



AVALIAÇÃO DE PROJETO SOBRE O ESTADO LIMITE DE SERVIÇO DE PASSARELAS SUBMETIDAS À AÇÃO DINÂMICA DO CAMINHAR DOS PEDESTRES

Irwing Aguiar Ribeiro da Silva

Gilvan Lunz Debona

iwng@msn.com

gilvanld@yahoo.com.br

Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, PGECIV/FEN/UERJ

Rua São Francisco Xavier, Nº 524, Maracanã, 20550-900, Rio de Janeiro/RJ, Brasil

José Guilherme Santos da Silva

jgss@uerj.br

Departamento de Estruturas e Fundações, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ

Rua São Francisco Xavier, Nº 524, Maracanã, 20550-900, Rio de Janeiro/RJ, Brasil

Resumo. *Passarelas são frequentemente submetidas a ações dinâmicas decorrentes da travessia de pedestres. O avanço tecnológico da engenharia estrutural e o uso de novos materiais têm originado passarelas cada vez mais esbeltas e, portanto, com maiores níveis de vibrações acarretando desde o desconforto aos usuários até riscos à segurança estrutural, nos piores casos, com acidentes fatais. Um exemplo atual diz respeito à ciclovia Tim Maia, localizada na cidade do Rio de Janeiro/RJ, Brasil, com carregamentos predominantemente de natureza dinâmica como o caminhar de pedestres, o tráfego de ciclistas, a ação do vento e a ação excepcional das ondas do mar. Assim sendo, este trabalho de pesquisa objetiva investigar um conjunto representativo de quinze passarelas quanto aos níveis de conforto humano, sob a ação dinâmica de pedestres, segundo as metodologias propostas nos guias internacionais de projeto HIVOSS [Human induced vibration of steel structures] e SÉTRA [Footbridges: assessment of vibrational behaviour of footbridges under pedestrian loading]. Cabe ressaltar, com base nos resultados alcançados ao longo deste estudo, que inúmeras passarelas apresentaram problemas associados ao desconforto humano dos pedestres.*

Palavras-chave: *Passarelas de pedestres, Dinâmica Estrutural, Conforto humano.*

1 INTRODUÇÃO

Passarelas de pedestres, como o próprio nome já diz, são estruturas destinadas à travessia de pedestres, ação esta essencialmente dinâmica. Assim sendo, estruturas deste tipo com frequências naturais iguais ou próximas da frequência do passo humano têm, como consequência, um aumento considerável dos problemas associados à vibração excessiva (Mendes, 2014; Bachman, 1995; Murray, 2003).

É importante salientar que essa aproximação de frequências, naturais com as de excitação, tem ocorrido devido a passarelas cada vez mais leves e esbeltas, fruto do arrojo crescente deste tipo de projeto aliado ao avanço tecnológico na área de engenharia estrutural e ao uso de novos materiais.

Considerando-se os aspectos apresentados anteriormente, este trabalho de pesquisa tem como objetivo principal a investigação de um conjunto de quinze passarelas quanto ao conforto humano, considerando-se os efeitos da ação dinâmica dos pedestres segundo as metodologias propostas pelos guias internacionais de projeto HIVOSS (2008), Human induced vibration of steel structures, e o SÉTRA (2006), Footbridges: assessment of vibrational behaviour of footbridges under pedestrian loading.

Os sistemas estruturais analisados são variados podendo ser formados por vigas retas de alma cheia, celulares ou treliçadas, todos com lajes maciças. Quanto ao material utilizado, foram estudadas passarelas de sistemas são mistos (aço-concreto), em geral, e uma totalmente em concreto armado.

Além disso, é apresentado, adicionalmente, um caso especial de projeto, localizado na cidade do Rio de Janeiro e que ficou mundialmente conhecido no primeiro semestre do ano de 2016, às vésperas das Olimpíadas desse mesmo ano. Trata-se da ciclovia Tim Maia, uma estrutura a beira-mar, na qual um de seus trechos não resistiu ao impacto de uma onda e acabou vitimando fatalmente duas pessoas. Para análise de seu comportamento dinâmico, foi utilizado o programa computacional Ansys (2007) e, posteriormente, avaliada quanto ao conforto humano no que tange o tráfego de pedestres segundo as metodologias supracitadas.

Finalmente, com base nos resultados alcançados ao longo deste trabalho de pesquisa, pretende-se orientar os projetistas desse tipo de estrutura quanto às metodologias aqui abordadas, que são uma forma prática de se obter resultados sobre o comportamento dinâmico de passarelas e seu risco de ressonância quando submetidas ao caminhar humano, principalmente diante da ausência de regulamentos nacionais acerca deste tema.

2 GUIA DE PROJETO SÉTRA (SÉTRA, 2006)

Neste guia técnico, publicado em 2006 pelo órgão francês Sétra (SÉTRA, 2006), é apresentada uma prática metodologia de análise além de recomendações que orientam a respeito da consideração ou não dos efeitos resultantes da ação dinâmica do caminhar de pedestres, com base em um conceito de classificação em função do nível de tráfego e do nível de conforto desejado.

2.1 Definição da classe e do nível de conforto da passarela

As passarelas são divididas em Classes de I a IV, conforme a frequência e densidade do tráfego de pedestres, variando do máximo na primeira até o mínimo na última. Dispensa-se o

cálculo para verificação do comportamento dinâmico da passarela quando esta é enquadrada na Classe IV (SÉTRA, 2006).

O conceito de conforto é totalmente subjetivo, onde cada pedestre percebe de modo diferente um dado nível de aceleração. Além disso, o grau de relevância da estrutura influencia diretamente no que tange essa questão. A Figura 1 ilustra como este guia relaciona os intervalos de aceleração com os níveis de conforto, considerando a direção de vibração vertical.



Figura 1. Intervalos de aceleração para vibrações na direção vertical e horizontal longitudinal

São praticamente imperceptíveis ao usuário as acelerações sofridas pela estrutura quando no nível de conforto máximo. Já no nível médio, as acelerações são pouco perceptíveis e, no mínimo, perceptíveis.

2.2 Avaliação das frequências naturais

Após essa classificação inicial, deve-se avaliar o risco de ressonância, de acordo com as quatro faixas apresentadas pela guia, para as direções vertical e longitudinal ilustradas a seguir na Figura 2, na qual a faixa mínima representa a possibilidade de excitação pelo segundo harmônico.

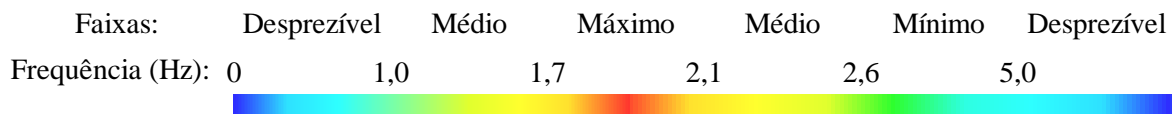


Figura 2. Faixas de frequências com riscos de ressonância para os modos de vibrações na vertical e horizontal longitudinal

Analogamente, a Figura 3 ilustra as quatro faixas de risco de ressonância para a direção transversal.

