

Florianópolis - Santa Catarina - Brazil

## ANÁLISE DINÂMICA NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DE PASSARELA DE GRANDE VÃO SOB AÇÃO DE CAMINHAR DE PEDESTRES

### **Filipe A. Rezende**

filiperezende@id.uff.br

Escola de Engenharia da UFF

Rua Passo da Pátria, 156, São Domingos, 24210-240, Niterói/RJ, Brasil.

### **Wendell D. Varela**

wendell@fau.ufrj.br

Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da UFRJ

Av. Pedro Calmon, 550, Cidade Universitária, 21941-901, Rio de Janeiro/RJ, Brasil.

### **André M. Brabo Pereira**

andremaues@gmail.com

Escola de Engenharia da UFF

Rua Passo da Pátria, 156, São Domingos, 24210-240, Niterói/RJ, Brasil.

### **Eliane M. L. Carvalho**

elianemaria@vm.uff.br

Escola de Engenharia da UFF

Rua Passo da Pátria, 156, São Domingos, 24210-240, Niterói/RJ, Brasil.

**Resumo.** *Passarelas são estruturas muito leves e recorrentes no cenário urbano, que apresentam, muitas vezes, baixa rigidez associada a longos vãos. Com a atual tendência de utilização de concepções estruturais inovadoras para o projeto dessas estruturas, houve um aumento do número dos casos de problemas de vibração relacionados à ação do caminhar dos pedestres. Guias de projeto internacionais já tratam a ação do caminhar como carregamento dinâmico, através da utilização de um modelo de força. Porém, em estruturas muito leves ocorre maior interação pessoa-estrutura, ocasionando uma alteração considerável nas propriedades dinâmicas do sistema, onde se destaca a simulação através de modelos biodinâmicos. Desta forma, o presente trabalho objetiva o estudo dos modelos de simulação do carregamento humano através do modelo de força e modelos biodinâmicos, de maneira a avaliar a relevância da interação pessoa-estrutura na resposta estrutural. Os resultados teóricos obtidos foram correlacionados com sinais experimentais de uma passarela no Rio de Janeiro. Os resultados demonstraram a importância de se considerar a interação pessoa-estrutura em análises dinâmicas de passarelas leves.*

**Palavras-Chave:** *Dinâmica Estrutural, Passarela, Interação Pessoa-Estrutura, Modelos Biodinâmicos.*

## 1 INTRODUÇÃO

Passarelas são estruturas muito recorrentes no cenário urbano atual, dada sua importância para garantir a continuidade do fluxo de pedestres através de obstáculos como rios e avenidas. Logo, estas estruturas geralmente são muito leves e possuem grandes vãos, uma vez que são projetadas para suportar carregamentos leves (cargas de vento com baixa área de obstrução, e carregamento de pessoas). Estas características, combinadas à tendência atual de aplicar técnicas arquitetônicas inovadoras, resultam em estruturas esbeltas e leves, consequentemente, com baixas frequências de excitação dos seus modos naturais.

O cenário descrito tem resultado num aumento do número de casos relacionados a problemas de vibração em passarelas de pedestres ao redor do mundo (Dallard *et al.*, 2001 e Nakamura & Fujino, 2002), o que tem gerado maior atenção técnica por parte de Normas e Guias de Projeto em relação à simulação dos carregamentos atuantes nas passarelas. Na maior parte destes documentos, a carga humana é simulada por um modelo de força, variável na posição e no tempo, cuja intensidade é descrita por uma Série de Fourier.

De acordo com Dang & Zivanovic (2013), passarelas com frequências naturais na faixa de 1,5 a 2,4 Hz são susceptíveis a problemas de ressonância, uma vez que se encontram dentro da faixa de frequências típicas do caminhar humano. O guia de projeto Sétra (2006) define a faixa de frequências típicas do caminhar entre 1,6 e 2,4Hz.

No entanto, não há consenso na literatura acerca da simulação do carregamento humano. Em muitos casos, a carga humana tem seus efeitos dinâmicos até mesmo negligenciados. A própria Norma Brasileira, NBR 7188/2013 prescreve a carga humana como uma força estática, uniformemente distribuída ao longo do tabuleiro, desconsiderando seus efeitos dinâmicos.

Decerto, são muitas as estratégias usadas para simular a atividade humana, seja a ação do caminhar ou do correr. Porém, em passarelas, sua consideração como carga dinâmica é fundamental para a elaboração do projeto, uma vez que podem ocasionar vibrações em excesso, e gerar desconfortos nos usuários, amplificação dos deslocamentos, e em casos críticos, o colapso da estrutura.

Contudo, Silva *et al.* (2013) afirmam que em estruturas leves pode ocorrer interação dinâmica entre pessoa-estrutura, uma vez que o corpo humano se integra ao sistema com suas propriedades dinâmicas, modificando a resposta estrutural de forma considerável.

Nestes casos, tem-se destacado a estratégia da simulação do carregamento humano por meio de modelos biodinâmicos, isto é, a representação dos transeuntes por sistemas massa-mola-amortecedor. Desta forma, pode-se avaliar a relevância da interação pessoa-estrutura na resposta final.

O presente trabalho tem o objetivo de avaliar a resposta teórica de um modelo simplificado de passarela de pedestres sob a aplicação de cargas humanas simuladas através do modelo de força e do modelo biodinâmico. O modelo utilizado teve suas propriedades extraídas de um modelo em elementos finitos tridimensional feito no SAP2000, que foi calibrado através de resultados experimentais obtidos de ensaios dinâmicos de uma passarela com grande vão localizada na cidade do Rio de Janeiro.

## 2 SIMULAÇÃO DO CARREGAMENTO HUMANO

Muitos estudos foram realizados para registrar a cinemática do caminhar humano. De acordo com Solís *et al.* (2014), a marcha humana é um processo rítmico dos membros inferiores para mover o centro de massa para frente. O processo da marcha é composto por eventos que ocorrem desde o toque de um pé no chão até o toque deste mesmo pé com o chão mais a frente novamente.

Porém, apesar de ser um processo cíclico, a marcha é uma ação variável, dependente de parâmetros como velocidade, cadência, comprimento do passo, e padrões assimétricos (Von-Schroeder *et al.* 1995). Muitos modelos bidimensionais e tridimensionais do carregamento humano foram desenvolvidos usando laboratórios de marcha (Medved, 2001). Outras medições são baseadas na fixação de acelerômetros na cintura da pessoa, que refletem a cinemática dos movimentos do corpo, como em Solís *et al.* (2014) e Toso *et al.* (2015).

A seguir, são apresentados os dois modelos de carregamento humano estudados neste trabalho: O modelo de força e o biodinâmico.

### 2.1 Modelo de Força

O modelo mais comum de simulação do carregamento humano consiste numa força variável na posição e no tempo, cuja intensidade é periódica, dada por uma Série de Fourier, mostrada na Eq.(1). Muitas fontes na literatura apresentam valores para os coeficientes da série, como em Bachmann *et al.* (1995), Murray *et al.* (1997), Kerr (1998), Young (2001), Sétra (2006) e ISO 10137 (2012). Esse modelo, por ser relativamente simples, é usado extensivamente para o projeto de passarela de pedestres e tem se provado bastante eficaz.

Análises presentes na literatura utilizam usualmente três harmônicos da Série de Fourier. Neste trabalho, os coeficientes usados para as simulações foram extraídos de Sétra (2006), e são apresentados na Tabela 1.

$$F(t) = G + \sum_{j=1}^n G\alpha_j \sin(2j\pi f_p t - \phi_j) \quad (1)$$

Na Equação (1),  $G$  é o peso de uma pessoa,  $f_p$  é a frequência do passo (Hz),  $\alpha_j$  e  $\phi_j$  são os coeficientes do  $j$ -ésimo harmônico da Série de Fourier.  $F(t)$  é a intensidade da força, variando no tempo  $t$ , em segundos.

A partir da Eq.(1), pode ser concluído que a força induzida por uma pessoa tem uma componente estática, representada pela constante  $G$  do peso da pessoa, e uma componente dinâmica, dada pelos termos dentro do somatório.

