanto este modelo foi questionado por diversos autores, bem como o modelo simples de massa-mola-amortecedor (MMA) amplamente adotado para a atividade de correr. O uso do modelo MMA para o caminhar forneceu de acordo com Lee e Farley (1998) *apud* Caprani *et al.* (2011) valores de k_p entre 12,0 e 35,0 kN/m quando a massa do modelo é a própria massa da pessoa.

Para a atividade de balanço vertical (*hopping*) do centro de massa do indivíduo (sem retirar os pés do chão) Zhang *et al.* (2000) *apud* Caprani *et al.* (2011) encontraram um valor para taxa de amortecimento igual a 0,3. Bertos *et al.* (2005) *apud* Caprani *et al.* (2011), entretanto, encontraram para atividade caminhar valores para taxa de amortecimento entre 0,4 e 0,7 e valores entre 2,0 kN/m e 13kN/m para a rigidez. Em seu trabalho Caprani *et al.* (2011) adota faixas de valores para os parâmetros de taxa de amortecimento, rigidez, massa e comprimento do passo, como se segue:

- ξ_p entre 0,1 e 0,3;
- k_p entre 10,0 e 35,0 kN/m;
- m_p entre 30,0 e 130,0 kg, e
- $l_p 0.66$ metros.

MODELOS ANALÍTICO-NUMÉRICOS DA INTERAÇÃO DINÂMICA ESTRUTURA-PESSOA

Este capítulo apresenta os modelos analítico-numéricos desenvolvidos para abordar a interação dinâmica pessoa-estrutura em duas situações: pessoa em pé e parada e caminhando sobre a estrutura. Previamente à apresentação deste último modelo, elabora-se o modelo para o movimento vertical da pessoa caminhando sobre uma superfície rígida.

IV.1 Modelo Numérico da Interação Dinâmica Estrutura-Pessoa em Pé

IV.1.1 Modelo da Estrutura e Equações de Movimento

Neste trabalho uma estrutura de passarela é representada por um modelo numérico composto de elementos de pórtico plano, como esquematizado na Figura IV.1. Sendo um modelo bidimensional, não são considerados os modos de vibrações de torção e nem de flexão horizontal, apenas os modos de vibração vertical são levados em conta no modelo.

O sistema de equações de movimento de uma estrutura discretizada em elementos finitos é dado por:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{U}} + \mathbf{K}\mathbf{U} = \mathbf{F} \tag{IV.1}$$

onde:

- **M** é a matriz de massa da estrutura:
- C é a matriz de amortecimento da estrutura:
- **K** é a matriz de rigidez da estrutura;
- $\ddot{\mathbf{U}}$, $\dot{\mathbf{U}}$ e \mathbf{U} são, respectivamente, vetores de aceleração, velocidade e deslocamento dos graus de liberdade dos pontos nodais da estrutura, e
- *F* é o vetor de forças nodais variável no tempo.

Por meio da análise de vibração livre, determinam-se as formas modais (autovetores φ) e frequências naturais de vibração, a partir dos quais, é possível considerar as amplitudes das componentes modais como coordenadas generalizadas.

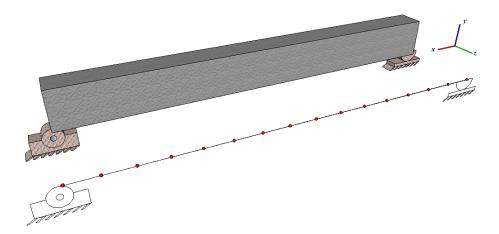


Figura IV.1 – Esquema de discretização do modelo de viga biapoiada.

O deslocamento (U_{ek}) associado ao grau de liberdade de deslocamento vertical de um ponto nodal k qualquer dessa estrutura é dado pela superposição modal das amplitudes de seus n principais modos de vibração, ou modos relevantes à resposta solicitada, obtido a partir da seguinte expressão:

$$U_{ek} = \phi_{1k} y_1(t) + \phi_{2k} y_2(t) + \dots + \phi_{nk} y_n(t) = \sum_{i=1}^n \phi_{jk} y_j(t)$$
 (IV.2)

onde:

- $y_i(t)$ é a amplitude do modo j;
- ϕ_{jk} é o elemento do auto-vetor associado ao modo j e ao grau de liberdade k;

Utilizando o princípio da superposição modal (Clough e Penzien, 1986) o sistema de Equações IV.2, transforma-se em *n* equações desacopladas na seguinte forma:

$$m_j \ddot{y}_j + c_j \dot{y}_j + k_j y_j = P_j \tag{IV.3}$$

onde:

- m_j é a massa modal da estrutura associada ao *j-ésimo* modo de vibração da estrutura;
- c_j é a constante de amortecimento modal associado ao j-ésimo modo de vibração da estrutura;
- ullet k_j é a rigidez generalizada associado ao j-ésimo modo de vibração da estrutura;

• P_j é a força generalizada associada ao modo j,calculada pelo produto vetorial $\phi_j P$, sendo ϕ_j o autovetor do modo j.

Dividindo-se todos os membros da Equação IV.3, por m_j e considerando as seguintes relações:

$$c_j = 2\omega_j m_j \xi_j \quad \text{e} \quad k_j = m_j \omega_j^2$$
 (IV.4)

onde:

- ω_j é a frequência angular de vibração da estrutura no *j-ésimo* modo;
- ξ_j é a taxa de amortecimento da estrutura para o *j-ésimo* modo.

chega-se à equação de movimento que assume a seguinte forma:

$$m_i \left(\ddot{y}_i + 2\omega_i \xi_i \dot{y}_i + \omega_i^2 y_i \right) = P_i \tag{IV.5}$$

IV.1.2 Equações de Movimento do Sistema Acoplado Estrutura-Pessoa em Pé

Uma pessoa em pé e parada sobre uma estrutura funciona como um sistema massamola-amortecedor a esta incorporado, compondo um sistema com propriedades dinâmicas
diferentes as da estrutura isolada. Ao considerar esse sistema, agora integrado, as matrizes
globais não são mais formadas exclusivamente pelas propriedades dos elementos da
estrutura, tendo dessa forma um acréscimo de fatores devido à contribuição das
características de seus ocupantes. Tal fenômeno se dá através da força de interação
estrutura- pessoa em pé em cada ponto k de contato, e pode ser escrita como:

$$F_{\rm int}(t) = F_e + F_a \tag{IV.6}$$

onde F_e e F_a são respectivamente, as forças elástica e amortecedora exercidas pelos componentes de rigidez e amortecimento do eixo vertical da pessoa, em contato com a superfície da estrutura.

Assim, para uma pessoa em pé e parada sobre uma superfície flexível, considerando o modelo de pessoa com um grau de liberdade, apresentado na Figura IV.2, é possível escrever as forças elástica e amortecedora de acordo com a Equação IV.7:

$$F_e = k_p \left[u_p - U_{ek} \right] \qquad \qquad F_a = c_p \left[\dot{u}_p - \dot{U}_{ek} \right] \tag{IV.7}$$

onde:

- u_p é o deslocamento vertical do centro de massa (CM) da pessoa e não inclui a parcela estática do deslocamento devido ao peso da pessoa;
- ullet U_{ek} é o deslocamento vertical da estrutura em cada ponto de contato (ponto k);

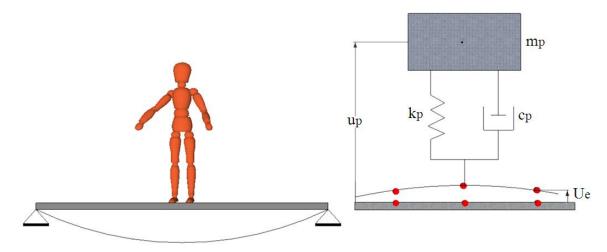


Figura IV.2 - Modelo analítico equivalente do sistema estrutura-pessoa em pé no meio do vão.

Para determinação das equações de movimento, considerando o método da superposição modal, adota-se o deslocamento U_{ek} escrito no formato da Equação IV.2. Ao substituir o deslocamento U_{ek} nas Equações IV.7, chega-se às componentes da força de interação dadas por:

$$F_e = k_p \left(u_p - \sum_{j=1}^n \phi_{jk} y_j \right)$$
 $F_a = c_p \left(\dot{u}_p - \sum_{j=1}^n \phi_{jk} \dot{y}_j \right)$ (IV.8)

Considerando apenas o primeiro modo de vibração vertical da estrutura (j=1), a força de interação em coordenadas generalizadas assume a expressão:

$$F_{\text{int}} = \phi_{1k} \left[c_p (\dot{u}_p - \phi_{1k} \dot{y}_1) + k_p (u_p - \phi_{1k} y_1) \right]$$
 (IV.9)

Portanto, a equação de movimento da **estrutura** associada ao primeiro modo de flexão vertical da viga com uma pessoa parada sobre a mesma (no ponto de contato k), é:

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + ky = \phi_k |c_p(\dot{u}_p - \phi_k \dot{y}) + k_p(u_p - \phi_k y)| - G$$
 (IV.10)

Agrupando na Equação IV.10 os termos em deslocamento \dot{y} e \dot{y} (para o ponto k) chega-se à seguinte expressão:

$$m\ddot{y} + \left(c + \phi_k^2 c_p\right) \dot{y} - \phi_k c_p \dot{u}_p + \left(k + \phi_k^2 k_p\right) y - \phi_k k_p u_p = 0 \tag{V.11}$$

De acordo com a Figura IV.2, a equação de movimento da **Pessoa parada em pé,** excluindo-se a parcela do peso da pessoa:

$$m_p \ddot{u}_p = -[F_e + F_a] \tag{IV.12}$$

Substituindo-se as componentes da força de interação em termos de \dot{y} e y (para o ponto k) na Equação IV.12, obtêm-se a equação de movimento referente a pessoa parada e em pé, de acordo com a Equação IV.13.

$$m_p \ddot{u}_p + c_p \dot{u}_p - c_p \phi_k \dot{y} + k_p u_p - k_p \phi_k y = 0$$
 (IV.13)

Assim, o sistema de equações para a modelagem da interação dinâmica estruturapessoa em pé, a ser integrada numericamente pelo Método de Runge-Kutta, na forma matricial pode ser escrito como:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{U}} + \mathbf{K}\mathbf{U} = \mathbf{F} \tag{IV.14}$$

onde os vetores de aceleração, velocidade e deslocamento do sistema são:

$$\ddot{\mathbf{U}} = \begin{bmatrix} \ddot{y} \\ \ddot{u}_p \end{bmatrix}; \quad \dot{\mathbf{U}} = \begin{bmatrix} \dot{y} \\ \dot{u}_p \end{bmatrix} \text{ e } \mathbf{U} = \begin{bmatrix} y \\ u_p \end{bmatrix}$$
 (IV.15)

e as matrizes de massa, rigidez, e amortecimento:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & m_p \end{bmatrix} \qquad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} c + \phi_k^2 \cdot c_p & -\phi_k \cdot c_p \\ -\phi_k \cdot c_p & c_p \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} k + \phi_k^2 \cdot k_p & -\phi_k \cdot k_p \\ -\phi_k \cdot k_p & k_p \end{bmatrix} \qquad \mathbf{F} = \begin{bmatrix} -G \\ 0 \end{bmatrix} \qquad (IV.16)$$

IV.2 Modelo de Pessoa Caminhando sobre uma Superfície Rígida

A força existente entre uma pessoa caminhando com velocidade constante (*v*), representada por um modelo massa-mola-amortecedor como ilustrado na Figura IV.3, e uma superfície rígida, assume a forma da Equação IV.17.

$$F(t) = F_e + F_a \tag{IV.17}$$

onde F_e e F_a são respectivamente, as forças elástica e de amortecimento exercidas pelos componentes de rigidez e amortecimento do eixo vertical da pessoa, detalhadas na Equação IV.18, em contato com a superfície da estrutura.

$$F_e = k_p [u_{pr} - u_r]$$
 $F_a = c_p [\dot{u}_{pr} - \dot{u}_r]$ (IV.18)

onde u_{pr} e \dot{u}_{pr} são o deslocamento e velocidade verticais do centro de massa da pessoa caminhando sobre a superfície rígida e u_r e \dot{u}_r são o deslocamento e velocidade verticais impostas ao centro de massa da pessoa pelo movimento dos calcanhares durante o caminhar.

