

DESEMPENHO DINÂMICO DE PASSARELAS DE MADEIRA SIMPLEMENTE APOIADAS COM DUAS E QUATRO VIGAS

Pedro Gutemberg de Alcântara Segundinho¹ & Antonio Alves Dias²

Resumo

Nos últimos anos tem ocorrido um aumento significativo de problemas relacionados às vibrações excessivas nas passarelas, devido aos movimentos dos pedestres, como caminhada, corrida etc.. Consequentemente, a norma brasileira para projeto de estruturas de madeira NBR 7190 (1997) necessita se adequar, prevendo a introdução de carregamentos dinâmicos que possam ocasionar ressonância. As passarelas de madeira avaliadas neste trabalho apresentavam vãos de 5 a 35 m, larguras de 150 e 200 cm, classes de resistência da madeira C40 e C60 e foram projetadas com duas e quatro vigas de madeira. A partir da avaliação dos resultados teóricos e numéricos obtidos no estudo paramétrico, concluiu-se que as passarelas de madeira simplesmente apoiadas com duas e quatro vigas, calculadas por meio da NBR 7190 (1997), podem ser desconfortantes para os usuários.

Palavras-chave: Passarelas de madeira. Vibrações induzidas por pedestres. Carregamentos dinâmicos.

DYNAMIC PERFORMANCE OF TIMBER FOOTBRIDGES SIMPLY-SUPPORTED WITH TWO AND FOUR BEAMS

Abstract

In recent years there has been a significant increase in problems related to excessive vibrations on footbridges due to pedestrian movement such as walking, running etc.. Thus the Brazilian code NBR 7190 (1997) for the design of timber structures need to adapt to such dynamic loads that can cause resonance. The timber footbridges evaluated in this study had span from 5 to 35 m, widths of 150 and 200 cm, C40 and C60 timber strength classes, and were designed with two and four beams of timber. From the evaluation of theoretical and numerical results obtained in the parametric study, it was found that the timber footbridges simply-supported with two and four beams, calculated by the Brazilian code NBR 7190 (1997), may be uncomfortable for users.

Keywords: Timber footbridges. Pedestrian-induced vibrations. Dynamic loads.

1 INTRODUÇÃO

A estimativa das frequências naturais e das acelerações permite antever a natureza das vibrações excessivas e, conseqüentemente, avaliar o nível de conforto humano. À medida que as passarelas se tornaram mais esbeltas e leves, em decorrência do avanço tecnológico tanto em materiais como em projeto estrutural, as verificações das condições de utilização passaram a ser cada vez mais importantes. Em geral, o problema decorrente das vibrações excessivas em passarelas é,

¹ Doutor em Engenharia de Estruturas - EESC-USP, p_gutemberg2001@yahoo.com.br

² Professor do Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC-USP, dias@sc.usp.br

principalmente, o desconforto causado ao usuário e também o seu receio em relação à segurança da estrutura, o que pode causar uma subutilização da passarela.

As pesquisas a respeito das vibrações excessivas em passarelas já ocorrem há algum tempo. Nos últimos anos, os casos de vibrações excessivas passaram a ter maior divulgação, tornando alguns deles famosos pelo mundo como, por exemplo, o caso da Millenium Footbridge, Londres, UK. Como consequências desses problemas, os pesquisadores começaram a se dedicar cada vez mais em resolver os problemas de conforto humano em passarelas.

O trabalho foi desenvolvido por meio de revisão bibliográfica a textos normativos e estudos de diversos autores; da avaliação das vibrações em passarelas dimensionadas para carregamentos estáticos, de acordo com a NBR 7190 (1997); da análise numérica utilizando o método dos elementos finitos, com o programa de análise estrutural SAP2000® versão 10.0.7. As passarelas de madeira avaliadas neste trabalho apresentavam vãos de 5 a 35 m, largas de 150 e 200 cm, classes de resistência da madeira C40 e C60 e foram projetadas com duas e quatro vigas de madeira. A partir da avaliação dos resultados teóricos e numéricos obtidos no estudo paramétrico, concluiu-se que as passarelas de madeira simplesmente apoiadas com duas e quatro vigas, calculadas por meio da NBR 7190 (1997), podem apresentar vibrações excessivas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Segundo a norma ISO 2631-2 (1989) (*International Organization for Standardization*), a percepção humana de vibrações excessivas depende muito das circunstâncias em que ocorrem: posição e atividade da pessoa, direção de incidência da vibração em relação à espinha dorsal, faixa de frequência, tempo de exposição e da expectativa que se tem em relação à vibração.

Segundo Pimentel e Fernandes (2002), as formulações atuais são, em sua maioria, aplicáveis às passarelas de sistema estrutural que podem ser modeladas como vigas retas simplesmente apoiadas. Esta modelagem simplifica o problema, pois permite incorporar os modos de vibrar da estrutura à análise, já que há expressões analíticas para os mesmos. Por outro lado, as formulações simplificadas não se aplicam às passarelas de sistemas estruturais estaiado ou pênsil, nas quais a interação entre os efeitos do esforço normal e flexão produz alterações nas formas de vibrar da estrutura.

Estes autores também relatam que os limites de frequências e acelerações podem ser aplicados em qualquer tipo de passarela. Entretanto, não são fáceis de serem aplicados rotineiramente, em termos de projeto, já que requerem a disponibilidade de um programa de computador que suporte a aplicação de cargas móveis variáveis deslocando-se ao longo do tempo na estrutura. Neste sentido, várias formulações simplificadas foram propostas e aplicadas em passarelas de sistema estrutural em vigas retas simplesmente apoiadas.

O cálculo das frequências naturais em passarelas simplesmente apoiadas pode ser feito a partir das expressões analíticas que determinam as frequências naturais em vigas simplesmente apoiadas, que são originadas das formulações de Euler-Bernoulli para vigas. Dentre as normas estrangeiras, aquela que atualmente aborda o cálculo das frequências naturais em passarelas de madeira simplesmente apoiadas, levando-se em conta essa formulação para vigas simplesmente apoiadas, tem-se a norma europeia Eurocode 5 - Parte 2 (1995) e sua versão para avaliação Eurocode 5 - Parte 2 (2004).

Como exemplo de códigos internacionais utilizados para obter as acelerações teóricas em passarelas, têm-se: BS 5400 (1978), SIA 160 (1989), OHBDC (1991), CEB (1993), Eurocode 5 (1995), AASHTO (1997), Eurocode 5 (2004), Bro (2004) e ISO 10137 (2005), e as formulações sugeridas por Rainer *et al.* (1988), Grundmann *et al.* (1993), Pimentel e Fernandes (2002). Comparações entre os critérios de vibrações nas direções transversal vertical e transversal horizontal são apresentadas nas

Figuras 1 e 2, respectivamente. As acelerações em RMS da ISO 10137 (2005) foram convertidos para grandeza similar aos demais critérios normativos, multiplicando pelos fatores $\sqrt{2}$ e 60.