Tabela 1: Coeficientes da Série de Fourier (adaptado de Sétra, 2006)

| Harmônico | $\alpha_j$ | $\phi_j$ |
|-----------|------------|----------|
| 1         | 0,4        | 0        |
| 2         | 0,1        | $\pi/2$  |
| 3         | 0,1        | $\pi/2$  |

## 2.2 Modelo Biodinâmico

Outras análises consideram a ação induzida pelo caminhar humano por Modelos Biodinâmicos, simulando os pedestres por sistemas massa-mola de propriedades dinâmicas individuais. Esta simulação tem produzido resultados mais representativos, uma vez que considera a interação pessoa-estrutura, permitindo o estudo da relevância de tal interação na resposta final e avaliando o impacto no corpo humano.

Muitas fontes da literatura possuem propostas de modelos biodinâmicos, com vários graus de liberdade. Sachse *et al.* (2004) usou um modelo biodinâmico com um grau de liberdade para simular a interação entre pedestres e estruturas com carregamento de multidão, o que pode provocar aumento no amortecimento, variação no valor das frequências naturais e até mesmo o aparecimento de novos modos de vibração. Kim *et al.* (2008) usou um modelo biodinâmico com dois graus de liberdade, cujas propriedades foram extraídas da ISO 5982 (1981) e comparou os resultados com o modelo de força, aplicados em um modelo computacional de passarela de pedestres. Toso *et al.* (2015) desenvolveu equações para as propriedades dinâmicas de modelos biodinâmicos com um grau de liberdade, utilizando modelos de regressão e redes neurais artificiais a partir de resultados experimentais encontrados na literatura.

As aplicações dos modelos biodinâmicos não se resumem ao estudo e análise de estruturas civis, mas também a avaliação de impactos sobre o corpo humano. Liang & Chiang (2006) desenvolveram modelos biodinâmicos com vários graus de liberdade com uma abordagem ergonômica, para avaliar o impacto de vibrações sobre humanos sentados.

Neste trabalho, o modelo biodinâmico utilizado para as análises foi o mesmo proposto por Silva *et al.* (2013), de um grau de liberdade, ilustrado na Figura 1. As propriedades dinâmicas do pedestre foram definidas em concordância com as expressões obtidas por Silva *et al.* (2013) por meio de modelos de regressão calibrados com resultados experimentais. Estas expressões são dadas por

$$\begin{aligned} m_p &= 97,082 + 0,275m - 37,518f_p \\ c_p &= 29,041m_p^{0,833} \\ k_p &= 30351,744 - 50,261c_p + 0,035c_p^2 \end{aligned} \quad (2)$$

Na Eq.(2),  $m$  é a massa da pessoa (kg),  $f_p$  é a frequência do passo (Hz),  $c_p$  é o coeficiente de amortecimento da pessoa (N.s/m), e  $k_p$  é a rigidez da pessoa (N/m).

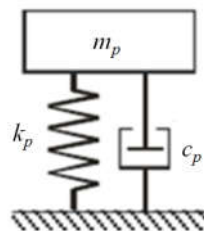


Figura 1: Modelo biodinâmico de 1 grau de liberdade utilizado

### 3 DESCRIÇÃO DA ESTRUTURA ANALISADA

A passarela analisada é uma estrutura mista, de aço e concreto, e possui dois vãos, um de 68,6m e outro de 17,7m, do qual somente o mais longo foi instrumentado e modelado por ser o mais flexível e o mais problemático, em termos de vibração. A passarela possui seus elementos de vigas, pilares e contraventamentos em perfis metálicos. A laje é pré-moldada de concreto armado, composta de placa superior e enrijecedores na parte inferior, apoiada sobre as transversinas, como mostra a Figura 2. O teto da passarela é de telha de fibrocimento e possui enrijecedores laterais em forma de "X" em tubos de 3/4 polegada, como mostra a Figura 3. A Figura 4 apresenta fotos tiradas da passarela.

O projeto da passarela divide seu comprimento em 4 módulos de 16895mm, cada um contendo entre 7 e 8 montantes, conforme indica a Figura 5. Os perfis dos módulos 1 e 2 podem ser vistos na Figura 7. Os perfis dos módulos 3 e 4 podem ser obtidos espelhando os desenhos da Figura 7, uma vez que a estrutura é simétrica. A Figura 6 apresenta o corte transversal nos pilares P1 e P2, mostrando os perfis utilizados também para estes. Todos os perfis encontram-se listados na Tabela 2, junto às suas dimensões.

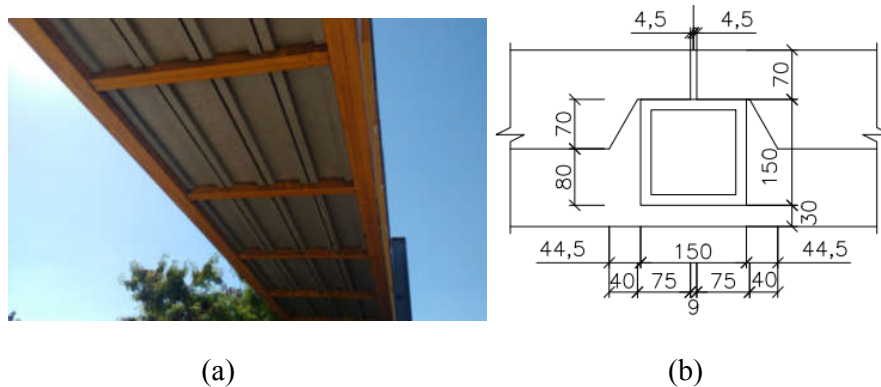


Figura 2: (a) Foto da laje com enrijecedores na parte inferior e (b) detalhe do apoio da laje nas vigas transversinas (dimensões em mm)

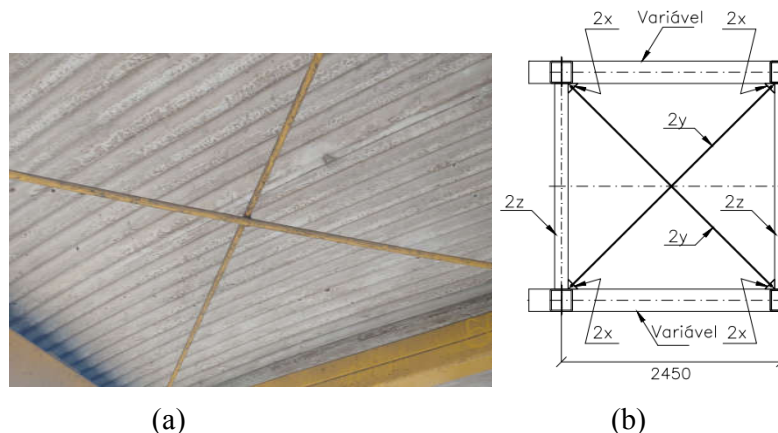


Figura 3: (a) Foto da telha e dos enrijecedores laterais e (b) Vista superior do projeto dos enrijecedores do teto (dimensões em mm)