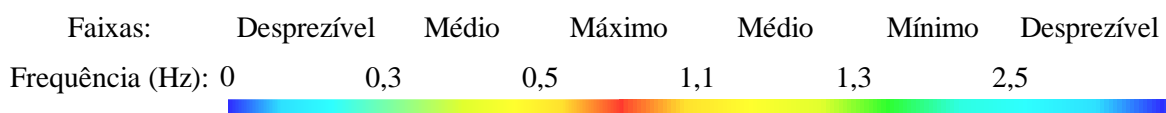


Figura 3. Faixas de frequências com riscos de ressonância para os modos de vibrações na transversal

Caso, a partir das frequências naturais da estrutura, o risco de ressonância seja classificado como desprezível, o nível de conforto é automaticamente considerado suficiente. É importante ressaltar que, apesar do risco ser considerado mínimo no intervalo entre 2,6 e 5,0Hz, estruturas com frequências naturais enquadradas no mesmo podem ser excitadas através segundo harmônico.

2.3 Cálculos para carregamentos dinâmicos

Segundo a direção de interesse (vertical, longitudinal ou transversal), o carregamento dinâmico F (N/m²) pode ser calculado pela Eq. (1), através da densidade de pedestres d (pedestres/m²), da componente P (N) da força devido a um pedestre isolado com frequência de passada f (Hz), a qual é ajustada para a frequência natural do referido modo de vibração, do

número de pedestres equivalente N_{eq} , do número de pedestres em trânsito n e do coeficiente de redução ψ .

$$F(t) = d P \cos(2\pi f t) (N_{eq}/n) \psi. \quad (1)$$

A componente P pode assumir três valores distintos, conforme a direção de interesse, sendo 280N para a direção vertical, 140N para a longitudinal e 35N para a transversal. O coeficiente de redução ψ leva em consideração o fato do risco de ressonância em uma passarela tornar-se menos provável na medida em que a frequência natural da estrutura se afasta do intervalo médio de frequência de passo dos pedestres.

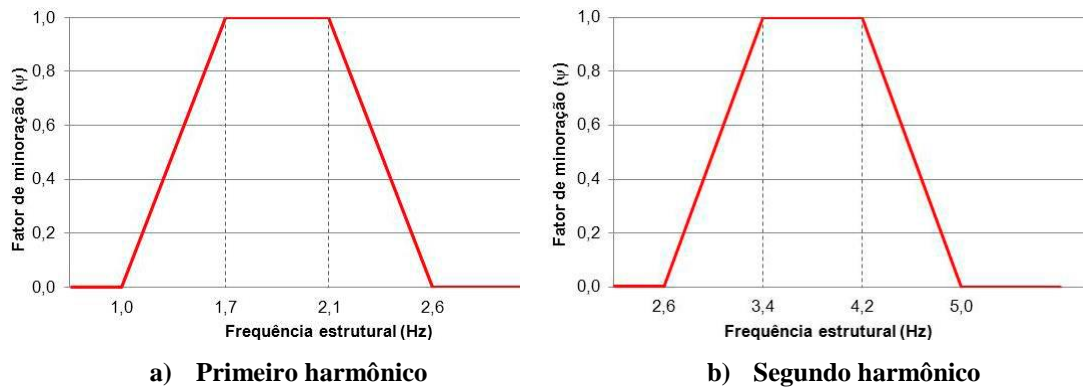


Figura 4. Coeficiente de redução ψ de vibrações na direção vertical ou longitudinal (Mendes, 2014)

2.4 Determinação da aceleração máxima

A partir daí, pode-se calcular o valor da aceleração em função do carregamento dinâmico F (N/m^2), do coeficiente de amortecimento estrutural ζ , da massa por área da estrutura, incluindo os pedestres, dada por ρA (kg/m^2), conforme demonstrado pela Eq. (2).

$$a = \frac{1}{2\zeta} \frac{4F}{\pi \rho A}. \quad (2)$$

3 GUIA DE PROJETO HIVOSS (HIVOSS, 2008)

Também no sentido de orientar o projetista, este guia técnico investigou a resposta dinâmica de várias passarelas submetidas à ação de pedestres através de medições e simulações numéricas. Tal trabalho resultou em recomendações que abrangem requisitos de projetos, níveis de conforto em termos de aceleração, modelos de carregamento para fluxos de pedestres, entre outros HIVOSS (2008).

Assim, caso uma passarela seja suscetível a vibrações que comprometam o conforto, o guia fornece informações adicionais concernentes a procedimentos de medição e metodologias para avaliação das propriedades dinâmicas, modificação de projeto e dispositivos de amortecimento HIVOSS (2008).

3.1 Avaliação das frequências naturais

A avaliação das frequências naturais pode ser realizada através de um modelo de elementos finitos, fórmulas analíticas ou métodos simplificados.

Deve-se levar em consideração a possibilidade do surgimento de discrepâncias entre os valores calculados, em termos de frequências naturais, e os obtidos experimentalmente da estrutura real provenientes das propriedades dos materiais, da complexidade da estrutura, do tipo de superfície do tabuleiro, das condições de contorno e dos guarda-corpos.

Vale ressaltar que o guia recomenda contabilizar a massa dos pedestres em circulação na passarela para o cálculo da frequência natural quando representar mais do que 5% da massa total da estrutura.

3.2 Verificação do intervalo de frequências críticas

Deve-se evitar que as frequências naturais da estrutura estejam presentes em um dos três intervalos de frequências críticas mostradas na Figura 5 e conforme a direção de interesse.

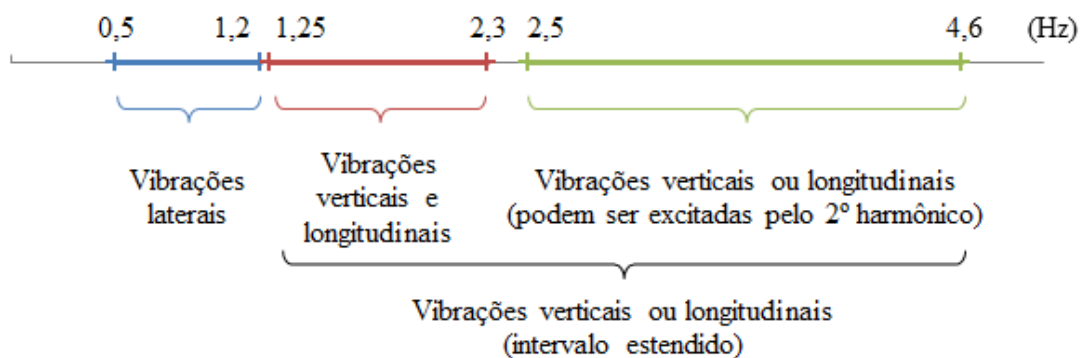


Figura 5. Intervalo de frequências críticas em Hz.

Passarelas com frequências naturais relativas a vibrações verticais ou longitudinais entre 2,5 e 4,6Hz podem ser excitadas em ressonância pelo 2º harmônico da ação de pedestres. Por isso, o guia recomenda aumentar o este intervalo para o trecho entre 1,25 e 4,6Hz.

3.3 Caracterização das situações de projeto

A seguir, na Figura 6, são mostradas as classes de tráfego e com as correspondentes densidades de pedestre sobre a superfície e, na Figura 7, são relacionados os intervalos de aceleração com os níveis de conforto, considerando a direção de vibração vertical.