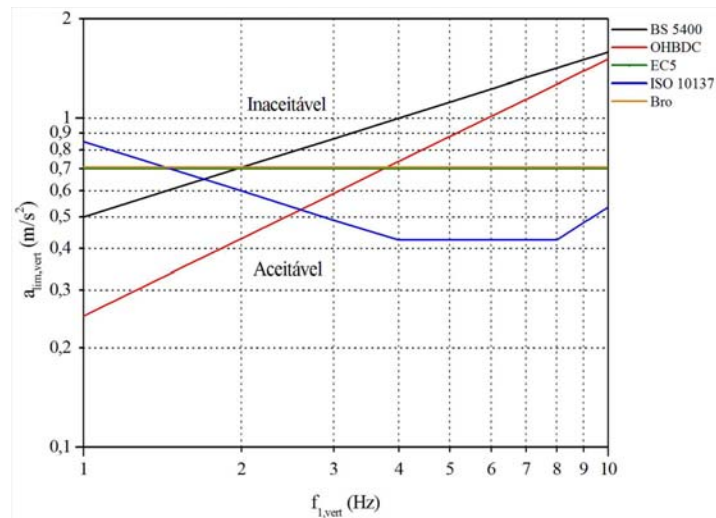


Figura 1 – Comparativo entre critérios normativos para aceitação de vibração na direção transversal vertical.

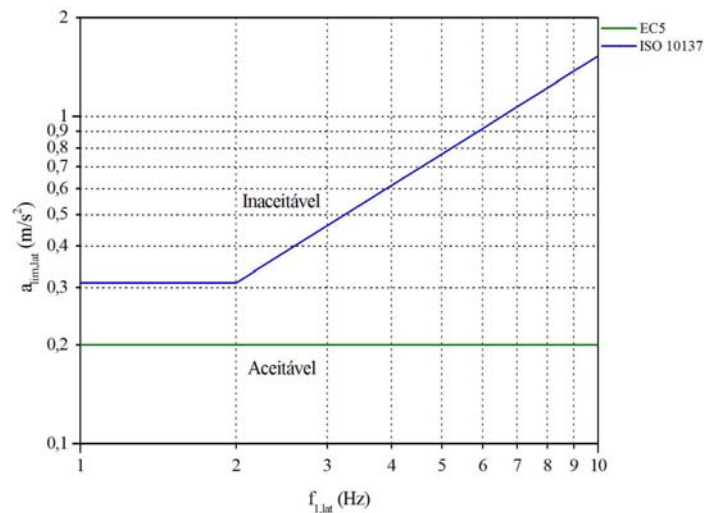


Figura 2 – Comparativo entre critérios normativos para aceitação de vibração na direção transversal horizontal.

A norma europeia Eurocode 5 - Parte 2 (2004) possui, desde as suas versões anteriores, recomendações que permitem a análise do conforto humano em passarelas de madeira e dispensa, das verificações de acelerações, as passarelas de madeira que apresentam frequências naturais nas direções transversal vertical e transversal horizontal acima dos limites de 5,0 Hz e 2,5 Hz, respectivamente. Recomenda, ainda, que as acelerações limites sejam nas direções transversal vertical $a_{lim,vert}$, menores ou iguais a $0,7 \text{ m/s}^2$ (7% g) e transversal horizontal $a_{lim,lat}$, menores ou iguais a $0,2 \text{ m/s}^2$ (2% g). Atualmente a norma europeia propõe apenas diretrizes para projetos de passarelas de madeira simplesmente apoiadas (vão simples), sem levar em conta os casos de passarelas de madeira de dois e três vãos contínuos, assim como aquelas que utilizam outros sistemas estruturais.

Uma primeira comparação, tratando dos critérios de vibração na direção transversal vertical mostra que a norma europeia Eurocode 5 - Parte 2 (1995 e 2004) e a Bro (2004) apresentam frequência independente e aceleração limite de $0,7 \text{ m/s}^2$, para uma passarela com frequência natural

na direção transversal vertical igual a 2 Hz, que é a principal frequência de caminhada. O critério da BS 5400 (1978) fornece uma aceleração na direção transversal vertical igual a $a_{\text{vert}} \leq 0,5 \cdot \sqrt{2 \text{ Hz}} \cong 0,707 \text{ m/s}^2$ e, na ISO 10137 (2005), encontra-se um valor de aceleração na direção transversal vertical igual a $a_{\text{vert}} \cong 0,6 \text{ m/s}^2$.

Uma segunda comparação, tratando dos critérios de vibração na direção transversal horizontal mostra que a norma europeia Eurocode 5 - Parte 2 (1995 e 2004) apresenta frequência independente da aceleração limite igual a $0,2 \text{ m/s}^2$. A ISO 10137 (2005) dá uma frequência independente da aceleração igual a $a_{\text{lat}} \cong 0,31 \text{ m/s}^2$, até uma frequência de 2 Hz. A norma BS 5400 (1978) e a norma Bro (2004) não apresentam uma aceleração limite para vibração na direção transversal horizontal. Contudo, a BS 5400 (1978) condiciona que, se a frequência natural da vibração na direção transversal horizontal for menor do que 1,5 Hz, o projeto deve considerar o risco de movimento na direção transversal horizontal de magnitude inaceitável.

A norma britânica BS 5400 (1978) propõe um modelo de carregamento de pedestres somente na direção transversal vertical e não, na direção transversal horizontal. A ISO 10137 (2005) modela os carregamentos, nas direções transversal vertical e transversal horizontal, impostos por um pedestre. Nota-se que, na modelagem do carregamento na direção transversal horizontal do pedestre, é assumido que parcela do peso estático do pedestre age na direção transversal horizontal. A norma europeia Eurocode 5 - Parte 2 (1995) propõe modelos de carregamentos nas direções transversal vertical e transversal horizontal, para vários tipos de sistemas estruturais, além de vigas simplesmente apoiadas. É válido observar que todos os critérios normativos e as indicações de pesquisadores da atualidade foram estabelecidos e aproximados, supondo que os carregamentos de pedestres são periódicos.

A norma europeia Eurocode 5 - Parte 2 (2004) apresenta uma formulação simplificada em relação à norma europeia Eurocode 5 - Parte 2 (1995), tomando apenas o caso de passarelas simplesmente apoiadas, sem levar em consideração o caso de vãos contínuos. Também não apresenta uma formulação indicando uma força a ser aplicada em passarelas de outros tipos de sistemas estruturais, para ser obtido o valor de acelerações nas direções transversal vertical e transversal horizontal. Este código normativo já evoluiu em relação aos demais, pois apresenta uma formulação para o cálculo do valor da aceleração na direção transversal vertical, que leva em conta o caso de pessoas correndo sobre a passarela.