Figura 4: Fotos da passarela instrumentada

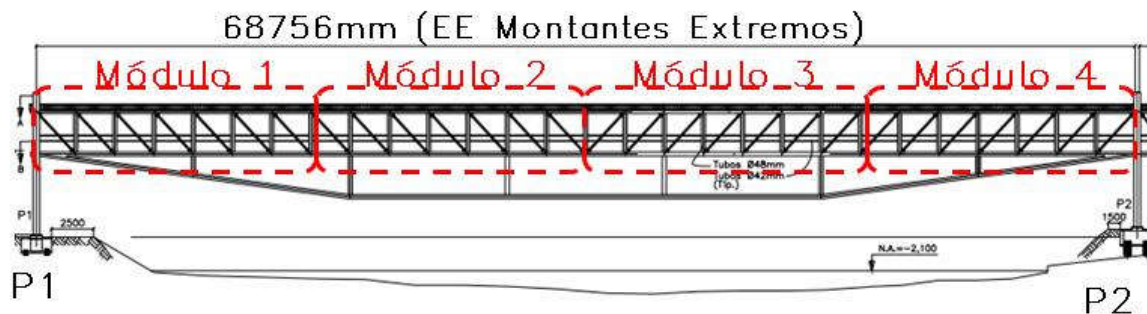


Figura 5: Vista lateral do projeto da passarela

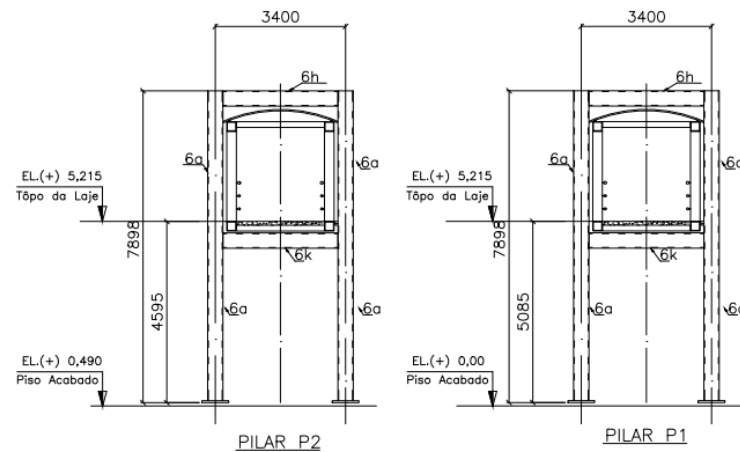


Figura 6: Seção transversal nos pilares do projeto da passarela

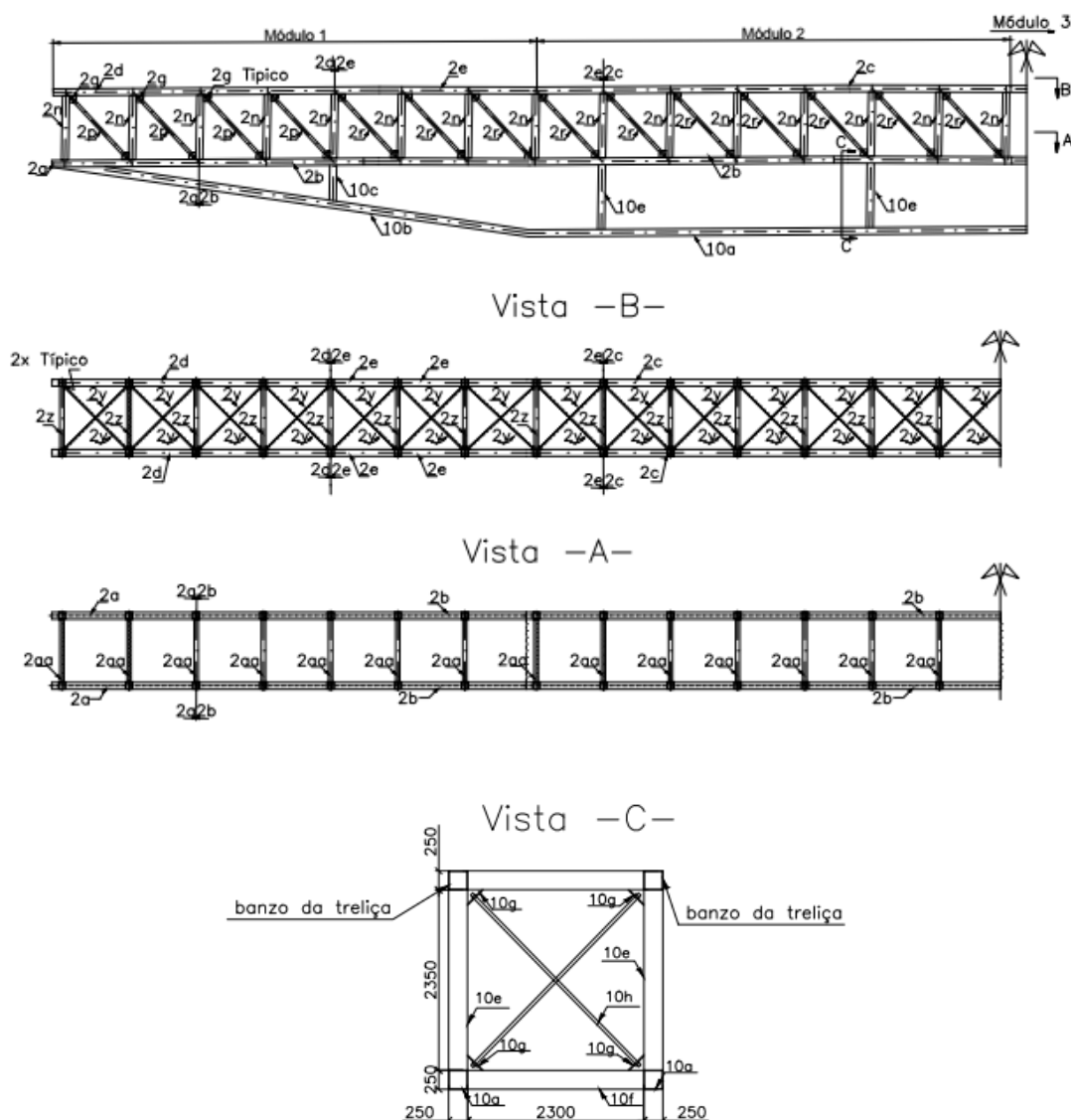
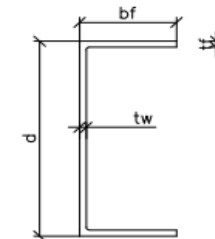
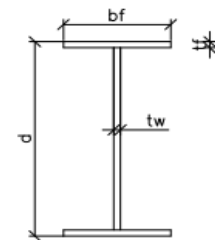
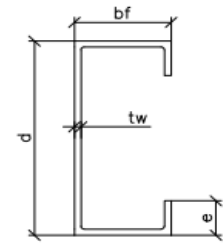


Tabela 2: Lista de perfis da passarela

| Marca | Descrição           | Local                                                         | Dimensões do Perfil (mm) |                |                |                |    |
|-------|---------------------|---------------------------------------------------------------|--------------------------|----------------|----------------|----------------|----|
|       |                     |                                                               | d                        | b <sub>f</sub> | t <sub>f</sub> | t <sub>w</sub> | e  |
| 2n    | 2 U 250x125x4,25    | Colunas da Passarela (montantes)                              | 250                      | 125            | 4,25           | 4,25           | -  |
| 2p    | 2 U 100x50x6,35     | Diagonais da Treliça                                          | 100                      | 50             | 6,35           | 6,35           | -  |
| 2r    | 2 U 100x50x25x4,75  | Diagonais da Treliça                                          | 100                      | 50             | 4,75           | 4,75           | 25 |
| 2d    | 2 U 250x125x6,35    | Longarina Superior                                            | 250                      | 125            | 6,35           | 6,35           | -  |
| 2e    | 2 U 250x125x9,50    | Longarina Superior                                            | 250                      | 125            | 9,5            | 9,5            | -  |
| 2c    | 2 U 250x125x12,50   | Longarina Superior                                            | 250                      | 125            | 12,5           | 12,5           | -  |
| 2a    | 2 U 250x125x9,50    | Longarina Inferior (banzo da treliça)                         | 250                      | 125            | 9,5            | 9,5            | -  |
| 2b    | 2 U 250x125x6,35    | Longarina Inferior (banzo da treliça)                         | 250                      | 125            | 6,35           | 6,35           | -  |
| 2y    | φ 3/4in             | Barras Travamentos Laterais no teto                           | -                        | -              | -              | -              | -  |
| 2z    | 2 U 150x75x30x3,0   | Transversinas Superiores                                      | 150                      | 75             | 3,0            | 3,0            | 30 |
| 2aa   | 2 U 150x75x30x4,75  | Transversinas Inferiores                                      | 150                      | 75             | 4,75           | 4,75           | 30 |
| 2x    | L 80x40x4,75        | Cantoneiras de Conexão dos travamentos laterais do teto       | -                        | -              | -              | -              | -  |
| 2g    | Chapa t = 6.35mm    | Chapas de Conexão das Diagonais da Treliça                    | -                        | -              | -              | -              | -  |
| 10a   | 2 U 250x125x9,50    | Longarina da Viga Vagão                                       | 250                      | 125            | 9,5            | 9,5            | -  |
| 10b   | 2 U 250x125x9,0     | Longarina da Viga Vagão                                       | 250                      | 125            | 9,0            | 9,0            | -  |
| 10c   | 2 U 250x125x30x4,75 | Montantes da Viga Vagão                                       | 250                      | 125            | 4,75           | 4,75           | 30 |
| 10e   | 2 U 250x125x30x4,75 | Montantes da Viga Vagão                                       | 250                      | 125            | 4,75           | 4,75           | 30 |
| 10f   | 2 U 250x125x30x3,0  | Transversinas da Viga Vagão                                   | 250                      | 125            | 3,0            | 3,0            | 30 |
| 10h   | φ 3/4in             | Travamentos Laterais da Viga Vagão                            | -                        | -              | -              | -              | -  |
| 10g   | L 50x80x150         | Cantoneiras de Conexão dos travamentos laterais da viga vagão | -                        | -              | -              | -              | -  |
| 6a    | CS 450x154          | Perfil "I" do Pilar                                           | 450                      | 450            | 16,0           | 12,5           | -  |
| 6k    | CVS 350x105         | Travessa inferior do pilar                                    | 350                      | 250            | 19,0           | 12,5           | -  |
| 6h    | VE 250x19           | Travessa superior do pilar                                    | 250                      | 125            | 4,75           | 4,75           | -  |



## 4 CAMPANHA DE ENSAIOS EXPERIMENTAIS

A campanha de ensaios experimentais, conduzida por Rezende *et al.* (2016), consistiu em testes de vibração livre e forçada na estrutura da passarela. A aquisição foi feita por meio de acelerômetros unidirecionais, conectados a um sistema de aquisição de dados.

