

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ANÁLISE DO CARREGAMENTO DE MULTIDÕES EM PASSARELAS UTILIZANDO UM
MODELO DE FORÇAS SINCRONIZADO NO TEMPO E NO ESPAÇO

por

Marcéu Heinzmann Igleles

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, novembro de 2015.

ANÁLISE DO CARREGAMENTO DE MULTIDÕES EM PASSARELAS UTILIZANDO UM
MODELO DE FORÇAS SINCRONIZADO NO TEMPO E NO ESPAÇO

por

Marcéu Heinzmann Igleles

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Alcy Rodolfo dos Santos Carrara
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Mecânica dos Sólidos**

Orientador: Prof. Dr. Herbert Martins Gomes

Coorientador: MSc. Marcelo André Toso

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Jakson Manfredini Vassoler

Prof. Dr. Rogério José Marczak

Prof. Dr^a Letícia Fleck Fadel Miguel

Porto Alegre, 9 de novembro de 2015.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus, por me conceder a oportunidade da constante evolução, do crescimento pessoal e profissional;

à minha mãe pelo amor, carinho, amizade e por todo amparo e paciência em todos os momentos;

à minha vó Dulce, exemplo de fé e determinação, pelo amparo, auxílio e carinho;

Um agradecimento especial à minha namorada Fernanda Anderle, companheira e amiga, que tem me acompanhado nesta jornada. Terás para sempre o meu carinho.

Agradeço principalmente ao Professor Dr. Herbert Martins Gomes, pela sugestão do tema deste trabalho, pela paciência e por representar o verdadeiro significado da palavra orientação. Agradeço também ao doutorando Marcelo Toso, pelo auxílio, paciência e sugestões neste trabalho.

Nesta longa caminhada, muitos foram especiais e jamais serão esquecidos. Minha enorme gratidão à grande amiga Shirley Tabaczinski, ao meu irmão Lucas Ninno, à minha família, à todos os meus amigos de Cuiabá e Rondonópolis, à família Wachtmann e aos amigos do Rio Grande do Sul.

IGLESES, M. H. **Análise do carregamento de multidões em passarelas utilizando um modelo de forças sincronizado no tempo e no espaço**. 2015. 15f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

RESUMO

Após incidentes envolvendo a travessia de pedestres em passarelas, como o da Millenium Bridge em Londres, muitos estudos têm sido realizados a fim de analisar e obter procedimentos para o dimensionamento destas estruturas, considerando os fatores mais importantes que envolvem a caminhada humana. Este trabalho verifica o comportamento estrutural de uma passarela sujeita ao carregamento causado por uma multidão de pedestres com uma densidade previamente definida, onde são apresentados dois modelos de forças: (a) modelo de força simples (MFS) em que a força das passadas sucessivas dos pedestres é representada por uma série de Fourier e a caminhada do pedestre é assumida com a velocidade constante em linha reta na direção do movimento; (b) modelo de força totalmente sincronizado (MFTS) onde parâmetros cinéticos e cinemáticos do pedestre são sincronizados no tempo e no espaço. O modelamento matemático foi realizado em linguagem de programação, utilizando o método de Newmark para a integração das equações de movimento, sendo utilizada a matriz de rigidez e massa de uma treliça espacial no modelamento da passarela. O modelo de força totalmente sincronizado se mostrou mais realista, uma vez que considera esforços verticais, laterais e longitudinais, sendo que o MFS apresentou comportamento que se observou poder subestimar as vibrações causadas na passarela, pois apresentaram diferenças significativas nas acelerações verticais, horizontais e longitudinais para o modelo completo. Ambos os modelos se mostraram mais realistas e precisos do que o método adotado pela única norma brasileira existente atualmente referente a cargas em passarelas e que considera a carga dos pedestres como uma carga uniformemente distribuída.

PALAVRAS-CHAVE: Interação pedestre-passarela, vibração mecânica, vibrações induzidas por pessoas.

IGLESES, M. H. **Analysis of crowd loading on footbridges using a fully synchronized model in time and space.** 2015. 15f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

ABSTRACT

After incidents involving pedestrians crossing footbridges, like in the Millennium Bridge in London, many studies have been conducted to analyze and get procedures for the design of these structures, considering the most important factors involving human walk. This work analyzes the structural behavior of a footbridge subject to loading caused by a crowd of pedestrians with a predefined density. It is presented two force models: (a) a simple force model (SFM) where the load applied from successive steps is represented by a Fourier series and the pedestrian is assumed walking at constant speed and in straight lines; (b) a fully synchronized force model (FSFM) where kinetic and kinematic parameters of the pedestrian are synchronized in time and space. The mathematical modeling was performed in programming language using Newmark method for integration of equations of motion and spatial truss finite elements are used to simulate the mechanical behavior. The fully synchronized force model presented more realistic, since it considers vertical, lateral and transverse loadings. Although SFM showed similar behavior, vibrations were underestimated and some significant differences could be observed in horizontal, longitudinal and vertical accelerations for the full model. Anyway, both models shows to be more realistic and accurate than the method proposed by the only existing Brazilian standard that considers pedestrians as uniformly distributed live loads.

KEYWORDS: Pedestrian-footbridge interaction, mechanical vibration, human induced structural vibration.

AGRADECIMENTOS	iii
RESUMO.....	iv
ABSTRACT	v
LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS	viii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Motivação e objetivos	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	2
3. MODELAMENTO DO PROBLEMA	4
3.1. Método de Newmark.....	5
3.2. Modelo do pedestre	5
3.3. Dimensões da passarela analisada e modelo numérico dinâmico da passarela	5
3.4. Modelo de força simples (MFS)	6
3.5. Modelo de força totalmente sincronizado (MFTS)	7
3.6. Modelo de multidão.....	8
4. RESULTADOS	9
4.1. Análise da aceleração RMS da estrutura no meio do vão	9
4.2. Análise dos espectros de aceleração	9
4.3. Análise dos deslocamentos	12
4.4. Análise modal	13
5. CONCLUSÕES	14
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFIAS	14
APÊNDICE	16

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Curva típica da componente vertical da FRS da caminhada humana individual.	4
Figura 3.1 - Vista Lateral do modelo de elementos finitos da treliça espacial da passarela	6
Figura 3.2 - Esquema de representação do MFS - Passos x Passada.	6
Figura 3.3 – Definição dos eixos e detalhamento do MFTS.	8
Figura 3.4 – Vista superior, em preto, pontos de contato dos pés e em vermelho a área de tráfego.	9
Figura 4.1 - MFS x MFTS - Densidade 0,3 ped/m ²	10
Figura 4.2 - MFS x MFTS - Densidade 0,7 ped/m ²	10
Figura 4.3 - MFS x MFTS - Densidade 0,9 ped/m ²	11
Figura 4.4 - Deslocamento vertical (a) MFS x (b) MFTS.....	12
Figura A.1 – Vetores resultantes no espaço para Força de Reação do Solo – MFTS.	17
Figura A.2 Gráficos utilizados na análise – MFTS (direção lateral) - Densidade 0,9 ped/m ²	17
Figura A.3 – Vista lateral da passarela analisada e componentes metálicos da estrutura.	18

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Resultados MFS x MFTS.	4
Tabela 3.1 - Dados biodinâmicos médios dos pedestres.....	5
Tabela 4.1 - Comparação acelerações RMS no meio do vão MFS x MFTS (mm/s ²).....	9
Tabela 4.2 - Valores RMS para deslocamentos (mm) – 0,9 ped/m ²	12
Tabela 4.3 – Exemplos de vibração desejáveis (Adaptado: SÉTRA, 2006)	12
Tabela 4.4 - Modos de vibração e sua interpretação geométrica.	13
Tabela 4.5 – Comparação de frequências de vibração numérica e experimental (Toso e Gomes, 2015).	14
Tabela A1 - DLF's utilizados por diferentes autores.....	16

1. INTRODUÇÃO

O crescimento das cidades e conseqüentemente do fluxo de veículos causaram um aumento significativo do número de passarelas de pedestres, cuja principal função é a de permitir o cruzamento de vias sem a interrupção do tráfego. Com a melhoria dos projetos, técnicas construtivas e novos materiais, essas passarelas estão cada vez mais esbeltas, e assim sendo, mais suscetíveis aos riscos da ressonância causada por vibrações induzidas por ações naturais como vento ou mesmo pelo carregamento causado por pedestres caminhando, correndo ou pulando sobre a estrutura.

Segundo Živanović et. al., 2012, mais de 1000 artigos foram publicados após o incidente na inauguração da Millennium Bridge, em Londres, em 2001, quando, por ocasião de sua inauguração, cerca de 100.000 pessoas fizeram a travessia da passarela, perfazendo uma densidade entre 1,3 a 1,5 pedestres por m², gerando vibrações laterais ressonantes importantes e pânico em seus usuários. Além deste episódio, outros também são conhecidos, como por exemplo o da Ponte de Solferino em Paris, que apresentou amplitude de vibração lateral de 0,81Hz e teve que ser interditada para manutenção. Outro caso foi o *Maple Valley Suspension Bridge* no Japão com um vão de 320m que no quarto modo de vibração lateral apresentou frequência de 1,02 Hz, esses são alguns dos casos citados em Carroll, 2013. No Brasil, a única norma que aborda o tema do dimensionamento de passarela para pedestres é a *ABNT NBR 7188 - Carga móvel rodoviária e de pedestres em pontes, viadutos, passarelas e outras estruturas*, que teve sua última revisão realizada em 2013, porém sem nenhuma diferença significativa para a versão de 1983. Esse guia brasileiro abrange cargas móveis em estruturas, porém sobre o carregamento de pedestres ela é superficial, no sentido de não ressaltar os possíveis efeitos nocivos da vibração causada pela caminhada humana. Esta considera apenas como um carregamento uniformemente distribuído sem um coeficiente de majoração de impacto e deixando uma recomendação para que o projetista considere efeitos da fadiga no dimensionamento.

Justamente por essa escassez de normas que tratem especificamente do tema em outros países e principalmente no Brasil, inúmeros artigos e trabalhos estão buscando desenvolver um modelamento mais preciso da interação da caminhada humana com as estruturas. Este modelamento, porém, esbarra em comportamentos individuais dos pedestres quando inseridos em uma multidão, uma vez que estão sujeitos a influências físicas e psicológicas. Estas são difíceis de estimar em campo através de estudos científicos, como por exemplo, a velocidade, o comprimento da passada, a largura do passo de cada pedestre e também a tendência dos pedestres de ficarem afastados uns dos outros.