A proposta de Rainer *et al.* (1988) permite trabalhar com os principais harmônicos da ação dos pedestres, segundo Pretlove *et al.* (1995) e Pimentel (1997). As propostas de Grundmann *et al.* (1993) e da norma europeia Eurocode 5 - Parte 2 (1995 e 2004) levam em conta o efeito de ressonância, por meio de um coeficiente de amplificação dinâmica, que depende da frequência natural da passarela. Seus trabalhos levantam o problema da sincronização de multidão de pedestres que estejam cruzando a passarela e apresentam procedimento para avaliação do problema. Também apresentam os procedimentos de dimensionamento da passarela em função das vibrações na direção transversal horizontal.

A partir do estudo realizado por Pimentel e Fernandes (2002), que diz respeito à investigação da aplicabilidade de formulações simplificadas, propostas na literatura, na análise de vibrações produzidas por pedestres em passarelas, concluiu-se que, nos vários casos examinados, a formulação proposta apresentou estimativas mais precisas para as acelerações.

O critério de dimensionamento atual da NBR 7190 (1997) não apresenta nenhuma indicação relativa aos limites de frequência e aceleração para as passarelas de madeira. A indicação da NBR 7190 (1997) é relativa a pisos de residências e escritórios; caso fosse estendida às passarelas, com certeza levaria à construção de estruturas robustas, acarretando uma solução antieconômica, uma vez que o critério estabelece uma frequência superior a 8 Hz. Segundo a NBR 7190 (1997), este é atendido, caso os pisos tenham uma flecha imediatamente inferior a 15 mm, referente a um carregamento de curta duração, e seja utilizado, na formulação, o módulo de elasticidade efetivo $E_{\text{co,ef}}$.

A indicação de verificação apresentada na NBR 7190 (1997), para que os pisos de madeira tenham uma frequência superior a 8 Hz, é uma primeira maneira de evitar problemas de vibrações, fazendo com que a estrutura tenha uma primeira frequência natural pelo menos acima do alcance do terceiro harmônico, ou seja, maior que três vezes a frequência de caminhada que se encontra na faixa de 1,7 a 2,3 Hz para a direção transversal vertical, segundo Bachmann e Ammann (1987); como exemplo toma-se ($3 \times 2,3 = 6,9$ Hz). Por isso, pisos com a primeira frequência natural acima de 8 Hz estariam salvaguardados desse efeito de ressonância. Na realidade, para estruturas com amortecimento relativamente alto, será suficiente que a primeira frequência natural na direção transversal vertical seja acima de 5 Hz, ou seja, a contribuição do terceiro harmônico já não será tão relevante. Como observação, vale lembrar que as pesquisas realizadas até então não levam em conta que a madeira pode ser um material com grande possibilidade de uso na construção de passarelas com vãos curtos e médios.

3 METODOLOGIA

Na análise teórica e numérica, foi investigado o comportamento dinâmico das passarelas de madeira simplesmente apoiadas sujeitas às ações dinâmicas induzidas por pedestres. Inicialmente, foi realizado o dimensionamento estático das passarelas de madeira simplesmente apoiadas com duas e quatro vigas, para vãos L variando de 5 a 35 m, a cada 1,0 m, larguras b das passarelas de madeira de 150 e 200 cm e classe de resistência da madeira C40 e C60.

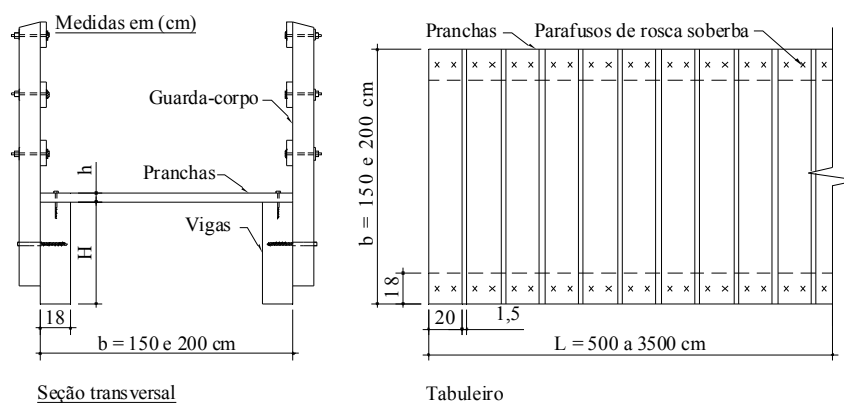


Figura 3 – Seção transversal e tabuleiro das passarelas de madeira com duas vigas.

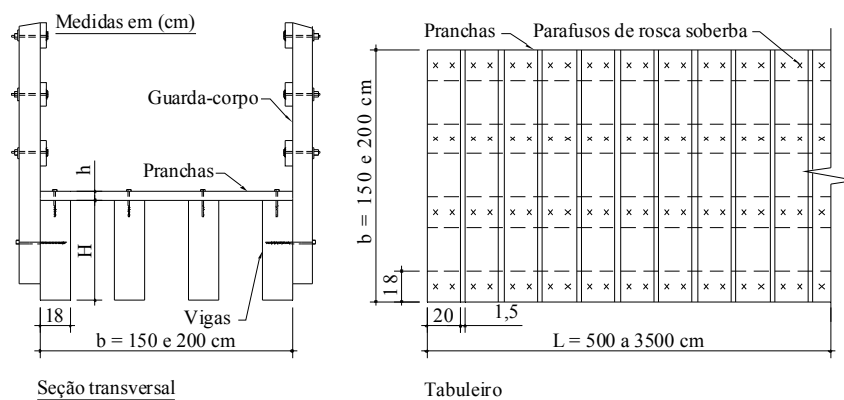


Figura 4 – Seção transversal e tabuleiro das passarelas de madeira com quatro vigas.

O modelo estrutural adotado consiste em passarelas de madeira simplesmente apoiadas, cuja seção transversal e tabuleiro são mostrados nas Figuras 3 e 4. É preciso deixar claro que, antes de realizar as avaliações dinâmicas por meio de uma análise paramétrica, foram realizados os cálculos estáticos para o dimensionamento das passarelas de madeira simplesmente apoiadas, de acordo com as normas brasileiras de ações e dimensionamento, NBR 7188 (1984) e NBR 7190 (1997), respectivamente.

3.1 Dimensionamento estático

Quanto ao dimensionamento estático, as passarelas de madeira simplesmente apoiadas com duas e quatro vigas foram verificadas para os estados limites últimos (tensões normais devidas ao momento fletor e tensões de cisalhamento devidas à força cortante) e estado limite de serviço (flecha máxima). A configuração de carregamentos críticos nas vigas é composta pelas cargas permanentes g e variáveis q , uniformemente distribuídas, iguais a 5 kN/m^2 , em toda a superfície da passarela; nas pranchas de madeira, é composta pelas cargas permanentes, uniformemente distribuídas em toda a superfície da passarela, e carga variável concentrada igual a 1 kN , representando o peso próprio do pedestre localizado na região central das passarelas de madeira, conforme mostrado nas Figuras 5 e 6.