Os ensaios de vibração livre consistiram na aplicação de impactos impulsivos com o calcanhar na passarela, enquanto os de vibração forçada consistiram na aplicação da carga de uma e quatro pessoas andando na passarela na frequência natural do primeiro modo vertical de vibração. Vale ressaltar que durante a realização dos ensaios, o trânsito na passarela não foi impedido.

### 4.1 Vibração Livre

O tratamento dos dados obtidos nos ensaios de vibração livre permitiu determinar as frequências naturais da estrutura. As Figuras 8 e 9 abaixo mostram trechos dos sinais de vibração livre captados, ao lado do correspondente sinal no domínio da frequência. A Tabela 3 mostra as propriedades dinâmicas obtidas para cada modo de vibração da passarela.

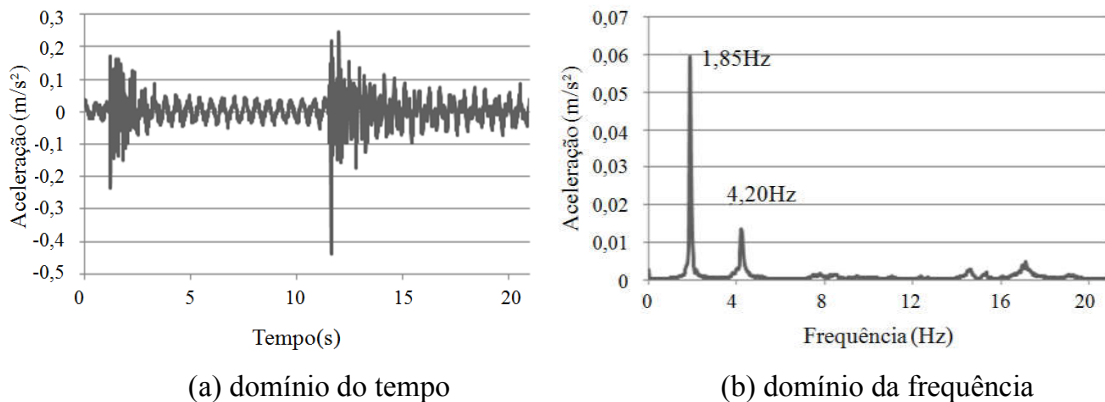


Figura 8: Sinais de aceleração na direção vertical com impactos a  $\frac{1}{4}$  do vão.

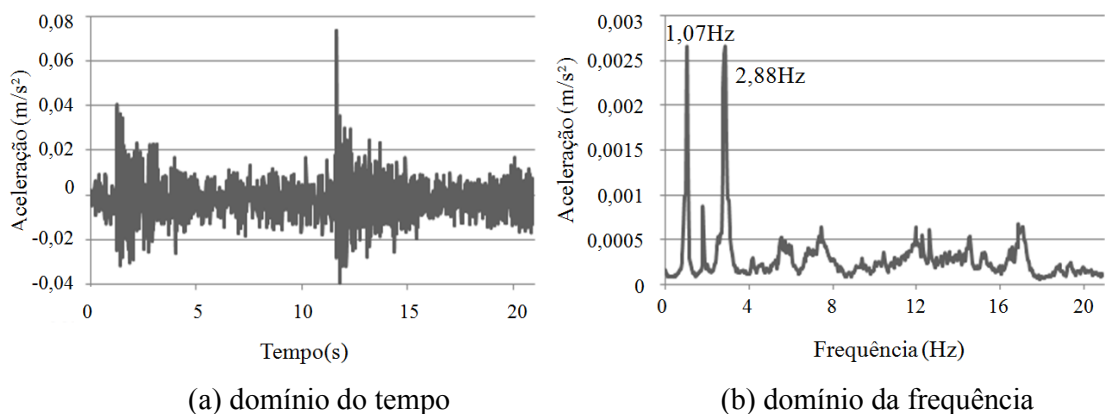


Figura 9: Sinais de aceleração na direção lateral com impactos a  $\frac{1}{4}$  do vão.

Tabela 3: Frequências Naturais da Passarela

| Modo           | Frequência Experimental<br>( $\pm 0,05\text{Hz}$ ) | Forma Modal                            | Taxa de amortecimento |
|----------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------|-----------------------|
| 1 <sup>o</sup> | 1,07                                               | 1 <sup>o</sup> modo de flexão lateral  | -                     |
| 2 <sup>o</sup> | 1,85                                               | 1 <sup>o</sup> modo de flexão vertical | 0,23%                 |
| 3 <sup>o</sup> | 2,88                                               | 2 <sup>o</sup> modo de flexão lateral  | -                     |
| 4 <sup>o</sup> | 4,20                                               | 2 <sup>o</sup> modo de flexão vertical | 0,56%                 |

## 4.2 Vibração Forçada

Foram realizados ensaios de vibração forçada objetivando excitar o primeiro modo vertical de vibração, com frequência experimental de 1,85Hz. Para isso, foram produzidos sinais com uma e quatro pessoas andando a 1,85Hz. A frequência do passo foi alcançada com o auxílio de um metrônomo. É importante ressaltar que devido à dificuldade em sincronizar os passos ao se andarem várias pessoas juntas, a excitação da estrutura não ocorre de forma homogênea.

A Figura 10 e a Figura 11 apresentam os sinais obtidos nos ensaios de vibração forçada com quatro pessoas e uma pessoa caminhando na frequência de 1,85Hz, respectivamente.

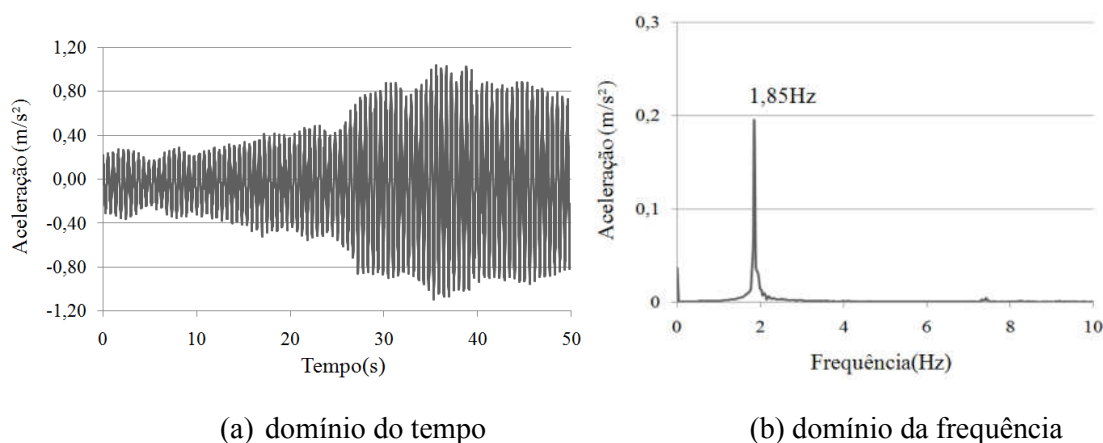


Figura 10: Sinais de aceleração na direção vertical com quatro pessoas caminhando a 1,85Hz

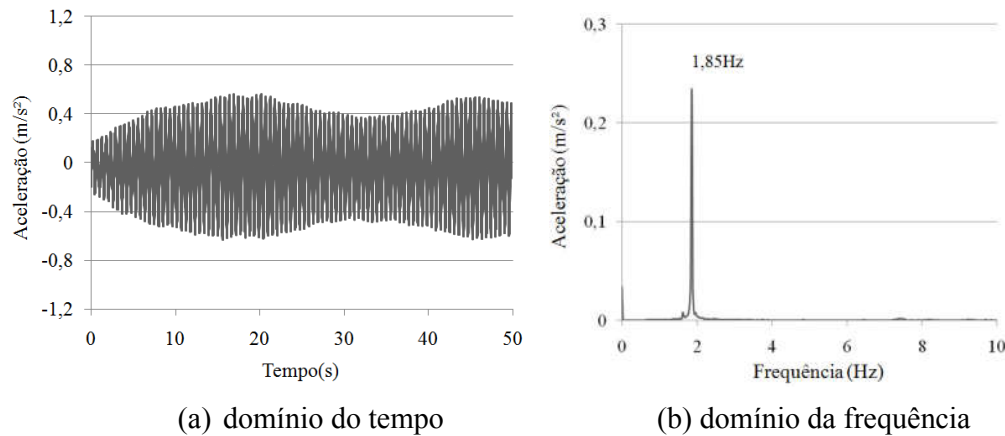


Figura 11: Sinais de aceleração na direção vertical com uma pessoa caminhando a 1,85Hz.