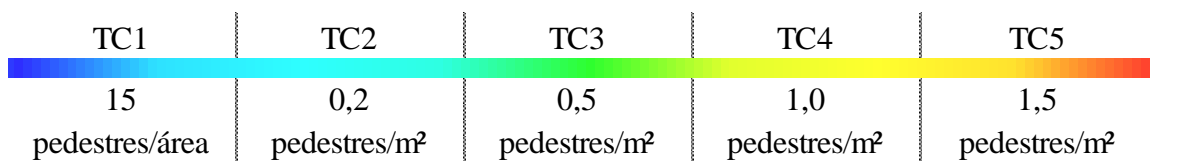


Figura 6. Classes de tráfego de pedestres e densidades



Figura 7. Intervalos de aceleração para vibrações na direção vertical e horizontal longitudinal

3.4 Caracterização do amortecimento estrutural

De acordo com o material utilizado para condições de serviço, são recomendados valores mínimos e médios dos parâmetros de amortecimento relacionados na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros de amortecimento

Tipo de construção	ξ_1 Mínimo	ξ_1 Médio
Concreto armado	0,8%	1,3%
Concreto protendido	0,5%	1,0%
Estrutura mista	0,3%	0,6%
Estrutura metálica	0,2%	0,4%
Estrutura de madeira	1,0%	1,5%
Stress-ribon	0,7%	1,0%

3.5 Determinação da aceleração máxima

Este guia recomenda, para o cálculo da aceleração máxima da passarela, o uso do método simplificado de 1 grau de liberdade, do método dos elementos finitos e do método dos espectros de resposta. Aos dois primeiros métodos, é necessária a aplicação de um modelo de carga harmônica constituído por um fluxo de n pedestres aleatórios em caminhada livre e, a partir deste, de um fluxo equivalente e ideal de n' pedestres perfeitamente sincronizados.

Através do método dos elementos finitos, o carregamento dinâmico do fluxo equivalente de pedestres, considerado uniformemente distribuído sobre toda a superfície S de tráfego de pedestres na passarela, é dado, em N/m^2 , pela Eq. (3):

$$P(t) = P \cos(2 \pi f_p t) n' \psi. \quad (3)$$

O coeficiente de redução ψ leva em consideração a probabilidade de f_p (Hz) se aproximar do intervalo crítico de frequências naturais em análise, conforme Figura 8.

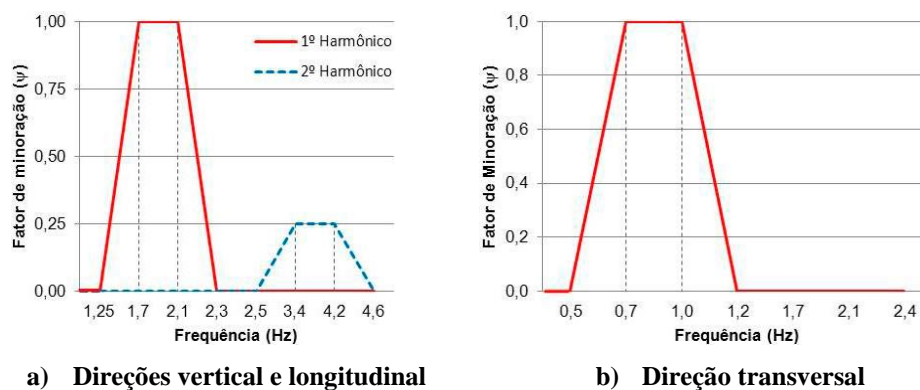


Figura 8. Coeficiente de redução ψ (Mendes, 2014)

O valor da componente P (N) da força devido a um pedestre isolado, com frequência de passada f_p assumida igual à frequência natural da passarela em análise, é função da direção do modo em análise. Para a direção vertical, assume o valor de 280N e, para as direções horizontais longitudinal e transversal, 140 e 35N, respectivamente.

A aceleração máxima da estrutura da passarela em ressonância e associada a uma ação dinâmica pode então ser calculada com base na idealização do método simplificado de 1 grau de liberdade para cada frequência natural da estrutura localizada no intervalo de frequências críticas. O cálculo é expresso pela Eq. (4) que relaciona os parâmetros de carga generalizada p^* (N), massa modal generalizada m^* (kg), decremento logarítmico δ e o coeficiente de amortecimento estrutural ζ .

$$a_{m\acute{a}x} = \frac{p^*}{m^*} \frac{\pi}{\delta} = \frac{p^*}{m^*} \frac{1}{2\zeta}. \quad (4)$$

4 PROGRAMA DE ANÁLISE DO CONFORTO EM PASSARELAS

Foi desenvolvido um programa computacional próprio, do tipo software aplicativo, para auxiliar o usuário no processamento de dados relativos à análise do conforto em passarelas submetidas à ação dinâmica de pedestres, segundo os guias técnicos HIVOSS (2008) e SÉTRA (2006), português e francês, respectivamente.

Análise do conforto em passarelas sob ação de pedestres segundo Hivoss (2008) e Sétra (2006)

Guia Técnico:
 HIVOSS
 SÉTRA

Modelo de carga
 $p(t) = P \cdot \cos(2\pi \cdot f_p \cdot t) \cdot n \cdot \psi$ [N/m²]

Aceleração
 $a = \frac{1}{2\zeta} \frac{p^*}{m^*}$

Classe de tráfego
 Classe pedestres/m²: 0,50 P/m²

Pedestres:
 número de pedestres = pedestres
 massa total = kg
 densidade linear = kg/m

Passarela + Pedestres:
 densidade linear = kg/m

Número equivalente de pedestres
 densidade $d < 1$ pedestre/m² $n' = \frac{10,8\sqrt{\zeta} \cdot n}{S} =$

Modo de vibração
 Frequência (Hz):
 Direção da vibração:
 Harmônico:
 Componente P (N):
 Coef. redução ψ :

Dados da passarela
 Largura da passarela B = m
 Comprimento da passarela vão L = m
 Área S = m²
 Massa de 1 pedestre m, pedestre = kg
 Densidade linear da passarela kg/m

Amortecimento
 ζ :
 Valor: médio
 Tipo de construção: Estrutura Metálica com ligações aparafusadas

Carga dinâmica
 $F(t) = P \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot t) \cdot n \cdot \psi$
 $F(t) = 280 \cdot \cos(2\pi \cdot 1,65 \cdot t) \cdot 0,155 \cdot 0,889$
 $F(t) = 38,577 \cdot \cos(2\pi \cdot 1,65 \cdot t)$
 $F_{m\acute{a}x} =$ N/m²

Aceleração
 $a = (1/2\zeta) \cdot (p^*/m^*)$
 $p^* = (2/n) \cdot F \cdot A = (2/n) \cdot 38,577 \cdot 97,13 = 2385,31$
 $m^* = (1/2) \cdot \mu \cdot L = (1/2) \cdot 1543,5 \cdot 38,85 = 29982,49$
 $a = (1/2 \cdot 0,04) \cdot (2385,31/29982,49)$
 $a =$ m/s² de conforto
 Intervalo m/s²

Figura 9. Visão geral do programa desenvolvido

O programa é dividido em oito partes principais e, através do preenchimento dessas etapas, o usuário pode, de forma simples, rápida e eficiente, analisar a classificação de uma dada passarela segundo os guias HIVOSS (2008) e SÉTRA (2006).

Na primeira etapa, o usuário seleciona o guia técnico sob o qual a análise será realizada e são exibidas simultaneamente as equações correspondentes ao modelo de carga dinâmica e à aceleração na estrutura.

Na etapa seguinte, devem ser informadas as características do modo de vibração em estudo, isto é, o valor da frequência, a direção da vibração e o harmônico correspondente. A

partir do fornecimento desses dados, os parâmetros componente P e coeficiente de redução ψ são calculados automaticamente. Além disso, também é exibido de forma gráfica o valor do coeficiente ψ em função da frequência (Hz).

Posteriormente, as medidas da superfície destinada à passagem de pedestres são informadas, bem como a massa unitária de pedestre considerada e a densidade linear da estrutura. O amortecimento seguido da classe de tráfego são os últimos parâmetros a serem informados.