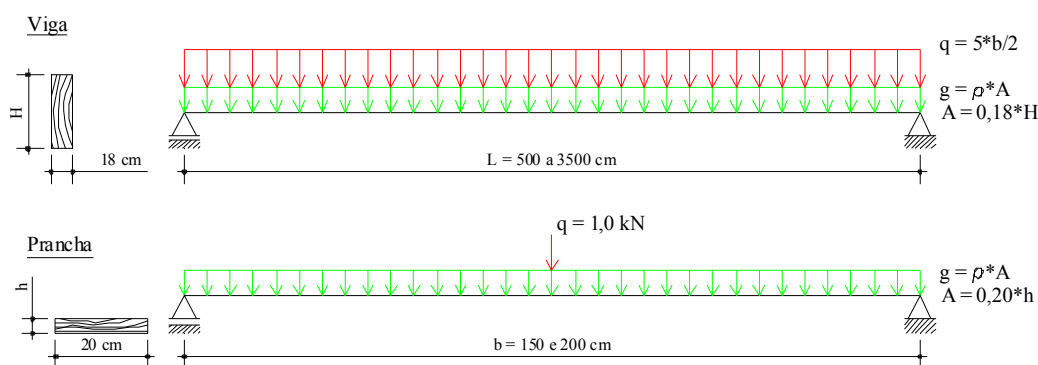


Figura 5 – Carregamento crítico nas passarelas de madeira com duas vigas.

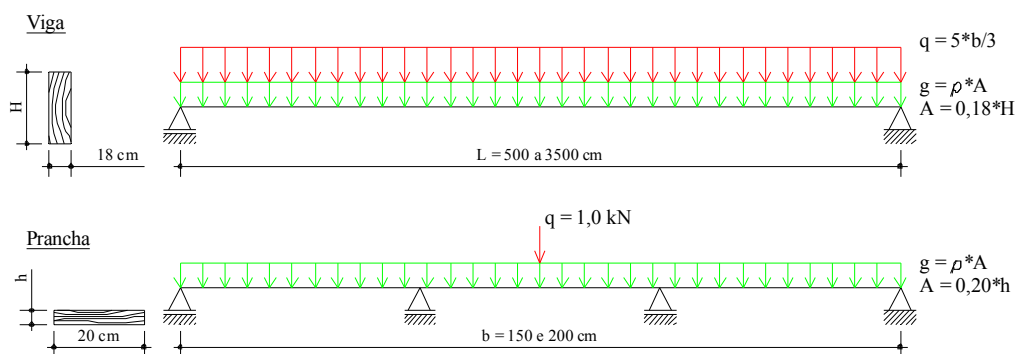


Figura 6 – Carregamento crítico nas passarelas de madeira com quatro vigas.

3.2 Análise dinâmica teórica

A análise dinâmica teórica das passarelas de madeira, em termos de cálculo das frequências naturais, será feita teoricamente por meio da formulação de vigas de Euler-Bernoulli, adaptada para as

passarelas de madeira simplesmente apoiadas. Nos cálculos dinâmicos realizados teoricamente para obtenção das frequências naturais e, conseqüentemente, das acelerações, foi levada em conta somente a rigidez das vigas das passarelas de madeira obtida a partir da altura H , conforme Figuras 3 e 4.

A análise dinâmica teórica das passarelas de madeira, em termos de acelerações, será feita por meio da norma europeia Eurocode 5 (1995) e a posterior versão para avaliação Eurocode 5 (2004). Tal escolha, deu-se a partir de um estudo prévio que constatou esse código sendo o mais adequado, pois os demais códigos normativos e algumas pesquisas de autores são aplicados, exclusivamente, para estruturas de concreto ou aço, e outros não restringem o material no qual podem ser aplicados, enquanto esta norma europeia trata exclusivamente das estruturas de madeira.

3.3 Análise dinâmica numérica

A análise dinâmica numérica foi realizada por meio do método dos elementos finitos (MEF), utilizando-se o programa de análise estrutural SAP2000® versão 10.0.7, que é marca registrada da *Computers and Structures, Inc.*, utilizando o elemento finito do tipo SHELL, que possui três ou quatro nós, podendo assumir tanto a forma triangular quanto a quadrilátera, e seis graus de liberdade por nó, três translações nodais e três rotações nodais em relação ao eixo global e cada elemento finito (SHELL) na estrutura, podendo assumir o comportamento de membrana, placa ou casca. Contudo, a formulação com quatro nós é a mais precisa das duas, e o manual do programa recomenda a utilização dos elementos de três nós, somente em partes transitórias de estruturas. As passarelas de madeira foram modeladas utilizando técnicas comuns de discretização, por meio de elementos finitos quadriláteros do tipo SHELL.

Para tal elemento, foram tomados cuidados relacionados ao fator de forma, uma vez que não deve ser muito grande. Este é dado pela razão entre a maior e a menor distância entre pontos médios. Segundo a publicação CSI [...] (2005), orienta-se que, para o quadrilátero com ângulos retos, elemento finito (SHELL) utilizado neste trabalho, o fator de forma é dado pela relação entre os lados, e os melhores resultados são obtidos para fatores de forma iguais a uma ou até quatro vezes a menor dimensão. O fator de forma não deve exceder a dez, ou seja, não deve ser utilizado elemento finito (SHELL) com forma muito alongada.

Tabela 1 – Valores típicos do movimento de caminhada

Movimento	f_p (Hz)	v_p (m/s)	l_p (m)
Caminhada lenta	1,7	1,0	0,60
Caminhada normal	2,0	1,5	0,75
Caminhada rápida	2,3	2,3	1,00
Corrida normal	2,5	3,1	1,25
Corrida rápida	> 3,2	5,5	1,75

As malhas de elementos finitos para as pranchas em madeira foram definidas nos planos horizontais contidos à meia espessura da mesa, e a espessura atribuída a cada elemento representa a espessura real da peça. As vigas de madeira foram modeladas por uma malha no plano na direção transversal vertical da viga, com espessura correspondente à da peça de madeira, ou seja, espessura real. A espessura do elemento finito (SHELL) gera um elemento de volume que permite considerar, automaticamente, o peso próprio e a rigidez da estrutura. As dimensões das malhas dos modelos em elementos finitos foram definidas respeitando o fator de forma de um até quatro, sugerido para o elemento finito (SHELL), segundo a publicação CSI [...] (2005). Conforme sugestão de Figueiredo (2005), para facilitar a aplicação de cargas com intensidade variável devido à ação de um pedestre, procura-se manter as dimensões no sentido longitudinal das malhas com comprimento igual a 25 cm,

ou seja, nós espaçados de $(l_p/3)$. Na Tabela 1, têm-se as características típicas do movimento de caminhada segundo, Bachmann e Ammann (1987), onde (f_p) é a frequência de passo, (v_p) é a velocidade do pedestre e (l_p) é o comprimento de passo.