Quase todos os modelos de força para o carregamento dos pedestres disponíveis (definidas no domínio do tempo ou da frequência) na literatura e em normas, assumem que estas são perfeitamente periódicas contendo um ou mais harmônicos e são medidas para altas frequências. A literatura indica que com o aumento da esbeltez das estruturas, estas estão cada vez mais suscetíveis aos efeitos de vibração causado por baixas frequências que podem vir dos harmônicos ou sub-harmônicos dos carregamentos gerados pela caminhada dos pedestres.

1.1. Motivação e objetivos

Muitos trabalhos têm focado na determinação de características biodinâmicas e cinéticas da caminhada, com o intuito de gerar um modelo adequado para o fenômeno da aplicação das cargas na estrutura que seja validado através de simulações e testes experimentais. Este trabalho tem como objetivo propor uma contribuição aos estudos que têm sido realizados no GMAP, através de uma análise de dois modelos de forças para o carregamento dinâmico de caminhada para uma multidão de pedestres em uma passarela e com isso desenvolver um modelo matemático em um software de programação. O caso de multidões tem sido pouco abordado na literatura e quando feito é tratado de maneira muito aproximada através de modelos simplificados que consideram fatores de majoração para

considerar sincronismo ou não dos pedestres assim como seu número. Este trabalho trará a simulação completa da multidão, tratando os pedestres individualmente sob uma densidade constante durante a caminhada.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A norma brasileira NBR 7188, 2013, define valores característicos de veículos sobre pneus e ações de pedestres em projetos de pontes, viadutos, passarelas e edifícios-garagem. Porém a norma é bastante sucinta no que se refere aos carregamentos causados por pedestres, devendo o projetista considerar uma carga móvel uniformemente distribuída de 5 kN/m² e quando se trata de estruturas esbeltas, sensíveis a ação dinâmica dos pedestres, deve-se comprovar sua estabilidade global e verificação estrutural através de modelos dinâmicos e verificação à fadiga. No entanto, não é apresentado nenhum modelo de carregamento de pedestres.

Dentre as principais normas existentes para o dimensionamento de passarelas sujeitas ao carregamento de pedestres, pode-se citar a AASHTO, 1997 e BS 1991-2, 2008, podendo se destacar as normas ISO 10137, 2007 e a recomendação francesa SÉTRA, 2006. Ambas consideram que a força dinâmica produzida por uma pessoa pode ser representada por uma função periódica $F(t)$ definida por séries de Fourier considerando o peso dos pedestres, conforme Equações (2.1) e (2.2). A abordagem da SÉTRA, 2006, sobre a vibração em passarelas é bastante ampla no sentido de descrever o fenômeno e identificar os parâmetros que possuem importância no dimensionamento dessas estruturas e metodologias para a análise dinâmica de passarelas através de ensaios. Além disso, é apresentado um método para o cálculo das frequências naturais, modos e a resposta ao carregamento pela passarela. A principal diferença entre essas normas se dá pela adoção de diferentes valores para os DLF's, que são fatores de cargas dinâmicas dependentes da velocidade, da frequência da caminhada e das características individuais de cada pedestre. Para o carregamento de multidões, a norma SÉTRA, 2006, distingue entre 4 classes, de acordo com o tráfego de pedestres: Classe I: muito densa (1 ped/m²), Classe II: densa (0.8 ped/m²), Classe III: espalhada (0.5 ped/m²) e Classe IV: passarelas raramente usadas.

$$F_v(t) = Q \left[1 + \sum_{n=1}^k \alpha_{n,v} \sin(2\pi f t + \phi_{n,v}) \right], \quad \text{para a direção vertical} \quad (2.1)$$

$$F_h(t) = Q \left[\sum_{n=1}^k \alpha_{n,h} \sin(2\pi f t + \phi_{n,h}) \right], \quad \text{para a direção horizontal} \quad (2.2)$$

A norma ISO 10137, 2007, fornece alguns exemplos para critérios de dimensionamento de passarelas para pedestres utilizando como base curvas de vibrações verticais e horizontais presentes na norma ISO 2631-1 multiplicados por um fator de majoração de 60 e um fator de 30 para pessoas paradas na estrutura, uma vez que elas são mais sensíveis a vibrações do que quando caminhando. Porém, de acordo com Živanović et al., 2005, essas recomendações não são baseadas em pesquisas publicadas pertinentes a vibrações em passarelas.

Importantes estudos sobre vibrações em passarelas causadas por pedestres têm sido realizados por Živanović (2005, 2008 e 2012). Živanović et al., 2012, realizam uma abrangente revisão de cerca de 200 literaturas que abordam este tema, no intuito de entender e modelar o carregamento induzido por pedestres, além de mencionar que inúmeros pesquisadores buscam determinar o fator de carga dinâmica (DLF) conforme pode ser visto na Tabela A1 do apêndice, fator este, intimamente ligado à frequência das passadas. Para estudos sobre multidões atravessando passarelas, Matsumoto, 1978, *apud* Živanović, 2012, relata que uma estimativa da quantidade equivalente de pedestres pode ser obtida pela densidade de pedestres em cima da passarela e do tempo necessário T_0 para a travessia da mesma, ou seja, $\sqrt{\lambda T_0} = \sqrt{n}$, onde λ é a taxa de pedestres por segundo que entram na passarela e n é o número de pedestres que estão em cima da passarela no mesmo instante.

Živanović et al., 2005, realizaram um estudo sobre uma passarela com 78m de comprimento na cidade de Podgorica, capital de Montenegro, sendo de 2,05 Hz a frequência do primeiro modo de flexão vertical da passarela medida experimentalmente. Esta frequência associada à baixa taxa de amortecimento, de apenas 0,28%, encontrada através da análise experimental, foram considerados fatores determinantes para a perceptível vibração da passarela na direção vertical.

Um importante fenômeno que ocorre na travessia, é a sincronização ou *lock-in*, que é o efeito causado pelo pedestre ao tentar ajustar a sua vibração com a da estrutura, proporcionando o aumento da amplitude de vibração, sendo mais provável de ocorrer na direção lateral do que na direção vertical devido ao balanço do corpo humano. A sincronização é dependente da frequência natural da passarela sendo excitada pela multidão caminhando, amplitude da resposta da passarela, número de pessoas envolvidas, densidade e velocidade das pessoas.

Carroll, 2013, realizou um estudo bastante completo sobre vibrações laterais em passarelas causadas por uma multidão de pedestres, desenvolvendo uma revisão abrangente de estruturas que foram monitoradas e utilizando uma campanha de testes experimentais através do monitoramento por sensores acoplados em pessoas caminhando em plataformas e esteiras instrumentadas. Através dessa campanha foi desenvolvido um modelo numérico que avalia a interação entre o pedestre e a estrutura, além de elaborar um quadro de modelagem para melhor compreensão dessa interação e a influência dinâmica do envolvimento de uma multidão de pedestres. O autor avalia ainda, o *GRF – Ground Reaction Force*, que é a reação que o solo faz ao pedestre durante a travessia e também cita as dificuldades do estudo de uma multidão de pedestres, devido aos parâmetros que são dificilmente estimados.

Estudos sobre a caracterização de modelos biodinâmicos são citados por Toso, 2012. O autor desenvolveu uma plataforma para medição com precisão dos esforços da caminhada humana através de células de cargas mensurando a componente vertical da força de reação do solo (FRS) a fim de caracterizá-la e utilizá-la posteriormente como carregamento dinâmico em estruturas. Segundo Toso, 2012, a FRS é uma força que atua do solo para o corpo que está em contato, representando uma resposta às ações musculares e ao peso corporal transmitido por meio dos pés. A curva característica da componente vertical da FRS é apresentada na Figura 2.1, onde o pé direito e o pé esquerdo estão em contato com uma plataforma, gerando dois picos e um vale que podem atingir 40% do peso estático corporal e a soma dessas curvas produz uma curva com característica periódica, sendo geralmente representada pela série de Fourier da Equação (2.1) e (2.2). Silva, 2011, utilizou os resultados da força de reação do solo de pedestres mensurada com esta plataforma e os resultados de acelerações avaliadas na cintura dos indivíduos para implementar um modelo biodinâmico. Além disso, o autor realizou uma validação do modelo biodinâmico através de uma comparação com resultados experimentais obtidos na travessia de uma multidão de pedestres em uma passarela experimental na UFPB. Para isto, utilizaram-se três densidades distintas: 0,3 ped/m², 0,7 ped/m² e 0,9 ped/m² e conclui que a adoção deste modelo apresentou resultados muito próximos dos resultados medidos na estrutura real, evitando estimativas conservadoras obtidas com a aplicação apenas da força em modelos para representar a ação de pedestres em situações de multidão.

A caminhada humana é composta pela componente vertical, causada pelo contato dos pés no solo com uma frequência em torno de 1,4 a 2,4 Hz e pelas componentes horizontais, que se devem à oscilação lateral do centro de gravidade do corpo humano como consequência da alternância do pé direito e pé esquerdo no chão, com frequência de metade da vertical, em torno de 0,7 a 1,4 Hz. Há também a componente horizontal de empuxo que resulta no movimento adiante para o pedestre. Essas forças dinâmicas verticais e horizontais impostas por pedestres e a resposta dinâmica causada por multidões em passarelas são estudadas por Hauksson, 2005. O autor realizou comparações entre as normas BS 5400, 1978, ISO 10137, 2007, e a norma sueca BRO, 2004, onde um modelamento em elementos finitos é utilizado para calcular a resposta dinâmica da passarela Millenium Bridge quando sujeita a uma carga dinâmica de acordo com as recomendações das normas citadas. Hauksson, 2005, estuda

ainda o fenômeno da sincronização que é o efeito causado pelo pedestre ao tentar ajustar a sua caminhada com a vibração da estrutura, proporcionando o aumento da amplitude de vibração em conhecidos episódios de vandalismo.