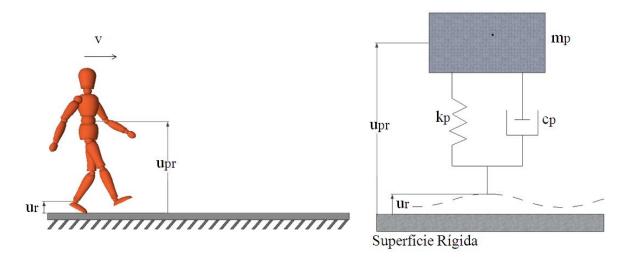


Figura IV.3 – Modelo Analítico de Pessoa Caminhando sobre Superfície Rígida

A força de interação dada pelas Equações IV.17 e IV.18 pode ser igualada à parcela flutuante da força de reação da superfície descrita pela série de Fourier da Equação II.1, ou seja:

$$F(t) = k_p \left[u_{pr} - u_r \right] + c_p \left[\dot{u}_{pr} - \dot{u}_r \right] = \sum_{j=1}^{nh} G\alpha_j sen \left[j2\pi f_{pp} t - \phi_j \right]$$
 (IV.19)

Portanto, a equação de movimento vertical do centro de massa da pessoa de acordo com a Figura IV.3, e a Equação IV.19, pode ser escrita como:

$$m_p \ddot{u}_{pr} = -F(t) \tag{IV.20}$$

IV.3 Modelo de Interação Estrutura-Pessoa Caminhando

Quando se trata do caminhar de uma pessoa com velocidade constante (v) ao longo de uma estrutura flexível, a força de interação estrutura-pessoa caminhando se faz presente (ver Figura IV.4), e é expressa pela Equação IV.21:

$$F_{\text{int}}(t) = k_p . \left[u_p + u_{pr} - \left(u_r + U_{ek} \right) \right] + c_p . \left[\dot{u}_p + \dot{u}_{pr} - \left(\dot{u}_r + \dot{U}_{ek} \right) \right]$$
 (IV.21)

onde:

- u_p é o deslocamento vertical de uma pessoa caminhando devido apenas a interação com a estrutura:
- $(u_p + u_{pr})$ é o deslocamento vertical total do centro de massa de uma pessoa caminhando sobre uma estrutura flexível;
- ullet U_{ek} é o deslocamento vertical da estrutura flexível em cada ponto de contato (ponto k);

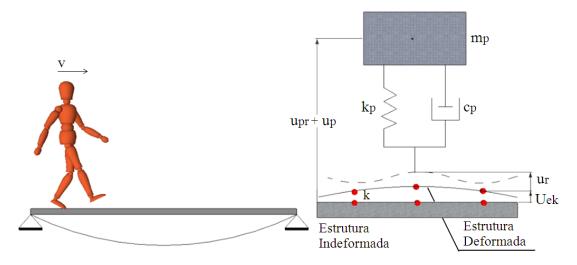


Figura IV.4 – Modelo Analítico de interação entre uma pessoa caminhando e uma estrutura flexível

Dessa forma a **equação de movimento vertical de um pedestre** caminhando sobre uma estrutura flexível é:

$$m_p(\ddot{u}_p + \ddot{u}_{pr}) = -F_{\text{int}}(t) \tag{IV.22}$$

Levando em consideração as Equações IV.17, IV.20 e IV.21, tem-se:

$$m_p \ddot{u}_p + k_p \cdot (u_p - U_{ek}) - c_p \cdot (\dot{u}_p - \dot{U}_{ek}) = 0$$
 (IV.23)

Para uma estrutura discretizada em elementos de pórtico plano o deslocamento e velocidade verticais em um ponto de contato (ponto *k*) podem ser escritos como:

$$U_{ek} = \mathbf{H}.\mathbf{U}_e$$
 e $\dot{U}_{ek} = \mathbf{H}.\dot{\mathbf{U}}_e$ (IV.24)

onde:

• **H** é o vetor de interpolação:

$$\mathbf{H} = \left[L \left(2\xi_{\text{int}}^3 - 3\xi_{\text{int}}^2 + 1 \right) \quad L \left(\xi_{\text{int}}^3 - 2\xi_{\text{int}}^2 + \xi_{\text{int}} \right) \quad \left(-2\xi_{\text{int}}^3 + 3\xi_{\text{int}}^2 \right) \quad L \left(\xi_{\text{int}}^3 - \xi_{\text{int}}^2 \right) \right] \quad (\text{IV}.25)$$

para $\xi_{\text{int}} = \frac{x}{L}$ em que x é a posição da pessoa caminhando no interior de um elemento de comprimento L.

• $\mathbf{U_e}$ e $\dot{\mathbf{U}_e}$ são, respectivamente, os vetores de deslocamento e velocidade nodais verticais do elemento e, dentro do qual o ponto de contato está localizado;

A força de interação F_{int} (t) é aplicada ao modelo de estrutura por meio de um vetor de força nodal equivalente $\mathbf{F_e}$ do elemento e:

$$\mathbf{F}_e = \mathbf{H}^T . F_{\text{int}} \tag{IV.26}$$

Para solucionar a equação de movimento da estrutura pelo método da superposição modal a força modal é calculada como

$$P_{j} = \mathbf{\Phi}_{ej}^{T} \mathbf{F}_{e} \tag{IV.27}$$

e o deslocamento vertical do ponto de contato é expresso por:

$$U_{ek} = \sum_{j} \mathbf{H.} \mathbf{\Phi}_{ej} Y_j = \sum_{j} \phi_{kj} Y_j$$
 (IV.28)

onde:

• Φ_{ej} é autovetor das amplitudes nodais do elemento e, associado ao modo j;

- y_i é a amplitude do i-ésimo modo;
- ϕ_{kj} é a amplitude da forma modal j do ponto de contato k;

Substituindo P_j na **equação de movimento da estrutura**, (Equação IV.5) e levando em consideração as Equações IV.17 e IV.21, tem-se:

$$m_i \ddot{y}_i + (2\omega_i \xi_i m_i + \phi_k^2 c_p) \dot{y}_i + (\omega_i^2 m_i + \phi_k^2 k_p) y_i - \phi_k c_p \dot{u}_p - \phi_k k_p u_p = \phi_k F(t)$$
 (IV.29)

Considerando as respostas para o primeiro modo de vibração vertical da estrutura, as equações de movimento da pessoa e estrutura – Equações IV.22 e IV.26, acopladas de forma matricial, são apresentadas no formato da Equação IV.30.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{X}} + \mathbf{K}\mathbf{X} = \mathbf{F} \tag{IV.30}$$

onde
$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} y \\ u_p \end{bmatrix} \qquad \mathbf{M} = \begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & m_p \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 2\xi\omega m + \phi_k^2 c_p & -\phi_k c_p \\ -\phi_k c_p & c_p \end{bmatrix} \qquad \mathbf{K} = \begin{bmatrix} \omega^2 m + \phi_k^2 k_p & -\phi_k k_p \\ -\phi_k k_p & k_p \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} \phi_k F(t) \\ 0 \end{bmatrix}$$
(IV.31)

IV.4 Implementação Computacional e Validação Preliminar

O sistema de Equações IV.14 cujos termos estão descritos nas Equações IV.15 e IV.16 para a pessoa em pé e parada e o sistema de Equações IV.30 com os termos descritos nas Equações IV.31 foram implementados em dois programas em linguagem FORTRAN que executam a integração no domínio do tempo pelo Método de Runge-Kutta.

O programa computacional para solução numérica da interação estrutura-pessoa em pé foi denominado **IEPP** e o programa para abordar a interação estrutura-pessoa caminhando **IEPC**. A Figura IV.5 ilustra o fluxograma geral dos programas citados, e as Figuras IV.6 e IV.7 apresentam a sequência dos programas IEPP para vibração livre e forçada e IEPC respectivamente.

Em referência à formulação apresentada no Item IV.3, e usando o exemplo de passarela reta em viga biapoiada com seção mista aço-concreto desenvolvida por Pfeil e Vasconcelos (2006), descrita no Item II.4.4, foram produzidas as respostas em aceleração no domínio do tempo através dos modelos de interação estrutura-pessoa caminhando (IEPC) e analítico numérico (Item II.4.3).

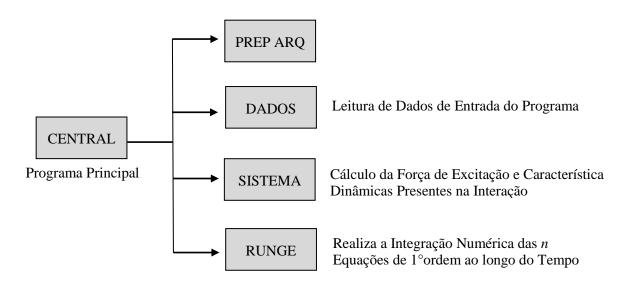


Figura IV.5 – Fluxograma dos programas IEPP e IEPC

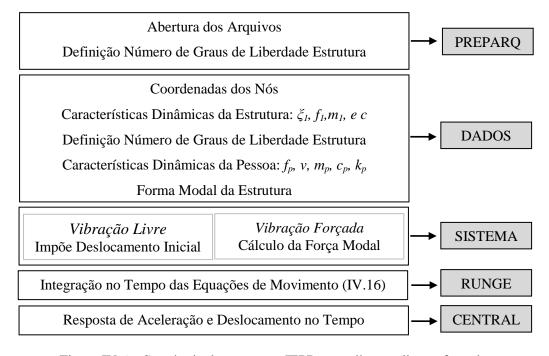


Figura IV.6 – Sequência do programa IEPP para vibração livre e forçada

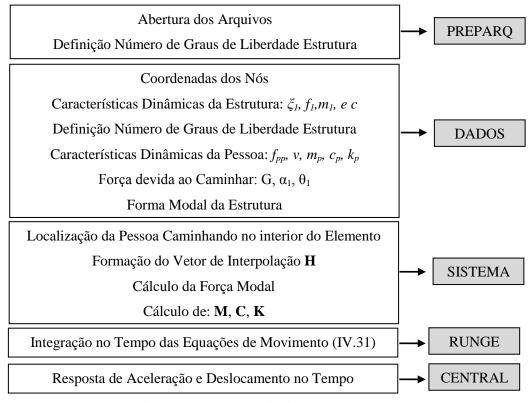


Figura IV.7 – Sequência do programa IEPC

A força móvel vertical de excitação representando o caminhar humano foi correspondente a uma pessoa pesando 750 N, caminhando com frequência fundamental (f_{pp}) e comprimento do passo iguais a 2,0 Hz e 0,8 metros respectivamente e considerando apenas o 1° harmônico da força com coeficiente igual a α_1 =0,4. As características modais de massa $(m_p$ =42,671 kg), rigidez $(k_p$ =12,54 kN/m) e amortecimento $(c_p$ =798,76 Ns/m) a comporem as Equações IV.31, foram obtidas do modelo biodinâmico de Silva e Pimentel (2011) (Item III.3.1).

O valor de aceleração máxima encontrado fazendo uso de ambos os modelos foi de $0,48 \text{ m/s}^2$, mostrada graficamente na Figura IV.8, o que já era esperado uma vez que, em situações em que a massa da pessoa envolvida na atividade, é um percentual muito pequeno da massa da estrutura (m_p =0,25% m_I), não há contribuição de maneira significativa do conceito de interação. Dessa forma, a resposta em aceleração máxima de uma estrutura em ressonância com uma pessoa caminhando, pode ser bem representada usando o modelo analítico-numérico de pessoa como carga móvel.