Após a confecção dos modelos numéricos em elementos finitos, conforme mostrado nas Figuras 7a e 7b, as funções de carga referentes ao carregamento móvel de pedestres são inseridas no SAP2000®, para serem realizadas as simulações numéricas dos casos de análises dinâmicas e a posterior obtenção dos dados resultantes. A simulação numérica do movimento de pessoas caminhando ao longo das passarelas de madeira é uma funcionalidade pouco explorada no SAP2000®. Nas simulações numéricas da passagem de um pedestre sobre as estruturas, foi imposto o movimento de caminhada normal, com frequência de passo igual a 2 Hz, por meio das funções de carga apresentadas nas Equações 1 e 2.

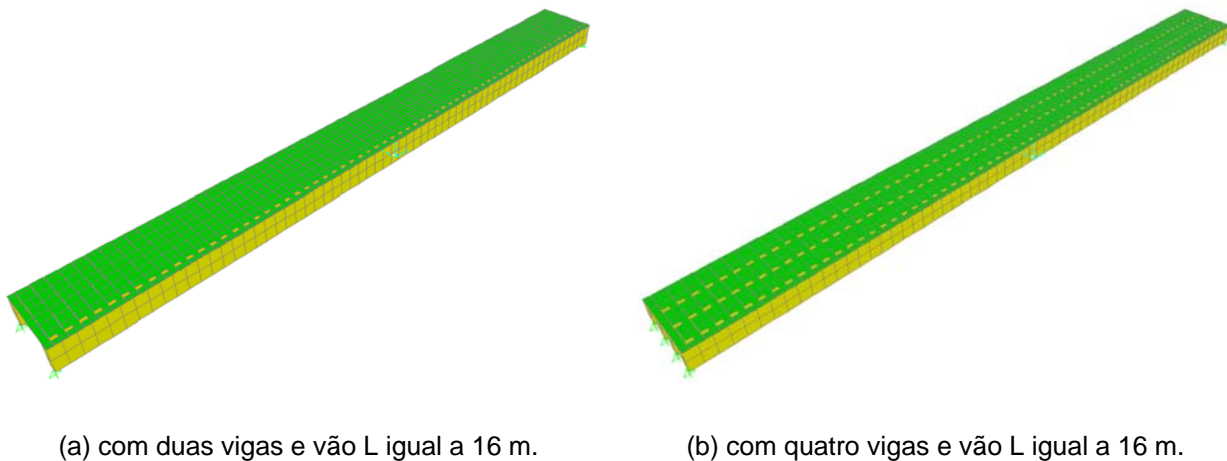


Figura 7 – Passarela de madeira em elementos finitos.

3.4 Carregamentos devido ao movimento de caminhada normal

As forças de reação no piso devido às ações humanas são funções periódicas no domínio do tempo da força $F(t)$, para o movimento de caminhada normal. Neste movimento, as componentes de força de ambos os pés são somadas e o carregamento pode ser dividido em diferentes oscilações senoidais, por uma série de Fourier, conforme explicado a seguir, nas Equações 1 e 2, e mostrado nas Figuras 8a e 8b.

Segundo Stolovas (2008), para estruturas como passarelas, um mínimo de três harmônicos é suficiente para causar vibrações excessivas na estrutura, uma vez que o terceiro harmônico já será capaz de produzir grandes amplitudes e causar desconforto aos usuários da estrutura. No entanto, além dos três primeiros harmônicos que são necessários para as simulações numéricas deste trabalho, utilizaram-se os coeficientes de Fourier apresentados nas Tabelas 2 e 3, para os primeiros cinco harmônicos dos carregamentos de caminhada normal recomendados por Bachmann *et al.* (1995), na Equação 1 e Bachmann e Ammann (1987), na Equação 2. Os valores das forças dinâmicas induzidas pelos pedestres devido ao movimento de caminhada normal, realizado sobre a estrutura, são quantificados a partir dos valores dos coeficientes de Fourier empregados nos harmônicos.

Os espectros das componentes da força nas direções transversal vertical e transversal horizontal mostram que as componentes de carregamento são aplicadas à frequência de passo e múltiplas desta, conforme Equação 1. Na direção transversal horizontal, as componentes de carregamento são aplicadas com a metade da frequência de passo, conforme Equação 2.

$$F_{\text{vert}}(t) = F_0 \left[\begin{array}{l} 1 + \alpha_{1,\text{vert}} \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_p \cdot t) + \alpha_{2,\text{vert}} \cdot \cos(4 \cdot \pi \cdot f_p \cdot t + \varphi_2) + \\ \alpha_{3,\text{vert}} \cdot \cos(6 \cdot \pi \cdot f_p \cdot t + \varphi_3) + \alpha_{4,\text{vert}} \cdot \cos(8 \cdot \pi \cdot f_p \cdot t + \varphi_4) + \\ \alpha_{5,\text{vert}} \cdot \cos(10 \cdot \pi \cdot f_p \cdot t + \varphi_5) \end{array} \right] \quad (1)$$

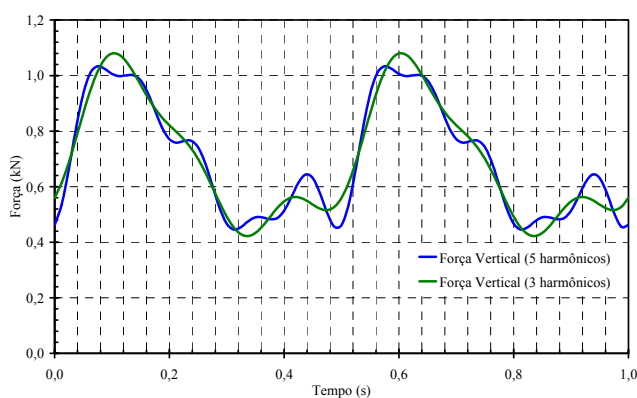
Tabela 2 – Coeficientes de Fourier para a direção transversal vertical. Fonte: Bachmann *et al.* (1995)

Caminhada normal	$\alpha_{1,\text{vert}}$	$\alpha_{2,\text{vert}}$	$\alpha_{3,\text{vert}}$	$\alpha_{4,\text{vert}}$	$\alpha_{5,\text{vert}}$
$f_p = 2$ Hz	0,37	0,10	0,12	0,04	0,08
Ângulos de fase - φ_i	-	$\pi/2$	$\pi/2$	$\pi/2$	$\pi/2$
Faixa de frequência (Hz)	1,4 - 2,4	2,8 - 4,8	4,2 - 7,2	5,6 - 9,6	7,0 - 12,0