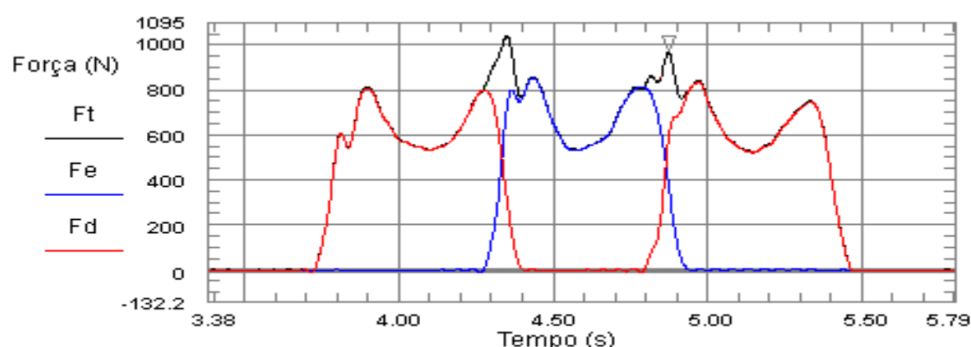


Figura 2.1 - Curva típica da componente vertical da FRS da caminhada humana individual.
(Fonte: Adaptado Toso, 2012)

Toso e Gomes, 2015, utilizaram os conceitos de parâmetros cinéticos (forças de interface) e parâmetros cinemáticos (velocidade da caminhada, taxa da passada, comprimento do passo e passada, largura do passo) obtidos pela plataforma para analisar a interação entre apenas um pedestre e a estrutura de uma passarela. A partir dessas informações preliminares, desenvolveram um modelo numérico que posteriormente foi validado com os resultados experimentais da medição dos esforços causados por um pedestre em uma passarela em Brasília, [Barros, 2009]. Dois modelos de forças foram determinados para estimar o carregamento do pedestre, o modelo SFM (*Simple Force Model*, aqui indicado como MFS, Modelo de Força Simples), utilizado nas normas SÉTRA, 2006 e ISO 10137, 2007, em que a força do pedestre é representada por uma série de Fourier com velocidade constante em linha reta; e o modelo FSFM (*Fully Synchronized Force Model*, aqui indicado como MFTS, Modelo de Força Totalmente Sincronizado), onde as componentes de carga são verticais, longitudinais e transversais utilizando os parâmetros cinéticos e cinemáticos, sincronizados no tempo e no espaço. Toso e Gomes, 2015, utilizaram os fatores de cargas dinâmicas (DLF's) fornecidos pela norma SÉTRA, 2006, massa do único pedestre de 76.4kg com taxa de passo de 1,82Hz.

Tabela 2.1 - Resultados MFS x MFTS.

Aceleração - meio do vão (mm/s ²)			
Modelo	Longitudinal	Vertical	Lateral
MFS	1.1	13.8	32.5
MFTS	2.1	17.9	33.2

(Fonte: Adaptado de Toso e Gomes, 2015.)

Como pode ser visto na Tabela 2.1 estes modelos apresentaram diferenças de 90%, 30% e 2% para acelerações na estrutura na direção longitudinal, vertical e lateral, respectivamente. O estudo conclui que o MFS pode subestimar comportamentos vibracionais de estruturas e que o MFTS pode representar melhor o comportamento do pedestre caminhando na passarela, assim como a sua resposta a este carregamento.

3. MODELAMENTO DO PROBLEMA

A passarela analisada juntamente com os carregamentos gerados pelos pedestres formam um sistema de equações diferenciais para as três direções de movimento da estrutura dado pela Equação (3.1):

$$[M]\ddot{\vec{x}} + [C]\dot{\vec{x}} + [K]\vec{x} = \vec{F}(t) \quad (3.1)$$

onde $\vec{F}(t)$ representa o vetor de carregamento, nas três direções, aplicado pela multidão sobre a estrutura, $[M]$ a matriz de massa da estrutura (com pedestres incorporados), $[C]$ matriz de amortecimento estrutural (medida experimentalmente) e $[K]$ matriz de rigidez. O vetor de deslocamentos no espaço é representado por $\vec{x} = (u, v, w)$ e suas derivadas, $\dot{\vec{x}}$, $\ddot{\vec{x}}$. Foram utilizados elementos finitos de treliças espaciais para o modelamento.

3.1. Método de Newmark

Para a resolução do sistema de equações diferenciais de movimento acopladas, utilizou-se o método de integração numérica implícita de Newmark com condições iniciais triviais. Segundo Rao, 2010, a estabilidade deste método depende dos parâmetros α e β e ele é incondicionalmente estável para $\alpha \geq \frac{1}{4}(\beta + \frac{1}{2})^2$ e $\beta \geq \frac{1}{2}$. Este método é baseado na suposição de que a aceleração varia linearmente entre dois instantes de tempo. As equações de recorrência para a aplicação de equações de movimento, considerando a variação da aceleração, velocidade e deslocamento em intervalos de tempo Δt , são indicadas a seguir:

$$\vec{x}_{i+1} = \left[\frac{1}{\alpha(\Delta t)^2} [M] + \frac{\beta}{\alpha(\Delta t)^2} [C] + [K] \right]^{-1} \times \left\{ \vec{F}_{i+1} + [M] \left(\frac{1}{\alpha(\Delta t)^2} \vec{x}_i + \frac{1}{\alpha \Delta t} \dot{\vec{x}}_i + \left(\frac{1}{2\alpha} - 1 \right) \ddot{\vec{x}}_i \right) + [C] \left(\frac{\beta}{\alpha \Delta t} \vec{x}_i + \left(\frac{\beta}{\alpha} - 1 \right) \dot{\vec{x}}_i + \left(\frac{\beta}{\alpha} - 2 \right) \frac{\Delta t}{2} \ddot{\vec{x}}_i \right) \right\} \quad (3.2)$$

$$\dot{\vec{x}}_{i+1} = \dot{\vec{x}}_i + [(1 - \beta)\ddot{\vec{x}}_i + \beta\ddot{\vec{x}}_{i+1}]\Delta t \quad (3.3)$$

$$\ddot{\vec{x}}_{i+1} = \left[\frac{1}{\alpha(\Delta t)^2} \right] (\vec{x}_{i+1} - \vec{x}_i) - \left[\frac{1}{\alpha(\Delta t)^2} \right] \dot{\vec{x}}_i - \left(\frac{1}{2\alpha} - 1 \right) \ddot{\vec{x}}_i \quad (3.4)$$

A escolha do intervalo de tempo é tal que possibilita a captura das pequenas variações de força nos instantes de contato dos pés com a passarela, neste caso $\Delta t = 10^{-3}$ s.

3.2. Modelo do pedestre

Parâmetros cinéticos e cinemáticos foram medidos simultaneamente através de testes realizados na plataforma para medição dos esforços da caminhada humana desenvolvida por Toso, 2012, em que foi solicitado a travessia em caminhada normal, com a participação de 54 pedestres, sendo que cada um deles atravessou a plataforma de forças 10 vezes. A Tabela 3.1 apresenta um resumo dos parâmetros avaliados. A massa considerada nesta análise é de aproximadamente 76.4kg, sendo uma média de todos os pedestres.

Tabela 3.1 - Dados biodinâmicos médios dos pedestres.

	V_s (m/s)	f_p (Hz)	L_p (m)	w_s (m)	d_s (s)	ss (s)	sss (m/s)	dss (m/s)	sss (m/s)	dss (m/s)
							longitudinal		lateral	
Min.	1.19	1.64	0.68	0.28	0.10	0.40	0.32	4.69	0.01	2.51
Max.	1.38	1.97	0.74	0.34	0.12	0.46	0.46	5.78	0.08	3.22
Média	1.30	1.82	0.71	0.31	0.11	0.43	0.38	5.11	0.03	2.85
σ	0.06	0.09	0.03	0.03	0.01	0.02	0.04	0.32	0.02	0.24

onde V_s = velocidade da caminhada; f_p = frequência da passada; L_p = largura dos passos; w_s = comprimento dos passos d_s = tempo de apoio dos dois pés; ss = tempo de apoio de um pé; sss = velocidade de um pé; dss = velocidade dos dois pés; σ = desvio padrão.

(Fonte: Adaptado de Toso e Gomes, 2015.)

3.3. Dimensões da passarela analisada e modelo numérico dinâmico da passarela

Para o modelo geométrico, utilizaram-se dados de uma passarela situada sobre a Estrada Parque de Indústria e Abastecimento (EPIA), trecho Cruzeiro Novo/Ceasa, na cidade de Brasília, conforme pode ser visto na Figura A.3. Brasiliano *et al.*, 2008, estudaram o comportamento dinâmico desta estrutura quando submetida ao carregamento de caminhada e

corrida de um pedestre e realizaram uma análise em elementos finitos para comparação dos resultados, com isso concluíram que a estrutura apresentou frequência de vibração vertical de cerca de 3,12 Hz. Esta estrutura também foi utilizada por Toso e Gomes, 2015, uma vez que os dados experimentais de vibrações ocasionadas pelo pedestre poderiam ser comparados com o modelo numérico desenvolvido. A estrutura discretizada com suas respectivas dimensões são apresentadas na Figura 3.1, sendo que o piso da plataforma e corrimãos foram modelados como massas distribuídas ao longo dos banzos inferiores da treliça e o telhado foi assumido como massas distribuídas ao longo dos banzos superiores. Dados a respeito das propriedades dos materiais do modelo atualizado podem ser encontrados em Toso e Gomes, 2015.

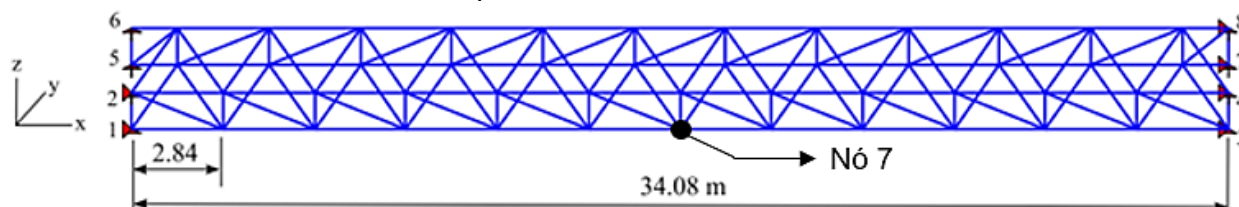


Figura 3.1 - Vista Lateral do modelo de elementos finitos da treliça espacial da passarela (Fonte: Adaptado Toso e Gomes, 2015.)