Conclui-se, portanto, que a formulação de interação estrutura-pessoa caminhando, bem como o programa IEPC desenvolvido, respondem de maneira satisfatória no que diz respeito ao comportamento dinâmico do sistema acoplado com relação de massas muito pequena (m_p/m_I) . Diante do quadro exposto este trabalho compreende de forma positiva a validação preliminar da implementação computacional proposta.

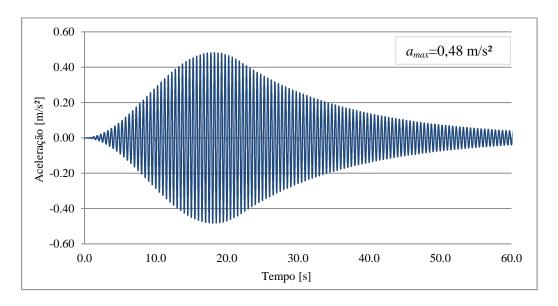


Figura IV.8 – Resposta em aceleração no domínio do tempo do exemplo de passarela com seção mista aço-concreto - Modelos Analítico-Numérico e Interação Estrutura-Pessoa Caminhando.

RESULTADOS MODELO DE INTERAÇÃO ESTRUTURA-PESSOA EM PÉ

Este capítulo trata em primeiro plano da validação do programa IEPP de Modelagem Analítico-Numérica da interação estrutura-pessoa em pé abordada no capítulo anterior, através de uma comparação teórico-experimental de um exemplo de estrutura sujeita à vibração livre com e sem pessoas paradas sobre ela. Segue-se um Estudo Paramétrico das respostas dinâmicas no domínio do tempo obtidas de um modelo de estrutura a vibração livre e forçada.

V.1 Comparação Teórico-Experimental

A fim de validar o modelo de interação estrutura-pessoa em pé descrito no Item IV.1, foi realizada uma comparação dos resultados teóricos com os resultados experimentais obtidos por Pedersen (2006), de ensaios de vibração livre de uma plataforma isolada, e da mesma plataforma na presença de uma e duas pessoas. Os dados fornecidos da estrutura são:

- Massa de 5,0 toneladas;
- Frequência natural do primeiro modo de vibração vertical f_1 =5.6 Hz;e
- Taxa de Amortecimento ξ =0,36%.

A geometria da plataforma e o peso dos indivíduos que participaram do ensaio não são informados em Pedersen (2006) de modo que a comparação teórico-experimental apresentada tem um caráter qualitativo apenas.

A Figura V.1 apresenta a frequência e a taxa de amortecimento das respostas da plataforma isolada e da plataforma com uma ou com duas pessoas, de acordo com a simbologia descrita na Figura V.2. Dessa forma, o gráfico da Figura V.1 mostra, para a plataforma isolada, frequência igual a 5,6 Hz e taxa de amortecimento (ξ) igual a 0,36%. Estes valores são alterados para aproximadamente 5,5 Hz e (ξ) 1% na presença de uma pessoa; e para 5,45 Hz e 1,7% para a plataforma com duas pessoas. O trabalho de Pedersen (2006) também aborda modelos de interação estrutura-pessoa (Figura V.2 (e)).

Para a obtenção das respostas teórico-numéricas com o programa IEPP, foi aplicado ao modelo da estrutura uma condição inicial em deslocamento a partir da qual se observa a vibração livre. Foram combinados os casos de estrutura isolada, com uma e duas pessoas. As pessoas foram representadas por modelos biodinâmicos descritos na Tabela III.1. Ressalta-se que para o modelo de Nigam e Malik (1987) foi adotado para taxa de amortecimento um valor de 50%.

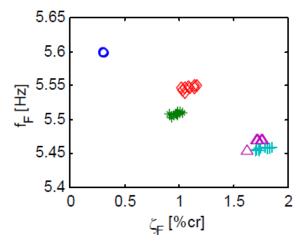


Figura V.1 – Resultados experimentais de frequências e taxas de amortecimento (Fonte: Pedersen, 2006).

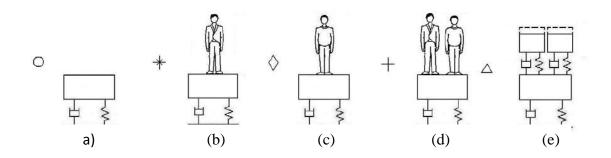


Figura V.2 – Modelos investigados, e simbologia para os resultados mostrados na figura V.1 As figuras (a) a (d) correspondem a modelos experimentais e a Figura (e) a um modelo teórico (Fonte: Pedersen, 2006).

A partir da resposta amortecida no tempo, as frequências de resposta e as taxas de amortecimento correspondentes, foram obtidas a partir do decaimento utilizando o método de cruzamento de zeros e o método de decremento logarítmico, respectivamente, conforme Equação V.1 (Clough, 1986):

$$\xi = \ln \frac{v_n}{v_{n+m}} \cdot \frac{1}{2 \cdot m \cdot \pi}$$
 (Eq. V.1)

As Figuras V.3 a V.5 apresentam as respostas de vibração livre na forma de gráficos de frequência x taxa de amortecimento da estrutura isolada e sistema estrutura-pessoa para alguns modelos biodinâmicos de pessoa em pé descritos na Tabela III.1. Ao comparar a Figura V.1 e às Figuras V.3 a V.5 observa-se que os resultados teóricos obtidos apresentam redução das frequências de resposta da plataforma com pessoas em relação à plataforma isolada bem similares à experimental. Em relação às taxas de amortecimento do sistema com pessoas, os valores teóricos encontrados foram bem diferentes dos obtidos experimentalmente.

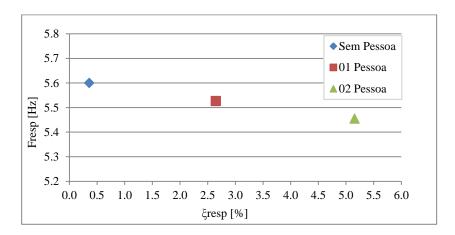


Figura V.3 – Frequências e taxas de amortecimento, com estrutura isolada, com uma e duas pessoas, a partir do modelo biodinâmico de Brownjohn (1999) com f_p =4,9 Hz e ξ_p =39%.

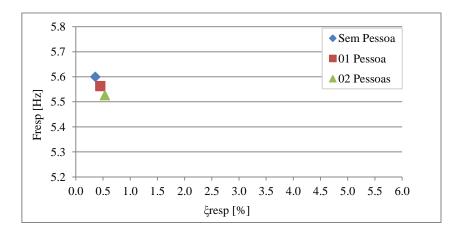


Figura V.4 - Frequências e taxas de amortecimento, com estrutura isolada, com uma e duas pessoas, a partir do modelo biodinâmico de Falati (1999) com f_p =10,43 Hz e ξ_p =50%.

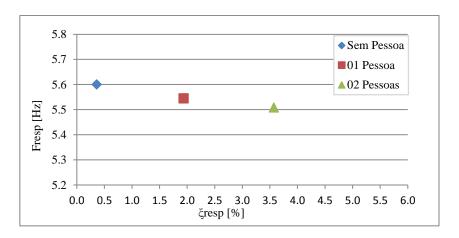


Figura V.5 – Frequências e taxas de amortecimento, com estrutura isolada, com uma e duas pessoas, a partir do modelo biodinâmico de Nigam e Malik (1987) com f_p =4,4 Hz e ξ_p =50%.

O modelo biodinâmico de Brownjohn (1999) – Figura V.3, é o que mais se aproxima do modelo estudado por Pedersen (2006), no que diz respeito às alterações na frequência do sistema pela presença de pessoas enquanto que apresentou taxa de amortecimento bem superior à experimental assim como o modelo de Nigam e Malik (1987) com taxa de amortecimento de 50% (Figura V.5). O modelo de interação cujos resultados estão na Figura V.4, correspondente ao modelo biodinâmico de Falati (1999), que por possuir frequência fundamental afastada da frequência natural da estrutura $(f_1 < f_p)$, praticamente não apresenta alterações nas características da resposta.

A partir dos resultados, para taxas de amortecimento e frequências de resposta do sistema acoplado estrutura-pessoa em pé, concluiu-se qualitativamente que em todos os modelos biodinâmicos houve o decréscimo do valor da frequência e o acréscimo da taxa de amortecimento do sistema, na presença de pessoas em relação à estrutura isolada. Observar-se também que quanto menor for a relação entre a massa de (1 ou 2) pessoas e a da estrutura (m_p/m) , menor será a contribuição da pessoa como instrumento de interação.

Portanto, as conclusões apresentadas validam satisfatoriamente o modelo proposto, quanto à alteração das propriedades dinâmicas da estrutura a partir da interação com pessoas em pé e paradas.

V.2 Estudo Paramétrico

V.2.1 Vibração Livre

A fim de obter os efeitos de uma pessoa parada em pé, com a postura ereta sobre uma estrutura sujeita a vibrações livres, neste trabalho foi simulada uma estrutura de viga biapoiada, com 35,0 metros de comprimento, com massa de 5,0 toneladas, taxa de amortecimento de 0,36% e frequência natural do primeiro modo de vibração igual a 5,6 Hz.

Esta estrutura é discretizada em elementos de pórtico plano, tendo um modelo mecânico massa-mola-amortecedor de um grau de liberdade representando uma pessoa localizada em seu nó central durante todo o estudo paramétrico (ver Figura V.6). Assim, o sistema estrutura-pessoa em pé é submetido a vibrações livres a partir de uma condição inicial de deslocamento de 3,5 cm.

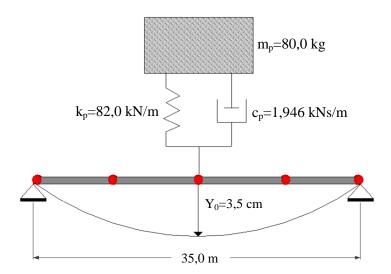


Figura V.6 – Esquema Pessoa Parada no nó central da viga biapoiada durante a vibração livre.

Os parâmetros do estudo são a massa, a rigidez e o amortecimento da estrutura de modo que a massa da pessoa varie de 0.5% a 3% da massa modal da estrutura e que a frequência natural f_I da estrutura varie entre 0.65 a 1.80 da frequência natural inicial f_i :

•
$$0.5\% < \frac{m_p}{m_1} < 3\%;$$

•
$$0,75 f_p < f_1 < 2,0 f_p$$
.

Levando em consideração que as propriedades dinâmicas de rigidez $(k_I=m_I.w_I^2)$ e amortecimento $(c_I=2.\xi_I.w_I.m_I)$ são relacionadas diretamente à massa e à frequência natural da estrutura, estas variam proporcionalmente àquelas.

As propriedades do modelo de pessoas simuladas são as do modelo biodinâmico de Brownjohn (1999), e se mantêm fixas ao longo das análises, ver Tabela III.1 e Figura V.6.

Para cada análise com o programa IEPP correspondente a uma estrutura foi obtida a taxa de amortecimento *versus* a relação entre a frequência fundamental do modelo biodinâmico (f_p) e a frequência natural do primeiro modo vertical da estrutura (f_I) , na presença de uma e duas pessoas respectivamente. As Figuras V.7 e V.8 apresentam estes valores.