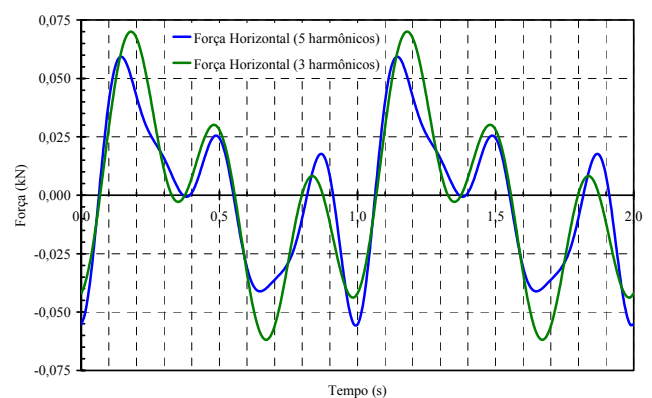
$$F_{\text{lat}}(t) = F_0 \left[\begin{array}{l} \alpha_{1,\text{lat}} \cdot \text{sen}\left(2 \cdot \pi \cdot \frac{f_p}{2} \cdot t\right) + \alpha_{2,\text{lat}} \cdot \text{sen}\left(4 \cdot \pi \cdot \frac{f_p}{2} \cdot t - \varphi_2\right) + \\ \alpha_{3,\text{lat}} \cdot \text{sen}\left(6 \cdot \pi \cdot \frac{f_p}{2} \cdot t - \varphi_3\right) + \alpha_{4,\text{lat}} \cdot \text{sen}\left(8 \cdot \pi \cdot \frac{f_p}{2} \cdot t - \varphi_4\right) + \\ \alpha_{5,\text{lat}} \cdot \text{sen}\left(10 \cdot \pi \cdot \frac{f_p}{2} \cdot t - \varphi_5\right) \end{array} \right] \quad (2)$$

Tabela 3 – Coeficientes de Fourier para a direção transversal horizontal. Fonte: Bachmann e Amman (1987)

Caminhada normal	$\alpha_{1,\text{lat}}$	$\alpha_{2,\text{lat}}$	$\alpha_{3,\text{lat}}$	$\alpha_{4,\text{lat}}$	$\alpha_{5,\text{lat}}$
$f_p/2 = 1$ Hz	0,039	0,010	0,042	0,012	0,015
Ângulo de fase - φ_i	-	$\pi/2$	$\pi/2$	$\pi/2$	$\pi/2$
Faixa de frequência (Hz)	0,6 - 1,1	1,2 - 2,2	1,8 - 3,3	2,4 - 4,4	3,0 - 5,5



(a) direção transversal vertical.



(b) direção transversal horizontal.

Figura 8 – Composição das forças.

Os termos que compõe as Equações 1 e 2 são os seguintes: F_0 : peso médio do pedestre (700 N); α_i : componente de carregamento da frequência $i \times f_p$; f_p : frequência de passo (Hz); φ_i : ângulo de fase da componente; i : número de ordem do harmônico; t : tempo de duração dos carregamentos.

4 RESULTADOS

Após ter sido feito o dimensionamento das passarelas de madeira, foi possível construir os gráficos das Figuras 9 e 10, nos quais se visualiza a variação das alturas H das vigas em relação aos vãos L das passarelas de madeira com duas e quatro vigas. Os valores referentes às espessuras h das pranchas de madeira destas passarelas são apresentados na Tabela 4. Depois da definição das dimensões dos elementos estruturais das passarelas de madeira, a partir do dimensionamento estático, fez-se a avaliação dinâmica das mesmas. Em um primeiro momento, tomou-se o módulo de elasticidade efetivo $E_{c0,ef}$ para o cálculo da primeira frequência natural e acelerações nas direções transversal vertical e transversal horizontal das passarelas de madeira com duas e quatro vigas. Em um segundo momento, tomou-se o módulo de elasticidade médio $E_{c0,m}$ para o cálculo da primeira frequência natural e acelerações nas direções transversal vertical e transversal horizontal das passarelas de madeira com duas e quatro vigas.

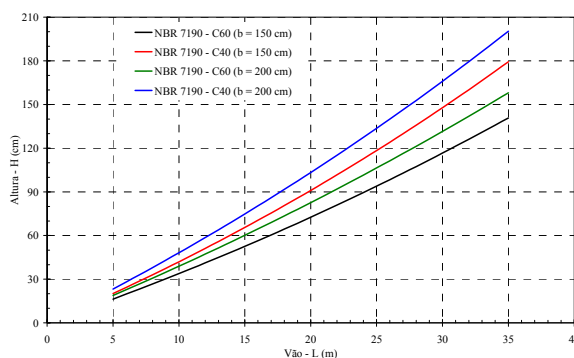


Figura 9 – Variação da altura H em relação aos vãos L das passarelas de madeira, de classe de resistência C40 e C60, com larguras b de 150 e 200 cm, com duas vigas.

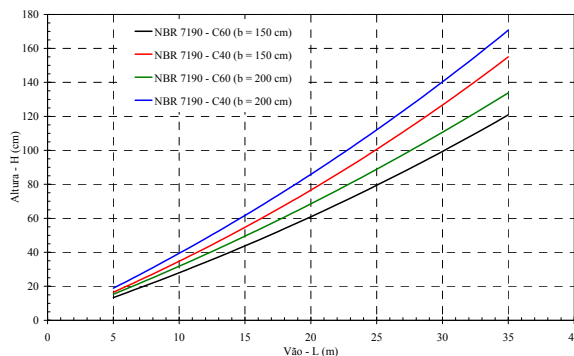


Figura 10 – Variação da altura H em relação aos vãos L das passarelas de madeira, de classe de resistência C40 e C60, com larguras b de 150 e 200 cm, com quatro vigas.

Tabela 4 – Espessura h das pranchas das passarelas de madeira simplesmente apoiadas

Classe	Duas vigas		Quatro vigas	
	b (cm)	h (cm)	b (cm)	h (cm)
C40	150	3,80	150	2,50
	200	4,67	200	2,50
C60	150	3,52	150	2,50
	200	4,32	200	2,50

As simulações numéricas apresentadas neste trabalho foram realizadas nas passarelas de madeira que possuem duas e quatro vigas, vão L variando de 5 a 35 m, largura b igual a 150 cm, classe de resistência da madeira C60 e módulo de elasticidade efetivo $E_{c0,ef}$. Escolheram-se essas passarelas de madeira para simulação numérica porque apresentaram maior número de frequências nas direções transversal vertical e transversal horizontal abaixo dos limites normativos, conforme resultados teóricos obtidos previamente. Os resultados mostrados a seguir dizem respeito ao cálculo teórico e numérico das frequências naturais, nas passarelas de madeira com duas e quatro vigas, e à análise de vibrações excessivas em termos das acelerações resultantes dos cálculos teóricos e das simulações numéricas. Nas Figuras 11 a 14, têm-se os gráficos dos valores teóricos e numéricos das frequências naturais referentes às passarelas de madeira simplesmente apoiadas com duas e quatro vigas.