A partir de todos os dados fornecidos e parâmetros calculados previamente, o número equivalente de pedestres é calculado, seguido da carga dinâmica e, por fim, da aceleração, bem como de sua classificação quanto ao conforto.

5 MODELOS ESTRUTURAIS INVESTIGADOS

O Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, PGECIV/FEN/UERJ, na área de concentração de Estruturas, ao longo de sua história, tem se aprofundado cada vez mais no estudo do comportamento dinâmico de estruturas de aço, concreto e mistas (aço-concreto) e, em razão disto, obtido conclusões importantíssimas diante da ausência de normas nacionais acerca desse tema de pesquisa.

Assim sendo, considerando-se o desenvolvimento deste trabalho, o PGECIV/FEN/UERJ representa uma vasta fonte pesquisa, no que concerne às tendências atuais da engenharia civil, principalmente, aquelas relacionadas ao projeto de estruturas. Desta forma, foram analisadas as dissertações de mestrado desenvolvidas no âmbito deste Programa de Pós-graduação, associadas ao estudo da resposta estrutural dinâmica de passarelas de pedestres. Como resultado, os autores apresentam a análise de conforto humano de 15 (Quinze) passarelas de pedestres, reais e existentes na cidade do Rio de Janeiro/RJ, Brasil.

5.1 Modelo estrutural I (Figueiredo, 2005)

Figueiredo (2005) investigou onze passarelas biapoiadas de sistema misto (aço-concreto), compostas por longarinas e transversinas de seção “I”, de comprimentos variáveis entre 10 e 35,0m, com incremento de 2,5m. Acerca do tema deste artigo, o modelo estrutural com 35,0m de vão se torna mais interessante pelo seu comportamento dinâmico e será aqui denominado de modelo ME-I.

Ao longo das laterais de uma laje maciça, em concreto armado, com 2,5m de largura por 0,10m de espessura, são dispostas as longarinas de perfil VS 1200x307. Já as transversinas, com seção I 203 x 27,3, são dispostas a cada 2,5m.

Em termos de características físicas dos materiais, o concreto utilizado na laje possui resistência característica à compressão superior a 30 Mpa e o aço dos perfis, tanto das longarinas quanto das transversinas, possui tensão de escoamento de 300 Mpa e módulo de elasticidade de 205GPa.

5.2 Modelos estruturais II, III, IV e V (Debona, 2011)

Debona (2011) investigou os resultados de quatro modelos numéricos desenvolvidos a partir de uma passarela de pedestres e, também, de ciclistas com sistema estrutural misto (aço-concreto) de 2,5 m de largura e 82,5 m de comprimento. A estrutura é apoiada em quatro pórticos e, portanto se divide em três vãos, além de dois balanços, um em cada extremidade.

No presente artigo, os modelos de Debona (2011) serão tratados como modelos ME-II, ME-III, ME-IV e ME-V. Basicamente, os modelos se diferem um do outro em termos da presença ou não de telhado e do tipo de modelagem das fundações. Nesse último, as fundações ora foram modeladas como simples engastes e ora com suas propriedades reais, isto é, blocos sobre estacas. A Tabela 2 mostra a diferença entre esses modelos.

Tabela 2. Diferença entre os modelos estruturais ME-II, ME-III, ME-IV

Modelo estrutural	Telhado	Fundações
ME-II	Não	Bases dos pilares engastadas
ME-III	Sim	Bases dos pilares engastadas
ME-IV	Não	Propriedades reais das fundações
ME-V	Sim	Propriedades reais das fundações

No que se refere às propriedades físicas dos materiais, o concreto utilizado possui resistência característica à compressão de 20 Mpa, módulo de elasticidade de 21,3 GPa, densidade de 2500 kg/m³ e coeficiente de Poisson de 0,2. Com relação ao aço, este possui módulo de elasticidade de 205 GPa, densidade de 7850 kg/m³ e coeficiente de Poisson de 0,3.

5.3 Modelos estruturais VI, VII e VIII (Feitosa, 2012)

Feitosa (2012) analisou a influência de longarinas constituídas por perfis metálicos alveolares em relação a perfis de alma cheia, além da variação do vão da passarela, no comportamento dinâmico de passarelas de pedestres biapoiadas, sem transversinas e de sistema misto (aço-concreto). Serão analisadas por este artigo três passarelas, sendo uma com longarinas de alma cheia e duas, de perfis alveolares, aqui denominadas por ME-VI, ME-VII e ME-VIII, respectivamente, todas com 30,0m de comprimento, conforme Tabela 3.

Tabela 3. Características das longarinas dos modelos ME-VI, ME-VII e ME-VIII

Modelo estrutural	Tipo de perfil	Perfil
ME-VI	Alma cheia	VS 1100x235
ME-VII	Alveolar com 15 furos (Ø 1160mm)	VS 1450x191
ME-VIII	Alveolar com 30 furos (Ø 826mm)	VS 1450x191

As longarinas são representadas por perfis soldados do tipo “VS”, com tensão de escoamento de 250 Mpa, tensão de ruptura por tração de 400 Mpa, módulo de elasticidade de 205GPa, módulo de elasticidade transversal de 78,85GPa e coeficiente de Poisson de 0,3.

Cada um dos três modelos possui uma laje de 2,5m de largura por 0,10m de espessura, em concreto armado com resistência característica à compressão igual ou maior a 30 Mpa,

módulo de elasticidade de 25GPa, 2500kg/m³ de massa específica e coeficiente de Poisson de 0,2.

5.4 Modelo estrutural IX (Souza, 2012)

Souza (2012) investigou o comportamento dinâmico de uma passarela de sistema misto (aço-concreto) em função da variação do vão. Para tal, o comprimento da passarela foi variado de 5,0 a 20,0m, com incremento de 1,0m, totalizando 16 modelos, todos com 3,5m de largura, constituídos por duas longarinas nas extremidades laterais e transversinas a cada 2,3m. Para este artigo, foi utilizada como modelo IX a passarela com comprimento de 20,0m por possuir frequências de vibração mais interessantes ao tema aqui tratado.

As longarinas e transversinas são perfis metálicos soldados, de seção “I”, aço ASTM A36 e com módulo de elasticidade igual a 205 GPa. As propriedades geométricas desses perfis são mostradas na Tabela 4

Tabela 4. Propriedades geométricas das longarinas e transversinas do ME-IX

Tipo do perfil	Altura do perfil (mm)	Largura da mesa (mm)	Espessuras das mesas (mm)	Espessura da alma (mm)
Longarina	700	300	25	8
Transversina	330	200	9,5	6,3

Em concreto armado, a laje foi construída com 0,10 m de espessura, resistência característica à compressão de 25 Mpa e módulo de elasticidade de 28 GPa. A concepção estrutural desse modelo considera a laje apoiada apenas nas transversinas.

5.5 Modelos estruturais X, XI e XII (Mendes, 2014)

O modelo estrutural X, investigado por Mendes (2014), é constituído por perfis metálicos laminados de aço ASTM A572, com resistência ao escoamento (f_y) de 345 MPa, enquanto que os modelos XII e XII possuem perfis de aço formados a frio de aço USIC-SAC 300, com resistência ao escoamento (f_y) de 300 MPa. Os aços desses três modelos possuem módulo de elasticidade (E) de 205 GPa, massa específica ρ de 7850 kg/m³ e coeficiente de Poisson (ν) de 0,3. O concreto das lajes é comum aos três modelos e possui resistência característica à compressão do concreto (f_{ck}) de 30 MPa, com módulo de elasticidade (E) de 26 GPa, massa específica (ρ) de 2500 kg/m³ e coeficiente de Poisson (ν) de 0,2.