## 5 MODELAGEM NUMÉRICA DA PASSARELA

Todas as análises feitas neste trabalho utilizaram um modelo planar de passarela de pedestres, cujas propriedades foram extraídas de um modelo em elementos finitos da passarela descrita na Seção 3. Desta forma pretende-se avaliar somente o comportamento dos modos verticais de vibração da estrutura, que para o caso são os mais influentes e problemáticos.

### 5.1 Modelo em Elementos Finitos

Em geral, espera-se que os modelos em elementos finitos elaborados em concordância com o projeto obtenham boas correlações com o comportamento estático e dinâmico da estrutura em análise. No entanto, de acordo com Bayraktar *et al.* (2009), devido às várias incertezas inerentes à modelagem, como propriedades dos materiais, rigidez dos suportes e não conformidade entre projeto e *as built*, os modelos apresentam, não raras vezes, diferenças consideráveis principalmente em relação ao comportamento dinâmico da estrutura, levando a um baixo nível de precisão na determinação das suas frequências naturais e modos de vibração.

Neste contexto, é frequente a realização de testes experimentais na estrutura após sua construção, desta forma podem-se calibrar os modelos numéricos previamente elaborados com os resultados experimentais e assim obter um modelo representativo.

Esta metodologia tem sido usada intensamente em todo o mundo. Bayraktar *et al.* (2009) usou resultados experimentais de testes dinâmicos para atualizar um modelo em SAP2000 de uma passarela metálica em arco em Trabzon, na Turquia. De maneira semelhante, Cismaşu *et al.* (2015) calibrou um modelo numérico com resultados de testes experimentais numa passarela de concreto armado em Portugal.

Da mesma forma, o modelo da passarela elaborado com base nas plantas do projeto foi calibrado em relação às frequências experimentais obtidas. A Figura 12 apresenta uma foto do

modelo numérico calibrado. A Tabela 4 mostra a correlação teórica experimental entre as frequências do modelo e as experimentais. Para esta análise, usou-se o software SAP2000.

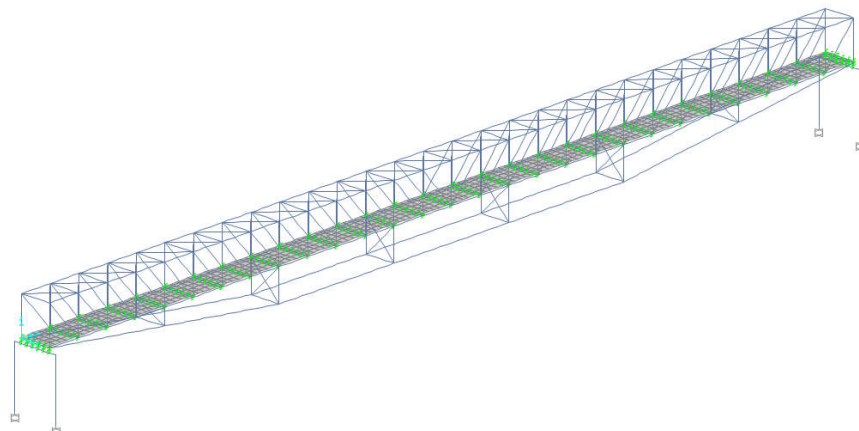


Figura 12: Modelo numérico final

Tabela 4: Comparação teórico-experimental das características dinâmicas da passarela para o modelo numérico calibrado.

| Modo | Frequência (Hz)                      |               | Diferença Percentual | Forma Modal                | Taxa de amortecimento |
|------|--------------------------------------|---------------|----------------------|----------------------------|-----------------------|
|      | Experimental ( $\pm 0,05\text{Hz}$ ) | Numérica (Hz) |                      |                            |                       |
| 1º   | 1,07                                 | 1,06          | 0,90%                | 1º modo de flexão lateral  | -                     |
| 2º   | 1,85                                 | 1,83          | 1,10%                | 1º modo de flexão vertical | 0,23%                 |
| 3º   | 2,88                                 | 2,94          | 2,10%                | 2º modo de flexão lateral  | -                     |
| 4º   | 4,20                                 | 4,47          | 6,40%                | 2º modo de flexão vertical | 0,56%                 |

## 6 IMPLEMENTAÇÕES COMPUTACIONAIS

Os algoritmos implementados neste trabalho seguiram o fluxograma indicado na Figura 13.

Primeiramente, exportam-se as propriedades dinâmicas do modelo de elemento finitos descrito na Seção 5.1 (autovetor e massa modal do primeiro modo vertical). Em seguida, exportam-se as propriedades dinâmicas obtidas experimentalmente (frequências naturais e taxas de amortecimento). Com estes dados, definem-se os dois modelos da ação humana, Série de Fourier e Modelo Biodinâmico, para depois resolver as EDO's que governam o problema dinâmico.

Como se deseja analisar somente o primeiro modo vertical, o modelo é plano, e contém somente dois graus de liberdade, um para o deslocamento vertical do pedestre e outro para o deslocamento vertical da estrutura.

As implementações computacionais tinham o objetivo de conseguir uma boa correlação com os resultados experimentais obtidos por meio dos ensaios de vibração forçada de uma e quatro pessoas, mostrados na Figura 11 e na Figura 10, respectivamente.