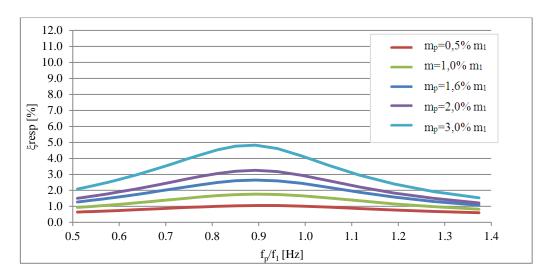


Figura V.7– Gráfico de Relações de taxa de amortecimento *x* relação de frequência da pessoa e da estrutura – *01 Pessoa*

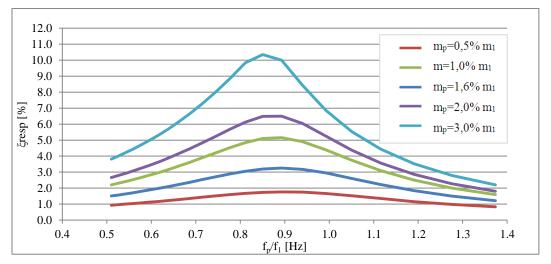


Figura V.8 – Gráfico de Relações de taxa de amortecimento *x* relação de frequência da pessoa e da estrutura – *02 Pessoas*

As observações realizadas a partir das respostas foram:

- ➤ Há um nítido acréscimo da taxa de amortecimento da resposta, na presença de pessoas;
- \triangleright Quanto maior for à relação entre massas m_p/m , ou seja, quanto menor for à massa da estrutura em relação às das pessoas, mais significativa será a contribuição das pessoas integrantes como sistema massa-mola-amortecedor acoplado à estrutura, no tocante ao amortecimento;
- \triangleright O máximo valor de taxa de amortecimento obtido, nos dois casos abordados, ocorreu aproximadamente nas relações de frequência (f_p/f_1) com o valor de 0.90;
- A partir das afirmativas acima, conclui-se que a presença de pessoas em estruturas se equivale a um sistema de **absorsor passivo**, atenuando as respostas em vibração vertical.

V.2.2 Vibração Forçada

De maneira análoga ao Item V.2.1, a fim de obter os efeitos de uma pessoa parada em pé com a postura ereta sobre uma estrutura sujeita agora a vibração forçada (Figura V.9), foi utilizado o mesmo exemplo da viga biapoiada do item anterior, sendo a pessoa representada também pelo modelo biodinâmico de Brownjohn (1999), localizada em seu nó central.

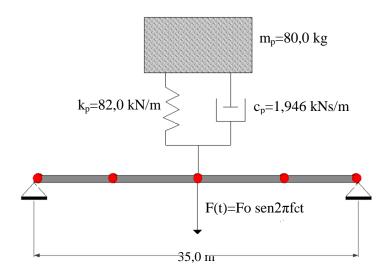


Figura V.9 – Esquema Pessoa Parada no nó central da viga biapoiada durante a vibração forçada.

Para submeter à estrutura citada à vibração forçada, foi aplicada à mesma uma força harmônica, descrita na Equação II.1, com frequência de excitação (f_c) variável no intervalo de $0.50f_I$ a 1.60 f_I . A força é aplicada, para o sistema estrutura-pessoa em pé se apresentando em ressonância ($f_I \approx f_p$).

As Figuras V.10 e V.11 apresentam as respostas da estrutura no domínio do tempo e no domínio da frequência, ambas para a estrutura isolada e na presença de uma pessoa parada em pé sobre a viga.

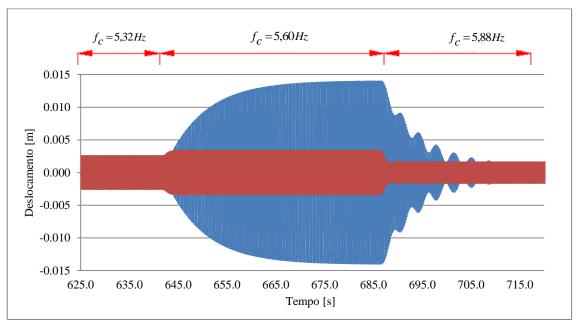


Figura V.10 – Gráfico do *Deslocamento* da estrutura a partir da Força periódica aplicada, com frequência e excitação variável [Azul – Sem Pessoa, Vermelho – Com Pessoa].

As conclusões tiradas a partir das respostas foram:

- ➤ Há um visível decréscimo nas amplitudes de deslocamento quando há presença de uma pessoa em pé sobre a estrutura em relação quando não há, que pode ser encarado como um maior amortecimento aparente do sistema;
- A partir da afirmativa acima, observa-se que uma pessoa em pé sobre uma estrutura submetida a uma força harmônica com frequência de excitação variável, funciona como um sistema massa-mola-amortecedor, que interage com a estrutura, de modo equivalente a um sistema absorsor passivo.

Vale ressaltar que apesar do acréscimo de amortecimento observado no sistema, com a presença de pessoas, o corpo humano não responde em uma única frequência, como modelado neste trabalho. Além de não ser possível determinar uma massa fixa para todos os indivíduos, característica necessária a uma adequada calibração (m e m_p), entre as propriedades da estrutura e do sistema de controle passivo.

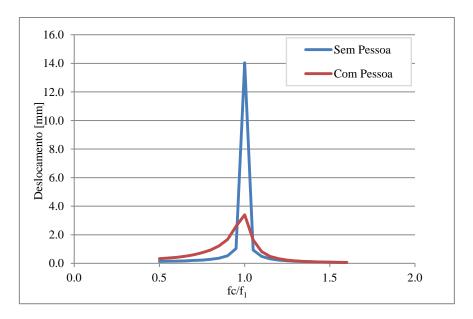


Figura V.11 – Espectro de Frequência da estrutura a partir da Força harmônica aplicada, com frequência e excitação variável [Azul – Sem Pessoa, Vermelho – Com Pessoa].

RESULTADOS DO MODELO DE INTERAÇÃO ESTRUTURA-PESSOA CAMINHANDO

VI.1 Introdução

Este capítulo apresenta e discute os resultados do modelo proposto e preliminarmente validado, de interação estrutura-pessoa caminhando descrito no Capítulo IV, em termos das respostas dinâmicas no domínio do tempo devida a aplicação da formulação em um modelo discretizado em elementos de pórtico plano da passarela *Aberfeldy*, executada em 1992 em material compósito que lhe permite possuir entre outras características, frequência natural muito próxima da frequência fundamental do caminhar humano, além de leveza. A análise se dará por meio de uma comparação das respostas em termos de aceleração no domínio do tempo, obtidas experimentalmente com as geradas numericamente a partir do modelo de interação formulada neste documento.

VI.2 Passarela Aberfeldy

O exemplo de estrutura adotado neste documento para aplicação do modelo de interação estrutura- pessoa caminhando foi a passarela *Aberfeldy* (ver Figuras I.7 e VI.1). A contrução desta passarela estaiada foi finalizada em outubro de 1992, em um campo de golfe na Escócia, simbolizou um marco na engenharia civil em termos do desenvolvimento e uso de materiais compósitos, especificamente o GRP – "Glass Reinforced Polyester" (Harvey, 1993). Esta passarela conta com perfis pultrudados de resina reforçada com fibra de vidro (GRP) como material constituinte para tabuleiro e torres e fibras de aramida revestidas com polietileno (*Kevlar*) para os estais (Lee, 1993).

A passarela possui 2,20 metros de largura e 113,0 metros de comprimento, sendo dividida em três vãos, um central com 63,0 metros e dois laterais com aproximadamente 25,0 metros cada. Seu perfil longitudinal demonstra uma proeminente curvatura vertical no vão central, que concorda em suas extremidades com os vãos laterais, que por sua vez possuem inclinação constante, conforme esquema da Figura VI.2.

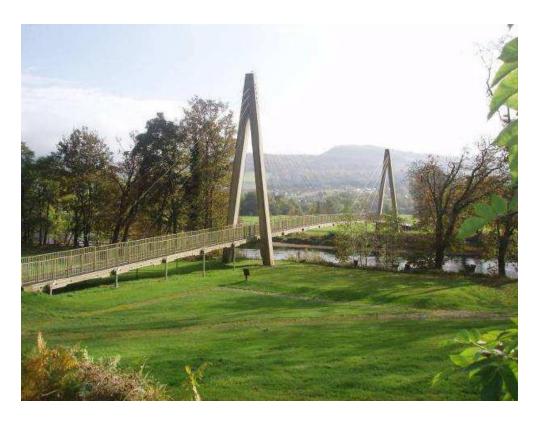


Figura VI.1 – Passarela Aberfeldy (Fonte: Skinner, 2009)

Para construção do tabuleiro e torres foram utilizados perfis celulares básicos de GRP composto por pranchas unidas por suas faces através de perfis conectores também de GRP em formato H além de colados, ilustrados na Figura VI.3. Sua seção transversal como vista na Figura VI.4, é formada por três pranchas, dois conectores e duas vigas longitudinais de seção transversal variável. As vigas são formadas por cinco conectores nos trechos das ancoragens dos cabos e sobre as torres e quatro conectores nos demais trechos. As transversinas principais fixadas sob os pontos de ancoragem dos cabos no tabuleiro são formadas por quatro perfis conectores e as transversinas secundárias por um perfil conector e é localizada a cada metro ao longo de toda a passarela.

Existem na passarela duas torres em formato de A, de onde saem 40 estais, sendo 20 estais de cada torre, inclinados longitudinal e transversalmente à passarela a fim de proporcionar estabilidade lateral. Os estais estão ancorados nas transversinas principais dos tabuleiros através de peças de alumínio como mostrado na Figura VI.5. As torres possuem aproximadamente 18,0 metros de altura, sendo que 2,6 metros se situam abaixo do tabuleiro.

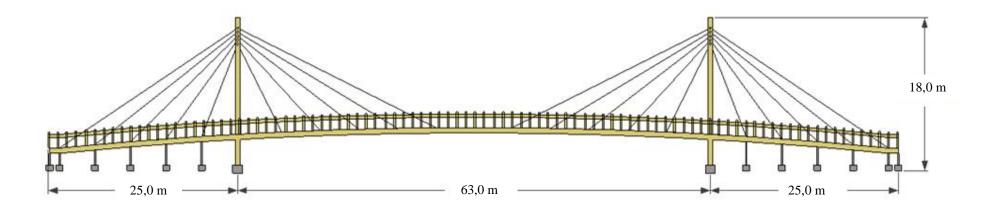


Figura VI.2 – Perfil Longitudinal Passarela Aberfeldy

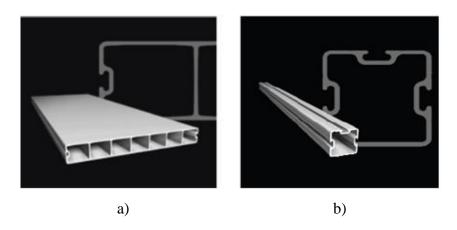


Figura VI.3 – a) Prancha em GRP b) Perfil conector em formato H (Fonte: Stratford, 2012)

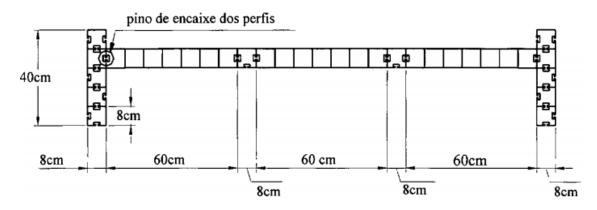


Figura VI.4 – Seção Transversal (Fonte: Harvey, 1993)



Figura VI.5 – Ancoragem dos estais nas transversinas principais do tabuleiro da passarela (Fonte: Stratford, 2012)

Levando em conta a baixa massa conferida à estrutura pela leveza do material contituinte se fez necessário promover uma adição de massa à passarela a fim de evitar problemas no tocante à ação do vento e imprimir uma maior rigidez inicial aos estais. Tal massa agregada foi obtida pelo acréscimo de um lastro formado por um piso de borracha ao longo do tabuleiro e de tubos de PVC preenchidos por concreto localizados dentro das células das pranchas do tabuleiro (Stratford, 2012).