O sistema estrutural é considerado misto (aço e concreto) com interação completa entre o piso e os elementos metálicos devido à presença de conectores metálicos dispostos na interface entre os materiais.

As estruturas metálicas dos três modelos são do tipo simplesmente apoiadas e apresentam ligações do tipo soldadas, constituídas por duas treliças cada, com comprimento e altura relacionados pela Tabela 5. Em relação à laje de concreto armado, os três modelos possuem piso com 2,0m de largura e 0,1m de espessura.

Tabela 5. Características geométricas das treliças dos modelos ME-X, ME-XI e ME-XII

Modelo estrutural	Comprimento (m)	Altura (m)
ME-X	32	2,5
ME-XI	36	2,55
ME-XII	27,2	1,4

5.6 Modelos estruturais XIII e XIV (Peña, 2015)

Com relação ao modelo estrutural XIII, Peña (2015) investigou uma passarela treliçada, com sistema misto (aço-concreto), constituída por 12 módulos metálicos, de comprimentos variáveis, subdivididos em segmentos menores chamados de aduelas com 6,0 m de comprimento e 4,0m de largura. Neste artigo, serão analisados os módulos 8, 9 e 10 que, com comprimentos de 24,0 m cada, constituem um único vão de 72,0 m, com comportamento dinâmico interessante ao tema aqui abordado.

A passarela possui duas treliças travadas nos planos inferior e superior por transversinas e contraventamentos em “X”. Entre os banzos inferiores, na projeção do eixo longitudinal da passarela, há ainda um elemento denominado de viga de piso ligando as transversinas aos elementos de contraventamento. Os perfis metálicos utilizados nesse modelo são de aço MR-250, com $f_y = 250$ Mpa, módulo de elasticidade (E) de 205GPa, coeficiente de Poisson (ν) de 0,3 e massa específica (ρ) de 7850 kg/m³. A relação dos mesmos pode ser vista na Tabela 6.

Tabela 6. Perfis metálicos utilizado no modelo ME-XIII

Elemento	Perfil		
	Trecho 8	Trecho 9	Trecho 10
Banzo superior	CS 400 x 209	CS 450 x 216	CS 400 x 155
Banzo inferior	CS 400 x 146	CS 400 x 165	CS 350 x 216
Diagonal	CS 300 x 76	CS 250 x 43	CS 300 x 102
Montante	CS 250 x 76	CS 250 x 66	CS 350 x 128
Viga de piso		CS 200 x 61	
Transversinas e Contraventamentos		CS 150 x 25	

A laje de piso foi concebida em steel deck de aço especial galvanizado ASTM A653 de grau 40, espessura de 10cm de concreto com f_{ck} maior ou igual a 20 Mpa, módulo de elasticidade (E) de 30GPa, coeficiente de Poisson (ν) de 0,2 e massa específica (ρ) de 2500kg/m³.

O modelo estrutural ME-XIV estudado por Peña (2015) se refere a uma passarela totalmente em concreto armado, com um único vão biapoiado de 18,4m de comprimento. A concepção estrutural desse modelo possui uma laje de 2,0m de largura apoiada em duas longarinas espaçadas de 110cm (distância entre suas faces internas) que, por sua vez, são enrijecidas por três transversinas equidistantes. Ressalta-se que em função da diferença entre a largura da laje e o espaçamento das longarinas, contabilizando suas larguras, tem-se um balanço lateral de 20 cm em ambos os lados da passarela.

Tabela 7. Perfis metálicos utilizado no modelo ME-XIV

Vigas	Largura (cm)	Altura (cm)
Longarinas	25	80
Transversinas	25	40

5.7 Modelos estrutural XV (Duarte, 2016)

O modelo estrutural XV, estudado por Duarte (2016), é de uma passarela de sistema misto (aço-concreto) com três vãos biapoiados, constituída por duas treliças ligadas entre si por transversinas e contraventamentos do tipo “X” em seus banzos inferiores e superiores. O vão central, objeto do referido estudo, possui 68,6m, divididos em 28 módulos com 2,55m de largura, 2,60m de altura e simétricos em relação ao meio do vão.

Os perfis metálicos são tubulares com costura, de seção retangular e obtidos a partir de chapas dobradas de aço USI-SAC 300. Esse material possui limite de escoamento (f_y) de 300 Mpa, módulo de elasticidade (E) de 205 GPa, coeficiente de Poisson (ν) de 0,3 e massa específica (ρ) de 7850 kg/m³. O contraventamento em “X” é feito por barras de 19 mm (3/4”) de diâmetro. As peças da laje são de concreto armado pré-moldado com resistência característica à compressão (f_{ck}) de 20 Mpa, módulo de elasticidade (E) de 21,3 GPa, coeficiente de Poisson (ν) de 0,2 e massa específica (ρ) de 2500 kg/m³.

6 ANÁLISE DO CONFORTO HUMANO DAS PASSARELAS

Segundo os guias técnicos HIVOSS (2008) e SÉTRA (2006), abordados nos itens 2 e 3 respectivamente, será realizada, neste item, a análise do conforto humano das quinze passarelas anteriormente descritas no item 5. O processamento dos dados dos modelos estruturais investigados e a análise de seus resultados serão feitos por meio do programa desenvolvido e descrito no item 4

Analisando-se os valores das frequências naturais de vibração na direção vertical de cada um dos quinze modelos estruturais investigados, verifica-se que boa parte destes modelos se enquadra em faixas onde o risco de ressonância é considerado pequeno, de acordo com os guias de projeto HIVOSS (2008) e SÉTRA (2006).

Na Tabela 8, é possível comprovar matematicamente essa questão, onde se verifica que os valores dos coeficientes de redução da ação dinâmica, ψ , calculados a partir das frequências naturais das passarelas em estudo, são nulos. Assim sendo, com exceção dos modelos estruturais ME-IX, ME-XIV e ME-XV, ficam dispensadas as análises de conforto

para os demais modelos, conforme orientações dos guias de projeto HIVOSS (2008) e SÉTRA (2006).

Tabela 8. Correlação entre frequências naturais e ψ por modelo estrutural

Modelos estruturais	Modo de flexão do tabuleiro na direção vertical					
	1º harmônico			2º harmônico		
	Frequência (Hz)	ψ HIVOSS	ψ SÉTRA	Frequência (Hz)	ψ HIVOSS	ψ SÉTRA
ME-I	3,55	0	0	11,53	0	0
ME-II	4,16	0	0	16,99	0	0
ME-III	4,17	0	0	18,82	0	0
ME-IV	5,39	0	0	13,54	0	0
ME-V	5,41	0	0	16,82	0	0
ME-VI	5,20	0	0	11,53	0	0
ME-VII	5,59	0	0	13,34	0	0
ME-VIII	4,92	0	0	12,51	0	0
ME-IX	2,34	0	0,52	9,19	0	0
ME-X	4,30	0	0	14,03	0	0
ME-XI	4,04	0	0	10,94	0	0
ME-XII	4,83	0	0	13,40	0	0
ME-XIII	3,71	0	0	10,36	0	0
ME-XIV	2,09	1	1	4,96	0	0,05
ME-XV	1,94	1	1	4,67	0	0,41

É importante ressaltar que, são nulos para os coeficientes ψ , segundo o guia HIVOSS (2008), para o primeiro e segundo harmônico do modelo estrutural ME-IX e para o segundo harmônico apenas dos modelos ME-XIV e ME-XV. Em relação ao guia SÉTRA (2006), somente para o segundo harmônico do modelo ME-IX tal coeficiente é nulo. Portanto, as análises de conforto dos cinco casos citados anteriormente fornecerão acelerações nulas, o que significa dispensa de tal análise pelo desprezível risco de ressonância ou ainda, nível de conforto máximo.