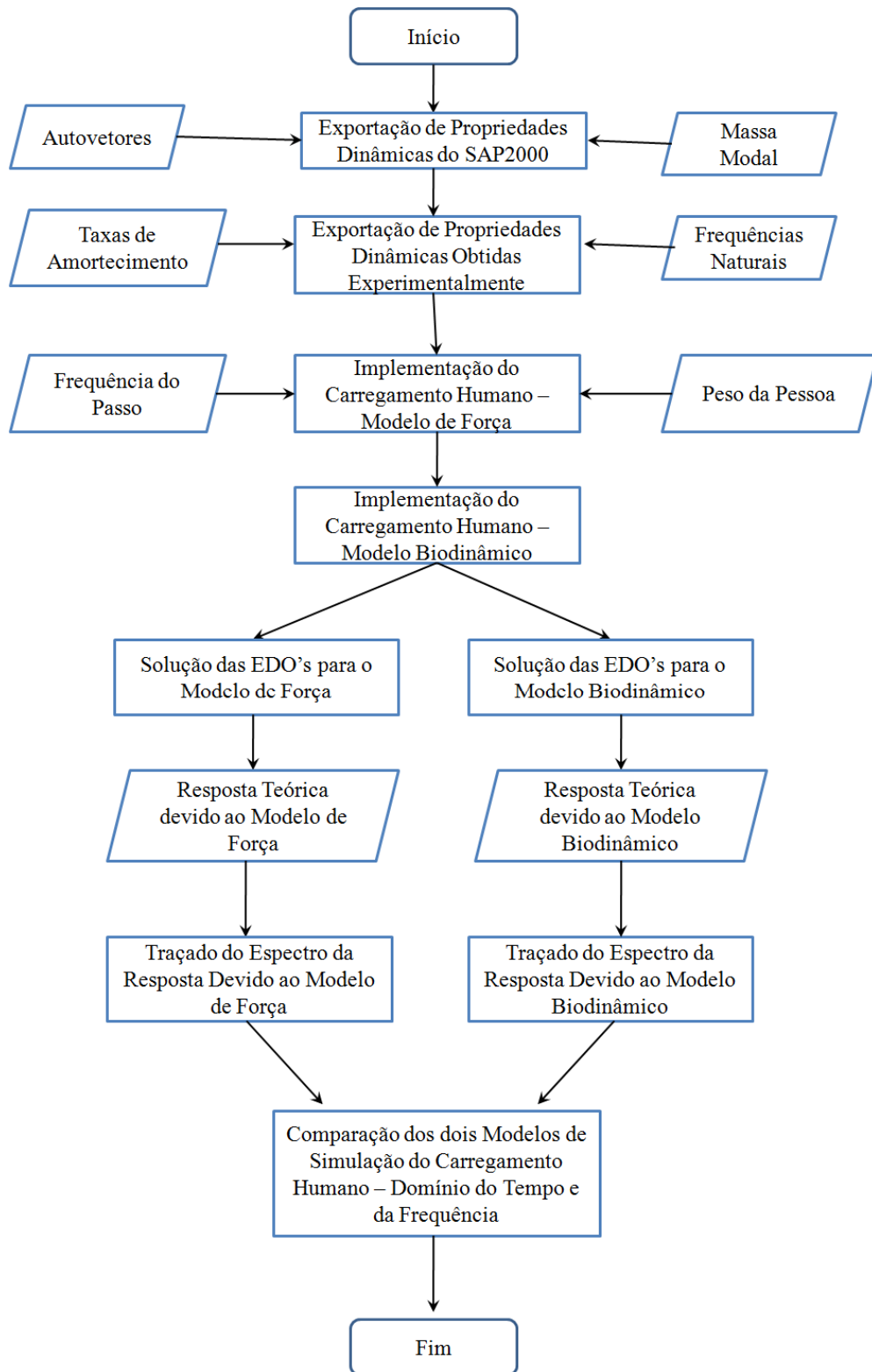


Figura 13: Fluxograma do Programa Implementado

## 6.1 Simulação - uma pessoa caminhando a 1,85Hz

A primeira simulação foi do sinal referente à Figura 11. Ao analisar este sinal, observaram-se três trechos com padrões um pouco diferentes. Isto é devido ao fato de que, mesmo com o auxílio do metrônomo, as pessoas normalmente não conseguem andar perfeitamente na frequência pretendida. Além disso, o trânsito na passarela não foi impedido durante a realização do ensaio, o que pode gerar padrões diferentes no sinal devido à influência de transeuntes em utilização normal.

A Figura 14 mostra o sinal experimental referente a uma pessoa caminhando a 1,85Hz, com a divisão de trechos proposta: 0-20s, 20-35s e 35-50s. No trecho 0-20s e 35-50s observa-se um aumento na amplitude de aceleração, o que indica um padrão em ressonância. Já no trecho de 20-35s, ocorre uma diminuição das acelerações, provocada provavelmente por um descompasso do pedestre. A Tabela 5 apresenta os parâmetros da caminhada adotados para cada trecho.

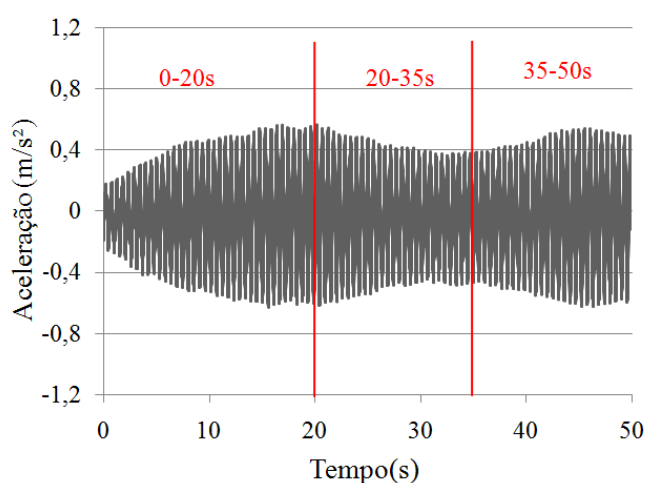


Figura 14: Uma pessoa caminhando a 1,85Hz - divisão em trechos

Tabela 5: Parâmetros da caminhada adotados para cada trecho - uma pessoa a 1,85Hz

| Trecho | Frequência do Passo (Hz) | Comprimento do Passo (m) | Massa do Pedestre (kg) |
|--------|--------------------------|--------------------------|------------------------|
| 0-20s  | 1,85                     | 0,7                      | 65                     |
| 20-35s | 1,75                     | 0,7                      | 65                     |
| 35-50s | 1,85                     | 0,7                      | 65                     |

A Figura 15 apresenta os resultados teóricos obtidos num gráfico de aceleração vs tempo sobreposto ao sinal experimental. A Figura 16 apresenta os espectros correspondentes a cada trecho, comparando a energia e o amortecimento do sinal experimental e do modelo biodinâmico.

Ao analisar a Figura 15, primeiramente observa-se boa correlação com os resultados teóricos obtidos com os experimentais. No entanto, não se observa diferença expressiva entre os modelos de força e biodinâmico. Isto é devido à consideração no modelo teórico de uma única pessoa caminhando a 1,85Hz. Neste caso, a massa da estrutura é muito superior à massa

de uma pessoa, portanto a interação pessoa-estrutura é praticamente desprezível. Vale ressaltar que na medida que cresce o número de pessoas utilizando a passarela, aumenta a necessidade de considerar esta interação, conforme pode ser visto na Seção seguinte.

A análise da Figura 16 apresenta os espectros da resposta teórica com modelo biodinâmico e da resposta experimental de cada trecho associado. Pela similaridade dos espectros, observa-se que tanto a resposta experimental quanto a teórica têm boa correlação em termos de energia do sistema.

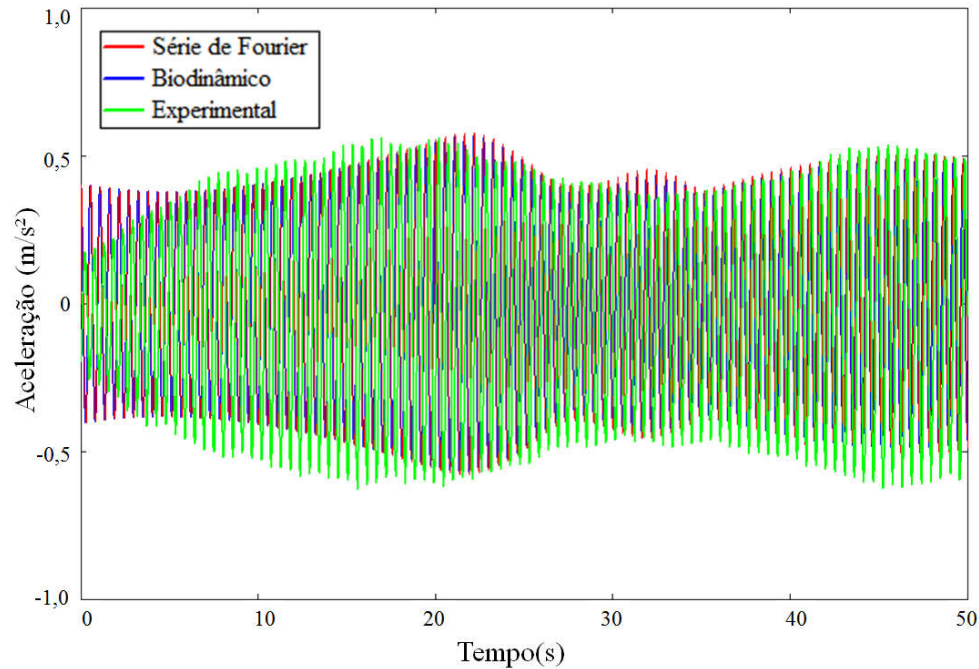


Figura 15: Sinal experimental e sinais teóricos sobrepostos - uma pessoa a 1,85Hz