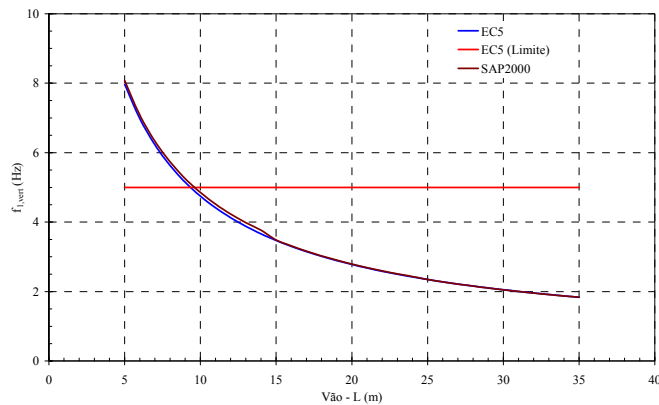


Figura 11 – Frequência natural na direção transversal vertical para as passarelas de madeira com duas vigas, largura b igual a 150 cm e classe de resistência da madeira C60.

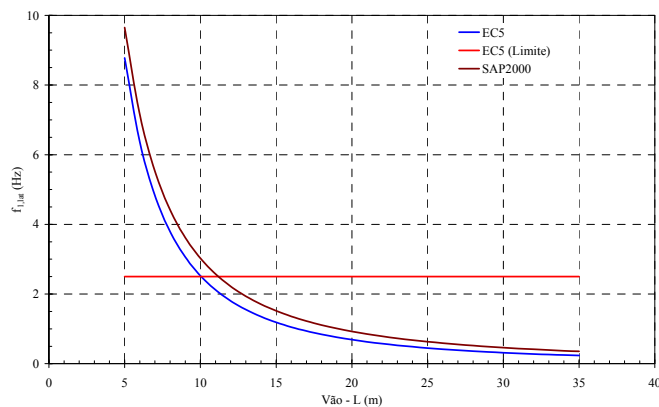


Figura 12 – Frequência natural na direção transversal horizontal para as passarelas de madeira com duas vigas, largura b igual a 150 cm e classe de resistência da madeira C60.

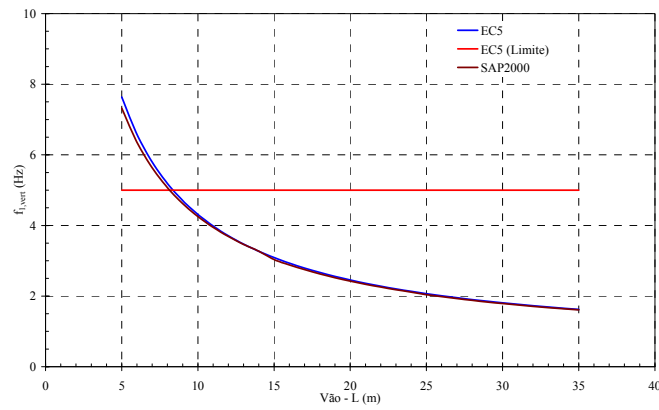


Figura 13 – Frequência natural na direção transversal vertical para as passarelas de madeira com quatro vigas, largura b igual a 150 cm e classe de resistência da madeira C60.

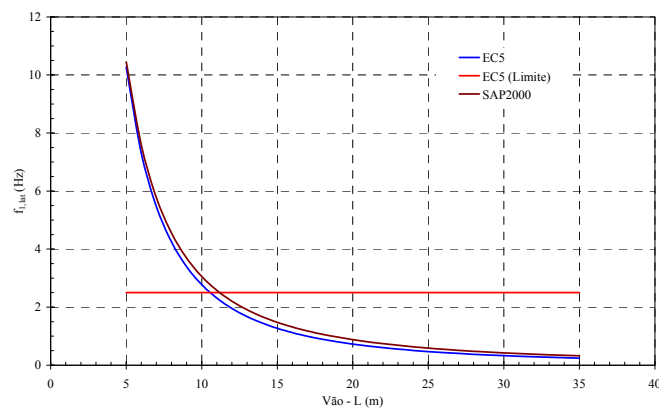


Figura 14 – Frequência natural na direção transversal horizontal para as passarelas de madeira com quatro vigas, largura b igual a 150 cm e classe de resistência da madeira C60.

Nas Figuras 15 a 18, são mostrados os valores das acelerações obtidas nas simulações numéricas localizadas no centro das passarelas de madeira com duas e quatro vigas. Os valores limites apresentados nas Figuras 15 a 18 foram obtidos por meio das diretrizes das respectivas normas.

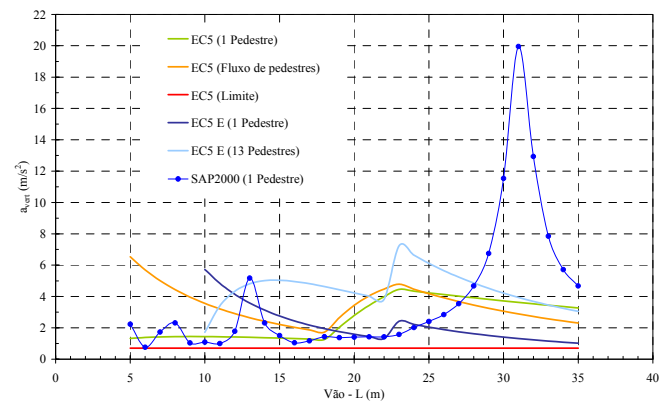


Figura 15 – Acelerações na direção transversal vertical das passarelas de madeira com duas vigas, largura b igual a 150 cm e classe de resistência da madeira C60.

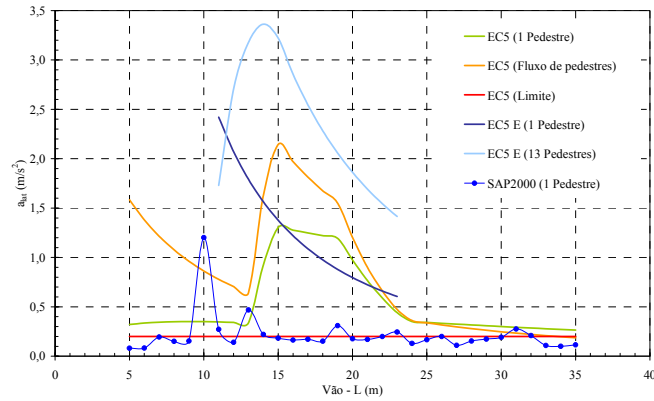


Figura 16 – Acelerações na direção transversal horizontal das passarelas de madeira com duas vigas, largura b igual a 150 cm e classe de resistência da madeira C60.