VI.3 Características Modais da Passarela Aberfeldy

As características modais da passarela adotadas neste trabalho foram obtidas por meio de ensaios realizados por Pimentel (1997). Os valores encontrados para frequências naturais, formas modais e taxa de amortecimento viscoso foram determinadas a partir de ensaios de vibração ambiente e de pessoa saltando.

O ensaio de *vibração ambiente* forneceu as nove primeiras frequências naturais bem como suas respectivas formas modais de vibração em flexão vertical e massas modais da estrutura isolada. Os resultados mais relevantes ao estudo aqui proposto referem-se aos dois primeiros modos de vibração. A Tabela VI.1 apresenta os valores das duas primeiras frequências naturais e as correspondentes formas modais da estrutura isolada conforme obtidas nos ensaios de vibração ambiente. Nas linhas da Tabela VI.2 associadas à letra E estão indicadas as características da estrutura isolada obtidas a partir destes mesmos ensaios. Os valores de massa modal foram obtidos por Pimentel (1997) a partir de um modelo numérico calibrado em relação aos valores de frequência e correlações com as formas modais obtidos experimentalmente dos ensaios de vibração ambiente.

Nos ensaios de *pessoa saltando*, um indivíduo com massa de 80 kg, localizado nos ventres das formas modais consideradas, excitou a passarela flexionando e esticando os joelhos sem retirar os pés do tabuleiro. Em seguida, permaneceu na mesma posição e em repouso em relação à passarela enquanto foi registrada a sua vibração livre amortecida. Nestes ensaios foram obtidos os valores mostrados nas linhas associadas à sigla E+P (estrutura+pessoa) da Tabela VI.2 para taxa de amortecimento viscoso e frequências dos dois primeiros modos do sistema estrutura mais pessoa parada em vibração livre.

Sabendo-se que a frequência natural de pessoas paradas é superior a 4,0 Hz (ver Tabela III.1) e, portanto, bastante afastada da frequência da estrutura (igual a 1,59 Hz) pode-se supor que a presença da pessoa não alterou a taxa de amortecimento da estrutura isolada. Para verificar esta suposição utilizou-se o programa IEPP (interação estrutura-pessoa parada) considerando o primeiro modo de vibração em flexão vertical da passarela Aberfeldy com taxa de amortecimento igual a 0,84% e uma pessoa de 80 kg localizada no centro do vão, representada pelo modelo biodinâmico de Brownjohn (1999). Ao sistema foi imposta uma condição inicial de deslocamento seguida de vibração livre. Aplicou-se o método do decremento logarítmico (Equação V.1) para determinar a taxa de amortecimento da resposta amortecida obtendo-se para o sistema estrutura mais pessoa o

mesmo valor de 0,84% correspondente à estrutura isolada, confirmando-se, portanto, a hipótese feita.

Tabela VI.1 - Frequências naturais e Formas Modais da direção vertical, obtidas dos ensaios em Vibração Ambiente (Pimentel, 1997).

Modo	Frequência (Hz)	Forma Modal do Tabuleiro	
1°	1,59		
2°	1,92		

Tabela VI.2 - Propriedades Modais da Passarela Aberfeldy obtidas Pelos Ensaios de Vibração Ambiente e Pessoa Saltando.

		m (kg)	f (Hz)	ξ(%)
1° Modo	Е	2547,0	1,59	-
1 Modo	E+P	-	1,56	0,84
2° Modo	Е	3330,0	1,92	-
	E+P	-	1,88	0,94

E: Passarela Isolada (resultado dos ensaios de Vibração Ambiente); E+P: Passarela + 80kg (resultado dos ensaios de Pessoa Saltando)

VI.4 Resposta Dinâmicas da Passarela Aberfeldy sob Ação de Pedestre Caminhando

Pimentel (1997) realizou também dois ensaios de *pessoas caminhando* sobre a passarela com frequências de passo marcadas por um metrônomo, de modo a impor ressonância com as frequências naturais dos dois primeiros modos de flexão vertical. As respostas registradas em termos de aceleração no tempo dos pontos localizados nos ventres das formas modais estão reproduzidas nas Figura VI.6 e VI.7. Destacam-se nestas figuras os valores máximos alcançados.

A massa das pessoas era igual a 80,0 kg e as frequências dos passos impostos pelo metrônomo durante cada um dos ensaios foram de 1,56 Hz e 1,88 Hz iguais as frequências naturais do sistema estrutura + pessoa (ver Tabela VI.2) nos dois primeiros modos de flexão vertical.

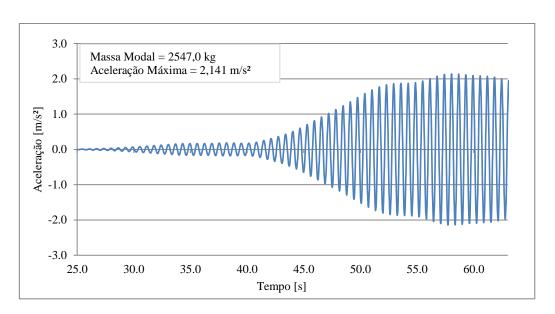


Figura VI.6 – Resposta de aceleração no meio do vão central ao longo do tempo para ensaio de pessoa caminhando em ressonância aproximada com a estrutura - 1° Modo de Vibração Vertical (Pimentel, 1997)

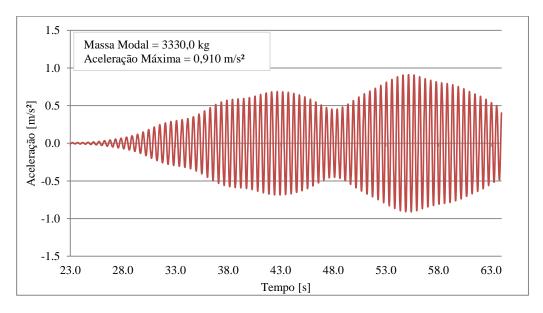


Figura VI.7 – Resposta de aceleração no ponto correspondente ao ventre do 2° modo ao longo do tempo para ensaio de pessoa caminhando em ressonância aproximada com a estrutura - 2° Modo de Vibração Vertical (Pimentel, 1997)

VI.5 Aplicação do Modelo de Carga Móvel no Sistema Passarela Aberfeldy + Pessoa

Para obter a resposta no domínio do tempo do sistema passarela Aberfeldy + pessoa caminhando usando o modelo de carga móvel com a força modal a ser atualizada em cada

instante de tempo em função da posição da pessoa e da magnitude da força vertical foram usadas as características presentes na Tabela VI.3 que consideram os resultados experimentais relacionados ao sistema estrutura + pessoa (E+P).

Tabela VI.3 - Propriedades Modais da Passarela Aberfeldy obtidas experimentalmente associadas ao sistema estrutura + pessoa (E+P).

	1° Modo	2° Modo
$f_{pp}\left(\mathrm{Hz}\right)$	1,56	1,88
$f_1(Hz)$	1,56	1,88
m ₁ +M (kg)	2627,0	3410,0
ξ _i (%)	0,84	0,94

A resposta no tempo, bem como os valores de aceleração máxima, obtidos pelo modelo de carga móvel em comparação com a resposta experimental são mostrados nas Figuras VI.8 e VI.9, e para facilitar a comparação, as respostas experimentais das Figuras VI.6 e VI.7 estão mostradas pelas suas envoltórias. Observa-se que as respostas teóricas foram consideravelmente superiores às obtidos experimentalmente, cerca de 60% para o primeiro modo e 125% para segundo modo.

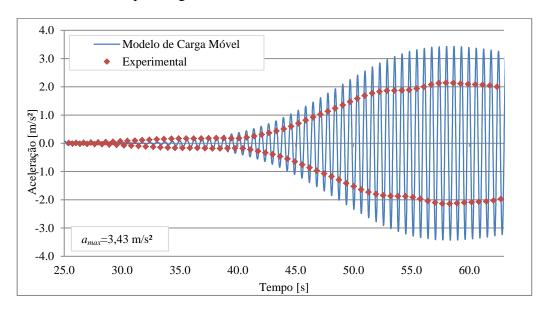


Figura VI.8 – Resposta de aceleração no ponto correspondente ao ventre do 1° modo de flexão vertical ao longo do tempo- Modelo de Carga Móvel x Experimental (Pimentel, 1997).

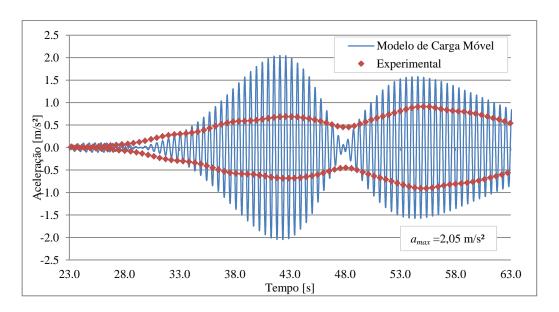


Figura VI.9 – Resposta de aceleração no ponto correspondente ao ventre do 2° modo de flexão vertical ao longo do tempo- Modelo de Carga Móvel x Experimental (Pimentel, 1997).

O modelo de carga além de apresentar respostas com valores superiores aos experimentais, também possui algumas particularidades em relação ao comportamento no segundo modo. Nota-se que, a história no tempo da resposta obtida pelo modelo de carga possui valor máximo de aceleração na passagem do pedestre pelo primeiro ventre da forma modal igual a 2,05 m/s², enquanto que o valor máximo de aceleração obtido experimentalmente foi localizada no segundo ventre da forma modal. Outra observação pertinente é a de que a resposta chega a ser próxima de zero, entre os dois ventres da forma modal, ou seja, a resposta amortece quase completamente antes de ser novamente amplificada para entrada no segundo pico da forma modal.

VI.6 Modelo de Interação com Modelo Biodinâmico de Silva e Pimentel (2011)

Com o modelo de interação estrutura-pessoa caminhando (Item IV.3) aplicado ao modelo de estrutura da passarela *Aberfeldy*, foram obtidas as respostas em aceleração no tempo. Utilizou-se o modelo biodinâmico de Silva e Pimentel (2011) para representar o pedestre caminhando sobre a estrutura como um sistema mecânico massa-mola-amortecedor, cujas características dinâmicas foram calculadas através das Equações III.2. As características dinâmicas adotadas no sistema estrutura-pessoa caminhando são apresentadas na Tabela VI.4, considerando massa da pessoa igual a 80,0 kg, e frequências

fundamentais do passo iguais a 1,56 Hz para o primeiro modo e 1,88 Hz, para o segundo modo de vibração.

Tabela VI.4 - Propriedades Modais Adotadas na Modelagem de Interação Estrutura-Pessoa Caminhando.

	Massa (k	Modal g)	Frequência Natural (Hz)		Rigidez (N/m)		Taxa de Amortecimento (%)	
Modo	1°	2°	1°	2°	1°	2°	1°	2°
Pessoa	60,55	48,55	2,67	2,65	17100	13406	91,6	78,0
Estrutura	2547,0	3330,0	1,59	1,92	254204	484626	0,84	0,94

Quanto aos resultados, o que se observa para as respostas em aceleração no tempo do primeiro modo (ver Figura VI.10) é uma boa concordância do comportamento dinâmico do modelo de interação estrutura-pessoa caminhando em comparação com o experimental, definida pela similaridade das respostas até pouco antes do pedestre alcançar o ventre da forma modal. Quanto ao valor de aceleração máxima obtido de 2,64 m/s², é possível notar a proximidade de cerca de 80% com a resposta medida experimentalmente (2,14 m/s²).

