

ANÁLISE TEÓRICA DE VIBRAÇÃO EM PASSARELAS DE MADEIRA

VIBRATION THEORETICAL ANALYSIS ON TIMBER PEDESTRIAN BRIDGES

Pedro Gutemberg de Alcântara Segundinho¹ e Antonio Alves Dias²

Escola de Engenharia de São Carlos – EESC
Universidade de São Paulo – USP
Departamento de Engenharia de Estruturas – SET
Av. Trabalhador São-carlense, 400
CEP: 13566-590, São Carlos, SP, Brasil
E-mail: ¹pssegund@sc.usp.br, ²dias@sc.usp.br

RESUMO

A madeira possui alta resistência mecânica e leveza. Atividades como caminhar, correr e pular pode produzir excitações dinâmicas indesejadas, fenômeno da ressonância devido às forças dinâmicas induzidas por pedestres, caso essas estruturas apresentem frequência natural dentro das faixas de frequências de passo. A avaliação dinâmica das passarelas se faz necessária para verificar o nível de conforto humano e a sua adequação quando submetidas à passagem de pedestres. O objetivo deste artigo é realizar as análises dinâmicas teóricas de passarelas de madeira em sistema estrutural em vigas biapoiadas por meio de diretrizes normativas, com vãos variando de 5 a 35 m, de 1 em 1 m, larguras de 150 cm e 200 cm, classe de resistência da madeira C40 e C60. As passarelas de madeira foram projetadas estaticamente utilizando as diretrizes das normas brasileiras ABNT NBR 7190 e ABNT NBR 7188. Os resultados obtidos numericamente foram comparados às diretrizes normativas contidas nos códigos internacionais BS 5400, EUROCODE 5, ISO 10137, BRO, SIA, AASHTO e OHBDC. Concluiu-se que a norma brasileira atual necessita de revisões que levem em conta o nível de conforto humano devido às vibrações induzidas por pedestres.

Palavras-chave: vibrações vertical e lateral, passarelas de madeira, pedestres caminhando e correndo, forças dinâmicas, conforto humano.

ABSTRACT

The wood presents high mechanical strength with low selfweight. Activities like walking, running and jumping can produce undesirable dynamic excitations, resonance due to dynamic forces induced by pedestrians, in case of structures present natural frequency inside of the band of step frequency. The dynamic evaluation of the footbridges is necessary to verify the level of human comfort and adaptation when submitted to the pedestrians moving load. The objective of this paper is to carry out the theoretical dynamic analyses of timber footbridges in structural system in beams through guidelines, with spans varying from 5 to 35 m, of 1 in 1 m, widths of 150 and 200 cm, class of resistance of the timber C40 and C60. The timber footbridges were projected using the guidelines of the Brazilian NBR 7190 and NBR 7188. The results theoretical were compared to the guidelines contained in the international BS 5400, EUROCODE 5, ISO 10137, BRO, SIA, AASHTO and OHBDC. It was ended that the current Brazilian guideline needs of revisions that take into account the level of human comfort due to the vibrations induced by pedestrians.

Keywords: vertical and lateral vibrations, timber footbridges, pedestrians walking and running, dynamics forces, human comfort.

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.

A madeira e materiais a base de madeira, madeira laminada colada (MLC) tem sido sucessivamente usada em passarelas de curto e médio vãos com baixo tráfego de pedestres. Porém, a baixa densidade e módulo de elasticidade destes materiais podem resultar em excessivas vibrações causadas pelo carregamento dinâmico, particularmente no caso de ações sincronizadas de pedestres. Em geral, o problema decorrente das vibrações excessivas em passarelas de madeira causa desconforto ao

usuário e receio em relação à segurança da estrutura, provocando uma subutilização da estrutura.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) na norma de madeiras e estruturas de madeira ABNT NBR7190:1997 não apresenta critérios relacionados aos limites de frequência e aceleração para as passarelas de madeira, em seu texto tem-se no item 9.3 que trata dos estados limites de vibrações, apenas uma definição geral a respeito das vibrações em pisos de madeira.

O critério proposto na norma brasileira (ABNT NBR7190:1997) sugere que a primeira frequência natural dos pisos de madeira seja superior a 8 Hz. Este será atendido caso os pisos tenham uma flecha imediata inferior a 15 mm devido a um carregamento de curta duração, para

tanto, utiliza-se no cálculo da flecha o módulo de elasticidade efetivo $E_{c0,ef}$.

Segundo a ISO 2631-2 (1989), 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 da estrutura, 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 modelados como vigas biapoiadas. Esta modelagem simplifica o problema no sentido que permite incorporar os modos de vibração da estrutura à análise, já que há expressões analíticas para os mesmos. Neste sentido, várias formulações simplificadas foram propostas e aplicadas em passarelas de sistema estrutural de vigas biapoiadas.