3.4. Modelo de força simples (MFS)

Neste trabalho utilizou-se a nomenclatura *Modelo de Força Simples (MFS)* para representar o carregamento periódico causado pelas forças sucessivas dos pés de uma pessoa em contato com o solo durante a travessia de uma passarela. Este modelo é utilizado em normas e trabalhos que estudam o tema, sendo representado por uma série de Fourier e assumindo o pedestre caminhando em linha reta na direção da caminhada e com velocidade constante. Conforme pode ser visto na Figura 3.2, o MFS assume que a caminhada humana é realizada por meio de impactos consecutivos dos pés em linha reta, desconsiderando assim, que o caminhar humano está sujeito às oscilações laterais causadas pelo movimento do centro de gravidade do corpo e que o pé direito e esquerdo possuem uma largura entre eles.

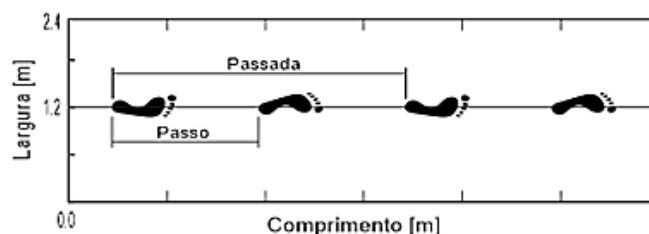


Figura 3.2 - Esquema de representação do MFS - Passos x Passada.

A Equação (2.1) representa a força vertical do pedestre, sendo $F_v(t)$ a força vertical variando no tempo, Q o peso estático do pedestre, α_i é o coeficiente de Fourier no i -ésimo harmônico (DLF), f_p é a taxa de passos (Hz), t o tempo (s), φ_i é o ângulo de fase no i -ésimo harmônico que está relacionado ao primeiro harmônico, i é a ordem numérica do número de harmônicos da série e n é o número total de harmônicos da série. Neste trabalho foram utilizados os DLF's e os ângulos de fase recomendados pela norma SÉTRA, 2006, assim: $\alpha_1 = 0.4$; $\alpha_2 = \alpha_3 \approx 0.1$; $\varphi_2 = \varphi_3 \approx \frac{\pi}{2}$.

A componente lateral $F_h(t)$, causada pela alternância dos pés durante a caminhada ocorre com uma frequência de metade da frequência da componente vertical (1 Hz para $f_p = 2\text{Hz}$) e ela também pode ser expressa no domínio da frequência por meio de uma série de Fourier, conforme Equação (2.2). Nesse caso, i possui valores não inteiros de $1/2$; 1 ; $3/2$; 2 , etc. Para esta norma, os ângulos de fase para a componente horizontal (lateral e longitudinal) são próximos de 0° e as componentes horizontais não possuem uma parte de força estática. De acordo com a SÉTRA, 2006, as componentes espectrais principais de forças laterais são

localizadas em uma frequência de cerca de metade da componente vertical, sendo a frequência correspondente às oscilações laterais do centro de gravidade do corpo ao longo da caminhada. Os valores correspondentes para os coeficientes da série de Fourier são $\alpha_{1/2} = \alpha_{3/2} \approx 0.05$; $\alpha_1 = \alpha_2 \approx 0.01$. Para a componente longitudinal, a norma SÉTRA, 2006 afirma que as frequências principais com esta componente são aproximadamente a mesma da componente vertical, sendo os coeficientes da série de Fourier: $\alpha_{1/2} \approx 0.05$; $\alpha_1 \approx 0.2$; $\alpha_{3/2} \approx 0.03$; $\alpha_2 \approx 0.1$.

3.5. Modelo de força totalmente sincronizado (MFTS)

Durante este trabalho não foi encontrada nenhuma norma ou artigo científico que utilizasse modelo semelhante ao que está sendo proposto, chamado de MFTS – *Modelo de Força Totalmente Sincronizado* para multidões, apenas o trabalho de Toso e Gomes, 2015, para um pedestre. São mais comumente encontrados modelos de forças individuais em cada direção (vertical, longitudinal e lateral) para representar o carregamento dinâmico dos pedestres ao longo do tempo. Porém estas componentes não apresentam o mesmo tempo de referência, logo, não estão sincronizadas no tempo, nem a aplicação das forças está corretamente sincronizada na posição da trajetória da caminhada. No modelo MFTS essas três componentes são utilizadas em conjunto com parâmetros cinéticos e cinemáticos dos pedestres, sendo sincronizadas no tempo e no espaço.

Este modelo considera que as velocidades dos pedestres não são constantes durante a passada e, por conseguinte, na travessia da passarela. Por meio de um algoritmo no MATLAB (2012), a densidade de pedestres previamente determinada se mantém constante durante o período de análise. Um ponto importante a se destacar, é que o MFTS considera que a caminhada humana ocorre com a alternância dos pés direito e esquerdo e a respectiva largura (L_p) entre eles, conforme pode ser visto na Figura 3.3, diferentemente do que é abordado pelas normas internacionais, que consideram a travessia do pedestre sendo realizada em linha reta. Os parâmetros cinéticos (forças do pedestre com a estrutura) e os parâmetros cinemáticos (velocidade da caminhada, frequência da caminhada, comprimento do passo e largura do passo) influenciam diretamente a aplicação da força resultante e estes parâmetros são considerados neste estudo através dos dados obtidos pela plataforma desenvolvida por Toso, 2012.

A Figura 3.3 (a) apresenta os resultados obtidos durante a análise do modelo e a linha tracejada representa como foi realizada a sincronização por meio do deslocamento dos valores de pico de cada componente da força, sendo o tempo de referência do modelo ajustado para a fase correta para cada componente. A Figura 3.3 (b) apresenta o modelo da caminhada através da passarela, sendo considerado os parâmetros cinemáticos do pedestre e a Figura 3.3 (c) apresenta o sistema de coordenadas consideradas no modelamento do pedestre.

Os pontos indicados na Figura 3.3 (a) e (b) representam a força do pé em contato com o solo. Na componente vertical, o ponto 1 representa o ponto de máxima força resultante e ocorre no momento em que os dois pés estão em contato com o solo e em 2 um pé está totalmente apoiado e o outro está levantado. Na componente longitudinal, a menor força ocorre no exato momento em que os dois pés estão apoiados na passarela (ponto 3), ou seja, os pés não exercem um efeito de empurrar longitudinalmente a estrutura. No ponto 4 é o instante em que um dos pés acaba de encostar no solo e outro está sendo levantado, momento exato em que ocorre um mínimo esforço na direção longitudinal. Assim como em 3, o ponto 6 ocorre no momento em que os dois pés estão apoiados no solo e não exercem força lateral na passarela.

Na Figura A.1 pode-se perceber a espacialidade da aplicação da força assim como o vetor resultante da FRS, com forças de empuxo maiores que as forças de desaceleração longitudinal, assim como a lateralidade das forças que serão fonte de excitação lateral da passarela.

3.6. Modelo de multidão

Para o modelamento da multidão atravessando a passarela foram estipuladas 3 diferentes densidades 0.3, 0.7 e 0.9 ped/m², valores que se mostraram coerentes com os usuais durante a pesquisa bibliográfica e que poderiam ocorrer em uma situação real. Essas densidades equivalem a um número de aproximadamente 25, 57 e 74 pedestres cruzando a passarela em questão.

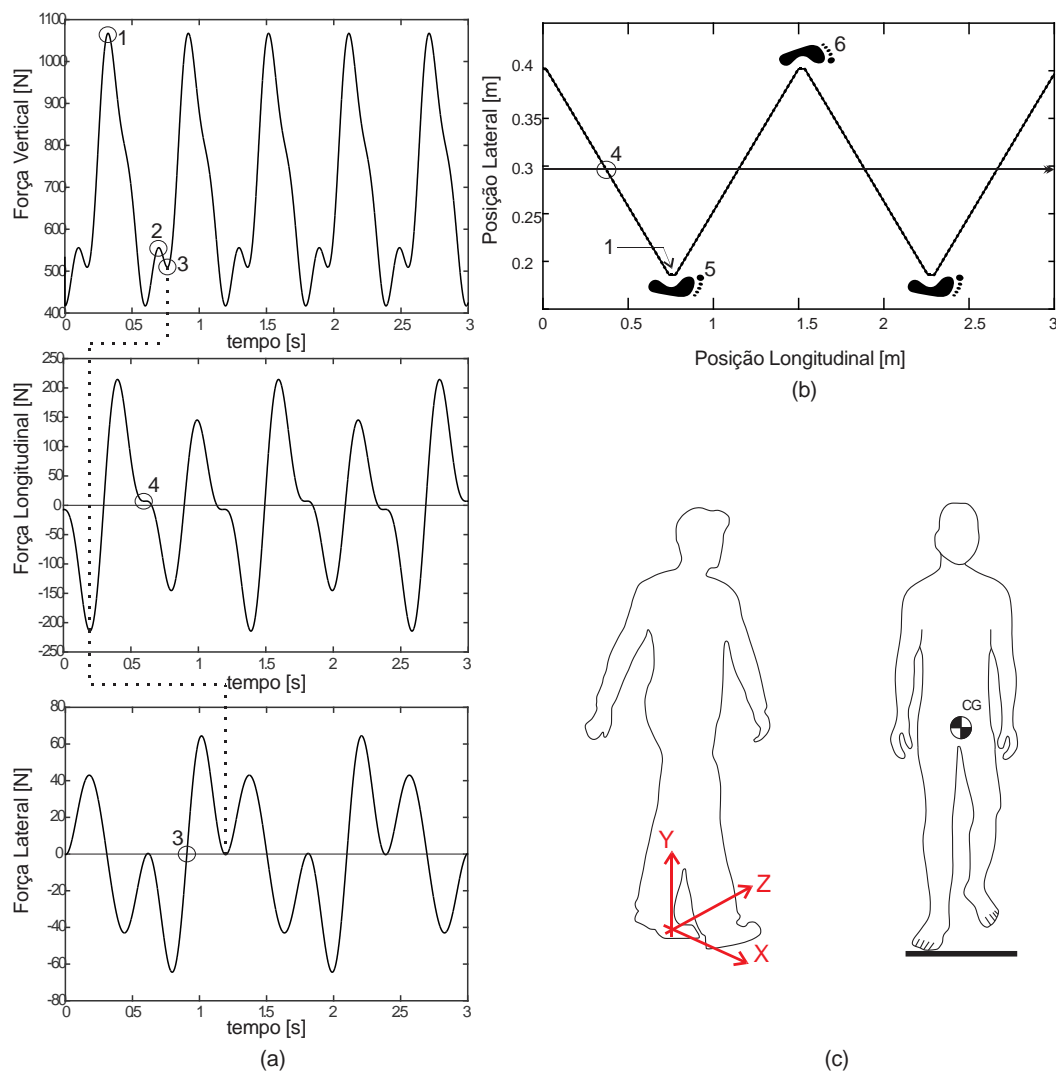


Figura 3.3 – Definição dos eixos e detalhamento do MFTS.