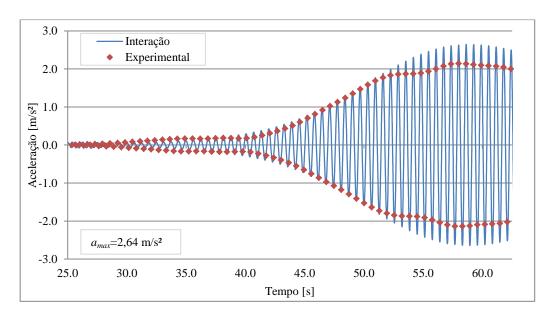


Figura VI.10 - Resposta de aceleração no ponto correspondente ao ventre do 1° modo de flexão vertical ao longo do tempo- Interação x Experimental (Pimentel, 1997).

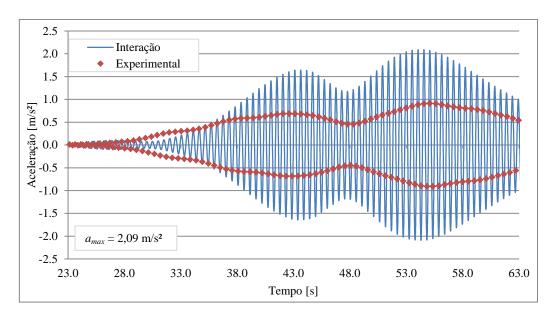


Figura VI.11 – Resposta de aceleração no ponto correspondente aos ventres do 2° modo de flexão vertical ao longo do tempo- Interação x Experimental (Pimentel, 1997).

A comparação de respostas para o segundo modo está mostrada na Figura VI.11. Observa-se que a resposta teórica com o modelo de interação segue o mesmo padrão da resposta experimental, com maiores valores de aceleração na passagem pelo segundo ventre da forma modal e valores não nulos na passagem pelo meio do vão, ao contrário da resposta obtida com o modelo de carga móvel (Figura VI. 9). Os valores de aceleração teórica, entretanto, são bem superiores aos da resposta experimental.

VI.7 Modelo de Interação com Modelo Biodinâmico adotado por Caprani (2011)

No Item III.3.2 mencionou-se a extensa revisão na literatura biodinâmica realizada por Caprani *et al.*(2011) quanto às características dinâmicas atribuídas a pessoas em diversas atividades. Assim, usando os extremos das faixas de valores de rigidez e taxa de amortecimento de uma pessoa caminhando encontrados por Caprani *et al.*(2011), estabeleceu-se quatro modelos conforme mostrado na Tabela VI.5. Com o exemplo da passarela *Aberfeldy*, foram geradas respostas dinâmicas em termo de aceleração ao longo do tempo fazendo uso do modelo de interação estrutura-pessoa caminhando, simulando um pedestre atravessando a estrutura com frequência de passo de 1,56 Hz e 1,88 Hz para o primeiro e segundo modos, respectivamente. As características dinâmicas atribuídas ao modelo da estrutura são as mesmas da Tabela VI.4

As Figuras VI.12 e VI.13 ilustram as respostas teóricas obtidas com o modelo B em comparação às experimentais para o primeiro e o segundo modos de vibração respectivamente. Para o primeiro modo observa-se o mesmo tipo de resposta agora com a aceleração máxima teórica de valor inferior à experimental. Já para o segundo modo o formato da resposta no tempo acompanha a resposta experimental, porém com amplitudes maiores, assim como se observou na Figura VI.11.

Tabela VI.5 - Propriedades Modais de Modelos de Pessoa Caminhando

Modelo	kp (kN/m)	$\xi_{p}(\%)$
A	10,0	30,0
В	10,0	60,0
С	35,0	30,0
D	35,0	60,0

A Tabela VI.6 apresenta os valores máximos de aceleração obtidos nas respostas teóricas com os quatro modelos biodinâmicos da Tabela VI.5. Observa-se que o aumento da rigidez k_p de 10 kN/m para 35 kN/m produziu um acréscimo expressivo nas respostas para os dois modos de vibração. Já o aumento da taxa de amortecimento da pessoa de 30% para 60% conduziu a um aumento nas respostas obtidas com o valor mínimo de k_p e praticamente não afetou o valor máximo de aceleração das respostas obtidas com o valor máximo de k_p . Em geral, vê-se que as propriedades dinâmicas do modelo da pessoa caminhando podem produzir variações significativas nas respostas. Para a resposta no primeiro modo de vibração, verifica-se que o valor máximo de aceleração experimental (igual a 2,14m/s²) se encontra na faixa de valores encontrados teoricamente. Entretanto, para o segundo modo o valor máximo experimental, igual a 0,91m/s² é bem inferior aos valores teóricos.

Tabela VI.6 - Valores de Aceleração Máxima do Modelo de Passarela *Aberfeldy* para diferentes Modelos Biodinâmicos

	Aceleração (m/s²)		
	1° Modo	2° Modo	
A	1,21	1,33	
В	1,52	1,70	
C	2,31	2,12	
D	2,25	2,08	

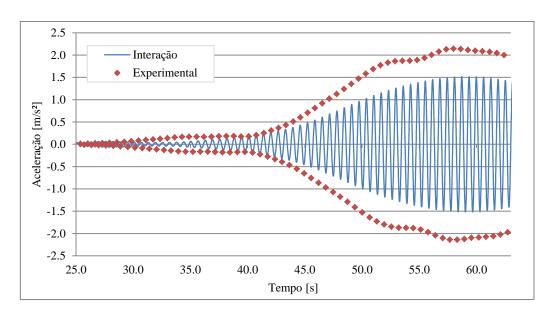


Figura VI.12 - Resposta de aceleração no ponto correspondente ao ventre do 1° modo de flexão vertical ao longo do tempo- Interação com Modelo Tipo B (Caprani, 2011) x Experimental (Pimentel, 1997).

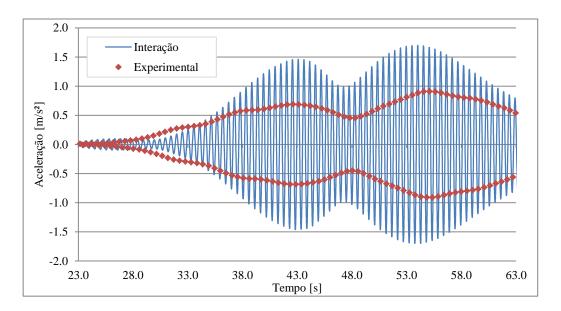


Figura VI.13 – Resposta de aceleração no ponto correspondente ao ventre do 2° modo deflexão Vertical ao longo do tempo - Interação com Modelo Tipo B (Caprani, 2011) x Experimental (Pimentel, 1997).

VI.8 Análise dos Resultados

Para efeito de discussão dos resultados obtidos para a passarela *Aberfeldy*, é necessário realizar alguns comentários quanto às respostas medidas experimentalmente,

nos ensaios em que os indivíduos foram solicitados a caminhar sobre a estrutura com frequência de passo marcada por um metrônomo de modo a impor ressonância com as frequências naturais dos dois primeiros modos de flexão vertical. Observa-se nas respostas teóricas que com o modelo de interação estrutura-pessoa caminhando, por exemplo as respostas das Figuras VI.10 e VI.11, que o aumento da aceleração se dá de forma contínua e com taxa de variação (derivada) suave até atingir o valor máximo. Já nas respostas experimentais, novamente reproduzidas nas Figuras VI.14 e VI.15, pode-se notar que o aumento da aceleração apresenta variações bruscas antes de alcançar os valores máximos nos trechos marcados na cor vermelha. Este comportamento conduz à suspeita de que os indivíduos não conseguiram manter a frequência requerida durante todo o trajeto, provavelmente por terem sido afetados pelo aumento das vibrações. Esta "perda de passo", havia sido notada por Zivanovic *et al.* (2005). As Figuras VI.14 e VI.15 contam também com linhas tracejadas que indicam o provável aumento das respostas em aceleração se o indivíduo durante o ensaio tivesse conseguido manter a frequência de passo constante ao longo da travessia da passarela.

Para efeito de análise da influência da "Perda do Passo" na resposta para uma pessoa caminhando sobre a passarela *Aberfeldy* usando o modelo de interação estruturapessoa caminhando, foram medidas as frequências das respostas experimentais do primeiro e segundo modos de flexão vertical, nos intervalos de tempo representados pelos trechos marcados em vermelho das Figuras VI.14 e VI.15, que como já esperado apresentaram variações em relação as frequências marcadas pelo metrônomo. Dessa forma usando o programa IEPC com modelo biodinâmico de Silva e Pimentel (2011), nos intervalos de tempo referentes a "Perda de Passo" foram aplicadas as frequências de passo medidas a partir das respostas experimentais e nos demais intantes de tempo a frequência fundamental do passo marcada pelo metrônomo. Como pode ser observado nas Figuras VI.16 e VI.18, que apresentam a variação das frequências fundameitas do passo do indivíduo caminhando ao longo da passarela *Aberfeldy*, em conjunto com as Figuras VI.17 e VI.19 que ilustram as respostas numéricas geradas pelo programa IEPC sobrepostas pelas respostas experimentais, demonstram que o modelo de interação proposto nesta dissertação possui execelente correlação teórico-experimental para os dois modos abordados.

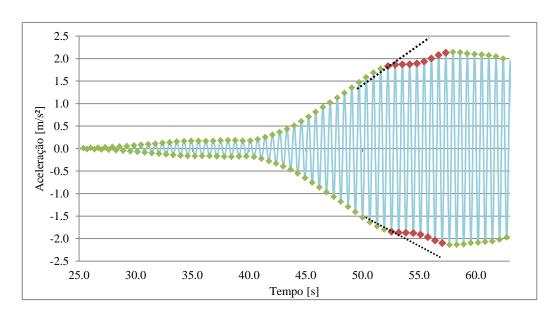


Figura VI.14 – Resposta Experimental de aceleração no meio do vão central ao longo do tempo de pessoa caminhando em ressonância aproximada com a estrutura - 1° Modo de Vibração Vertical (Pimentel, 1997)

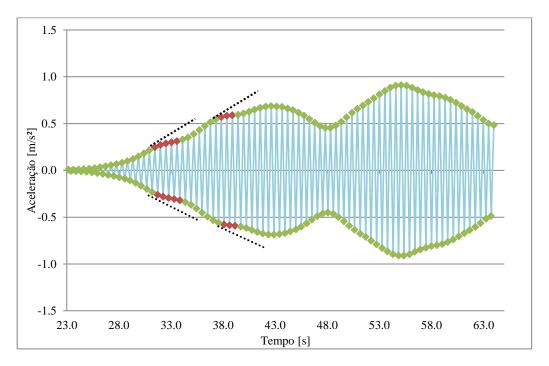


Figura VI.15 – Resposta Experimental de aceleração no ponto correspondente ao ventre do 2° modo ao longo do tempo de pessoa caminhando em ressonância aproximada com a estrutura - 2° Modo de Vibração Vertical (Pimentel, 1997)

A aplicação do modelo de carga móvel para uma pessoa caminhando sobre a passarela *Aberfeldy*, forneceu amplitudes de aceleração bastante superiores às obtidas

experimentalmente em ambos os modos analisados, a forma da resposta numérica para o primeiro modo teve boa concordância com a experimental, contudo a envoltória experimental demonstra que mesmo se a frequência do passo houvesse sido constante a amplitude da resposta obtida pelo modelo de carga móvel ainda seria consideravelmente maior que a experimental. E o segundo modo de vibração modelado, não representou o comportamento dinâmico registrado da estrutura.