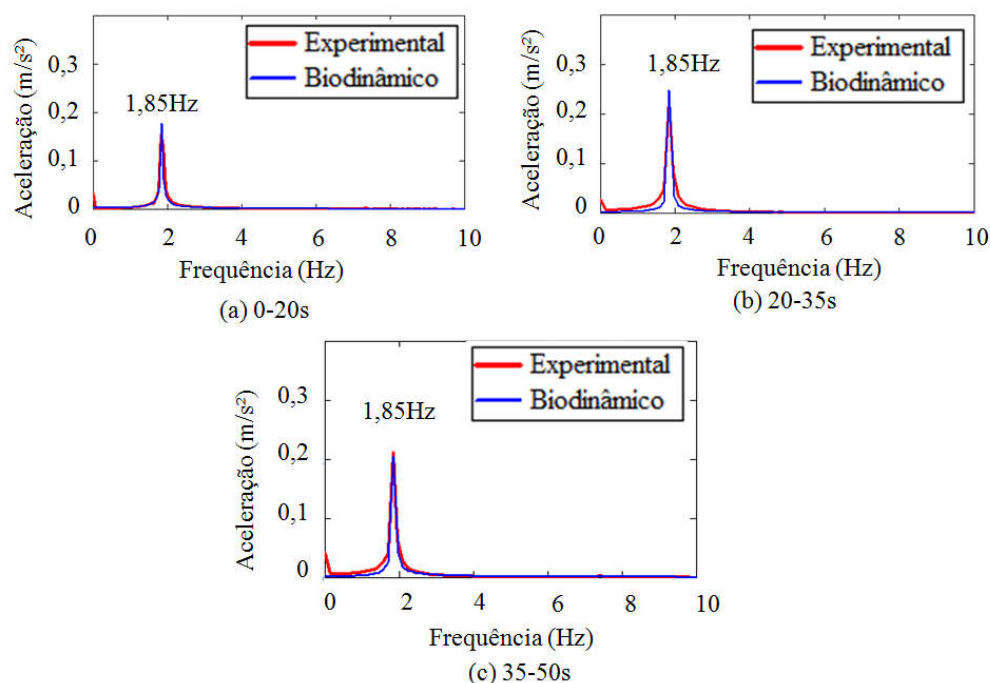


Figura 16: Espectros de cada trecho - comparação entre sinal experimental e modelo biodinâmico - uma pessoa a 1,85Hz

## 6.2 Simulação - quatro pessoas caminhando a 1,85Hz

Da mesma forma que na seção anterior, foram identificados no sinal experimental da Figura 10 três trechos com padrões distintos. Entre 0 e 10s, observa-se um batimento no sinal, que indica que as quatro pessoas não estavam com passo sincronizado. Depois, entre 10-17s, o sinal começa a adquirir padrões de ressonância. Por último, entre 17-50s, o sinal apresenta suas maiores amplitudes, evidenciando uma ressonância mais perfeita neste trecho. A Figura 17 apresenta o sinal de quatro pessoas andando a 1,85Hz com a divisão de trechos proposta.

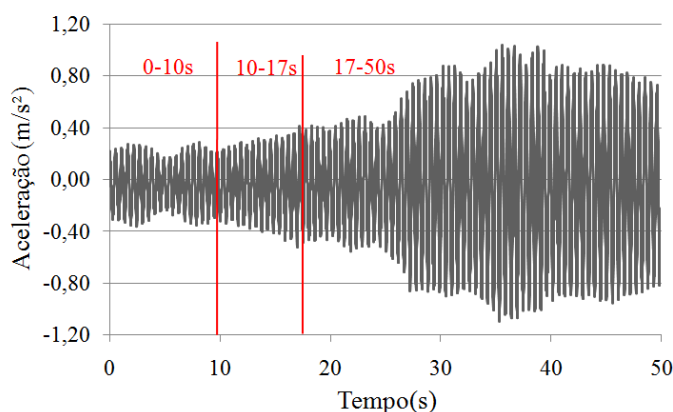


Figura 17: Quatro pessoas caminhando a 1,85Hz - divisão em trechos

Para este caso, com quatro pessoas caminhando sobre a passarela, na distribuição indicada na Figura 18, foi assumido que as pessoas da frente (Pessoa 1 e Pessoa 2) seriam simuladas por um único modelo biodinâmico, com massa, rigidez e coeficientes de amortecimento dobrados. Da mesma forma, para as pessoas de trás (Pessoa 3 e Pessoa 4). Totalizando, ao final, um sistema com 3 graus de liberdade: um para estrutura e outros dois para os pedestres. Assim, é possível simular esta condição de carregamento no modelo plano utilizado, cujos parâmetros estão indicados na Tabela 6.

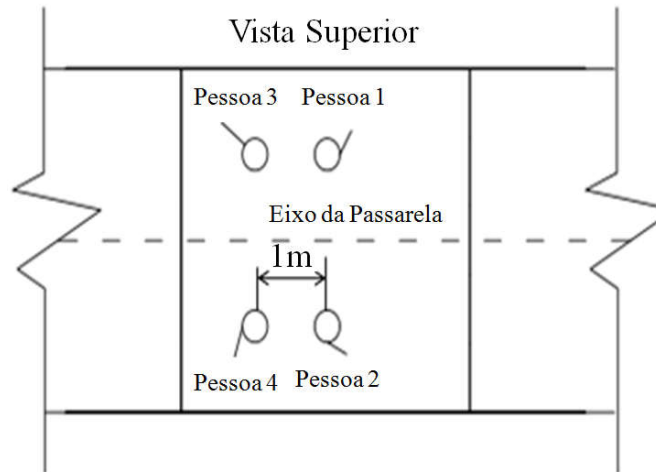


Figura 18: Distribuição das quatro pessoas na passarela

Tabela 6: Parâmetros da caminhada adotados para cada trecho - quatro pessoas a 1,85Hz

| Trecho | Frequência do Passo das Pessoas da Frente (Hz) | Frequência do Passo das Pessoas de Trás (Hz) | Comprimento do Passo (m) | Massa dos Pedestres (kg) |
|--------|------------------------------------------------|----------------------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 0-10s  | 1,750                                          | 1,650                                        | 0,7                      | 65                       |
| 10-17s | 1,845                                          | 1,735                                        | 0,7                      | 65                       |
| 17-50s | 1,870                                          | 1,870                                        | 0,7                      | 65                       |

A Figura 19 apresenta os sinais teóricos obtidos para o modelo de força e biodinâmico, sobrepostos aos sinais experimentais. Novamente, observa-se uma boa correlação com os sinais experimentais, principalmente por parte do modelo biodinâmico. Neste caso, destacam-se as diferenças entre o modelo biodinâmico e o modelo de força. Observa-se que o modelo biodinâmico, por considerar a interação pessoa-estrutura, provocou uma diminuição na resposta de aceleração da estrutura. Pode-se concluir também que quanto maior o número de pessoas na passarela, isto é, quando maior for a razão entre a massa da estrutura e a massa das pessoas, mais relevante a interação estrutura-pessoa.

Os espectros de cada trecho são apresentados na Figura 20. Novamente, observa-se que os espectros do modelo biodinâmico apresentam muita similaridade com os espectros do sinal teórico, evidenciando uma boa correlação da energia de ambos os sistemas.

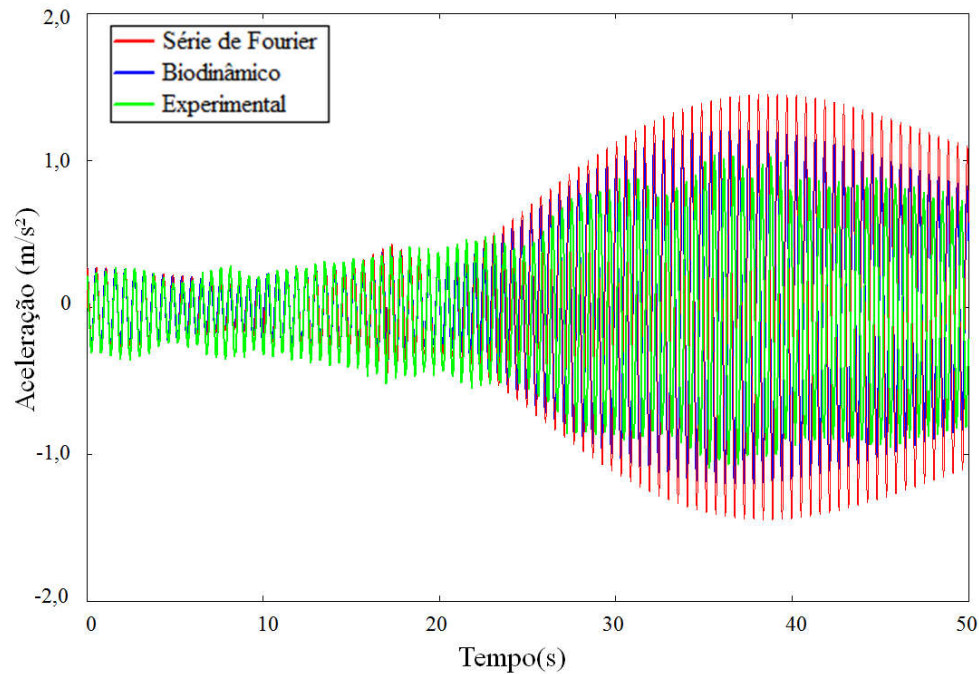


Figura 19: Sinal experimental e sinais Teóricos Sobrepostos - Quatro Pessoas a 1,85Hz