Os resultados de aceleração e de nível de conforto, para cada uma das cinco classes de tráfego do guia HIVOSS (2008), tanto para o primeiro quanto para o segundo harmônico de

vibração dos modelos estruturais ME-IX, ME-XIV e ME-XV são apresentados a seguir na Tabela 9.

Tabela 9. Resultados de aceleração e nível de conforto para o 1º e 2º harmônicos por classe de tráfego, segundo o guia HIVOSS (2008)

Modelo estrutural	Classe de tráfego	1º harmônico		2º harmônico	
		Aceleração (m/s ²)	Nível de conforto	Aceleração (m/s ²)	Nível de conforto
ME-IX	TC1	0	Máximo	0	Máximo
	TC2	0	Máximo	0	Máximo
	TC3	0	Máximo	0	Máximo
	TC4	0	Máximo	0	Máximo
	TC5	0	Máximo	0	Máximo
ME-XIV	TC1	0,59	Médio	0	Máximo
	TC2	1,13	Mínimo	0	Máximo
	TC3	1,73	Mínimo	0	Máximo
	TC4	5,10	Inaceitável	0	Máximo
	TC5	5,98	Inaceitável	0	Máximo
ME-XV	TC1	1,60	Mínimo	0	Máximo
	TC2	2,39	Mínimo	0	Máximo
	TC3	3,57	Inaceitável	0	Máximo
	TC4	10,19	Inaceitável	0	Máximo
	TC5	11,50	Inaceitável	0	Máximo

Como, para a quarta classe de tráfego do guia SÉTRA (2008), fica dispensada a análise do conforto, os resultados de aceleração e de nível de conforto, apenas para as três primeiras classes de tráfego de tal guia, tanto para o primeiro quanto para o segundo harmônico de vibração dos modelos estruturais ME-IX, ME-XIV e ME-XV são apresentados na Tabela 10, mostrada a seguir.

Tabela 10. Resultados de aceleração e nível de conforto para o 1º e 2º harmônicos por classe de tráfego, segundo o guia SÉTRA (2006)

Modelo estrutural	Classe de tráfego	1º harmônico		2º harmônico	
		Aceleração (m/s ²)	Nível de conforto	Aceleração (m/s ²)	Nível de conforto
ME-IX	Classe I	7,84	Inaceitável	0	Máximo
	Classe II	3,28	Inaceitável	0	Máximo
	Classe III	2,73	Inaceitável	0	Máximo
ME-XIV	Classe I	5,10	Inaceitável	0,26	Médio
	Classe II	2,11	Mínimo	0,11	Máximo
	Classe III	1,73	Mínimo	0,09	Máximo
ME-XV	Classe I	10,19	Inaceitável	4,21	Inaceitável
	Classe II	4,27	Inaceitável	1,76	Inaceitável
	Classe III	3,57	Inaceitável	1,47	Inaceitável

7 CASO ESPECIAL DE PROJETO

Novamente, considerando-se a avaliação de conforto humano de passarelas submetidas ao caminhar de pedestres, será apresentada neste item, em caráter adicional e como caso especial de projeto, a Ciclovia Tim Maia, localizada na cidade do Rio de Janeiro.

Recentemente, o colapso estrutural da Ciclovia Tim Maia marcou negativamente a cidade do Rio de Janeiro, às vésperas das Olimpíadas de 2016, e tornou este sistema estrutural mundialmente conhecido. O modelo estrutural em questão consiste em uma estrutura a beira-mar, com cerca de 4 km de extensão, conectando os bairros do Leblon e São Conrado, concebido para propiciar momentos de lazer e admiração da paisagem costeira da cidade entrou para a história após um trecho de comprimento da ordem de 18,0m, ter colapsado devido ao impacto dinâmico das ondas do mar.

Os autores deste artigo têm plena consciência de que o evento ocorrido com a ciclovia não teve relação com possíveis problemas de conforto associados ao caminhar humano. Porém, em virtude de sua popularidade, este sistema estrutural será investigado e submetido à análise do conforto humano, segundo os guias de projeto HIVOSS (2008) e SÉTRA (2006), devido ao carregamento dinâmico proveniente exclusivamente do caminhar de pedestres.

O trecho da estrutura em questão é representado por uma viga biapoiada, em concreto armado, com, aproximadamente, 18,0m de extensão e seção transversal em “T”, com 2,5 m de largura de mesa (tabuleiro). A seguir, a Figura 10 ilustra a seção transversal da estrutura.

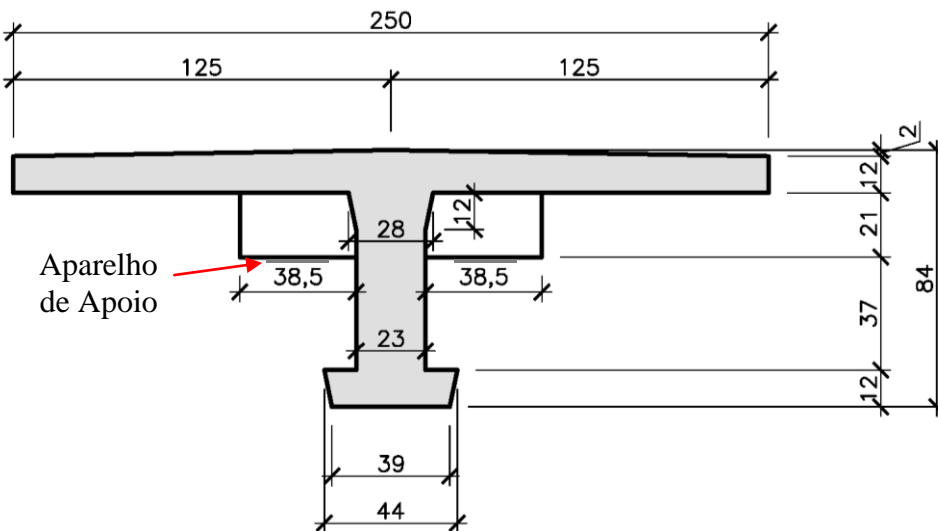


Figura 10. Seção transversal da ciclovia Tim Maia com medidas em centímetros

No âmbito deste trabalho de pesquisa foi desenvolvido um modelo numérico-computacional representativo da estrutura, com base no emprego de elementos finitos sólidos, a partir do emprego do programa computacional ANSYS (2007). Na Figura 11, são apresentadas a vista isométrica e a seção transversal da estrutura em questão.