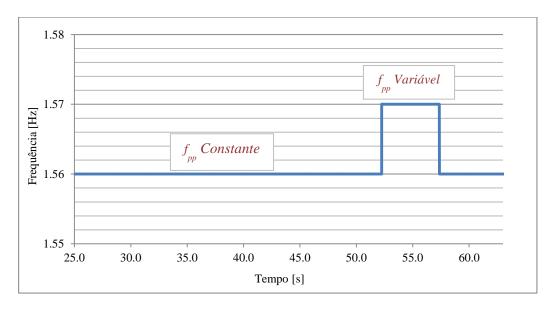


Figura VI.16 – Frequência obtida de resposta experimental de Pimentel, 1997- 1° Modo de Vibração Vertical

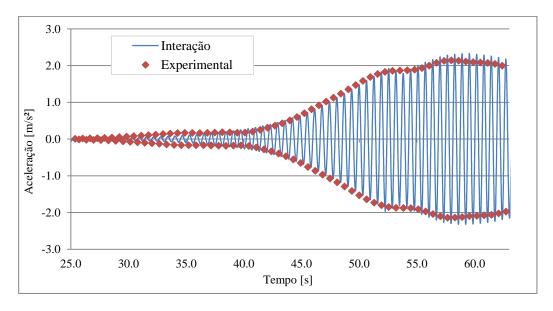


Figura VI.17 – Resposta de aceleração no ponto correspondente ao ventre do 1° modo de flexão vertical ao longo do tempo- Interação com "Perda de Passo" x Experimental (Pimentel, 1997).

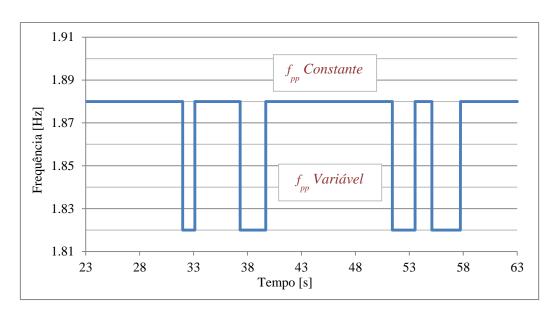


Figura VI.18 – Frequência obtida de resposta experimental de Pimentel, 1997- 2° Modo de Vibração Vertical

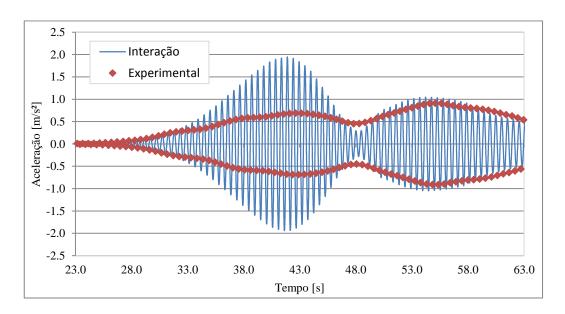


Figura VI.19 – Resposta de aceleração no ponto correspondente ao ventre do 2° modo de flexão vertical ao longo do tempo- Interação com "Perda de Passo" x Experimental (Pimentel, 1997).

As respostas obtidas pelo modelo de interação estrutura-pessoa caminhando (Item VI.6), com uso do modelo biodinâmico de Silva e Pimentel (2011), apresentam-se muito semelhantes em termos da natureza do comportamento dinâmico da estrutura real diante de vibrações induzidas por uma pessoa caminhando. A resposta numérica para o primeiro

modo alcançou uma consistente similaridade com a resposta experimental, no que diz respeito ao valor de aceleração máxima obtida, e ao comportamento, que se manteve igual até o ponto da "perda de passo" do indivíduo durante o ensaio. O mesmo não se observou com tamanha consistência para o segundo modo, muito provavelmente em razão da resposta experimental apresentar dois pontos de desvio da continuidade da frequência do passo, o que contribuiu para discordância entre os valores numéricos e experimentais.

Quanto aos resultados gerados pelo modelo de interação estrutura-pessoa caminhando com os valores extremos das faixas de k_p e ξ_p dos modelos biodinâmicos pesquisados por Caprani (2011), estes seguiram o mesmo padrão das respostas no tempo obtidas com o modelo biodinâmico de Silva e Pimentel (2011), com variações expressivas das amplitudes.

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Além da segurança ao colapso, o conforto do usuário pode ficar comprometido pela excessiva vibração de passarelas, sendo este critério, portanto, de grande relevância na etapa de projeto de tais estruturas. A resposta dinâmica em passarelas devida às ações produzidas por atividades humanas tais como caminhar e correr se deve à prática atual da concepção arquitetônica de estruturas com formas cada vez mais esbeltas e flexíveis. Diante desta problemática este trabalho investigou a contribuição da interação na resposta em aceleração, existente entre pessoas e passarelas que apresentam comportamento dinâmico.

As conclusões obtidas das inúmeras respostas foram:

- O modelo analítico-numérico de pessoa como carga móvel é recomendado quando não há interação entre o sistema estrutura-pessoa, demostrado pela equivalência das respostas geradas por ambos os modelos em um exemplo de pessoa caminhando em uma passarela em viga biapoiada com seção mista aço-concreto (Pfeil e Vasconcelos, 2006), concluindo-se que em situações onde a massa do pedestre for um percentual muito pequeno em relação à massa da estrutura, não há interação;
- A partir das análises pelo modelo de interação estrutura-pessoa parada, com vibração livre e forçada em um exemplo de viga biapoiada com uma e duas pessoas paradas no meio do vão, obteve-se alterações nas propriedades modais do sistema estrutura-pessoa em relação à estrutura isolada, com acréscimo de amortecimento e diminuição da frequência natural, quando imposta vibração livre na estrutura. No caso de vibração forçada houve um decréscimo nas amplitudes de deslocamento, que pode ser tomado como um aumento no amortecimento do sistema. Do exposto concluiu-se que pessoas paradas em estruturas em comportamento dinâmico alteram as propriedades modais da mesma com a capacidade de impor um acréscimo de amortecimento ao sistema, e podem ser tidas como um sistema absorsor passivo;
- O modelo de pessoa como carga móvel se deslocando sobre a estrutura da passarela de Aberfeldy forneceu resultados com amplitudes de resposta muito

maiores do que as experimentais (60% e 125% maiores, respectivamente para o primeiro e segundo modos) e também maiores ou iguais às obtidas com a aplicação do modelo de interação estrutura - pessoa caminhando. Além disso, no caso do segundo modo de vibração, o aspecto da resposta obtida com o modelo de carga móvel foi muito distinto daquele das respostas obtidas experimentalmente e teoricamente com o modelo de interação;

- Diante da observação da dificuldade dos pedestres em caminhar em ressonância com a estrutura quando esta apresenta grandes amplitudes, conclui-se que as respostas do modelo de interação estrutura pessoa caminhando fornecerão sempre um limite superior para as respostas da estrutura. No caso de aplicação do modelo biodinâmico de Silva e Pimentel (2011) as acelerações máximas teóricas da passarela Aberfeldy foram respectivamente 23% e 130% maiores do que as experimentais para o primeiro e segundo modos de vibração. O aspecto das respostas teóricas foi semelhante ao das experimentais para ambos os modos;
- A aplicação de valores extremos dos parâmetros do modelo biodinâmico conforme indicação de Caprani et al. (2011) conduziu a amplitudes de respostas estruturais bastante distintas entre si, demonstrando a importância do desenvolvimento de modelo biodinâmico específico para pessoa caminhando como elaborado por Silva e Pimentel (2011).

Do exposto quanto aos resultados obtidos, observou-se consistência nos modelos de interação estrutura-pessoa propostos, tornando verdadeira a afirmação da consideração das propriedades modais dos usuários de estruturas de passarela. E para trabalhos futuros, como instrumento de desenvolvimento dos modelos de interação propostos, este documento sugere :

- Pesquisar a linha do modelo a ser estendido para incorporar a presença de muitas pessoas simultaneamente na passarela, cada qual com suas características;
- Para um projeto de passarela leve e com frequência natural na faixa de frequências do caminhar humano, a aplicação deste modelo em conjunto com o método de Monte Carlo para a geração aleatória dos parâmetros do

- modelo biodinâmico para representar as pessoas em uma multidão, fornecerá as respostas máximas esperadas da estrutura;
- Usar a passarela desenvolvida na COPPE por Teixeira, 2007, em um estudo experimental que possa substituir os resultados de Pedersen, 2006 usados de forma apenas qualitativa na validação da formulação da interação estruturapessoa parada apresentada neste trabalho;
- Realizar um estudo a cerca do conforto humano;
- Desenvolver o mesmo estudo de interação estrutura-pessoa para o modo lateral;
- Usar modelos de pessoa como sistema mecânico massa-mola-amortecedor com mais de um grau de liberdade no estudo de interação estrutura-pessoa .

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT "ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS". NBR 6118 -Projeto de Estruturas de Concreto Armado – Procedimento. Rio de Janeiro. 2003.
- ABNT "ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS". NBR 7188 -Carga Móvel em Ponte Rodoviária e Passarela de Pedestres. Rio de Janeiro. 1982.
- ABNT "ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS". NBR 8800 -Projeto e Execução de Estruturas de Aço e de estruturas mistas aço-concreto de edifícios. Rio de Janeiro. 2003.
- 4. ALLEN D.E., RAINER J.H., "Floor vibration". Ottawa, Canada: Division of Building Research, NRCC. Canadian Building Digest (CBD) 1975.
- 5. ALLEN D.E., RAINER J.H., PERNICA G., "Vibration Criteria for Assembly Occupancies". Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 12, N° 3. Pp. 617-623, 1985.
- ALVES N.K.C., "Cargas Humanas Devido a Pedestres em Movimento", Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Novembro, 1990.
- 7. BACHMANN H., AMMANN W., "Vibration in Structures Induced by man and Machines", Structural Engineering Document No 3e, International Association for Bridge and Structure Engineering, IABSE, Zurich, Switzerland, 1987.
- 8. BAKER R., "The History of gait Analysis the Advent of Modern Computers", Gait e Posture 26(2007): 331-342, 2006.
- BATTISTA R.C., ROITMAN N., "Análise de Vibrações e da Segurança do Estádio do Maracanã", Relatório Técnico COPPETEC ET-150474, contrato da Fundação COPPETEC com a SUDERJ, Rio de Janeiro, Novembro, 1990.
- 10. BERTOS G., CHILDRESS D., GARD S., "The Vertical Mechanical Impedance of the Locomotor System During Human Walking with Applications in Rehabilitation". Proceeding of the 2005 IEEE Ninth International Conference on Rehabilitation Robotics, Chicago, 2005.
- 11. BOILEAU P.-É., RAKHEJA S., YANG X., STIHARU I. "Comparison of biodynamic response characteristics of various human body models as applied to seated vehicle drivers", in UK Informal Group Meeting on Human Response to Vibration, Nuneaton, UK, 18-20 September 1996.
- 12. BRAUNE W, FISCHER O. "*The human gait*". Translated by Maquet P, Furlong R. Berlin: Springer-Verlag; 1987.