A fim de manter este número constante durante o período de análise, desenvolveu-se um algoritmo em que à medida que os pedestres deixam a passarela, eles imediatamente voltam a entrar na mesma, mantendo um fluxo constante de pedestres durante toda a análise. Durante a travessia, a velocidade do pedestre é variável no tempo e diferente dos outros indivíduos da multidão, segundo uma distribuição Gaussiana (normal) de probabilidades. Neste modelo não é considerado o fator de sincronização entre os pedestres, tendo sido suposto aleatório a escolha do caminho seguido por cada indivíduo, assim como a fase dos sinais de força entre as caminhadas entre eles. Em todas as análises preocupou-se em manter a semente da geração de números aleatórios constantes para que se pudessem fazer as comparações de forma justa.

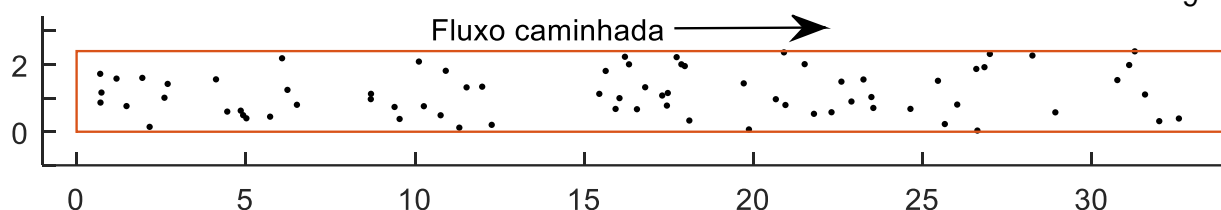


Figura 3.4 – Vista superior, em preto, pontos de contato dos pés e em vermelho a área de tráfego.

4. RESULTADOS

4.1. Análise da aceleração RMS da estrutura no meio do vão

Como um dos objetivos deste trabalho é avaliar e comparar os modelos de carregamentos, optou-se por utilizar os resultados da simulação do modelo de força simples e do modelo de força totalmente sincronizado através das respostas de aceleração RMS (*root mean square*) no meio do vão (nó 7 indicado na Figura 3.1) nas três direções, sendo 1 a direção longitudinal, 2 a direção vertical e 3 a direção lateral. Esta escolha se deve pelo interesse em avaliar a magnitude da aceleração no ponto considerado mais crítico e no momento em que todos os pedestres estivessem sobre a estrutura.

Conforme pode ser visto na Tabela 4.1, foram analisados os resultados das três densidades previamente determinadas, sendo observada em todas elas valores de acelerações superiores ao utilizar o MFTS.

Tabela 4.1 - Comparação acelerações RMS no meio do vão MFS x MFTS (mm/s^2).

Nó	gdl	MFS 0,3 ped/m ²	MFTS 0,3 ped/m ²	Diferença %
	$a_{x \text{ rms}}$	3,70	4,65	26%
7	$a_{y \text{ rms}}$	94,53	98,41	4%
	$a_{z \text{ rms}}$	23,42	25,17	7%
		MFS 0,7 ped/m ²	MFTS 0,7 ped/m ²	-
	$a_{x \text{ rms}}$	5,56	6,59	19%
7	$a_{y \text{ rms}}$	128,05	133,84	5%
	$a_{z \text{ rms}}$	36,09	37,20	3%
		MFS 0,9 ped/m ²	MFTS 0,9 ped/m ²	-
	$a_{x \text{ rms}}$	7,22	8,85	23%
7	$a_{y \text{ rms}}$	161,82	167,62	4%
	$a_{z \text{ rms}}$	39,14	41,04	5%

A resposta RMS mostra que as acelerações na direção vertical são praticamente as mesmas para os dois modelos, mas para as direções lateral e longitudinal nota-se uma diferença, que se justifica pelo fato do modelo proposto ser mais realista em termos de carregamento.

4.2. Análise dos espectros de aceleração

Optou-se por realizar uma análise dos resultados das simulações por meio do espectro de frequências, com o objetivo de verificar o comportamento dos picos das acelerações para cada valor de frequência obtido. E assim poder verificar eventuais diferenças entre os dois modelos, o que seria difícil a partir dos sinais de aceleração no tempo. A Figura A.2 indica uma típica saída do programa de análise com os sinais no tempo e espectros de aceleração. Nesta análise foram comparadas as três densidades de pedestres atravessando a passarela, conforme pode ser visto na Figura 4.1, Figura 4.2 e Figura 4.3, onde no item a) são comparadas as acelerações na direção longitudinal do MFS e do MFTS, em b) acelerações na

direção vertical do MFS e do MFTS e em c) as acelerações na direção lateral do MFS e do MFTS.

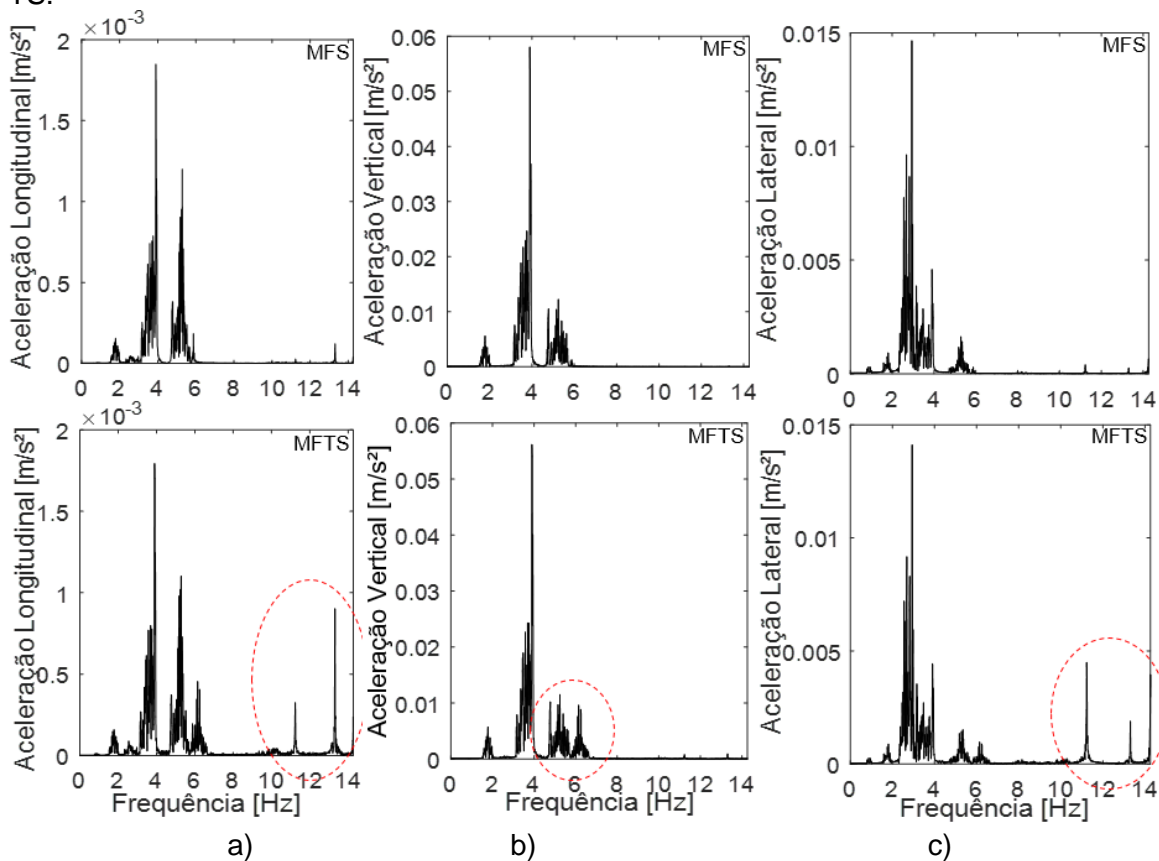


Figura 4.1 - MFS x MFTS - Densidade 0,3 ped/m².