2 – FREQUÊNCIAS NATURAIS

A determinação das frequências naturais em passarelas de madeira biapoiadas é feita a partir das expressões analíticas que determinam as frequências naturais em vigas biapoiadas, (EUROCODE 5, 1993). A primeira frequência natural na direção vertical pode ser calculada pela Equação 1 e para levar em conta os fatores que contribuem para a variabilidade da primeira frequência natural na direção vertical considera-se o valor mais desfavorável para o conforto do usuário entre os possíveis valores situados no intervalo de $0,7 \cdot f_{1,vert}$ a $1,3 \cdot f_{1,vert}$.

$$f_{1,vert} = \frac{\pi}{2 \cdot L^2} \cdot \sqrt{\frac{E_{c0,m} \cdot I_{vert}}{\rho \cdot A}} \quad [\text{Hz}] \quad \text{Eq. 1}$$

A primeira frequência natural na direção lateral pode ser calculada pela Equação 2 e para levar em conta os fatores que contribuem para a variabilidade da frequência natural na direção lateral considera-se o valor mais desfavorável para o conforto do usuário entre os possíveis valores situados no intervalo de $0,7 \cdot f_{1,lat}$ a $1,3 \cdot f_{1,lat}$.

$$f_{1,lat} = \frac{\pi}{2 \cdot L^2} \cdot \sqrt{\frac{E_{c0,m} \cdot I_{lat}}{\rho \cdot A}} \quad [\text{Hz}] \quad \text{Eq. 2}$$

No cálculo das frequências naturais das passarelas de madeira deve ser utilizado o módulo de elasticidade médio, segundo (EUROCODE 5, 1993).

3 – ACELERAÇÕES CALCULADAS POR MEIO DE CRITÉRIOS NORMATIVOS

A seguir são apresentados os critérios normativos e também aqueles sugeridos por autores, para o cálculo da aceleração em passarelas biapoiadas, isto é, projetadas em sistema estrutural de vigas biapoiadas.

A norma britânica BS5400 (1978) estabelece que, para estruturas com a primeira frequência natural referente ao primeiro modo de vibrar na direção vertical menor do que 5 Hz, a aceleração limite na direção vertical em qualquer

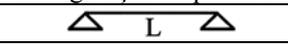
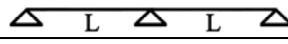
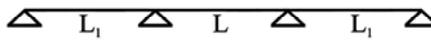
parte da estrutura deverá ser limitada ao valor dado pela Equação 3. Caso as passarelas apresentem a primeira frequência natural na direção vertical maior ou igual a 5 Hz os limites de serviço serão atendidos.

$$a_{lim,vert} = 0,5 \cdot \sqrt{f_{1,vert}} \quad [\text{m/s}^2] \quad \text{Eq. 3}$$

A norma britânica BS5400 (1978) apresenta um método simplificado para o cálculo da aceleração máxima na direção vertical, Equação 4, para passarelas biapoiadas ou contínuas de dois ou três vãos, simétricas e seção transversal constante. Essas são reduzidas na faixa frequência de 4 a 5 Hz, adotando-se respectivamente redução de 1 a 0,7 nessa faixa e valores intermediários obtidos por meio de interpolação linear. Essa norma não apresenta um critério de cálculo na direção lateral para aceleração limite devido à vibração na direção lateral, no entanto, condiciona que se a frequência natural de vibração na direção lateral é menor do que 1,5 Hz, o projeto deve considerar o risco de movimento lateral de magnitude inaceitável.

$$a_{max,vert} = 4 \cdot \pi^2 \cdot f_{1,vert}^2 \cdot y_{est} \cdot K_{BS} \cdot \Psi \quad [\text{m/s}^2] \quad \text{Eq. 4}$$

Tabela 1. Fator de configuração (BS5400, 1978).

Configuração da passarela	L_1/L	K_{BS}
	-	1,0
	-	0,7
	1,0	0,6
	0,8	0,8
	$\leq 0,6$	0,9

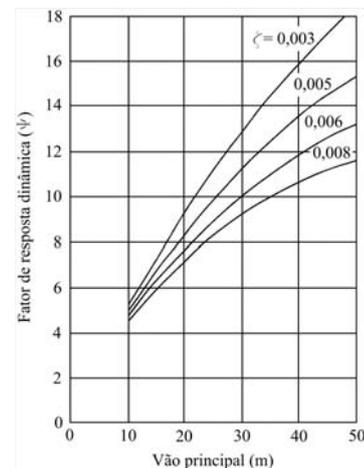


Figura 1. Fator de resposta dinâmica em função do vão e da taxa de amortecimento da passarela (BS5400, 1978).

A desvantagem na utilização da Equação 4 é que foi adotado para a mesma um primeiro coeficiente de Fourier igual a 0,257 sugerido por Blanchard *et al.* (1977) e referente ao primeiro harmônico para toda a faixa de frequência abaixo de 5 Hz, não levando em consideração os fatores dinâmicos de carregamento correspondentes aos harmônicos superiores que possam ocorrer dentro dessa faixa de frequências. Na Equação 4 este coeficiente de Fourier está incluso na obtenção do gráfico do fator de

resposta dinâmica, Figura 1. Nos diagramas mostrados nesta figura também não é levado em conta o número de ciclos que está relacionado com a frequência de passo, ou seja, a passarela pode ser excitada pelo primeiro ou pelo segundo harmônico. Neste segundo caso o número de ciclos seria o dobro. O fator de configuração corrige a aceleração máxima na direção vertical dada pela Equação 4 ao aplicar-se para passarelas de dois e três vãos contínuos.