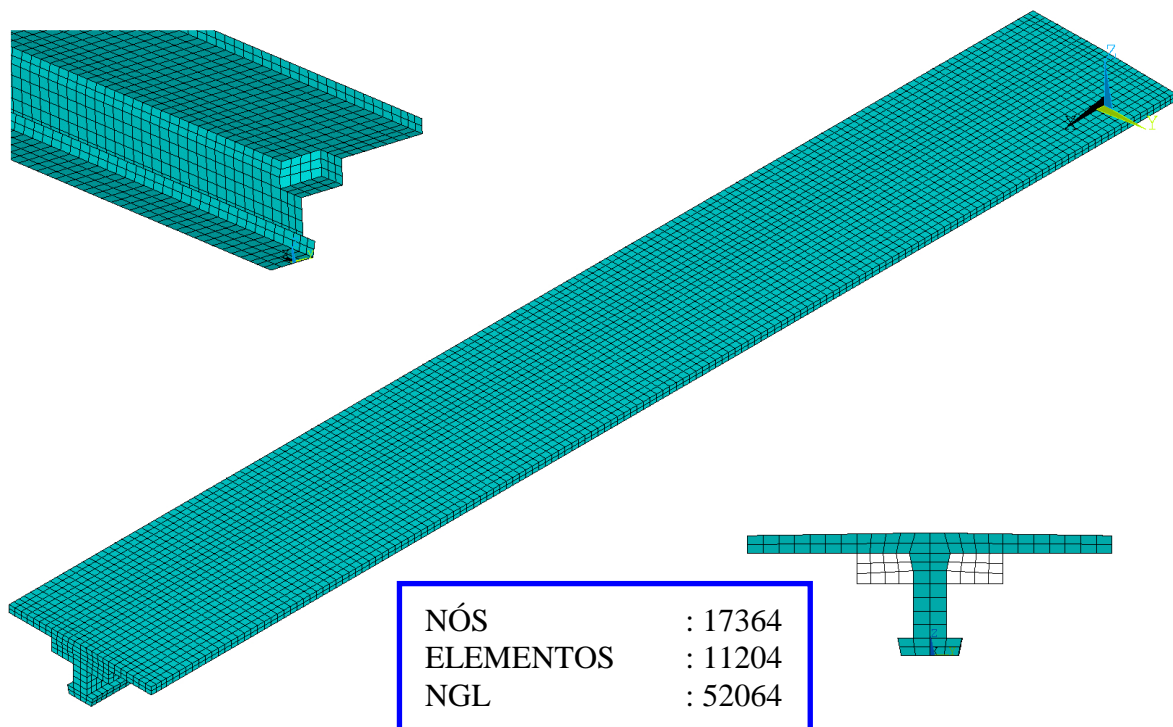


Figura 11. Isométrico (central), seção transversal e detalhe dos apoios do modelo em elementos finitos

Inicialmente, foi realizada uma análise modal da ciclovia para a obtenção dos valores das frequências naturais (autovalores) e dos modos de vibração (autovetores) da estrutura através do programa computacional ANSYS (2007), verificando-se as características dinâmicas de massa e rigidez do modelo conduzem a valores de frequências próximas ao intervalo de ressonância descrito pelos guias HIVOSS (2008) e SÉTRA (2006). A Figura 12 apresenta os modos de vibração de flexão na direção vertical e os valores das frequências naturais.

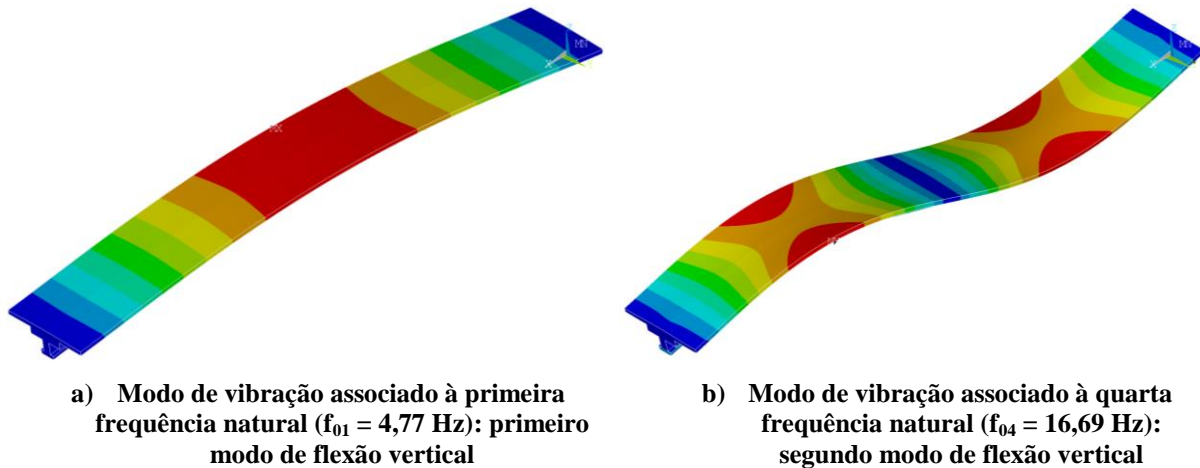


Figura 12. Modos de vibração da ciclovia Tim Maia

Além disso, foi realizada uma análise harmônica, através da aplicação de uma carga senoidal no centro do piso da estrutura, objetivando-se identificar os modos de vibração com os maiores níveis de transferência de energia relacionados à resposta dinâmica da estrutura da ciclovia, isto é, os modos que transferem mais energia no sistema estrutural quando sujeito a uma sollicitação dinâmica de natureza harmônica.

Por meio dos resultados da resposta dinâmica da estrutura em termos de espectro de frequência dos deslocamentos nodais, pode-se obter o fator de amplificação dinâmica (FAD), através do quociente entre o deslocamento dinâmico e o deslocamento estático. Na Figura 13, é apresentado o gráfico do FAD em função do parâmetro de frequência, β , representativo do quociente entre a frequência de excitação, ω , e a frequência fundamental, ω_0 , da estrutura.

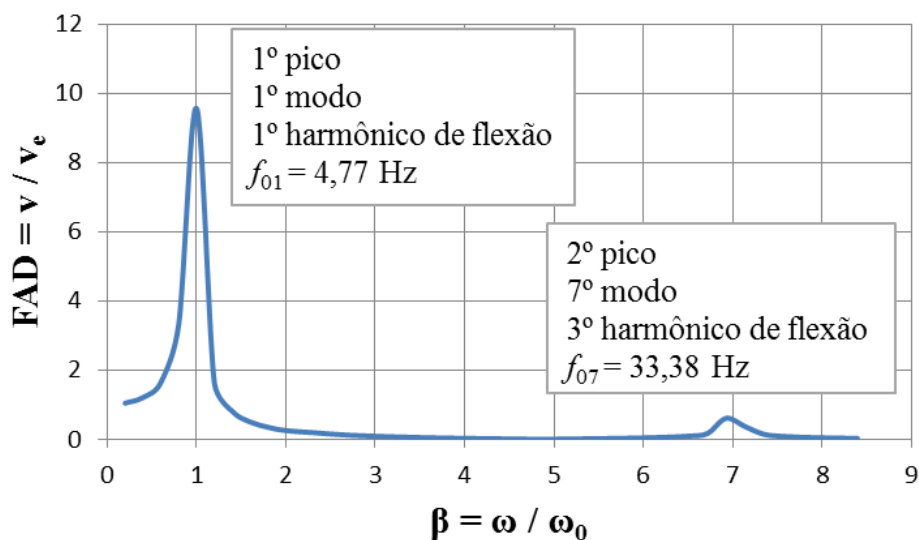


Figura 13. Fator de amplificação dinâmica, FAD, em função do parâmetro de frequência, β

Observa-se que o modo de vibração predominante consiste no modo fundamental ($f_{01} = 4,77$ Hz). Entretanto, observando-se os intervalos de frequências propostos pelos guias de projeto HIVOSS (2008) e SÉTRA (2006), verifica-se que a ciclovia possui um risco de ressonância pequeno, no que se refere ao primeiro e segundo harmônicos; e, portanto, fica dispensada sua análise quanto ao conforto humano.