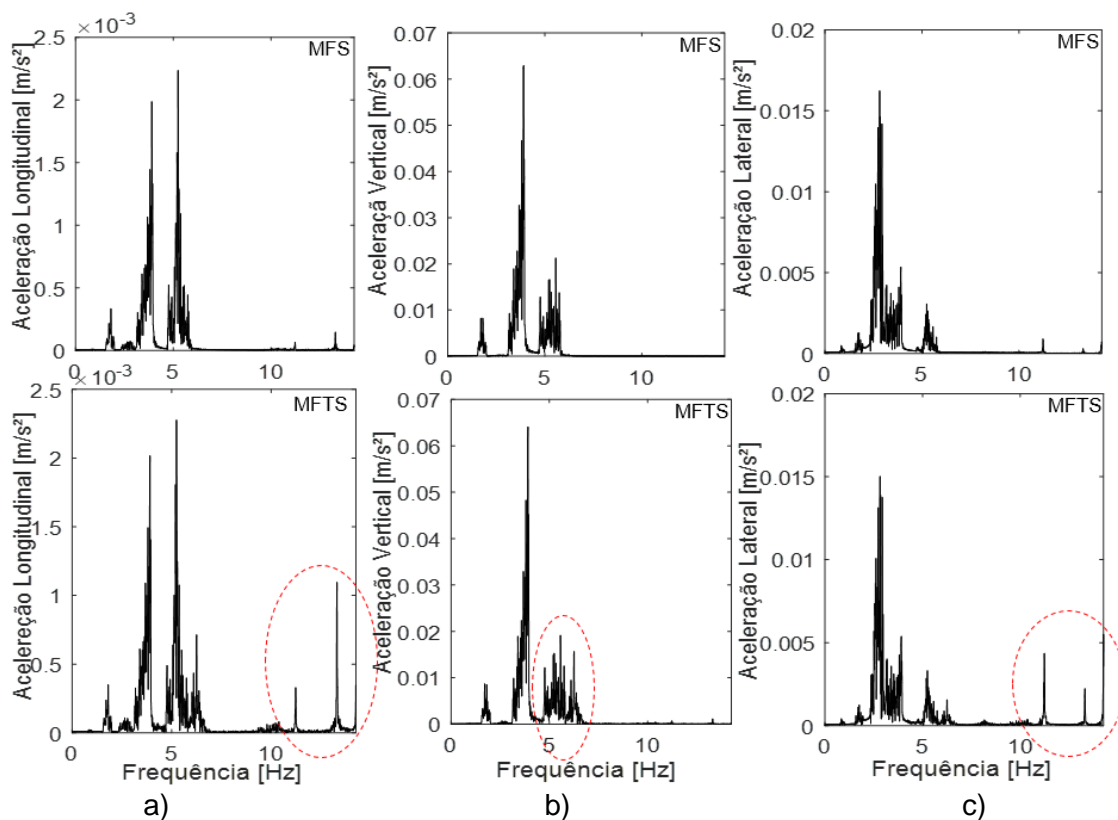


Figura 4.2 - MFS x MFTS - Densidade 0,7 ped/m².

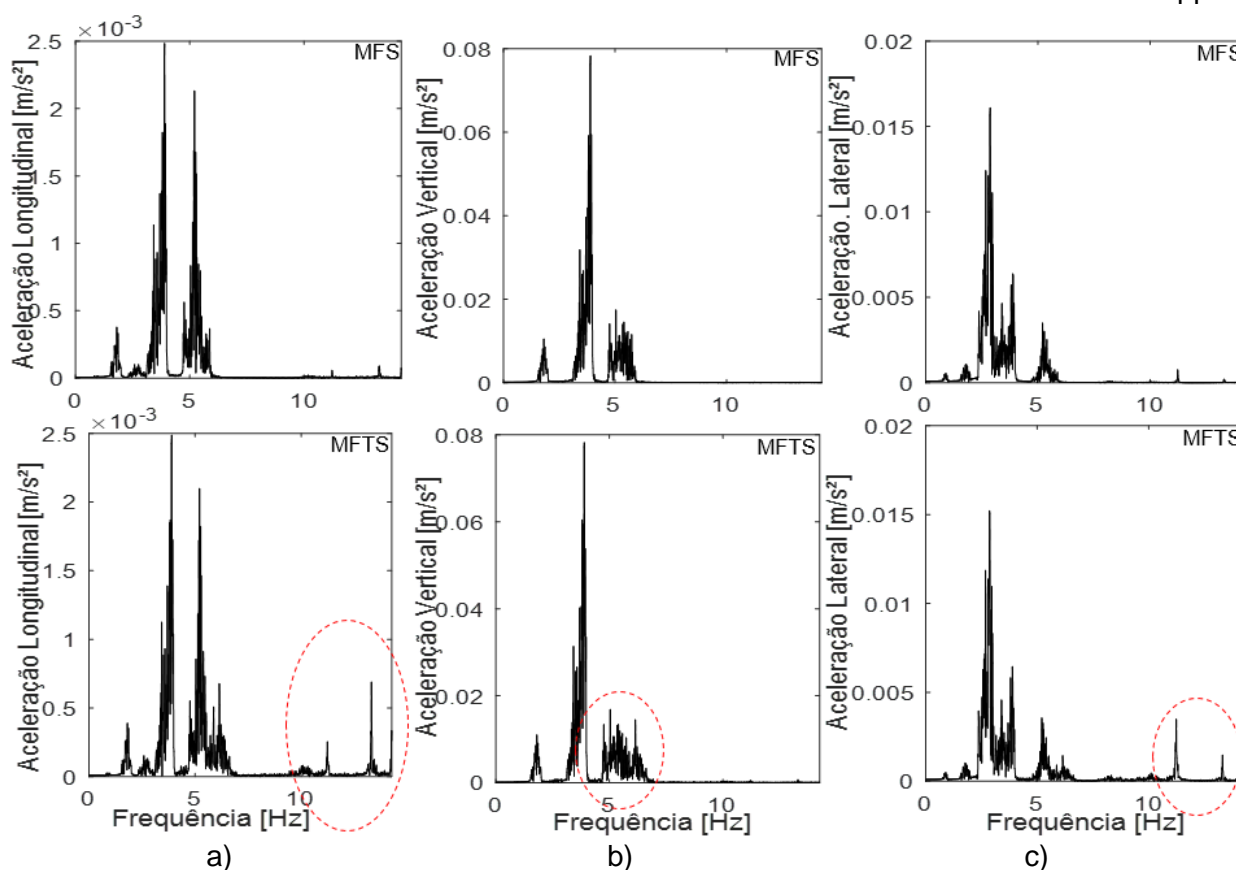


Figura 4.3 - MFS x MFTS - Densidade 0,9 ped/m².

Em todos os gráficos (Figuras 4.1, 4.2 e 4.3) para todas as densidades, no eixo da abcissa em aproximadamente 2Hz, observa-se a frequência da caminhada do pedestre, presente no sinal das três direções. No ponto de aproximadamente 4Hz (mais especificamente em 3,92Hz) nota-se a frequência natural correspondente ao primeiro modo vertical flexional da estrutura que foi excitada pela multidão de pedestres. A partir do ponto de 6Hz, é possível observar diferenças mais notáveis no espectro de frequências, tendo o MFTS apresentado valores mais elevados de picos de aceleração em alguns pontos e o surgimento de frequências não excitadas pelo MFS, como por exemplo nos pontos de 11Hz e 13Hz para as frequências de vibração da estrutura nas direções laterais e longitudinais.

Esses valores captados pelo MFTS podem ser entendidos como a influência da utilização de um modelo que considera que a caminhada humana ocorre com a alternância dos pés em contato com o solo, gerando esforços laterais e longitudinais na estrutura. Ao utilizar esse modelo, observa-se também, o surgimento de modos de vibração que não são observados ao adotar o modelo de força simples. Conclusões semelhantes foram obtidas por Toso e Gomes, 2015, no caso de apenas um pedestre atravessando a passarela.

Posteriormente ao se analisar esses picos de acelerações, observou-se que são resultados de esforços combinados de torção e flexão, provavelmente influenciados pelas forças na direção lateral e pelo modelamento que considera que os pedestres adentram na estrutura com velocidades e em posições diferentes. Resultado que se mostrou diferente de quando considerado o modelo simplificado, uma vez que este considera que os pedestres estão à velocidade constante e caminham em linha reta.

A norma SÉTRA, 2006, não cita um limite máximo permissível para acelerações, porém faz uma referência a Eurocode, 1992, que propõe uma aceleração lateral crítica de 0,2 m/s² para situações normais e 0,4 m/s² para condições excepcionais, no caso de multidões e cita ainda que é um consenso a utilização de aceleração vertical em um intervalo entre 0,5 m/s² e

0,8 m/s². Nestes casos, os dois modelos propostos apresentaram acelerações abaixo dos valores críticos mencionados pelas normas.

4.3. Análise dos deslocamentos

Realizou-se uma análise dos deslocamentos para entender as diferenças ocasionadas na estrutura ao se adotar dois modelos de carregamento, optando-se por utilizar também a comparação em RMS no intervalo adotado, conforme pode ser visto na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Valores RMS para deslocamentos (mm) – 0,9 ped/m².

Nó (centro do vão)	Direção	MFS	MFTS	Diferença %
		U _{rms}	U _{rms}	U _{rms}
7	Longitudinal	0,0802	0,0844	5%
7	Vertical	2,8	2,89	3%
7	Lateral	0,247	0,214	13%

Conforme os resultados apresentados na Tabela 4.2, percebe-se uma diferença notável no nó 7, referente ao nó do centro do vão da passarela, quando analisada a direção lateral. Essa diferença pode ser interpretada como uma ênfase do que o modelo MFTS propõe ao incluir o efeito do esforço lateral na caminhada. Pode-se ainda citar a importância que este efeito causa nas estruturas, por exemplo, os problemas ocasionados na *Millenium Bridge*, mostram que os pedestres causaram uma aceleração lateral elevada durante a travessia de inauguração. Na direção longitudinal e vertical, as diferenças são pequenas, mas observa-se que o deslocamento aumenta à medida em que os pedestres adentram na passarela até o pico de deslocamento no centro do vão no instante em que todos os pedestres estão sobre a estrutura, conforme Figura 4.4.

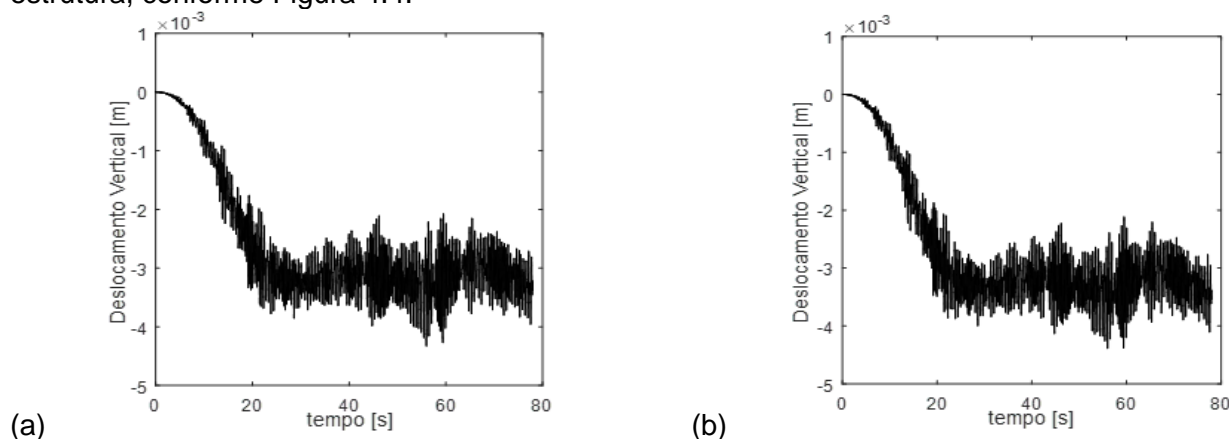


Figura 4.4 - Deslocamento vertical (a) MFS x (b) MFTS.