- 13. BROWNJOHN J.M.W. "Energy dissipation in one-way slabs with human participation", Proceedings of the Asia-Pacific Vibration Conference 99, Nanyang Technological University, Singapore, 11-13 December 1999. Vol. 1: 155-60.
- 14. CAPRANI, C.C., KEOGH J., ARCHBOLD P. and FANNING P. "Characteristic Vertical Response of a Footbridge Due to Crowd Loading", EURODYN 2011, Leuven, Belgium, 4-6 July 2011.
- 15. CEB "COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON", Bulletin d'Information 209, Vibration Problems in Structures: practical guidelines. Lausanne, Switzerland, Aug. 1991
- 16. CHARLES P.; BUI V. "Transversal Dynamic actions of pedestrian. Synchronization". Proceedings of Footbridges 2005 2nd International Conference, Veneza, Itália.
- 17. CLOUGH R.W., PENZIEN J., "Dynamics of Structures, 7th ed.", New York, McGraw-Hill, 1986.
- 18. DALLARD P., FITZPATRICK T., FLINT A., LOW A., RIDSILL-SMITH R. AND WILLFORD, M. "Technical update: Pedestrian induced vibration of footbridges", The Structural Engineer (IStructE) 78 (23/24): 13-5, 2000.
- 19. EBRAHIMPOUR A., SACK R.L., "Modeling Dynamic Occupant Loads", ASCE, Journal of Structural Engineering, Vol. 115, N° 6, pp.1476-1495, 1989.
- 20. EBRAHIMPOUR A., SACK R.L., "Design Live Loads for Coherent Crowd Harmonic Movements", Journal of Structural Engineering (ASCE), 1992.
- 21. EBRAHIMPOUR A., HAMAN A., SACK R.L. *et al*, "*Measuring and Modeling Dynamic Loads Imposed by Moving Crowds*". Journal of Structural Engineering, Vol. 122, N° 12, pp.1468-1473, 1996.
- 22. ELLIS B.R., JI, T. and LITTLER, J.D., "The response of grandstands to dynamic forces induced by crowds", Australasian Structural Engineering Conference, Sydney, Australia, 21-23 January 2001.
- 23. FAISCA R. G., "Caracterização de cargas dinâmicas geradas por atividades humanas". 2003 230 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro, 2003.
- 24. FALATI S. "The Contribution of non-structural Components to the overall Dynamic Behavior of Concrete Floor Slabs". Thesis (PhD). University of Oxford, Oxford, UK, 1999.
- 25. FOSCHI R.O. e GUPTA, A. "Reliability of Floors Under Impact Vibration", Canadian Journal of Civil Engineering 14(5): 683-9, 1987.

- 26. GOLDMAN D.E., "USN MRI" Rept. 1, NM 004 001, March 1948.
- 27. GRIFFIN M.J., "Handbook of Human Vibration". London, UK: Academic Press, 1990.
- 28. HARVEY W. J., "A Reinforced Plastic Footbridge, Aberfeldy, UK", Structural Engineering International, Vol. 3, Part 4, pp. 229-232, 1993.
- 29. INGOLFSSON E.T., GEORGAKIS C.T., JONSSON J., "Pedestrian induced lateral vibration of footbridges: A Literature Review", The Structural Engineer (IStructE) 78 (21/52): 2012.
- 30. INMAN V.T.; Todd F., RALSTON H.J., "Human Walking", Williams and Wilkins, Baltimore, USA, 1981.
- 31. ISO 7962. "Mechanical Vibration and Shock-mechanical transmissibility curves of the human body in the z direction". International Standard, 1987.
- 32. ISO 5982. "Vibration and Shock Mechanical Driving Point Impedance of the Human Body". International Organization for Standardization (ISO), 1981.
- 33. KASPERSKI, M. and NIEMANN, H.J., "Man Induced Vibrations of a Stand Structure", in Moan, T., et al. (eds) EURODYN'93, Trondheim, Norway, 21-23 June 1993. Rotterdam, The Netherlands: A.A. Balkema Publishers. 977-983, 1993.
- 34. KERR S., "Human Induced Loading on Flexible Staircases", Ph.D thesis, University of London, London, England, 1998.
- 35. KERR S.; BISHOP N., "Human Induced Loading on Flexible Staircases, Engineering Structures", v.23, pp 37-45, 2001.
- 36. L'ASSOCIATION FRANÇAISE DE GÉNIE CIVIL. "Passerells Piétones Évaluattion Du comportement vibratoire sous l'action des piétons". Edité par Sétra, mars 2006.
- 37. L'ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION, 2004 Eurocode 1: "Actions sur lês structures Partie 2: Actions sur lês ponts, dues au traffic". Saint-Denis, 2004.
- 38. LEE D. J., "Project Linksleader': The First Major Cable-Stayed GRP Bridge", FIP Symposium Modern Prestressing Techniques and Their Applications, Kyoto, Japan: FIP, Vol. 2, pp. 671-678, 1993.
- 39. LEE C., FARLEY C. "Determinants of the Center of Mass Trajectory in Human Walking and Running". The Journal of Experimental Biology, 201, 2935-2944, 1998

- 40. LITTLER J.D., "Full-scale Testing of Large Cantilever Grandstands to Determine Their Dynamic Response", in Thompson, P.D., Tolloczko, J.J.A. and Clarke, J.N. (eds) Stadia, arenas and grandstands. London: E and FN Spon. 123-34, 1998.
- 41. MAREY, E.-J., G.DEMENY, "Etudes Experimentales de La Locomotion Humaine", Compt.rend.Acad, d.sc., 106:544, 1887.
- 42. MORELAND, R., "The Weight of a Crowd", Letter to the Editor, Engineering, Vol. 79, p. 551, April, 1905.
- 43. MUYBRIDGE E.J., "Method of and Apparantus for Photographing Changing or Moving Objects", United States Patent N°. 279,878, June 1883.
- 44. NIGAN S.P., MALIK M., "A Study on a Vibration Model of a Human Body". Journal of Biomechanical Engineering, Transactions of ASME. Vol. 109, pp. 148-153, May, 1987.
- 45. NAKAMURA S. I. "Transversal horizontal vibration on a pedestrian cable-stayed bridge". Journal of Structural Engineering International, IABSE. v.12, n. 4. p.295-300. 2002.
- 46. OHLSSON S.V., "Floor Vibrations and Human Discomfort", Ph. D thesis, Department of Structural Engineering, Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden, 1982.
- 47. PEDERSEN L., "Experimental Investigation of Dynamic Human-Structure Interaction". IMAC-XXIV: Conference & Exposition on Structural Dynamics, 2006.
- 48. PEDERSEN L., "An Aspect of Dynamic Human-Structure Interaction". IMAC-XXVI: Conference & Exposition on Structural Dynamics, 2008.
- 49. PERRY J. "Análise de Marcha, v. 1: Marcha Normal". São Paulo: Manole, 2005.
- 50. PFEIL M.S., VASCONCELOS, J.R.S.B., "Simulação da Resposta Dinâmica de Passarela ao Tráfego de Pedestres". XXXII Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural. JOR0476. Campinas SP, Brasil, Maio, 2006.
- 51. PIMENTEL R. L., WALDRON, P., "Guidelines for the vibration serviceability limit state of pedestrian bridges". International Seminar on Structural Assessment, pp. 339-346, London, UK, July, 1996.
- 52. PIMENTEL; R. L., "Vibrational Performance of Pedestrian Bridges due to Human-induced Loads". PhD thesis, University of Sheffield, 1997.
- 53. QASSEM W., OTHMAN, M. O., ABDUL-MAJEED, S. "The Effects of Vertical and Horizontal Vibrations on the Human Body". Medical Engineering and Physics, 1994.

- 54. RACIC V., PAVIC A., BROWNJOHN J. M. W., "Experimental Identification and Analytical Modeling of Human Walking Force: Literature Review". Journal of Sound and Vibration 326 (2009): 1-49
- 55. RAINER, J.H., PERNICA. G., ALLEN D. E., "Dynamic Loading and Response of Footbridges". Canadian Journal of Civil Engineering, Vol.15 N°1. Pp.6-7.1988.
- 56. REIHER, H., MEISTER, F.J., "Die Empfindlichkeit des Menschen gegen Erschutterungen (The Effect of Vibration on People)", Forsch, Ing-Wes., 1931,
- 57. ROITMAN, N., FAÍSCA, R.G., MAGLUTA, C., "Comparação Numérica-Experimental da Resposta de uma Estrutura Submetida ao Carregamento de Multidão". XX Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural. TRB0248. Brasília DF, Brasil, Maio, 2002.
- 58. SACHSE, R., PAVIC, A., REYNOLDS, P., "Human-Structure Dynamic Interaction in Civil Engineering Dynamics: A Literature Review". The Shock and Vibration Digest, vol. 35, N° 35 1.pp.3-18, 2003.
- 59. SANTOS, C. M., "Avaliação do Comportamento Dinâmico de uma Passarela Submetida a Carregamentos Induzidos por Pedestres". Dissertação de Mestrado COPPE/UFRJ, Brasil 2011.
- 60. SAUL, W.E., TUAN, C.Y., "Review of Live Loads Due to Human Movements", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 112, N° 5, pp. 995 1004, May, 1986.
- 61. SETRA- Service d'Études techiniques des routes et autoroutes. Footbridges. "Assessment of vibrational behavior of footbridges under pedestrian loading". 2006.
- 62. SILVA, F. T., PIMENTEL R. L., "Biodynamic Walking Model for Vibration Serviceability of Footbridges in Vertical Direction", EURODYN 2011, Leuven, Belgium, 4-6 July 2011.
- 63. SILVA, F. T., "Vibrações de Passarelas de Pedestres na Direção Vertical Considerando Modelos Biodinâmicos de Pessoas Caminhando". Tese de Doutorado UFPB, Brasil 2011.
- 64. SKINNER J.M., "A Critical Analysis of the Aberfeldy Footbridge, Scotland", Proceeding of Bridge Engineering 2 Conference, University of Bath, Bath, UK, April 2009.
- 65. STRATFORD, T., "The Condition of the Aberfeldy Footbridge After 20 Years of Service", Structural Faults and Repair 2012, Edinburgh, July 2012.

- 66. TEIXEIRA, A. M. A., "Passarelas Estaiadas de Materiais Novos e Convencionais sob Ação de Cargas Dinâmicas Humanas", Tese de M.Sc. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2000.
- 67. TEIXEIRA, A. M. A., "Ponte Desmontável em Material Compósito de Fibra de Vidro", Tese de D.Sc. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2007.
- 68. TILDEN, C.J., "Kinetic effects of crowds", Proceedings, ASCE, Journal of Structures Engineering, v. 34, N° 3, pp.325-340 Mar, 1913.
- 69. TILLY, G. P.; CULLINGTON D. W.; EYRE R.; "Dynamic Behaviour of footbridges", Surveys S26/86, International Association of Bridge and Structural Engineering, IABSE, 1984
- 70. TREDGOLD, T. Elementary Principles of Carpentry, 2nd ed., Publisher unknown, 1828.
- 71. TUAN, C.Y., SAUL, W. W., "Loads due to Spectators Movements", ASCE, Journal of Structural Engineering, v. 111, N° 2, pp. 418-434, 1985.
- 72. VARELA, W.D., "Modelo Teórico Experimental para Análise de Vibrações Induzidas por Pessoas Caminhando sobre Lajes de Edificios". Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Brasil 2004.
- 73. WASSERMAN, D. E. "Human Aspects of Occupational Vibration". Elsevier Science Publishers B. V., USA, 1987.
- 74. WEI, L.; GRIFFIN, M. J. "Mathematical models for the apparent mass of the seated human body exposed to vertical vibration". Journal of Sound and Vibration 212(5): 855-74, 1998.
- 75. WILLFORD, M.; ROCHE, M. "London Millennium Bridge: Pedestrian-induced transversal horizontal vibration". Journal of Bridge Engineering, ASCE, p.412-417,nov./dec, 2001.
- 76. YOUNG, P., "Improved Floor Vibration Prediction Methodology", Engineering for Structural Vibration – Current developments in Research and Practice. Vibration Seminar, Arup Group Ltd, October, 2001.
- 77. ZHANG, L., XU, D., MAKHSOUS, M. LI, F. "Stiffness and Viscous Damping of the Human Leg". Proceedings of the 24 th Annual Meeting of the American Society of Biomechanics, Chicago, July 2000.
- 78. ZIVANOVIC, S.; PAVIC, A.; REYNOLDS, P. "Vibration Serviceability of Footbridges under human-induced excitation: a literature review". Journal of Sound and Vibration 279:1-74, 2005.

- 79. ZIVANOVIC, S.; PAVIC, A.; REYNOLDS, P. "Human-structure dynamic Interaction in Footbridges". Proceedings of the Institution of Civil Engineering, Bridges Engineering 158, December 2005.
- 80. ZIVANOVIC, S.; PAVIC, A.; REYNOLDS, P. "Finite Element Modeling and updating a lively footbridge: The Complete Process". Journal of Sound and Vibration 301:126-145, 2006.