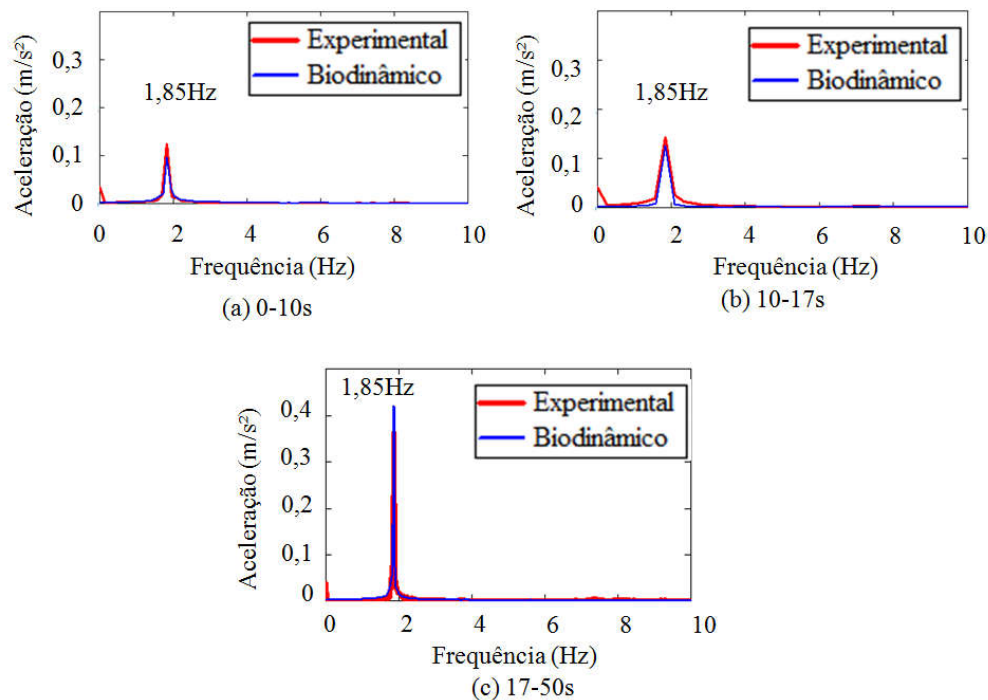


Figura 20: Espectros de cada trecho - comparação entre sinal experimental e modelo biodinâmico - quatro pessoas a 1,85Hz

## 7 CONCLUSÃO

As simulações feitas neste trabalho permitem avaliar a relevância da interação pessoa-estrutura em edificações leves, que é função da quantidade de pedestres que caminham sobre a estrutura.

O modelo biodinâmico obteve melhores correlações com os resultados experimentais, principalmente para o caso de quatro pessoas caminhando a 1,85Hz. Porém, para o sinal de uma pessoa caminhando a 1,85Hz, a diferença entre os modelos biodinâmico e de força foi desprezível.

A análise dos espectros do sinal teórico do modelo biodinâmico em relação ao sinal experimental evidencia boa similaridade na energia dos dois sistemas.

### *Agradecimentos*

Ao CNPq e à FAPERJ pelo financiamento da pesquisa, à Prefeitura do Rio de Janeiro pelo acesso aos dados da passarela e ao SENAC pelo apoio durante a realização dos ensaios experimentais.

## REFERÊNCIAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2013. NBR 7188: Carga móvel em ponte rodoviária e Passarela de Pedestres. Rio de Janeiro.

Bachmann, H. *et al.* 1995. Vibration Problems in Structures - Practical Guidelines, *Institut für Baustatik und Konstruktion*, 1<sup>st</sup>ed, Basel, Birkhäuser.

Bayraktar, A., Altunisik, A.C., Sevim, B., Türker, T., 2009. Modal testing, finite-element model updating, and dynamic analysis of an arch type steel footbridge. *ASCE Journal of Performance of Constructed Facilities*, v 23, n. 2.

Cismaşiu, C., Narciso, A.C., Amarantedos Santos, F.P., 2015. Experimental dynamic characterization and finite-element updating of a footbridge structure. *ASCE Journal of Performance of Constructed Facilities*, v. 29, n. 4.

Dang, H.V, Zivanovic, S., 2013. Modelling pedestrian interaction with perceptibly vibrating footbridges, *FME Trans.*,v. 41, n. 4, p. 271-278.

Dallard, P., Fitzpatrick, A., Flint, A., LeBourva, S., Low, A., Smith, R. Willford, M., 2001. The London Millennium Footbridge. *The Structural Engineer*, v. 79, n.22,p.17-33.

ISO 5982, 1981. International Organization for Standardization. Vibration and shock-Mechanical driving point impedance of the human body.

ISO 10137,2012. International Organization for Standardization, Bases of Design of Structures - Serviceability of Buildings and Walkways against Vibrations.

Kerr, S.C.,1998. *Human Induced Loading on Staircases*, Ph.D. thesis, University of London, London, England.

- Kim, S.H, Cho, K.I. Choi, M.S. Lim, J.Y.,2008. Development of human body model for the dynamic analysis of footbridges under pedestrian induced excitation. *International Journal of Steel Structures* v.8, p. 333-345.
- Liang, C., Chiang, C., A, 2006. Study on Biodynamic Model of Seated Human Subjects Exposed to Vertical Vibration. *International Journal of Industrial Ergonomics*, v. 36, n. 10, p. 869-890.
- Medved, V. Measurement of Human Locomotion. Boca Raton: CRC, Press LLC, 2001.
- Murray, T.M., Allen, D.E., Ungar, E.E.,1997. Floor Vibrations Due to Human Activity, Steel Design Guide Series Nº 11, Pub. No. D811, American Institute of Steel Construction, Chicago.
- Nakamura, S. I.; Fujino, Y., 2002.Transversal Horizontal Vibration on a Pedestrian Cable Stayed Bridge. *Structural Engineering International*, v. 12, n. 4, p. 295-300.
- Rezende, F.A.; Sá, T.G; Varela, W.D; Carvalho, E.M.L., 2016. Medição de Vibrações em Passarela Metálica com Grande Vão. *XXXVII Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural*. Paraguai.
- Sachse, R., Pavic,A., Reynolds,P., 2004. Parametric study of modal properties of damped two-degree-of-freedom crowd–structure dynamic systems, *Journal of Sound and Vibration*, v. 274, p.461-480.
- Sétra, 2006. Service d'Études techniques des routes et auto routes. Footbridges. Assessment of vibrational behaviour of footbridges under pedestrian loading.
- Silva, F.T., Brito, H.M.B.F, Pimentel, R.L., 2013. Modeling of crowd load in vertical direction using biodynamic model for pedestrians crossing footbridges. *Canadian Journal of Civil Engineering*, v. 40, n. 12, p. 1196-1204.
- Solís, F.M., Limon, S.V, Treviño, A.V., Lelis, J.M., Sánchez, A.C., Treviño, M.V.,2014. Design of a low cost measurement system based on accelerometers for gait analysis. *Acta Scientiarum*, v. 36, n. 1, p. 111-121.
- Toso, M. A., Gomes, H. M, Silva, F.T., Pimentel, R.L., 2015. Experimentally fitted biodynamic models for pedestrian-structure interaction in walking situations. *Mechanical Systems and Signal Processing*, v. 72-73, p. 590-606.
- Von-schroeder, H.; Coutts, R.; Lyden, P.; Billings, E.; Nickel, V.; 1995. Gait Parameters following Stroke: A Practical Assessment. *Journal of Rehabilitation Research and Development*, v. 32, n. 1, 25-31.
- Young, P., 2001. "Improved Floor Vibration Prediction Methodology", Engineering for Structural Vibration - Current developments in Research and Practice, Vibration Seminar, Arup Group Ltd.