Apesar disso, não há nenhuma recomendação clara nas normas ISO 10137, 2007 e SÉTRA, 2006 sobre um deslocamento limite, apenas um exemplo desta última de acordo com o conforto dos pedestres à frequência de 1 e 2 Hz, conforme Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Exemplos de vibração desejáveis (Adaptado: SÉTRA, 2006)

Frequência (Hz)	Aceleração (mm/s ²)	Velocidade (mm/s)	Deslocamento (mm)
1	500,0	8,0	12,7
	100,0	16,0	25,3
2	500,0	4,0	3,2
	100,0	8,0	6,3

4.4. Análise modal

Desenvolveu-se uma rotina no Matlab com o objetivo de analisar as frequências naturais e os respectivos modos de vibração da estrutura analisada. Com isso, pôde-se verificar que a estrutura está sujeita à combinação de modos de vibrações simples, assim como acoplados, conforme pode ser visto na segunda coluna da Tabela 4.4. Para melhor visualização dos modos de vibração, optou-se por gerar os resultados em uma escala de 100 vezes a real para os 7 primeiros modos de vibração.

A Tabela 4.5 apresenta as correspondentes frequências naturais obtidas na simulação numérica e um comparativo com os resultados experimentais de Brasiliano et al., 2008, referente aos modos apresentados na Tabela 4.4. As setas mostradas nas figuras da Tabela 4.4, são apenas para indicar a direção vertical (para baixo), o que facilita o entendimento do comportamento da estrutura ao ser analisada.

Tabela 4.4 - Modos de vibração e sua interpretação geométrica.

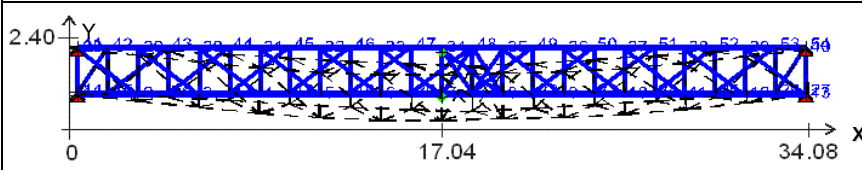
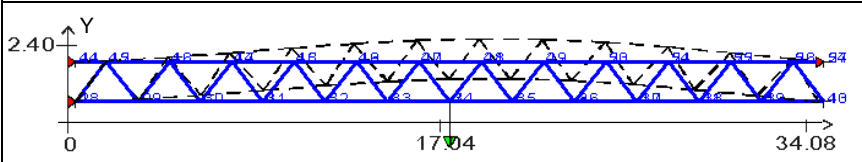
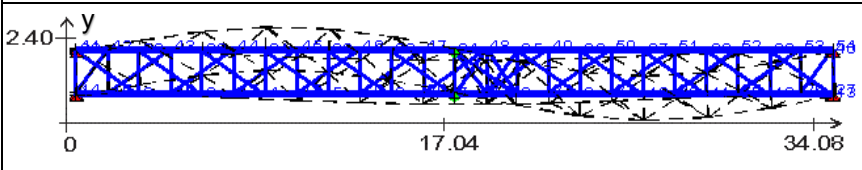
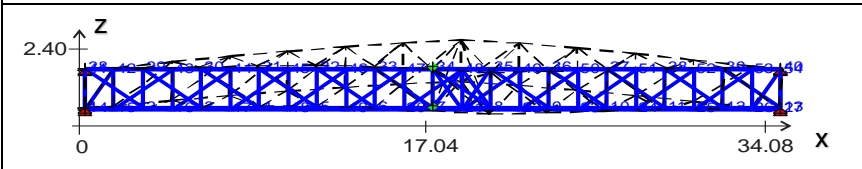
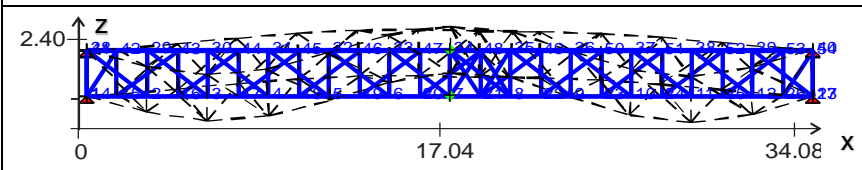
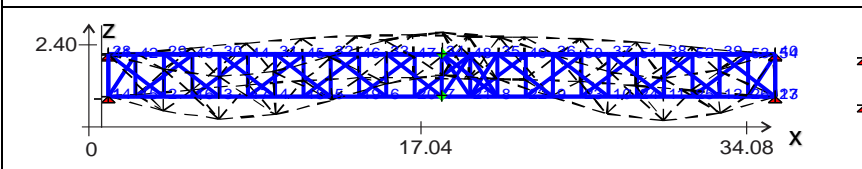
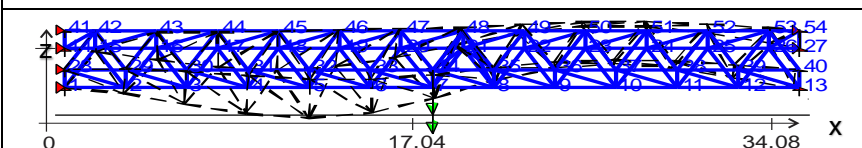
Modo de vibração	Interpretação geométrica
	1º. Modo de Flexão lateral
	1º Modo de flexão vertical + torção
	2º - Modo de flexão lateral + torção
	1º Modo de torção + flexão lateral
	2º Modo de flexão vertical + torção
	2º modo de flexo-torção combinado
	2º - torção + flexão

Tabela 4.5 – Comparação de frequências de vibração numérica e experimental (Toso e Gomes, 2015).

Modo	1º	2º	3º	4º	5º	6º	7º
Frequência (Hz)	3,03	3,92	5,28	6,28	8,23	10,12	11,24
Brasiliano et al., 2008	3,12	3,92	5,18	- *	8,23	10,09	11,35

* não medida experimentalmente

5. CONCLUSÕES

O fenômeno da caminhada humana é um tema que está em constante estudo, principalmente pelo fato de que seus parâmetros são dependentes de fatores que apresentam bastante incertezas. O estudo deste fenômeno é importante para o correto dimensionamento das estruturas, podendo ser evitados problemas como os que aconteceram com o incidente na Millenium Bridge. Neste caso é importante que ao se dimensionar uma estrutura de passarela, que na atualidade estão cada vez mais esbeltas, o maior número de parâmetros esteja sendo considerado.

Ao ser proposto o modelo de força totalmente sincronizado, entendeu-se que este é mais completo que o modelo de força simples, uma vez que os parâmetros cinéticos e cinemáticos obtidos através de testes experimentais dos pedestres estão sendo considerados no modelo numérico. Observa-se também que ao realizar a sincronização da força na direção longitudinal, vertical e lateral o MFTS se torna mais realista, uma vez que utiliza a magnitude do carregamento dos pedestres no instante correto e não de forma defasada no tempo e no espaço como no MFS.

O MFTS foi capaz de captar modos de torção não excitados no MFS. Isto pode levar a uma possível subavaliação dos níveis de aceleração, o que leva à conclusão de que o MFTS, neste caso, trará resultados mais realistas.

Como sugestão para trabalhos futuros, este modelo proposto pode ser comparado a mais testes experimentais, como por exemplo, em outras passarelas com maior número de sensores para captar diversos modos de vibração, densidades de pedestres diferentes das aqui avaliadas, e onde todos os principais fatores envolvidos sejam devidamente controlados. Além disso, é importante que os pedestres avaliados tenham o maior número de parâmetros cinéticos e cinemáticos previamente determinados, para que possam ser utilizados no modelo numérico da forma mais fiel possível. Fenômenos como a interação de pedestres entre si, pedestres e obstáculos, não foram contemplados neste trabalho, mas são motivo de investigação em curso e que de fato tornarão o modelo mais fiel ao fenômeno analisado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFIAS

AASHTO. “**American association of state highway and transportation officials. Guide specifications for design of pedestrian bridges**”. Nova York: American association of state highway transportation officials. 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. “**NBR 7188. Carga móvel em ponte rodoviária e passarela de pedestre**”. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

Barros, T. P. “**Análise dinâmica em passarela sujeita à movimentação humana**”. Dissertação de Mestrado, programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2009.

Brasiliano, A., Doz, G., Brito, J. L. V. and Pimentel, R. “**Role of non-metallic components on the dynamics behaviour of composite footbridges**”, Proceedings of the 3rd. International Conference Footbridge, Porto, Portugal, 2–4 July, (2008).

Brownjohn, J., Živanović, S., Pavic, A., “**Crowd Loading on Footbridges**”, Third International Conference - Footbridge 2008.

BRO 2004. Publikation 2004:56: “**Vägverkets allmänna tekniska beskrivning för nybyggande och förbättring av broar: Svensk Byggtjänst.**” Stockholm: Sverige, 2004.

BS 1991-2:2008 “**UK National Annex to Eurocode 1: Actions on structures - Part 2: Traffic loads on bridges**”. National Annex to BS EN 1991-2:2003, British Standards Institution, London. 2008.

BS 5400. Part 2, “**Appendix C, Vibration Serviceability Requirements for Foot and Cycle Track Bridges.**” London: UK British standards associations, 1978.

Carroll, S., P., “**Crowd-induced lateral bridge vibration.**” PhD thesis, University of Nottingham, 2013.

Hauksson, F., “**Dynamic Behavior of Footbridges Subjected to Pedestrian-Induced Vibrations.**” Structural Mechanics (LTH), Lund, Suécia, 2005.

ISO 10137. “**Bases of design of structures - Serviceability of buildings and walkways against vibration.**” Second edition. Ed. Geneve: International standard association, 2007.

ISO 2631-1. “**Mechanical vibration and shock -- Evaluation of human exposure to whole-body vibration - Part 1: General requirements**”, Geneve, 1997.

Rao, S. S. “**Mechanical Vibrations.**” Prentice Hall. 5th. Edition, 2010.