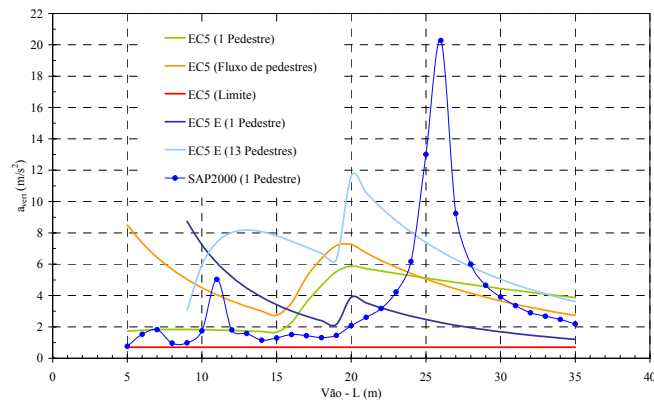


Figura 17 – Acelerações na direção transversal vertical das passarelas de madeira com quatro vigas, largura b igual a 150 cm e classe de resistência da madeira C60.

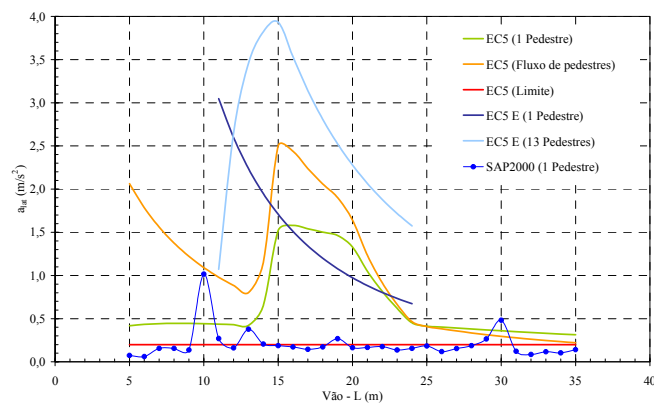


Figura 18 – Acelerações na direção transversal horizontal das passarelas de madeira com quatro vigas, largura b igual a 150 cm e classe de resistência da madeira C60.

5 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos teórica e numericamente permitiram comprovar que as passarelas de madeira estudadas neste trabalho podem apresentar problemas de vibrações excessivas, porque as frequências naturais nas direções transversal vertical e transversal horizontal estão abaixo dos limites estabelecidos em normas para os dois casos estudados de duas e quatro vigas, principalmente com vãos superiores a 10 m.

A partir dos resultados das análises teóricas e numéricas, observou-se que existe uma tendência de ocorrer desconforto para os usuários, pois as acelerações estão com valores superiores aos limites estabelecidos em normas, tanto ao se levarem em conta as análises para um pedestre caminhando sobre a passarela de madeira, quanto as análises para fluxo de pedestres caminhando.

A modelagem numérica é uma alternativa viável capaz de identificar as ressonâncias dos harmônicos devido ao movimento de caminhada normal para uma frequência de 2 Hz referentes às frequências naturais das passarelas de madeira, enquanto os modelos teóricos levam em conta apenas a ressonância da primeira frequência natural, relativa ao primeiro modo de vibrar nas direções transversal vertical e transversal horizontal.

6 AGRADECIMENTOS

Ao CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - Brasil, e à CAPES, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil, pelo apoio concedido a esta pesquisa na forma de bolsa (Doutorado) e taxa de bancada.

7 REFERÊNCIAS

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO**: Guide specifications for design of pedestrian bridges. EUA, aug. 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7188**: Carga móvel em ponte rodoviária e passarela de pedestre. Rio de Janeiro, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190**: Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997.

BACHMANN, H.; AMMANN, W. Vibrations in structures induced by man and machines. **Structural Engineering Document 3E**, IABSE, ISBN 3-85748-052-X, 1987.

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

BRITISH STANDARDS. **BS5400**: Steel, Concrete and Composite Bridges: Specification for Loads, Part 2, Appendix C, 1978.

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

COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON. **CEB-FIP**: Bulletin d'information, n. 209, England, London, aug. 1993.

CSI Analysis Reference Manual. Berkeley, California: Computers and Structures, Inc., 2005. 415 p.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EUROCODE 5**: Design of timber structures, Part 2: Bridges. Brussels, Belgium, 1995.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EUROCODE 5**: Design of timber structures. Part 2: Bridges. London, UK, 2004.

FIGUEIREDO, F. P. **Estudo do comportamento dinâmico de passarelas devido ao caminhar de pedestres**. 2005. 122 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Estadual do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia, Rio de Janeiro, 2005.

GRUNDMANN, H.; KREUNZINGER, H.; SCHNEIDER, M. Dynamic calculations of footbridges. **Bauingenieur**, v. 68, n. 5, p. 215-225, 1993. (in German).

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 10137**: Bases for design of structures - Serviceability of buildings and pedestrian walkways against vibration. Geneva, Switzerland, 32 p, 2005.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 2631-2**: Evaluation of human exposure to whole-body vibration, Part 2, Continuous and shock-induced vibration in buildings (1 to 80 Hz). Geneva, 1989.

ONTARIO HIGHWAY BRIDGE DESIGN CODE. **OHBDC**: Ministry of transportation and communications - Highway engineering division, 3rd ed., Ontario, Canada, 1991.

PIMENTEL, R. L. **Vibrational performance of pedestrian bridges due to human-induced loads**. 1997. 244 p. PhD Thesis, University of Sheffield, Sheffield, UK, 1997. (in English).

PIMENTEL, R. L.; FERNANDES, H. M. B. A simplified formulation for vibration serviceability of footbridges. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON DESIGN AND DYNAMIC BEHAVIOUR OF FOOTBRIDGES - FOOTBRIDGE 2002, 1., 2002, Paris, France. **Proceedings...** Paris, France, nov. 2002.

PRETLOVE, A. J.; RAINER, J. H. Human response to vibrations. In: **Vibration Problems in Structures**: Practical Guidelines. Birkhauser, Basel, 1995. Appendix I.

RAINER, J. H.; PERNICA, G.; ALLEN, D. E. Dynamic loading and response of footbridges. **Canadian Journal of Civil Engineering**, v. 15, n. 1, p. 66-71, 1988.

SEGUNDINHO, P. G. A. **Estudo das vibrações induzidas por pedestres em passarelas de madeira**. 2010. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2010.

STOLOVAS, S. **Dinâmica aplicada em estruturas de concreto**. São Paulo: TQS Informática Ltda, 2008. 283 p. (Apostila).

SWISS NATIONAL STANDARDS. **SIA 160**: Effects of loads on structures, 1989.