8 CONCLUSÕES

Este trabalho de pesquisa avaliou os níveis de conforto humano de uma série de passarelas de pedestres submetidas à ação dinâmica do caminhar humano, considerando-se para tal, sistemas estruturais de concreto armado e mistos (aço-concreto). Desta maneira, foram consideradas ao longo do estudo as metodologias propostas pelos guias internacionais simplificados de projeto HIVOS (2008) e SÉTRA (2006) e um programa computacional foi desenvolvido pelos autores para dar respaldo às análises durante o desenvolvimento da pesquisa.

Os guias de projeto HIVOS (2008) e SÉTRA (2006) se baseiam em intervalos de frequências naturais onde existem riscos de ressonância entre as frequências da excitação (caminhar dos pedestres) e das passarelas. Os limites superior e inferior desses intervalos variam de um guia de projeto para o outro e, portanto, dependendo do valor da frequência natural em análise, esperam-se resultados distintos no que se refere ao valor de aceleração e classificação de conforto para cada um dos guias.

Foi identificada certa correlação entre os resultados obtidos para os três modelos estruturais que apresentaram maiores problemas em relação ao conforto humano (ME-IX, ME-XIV e ME-XV), quando analisados pelos diferentes guias de projeto. Exceção se faz, diante do exposto no parágrafo anterior, ao primeiro harmônico do modelo ME-IX e ao segundo harmônico do modelo ME-XV.

No primeiro caso, primeiro harmônico do ME-IX, a frequência natural no valor de 2,34Hz ficou fora dos intervalos com risco de ressonância do guia HIVOSS (2008) e, portanto, com nível de conforto máximo. Por outro lado, para o guia SÉTRA (2006), para a mesma frequência (ou modo de vibração), o nível de conforto dessa passarela foi considerado como inaceitável. Para este modelo estrutural, essa situação ocorre igualmente para todas as classes de tráfego.

Analogamente, no segundo caso, o segundo harmônico do ME-XV com uma frequência natural de 4,67 Hz, apresenta um nível de conforto máximo em função do risco de ressonância muito pequeno, quando analisado pelo guia HIVOSS (2008). De outra forma, para o guia SÉTRA (2006), a mesma estrutura é classificada como inaceitável no que se refere ao nível de conforto. Para este modelo estrutural, tal fato ocorre para qualquer classe de tráfego de qualquer um dos guias.

Assim sendo, os resultados alcançados demonstram que, apesar das diferenças já esperadas, os dois guias simplificados de projeto HIVOS (2008) e SÉTRA (2006) orientam os projetistas de forma simples e eficiente, no que tane ao comportamento dinâmico de passarelas de pedestres, quando submetidas à ação dinâmica proveniente do caminhar humano, principalmente levando-se em conta a ausência de normas nacionais acerca deste tema. Portanto, visando evitar problemas com altos níveis de vibrações, abrangendo situações desde o desconforto do usuário até o risco à segurança estrutural, o uso desses guias simplificados de projeto é recomendável pelos autores na prática corrente de projeto.

Finalmente, os autores gostariam de ressaltar que em seu trabalho de pesquisa, Bachmann et al (1995) destaca uma situação de projeto associada a uma passarela de pedestres com frequência fundamental de 8,0Hz a qual exibia ressonância para uma frequência de passo de pedestre de 3,7Hz. Este fenômeno se deve ao fato de que o terceiro harmônico da função de carregamento dinâmico, na frequência de $3 \times 3,7\text{Hz} = 11,1\text{Hz}$ excitava a segunda frequência natural da estrutura que se apresentava exatamente em 11,1Hz.

Ou seja, nem sempre os guias simplificados de projeto cobrem todas as situações associadas à interação dinâmica existente entre os harmônicos da excitação oriunda dos pedestres e as frequências naturais das passarelas. Desta maneira, estruturas especiais, tal como a ciclovia Tim Maia, devem ser convenientemente investigadas não apenas com base na adoção de análises expeditas realizadas a partir do uso de guias de projeto. Desta maneira, os autores gostariam de concluir recomendando e ressaltando a relevância da análise dinâmica de passarelas, mediante o emprego de modelos numéricos mais sofisticados, como por exemplo, modelos biodinâmicos, além, evidentemente, do emprego da monitoração experimental dinâmica deste tipo de estrutura.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao suporte financeiro fornecido pelas Agências de Fomento à Pesquisa do país, CAPES, CNPq e FAPERJ, que possibilitaram a realização deste trabalho de pesquisa.

REFERÊNCIAS

- ANSYS Swanson Analysis Systems, Inc., P. O. Box 65, Johnson Road, Houston, PA, 15342-0065. Release 11.0, SP1 UP20070830, ANSYS, Inc. is a UL registered ISO 9001:2000 Company. Products ANSYS Academic Research, 2007.
- Bachmann H., W.J Ammann, F. Deischi, J. Eisenmann, J. Floegl, G.H. Hirsch, et al., 1995. *Vibrations in structures induced by man and machines*. Basel (Switzerland):Institut für Baustatik und Konstruktion, Birkhäuser.
- Debona, G.L., 2011. *Modelagem do comportamento dinâmico de passarelas tubulares em aço e mistas (aço-concreto)*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, PGECIV, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ, Rio de Janeiro/RJ, Brasil.
- Duarte, I.F.B., 2016. *Análise de vibrações e avaliação de conforto humano sobre passarelas de pedestres mistas (aço-concreto) com base no emprego de modelos biodinâmicos*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, PGECIV, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ, Rio de Janeiro/RJ, Brasil.
- Ellis, B.R, 2000. On the response of long-span floors to walking loads generated by individuals and crowds. *The Structural Engineer*, 78: 17-25.
- Feitosa, F.F., 2012. *Análise dinâmica de passarelas de pedestres mistas (aço-concreto) com aberturas na alma de vigas de aço*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, PGECIV, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ, Rio de Janeiro/RJ, Brasil.
- Figueiredo, F.P., 2005. *Estudo do comportamento dinâmico de passarelas devido ao caminhar de pedestres*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, PGECIV, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ, Rio de Janeiro/RJ, Brasil.
- HIVOSS Human Induced Vibration of Steel Structures, 2008. *Design of Footbridges Guideline*. Research Fund for Coal and Steel.
- Lima, N.L. de A, 2007. *Efeito da modelagem do carregamento, do impacto do calcanhar humano e do amortecimento estrutural na resposta dinâmica de passarelas mistas*.

Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, PGECIV, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ, Rio de Janeiro, Brasil.

Mendes, J.P., 2014. *Análise dinâmica e controle de vibrações de passarelas de pedestres submetidas ao caminhar humano*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, PGECIV, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ, Rio de Janeiro/RJ, Brasil.

Murray, T.M., Allen, D.E., Ungar, E.E, 2003. *Floor vibrations due to human activity, Steel Design Guide Series*. American Institute of Steel Construction, AISC, Chicago, USA.

Peña, W.D.L., 2015. *Modelagem do caminhar humano e avaliação do conforto humano de passarelas de pedestres*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, PGECIV, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ, Rio de Janeiro/RJ, Brasil.

SÉTRA Footbridge, 2006. *Assessment of Vibrational Behaviour of Footbridge Under Pedestrian Loading, Technical guide*. Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes, Paris, França.

Souza, J.M.S., 2012. *Análise da resposta dinâmica de passarelas de pedestres considerando-se uma modelagem probabilística do caminhar humano*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, PGECIV, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ, Rio de Janeiro/RJ, Brasil.

Zúñiga, J. E. V, 2011. *Análise da resposta dinâmica experimental de uma passarela tubular mista, aço-concreto, submetida ao caminhar humano*, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, PGECIV, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ, Rio de Janeiro, Brasil.