SÉTRA. “**Footbridges: assessment of vibrational behavior of footbridges under pedestrian loading, Technical guide.**” Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes, Paris. 2006.

Silva, F., T., “**Vibrações de passarelas de pedestres na direção vertical considerando modelos biodinâmicos de pessoas caminhando**”, Tese de Doutorado, Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, João Pessoa, Paraíba, 2012.

Toso, M., A., “**Desenvolvimento de uma plataforma de forças para medição e análise dos esforços verticais para modelamento biodinâmico da caminhada humana**”, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Porto Alegre, 2012.

Toso, M., A., Gomes, H., M., “**Pedestrian-Structure Dynamic Interaction Based on Kinetic And Kinematic Parameters.**” ICSV22, Florence, Italy, 2015.

Toso, M., Gomes, H. M., “**Footbridge model updating based in modal data using the sensitivity method and particle swarm optimization.**” Proceedings of the COBEM 2015, Rio de Janeiro, RJ.

Živanović, S., Pavic, A., Reynolds, P.; “**Vibration serviceability of footbridges under human-induced excitation: A literature review**”, Journal of sound and vibration, January 2005.

Živanović, S. “**Benchmark Footbridge for Vibration Serviceability Assessment under Vertical Component of Pedestrian Load**”. ASCE Journal of Structural Engineering, 138 (10), 1193-1202. 2012. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000571, October, 2012.

APÊNDICE

Tabela A1 - DLF's utilizados por diferentes autores.

Autores	DLFs para os harmônicos considerados	Observações	Tipo de atividade e direção
Blanchard et al.	$\alpha_1=0.257$	DLF diminui para frequências de 4 à 5 Hz	Caminhada - vertical
Bachmann & Ammann	$\alpha_1=0.37, \alpha_2=0.10, \alpha_3=0.12, \alpha_4=0.04, \alpha_5=0.08$	Frequência principal = 2 Hz	Caminhada - vertical
	$\alpha_1=0.039, \alpha_2=0.01, \alpha_3=0.043, \alpha_4=0.012, \alpha_5=0.015$	Frequência principal = 2 Hz	Caminhada - lateral
	$\alpha_{1/2}=0.037, \alpha_1=0.204, \alpha_{3/2}=0.026, \alpha_2=0.083, \alpha_{5/2}=0.024$	Frequência principal= 2 Hz	Caminhada - longitudinal
Rainer et al.	$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ e α_4	DLF depende da frequência	
Kerr	$\alpha_1, \alpha_2 = 0.07; \alpha_3 \approx 0.06$	α_1 é dependente da frequência	Caminhada - vertical
ISO 10137	$\alpha_1=0.37(f-1.0), \alpha_2=0.1, \alpha_3=0.06, \alpha_4=0.06, \alpha_5=0.06$	Faixa de frequências: 1.2 à 2.4; 2.4 à 4.8; 3.6 à 7.2; 4.8 à 9.6; 6.0 à 12.0	Caminhada - vertical
ISO 10137	$\alpha_1= \alpha_2=\alpha_3=\alpha_4=\alpha_5=0.1$	Faixa de frequências: 1.2 à 2.4; 2.4 à 4.8; 3.6 à 7.2; 4.8 à 9.6; 6.0 à 12.1	Caminhada - horizontal

(Fonte: Adaptado de Živanović, 2012.)

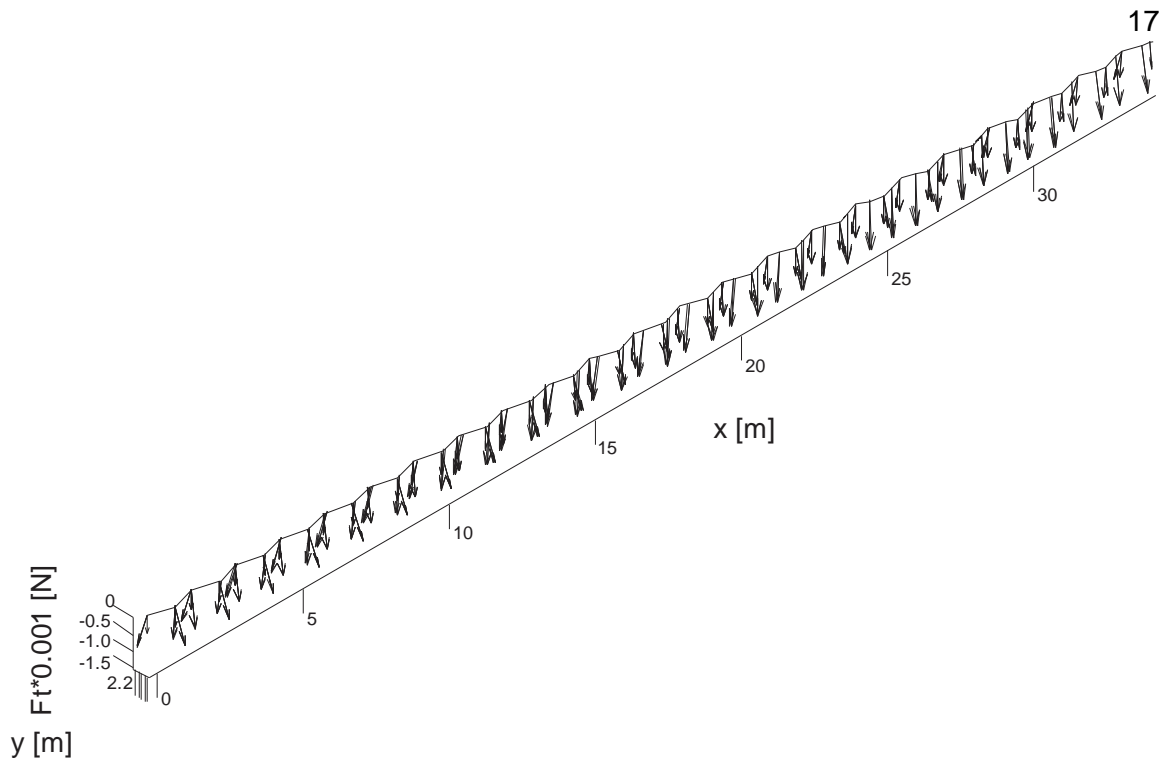


Figura A.1 – Vetores resultantes no espaço para Força de Reação do Solo – MFTS.

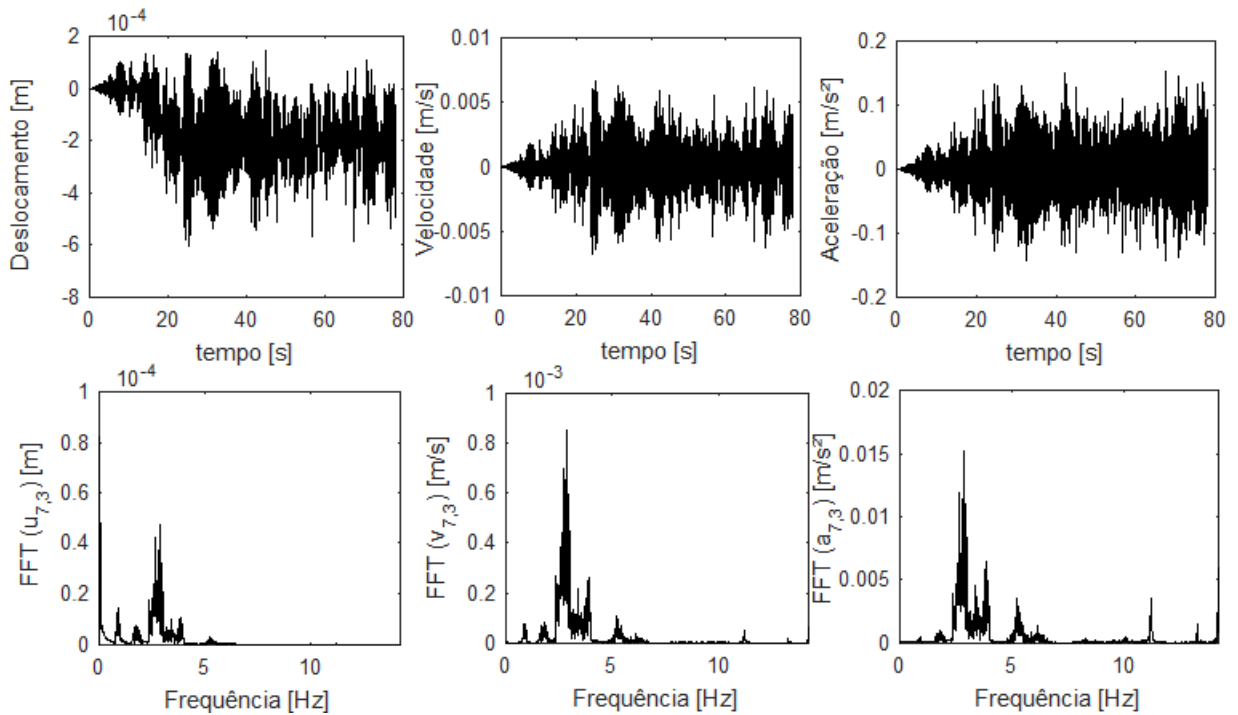


Figura A.2 Gráficos utilizados na análise – MFTS (direção lateral) - Densidade 0,9 ped/m².

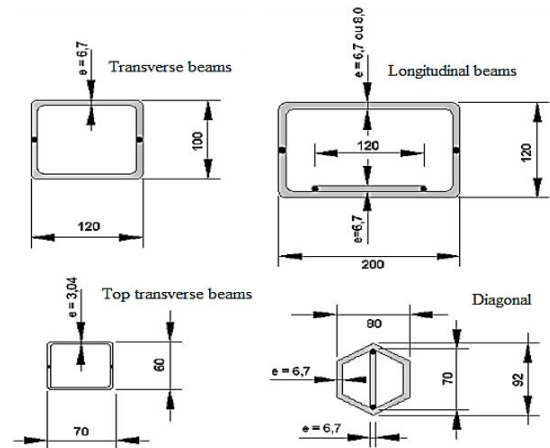


Figura A.3 – Vista lateral da passarela analisada e componentes metálicos da estrutura.
(Fonte: Adaptado Brasileiro et al. 2008)