A norma canadense OHBDC (1991) apresenta diferenças em relação à norma britânica BS5400 (1978). A aceleração limite na direção vertical será verificada caso a primeira frequência natural na direção vertical seja menor que 4 Hz. Essa adota um valor mais conservador para a aceleração limite na direção vertical calculada por meio da Equação 5, enquanto que, a aceleração máxima na direção vertical em (OHBDC, 1991) é calculada também pela BS5400 (1978) utilizando a Equação 4 acima.

$$a_{lim,vert} = 0,25 \cdot f_{1,vert}^{0,78} \left[m/s^2 \right] \quad \text{Eq. 5}$$

A norma européia EUROCODE 5 (1993) recomenda que sejam dispensadas das verificações de acelerações limites nas direções vertical e lateral, as passarelas que apresentam as primeiras frequências naturais nas direções vertical e lateral maiores ou igual a 5 Hz e 2,5 Hz, respectivamente. As acelerações máximas nas passarelas de madeira nas direções vertical e lateral com as primeiras frequências naturais nas direções vertical e lateral não excedendo os limites é realizado por meio das Equações 6 e 7. A seguinte norma estabelece acelerações limites nas direções vertical, menor ou igual a 0,7 m/s² (7 % g), e lateral, menor ou igual a 0,2 m/s² (2 % g), caso as primeiras frequências naturais estejam abaixo dos limites estabelecidos. Nas Equações 6 e 7 é levado em consideração o cálculo para um pequeno fluxo de pessoas, refere-se à ação de um grupo de 10 pessoas ou à passagem de pedestres representando uma densidade de 0,6 pessoas/m², situação normal para a maior parte das passarelas de madeira, e fator de correção para as acelerações nas direções vertical e lateral denominado de fator de configuração, para um, dois ou três vãos contínuos, conforme Tabela 2.

$$a_{max,vert} = 165 \cdot K_a \cdot \frac{1 - e^{-2 \cdot \pi \cdot n_s \cdot \zeta}}{\rho \cdot A \cdot L \cdot \zeta} \cdot k_{vert,f} \left[m/s^2 \right] \quad \text{Eq. 6}$$

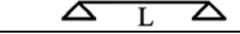
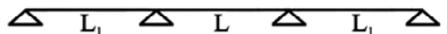
$$a_{max,lat} = 40 \cdot K_a \cdot \frac{1 - e^{-2 \cdot \pi \cdot n_s \cdot \zeta}}{\rho \cdot A \cdot L \cdot \zeta} \cdot k_{lat,f} \left[m/s^2 \right] \quad \text{Eq. 7}$$

Nas Equações 8 e 9 são calculadas as acelerações nas direções vertical e lateral para um pedestre passando em situação normal sobre uma passarela de madeira. Também, leva-se em conta o fator de configuração da passarela, para um, dois ou três vãos contínuos, conforme Tabela 2. Os valores das acelerações obtidos por meio das Equações 8 e 9 são dados em [m/s²].

$$a_{max,vert} = 0,027 \cdot L \cdot b \cdot 165 \cdot K_a \cdot \frac{1 - e^{-2 \cdot \pi \cdot n_s \cdot \zeta}}{\rho \cdot A \cdot L \cdot \zeta} \cdot k_{vert,f} \quad \text{Eq. 8}$$

$$a_{max,lat} = 0,027 \cdot L \cdot b \cdot 40 \cdot K_a \cdot \frac{1 - e^{-2 \cdot \pi \cdot n_s \cdot \zeta}}{\rho \cdot A \cdot L \cdot \zeta} \cdot k_{lat,f} \quad \text{Eq. 9}$$

Tabela 2. Fator de configuração (EUROCODE 5, 1993).

Configuração da passarela	L ₁ /L	K _a
	-	1,0
	-	0,7
	1,0	0,6
	0,8	0,8
	≤ 0,6	0,9

Nas Equações 6 à 9 os fatores de grupo nas direções vertical e lateral, Figura 2 e 3, são dependentes da primeira frequência natural da passarela nas direções vertical e lateral, (EUROCODE 5, 1993). Na falta de valores precisos, pode-se adotar o valor do coeficiente de amortecimento igual a 0,010 para estruturas sem juntas mecânicas e 0,015 para estruturas com juntas mecânicas.

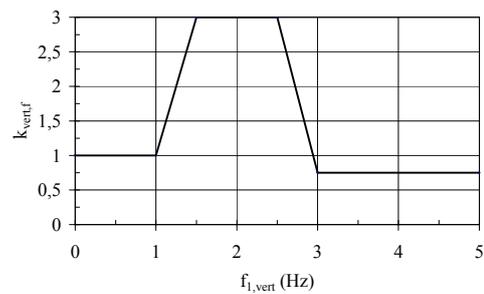


Figura 2. Relação entre o fator de grupo e a primeira frequência natural da passarela na direção vertical.

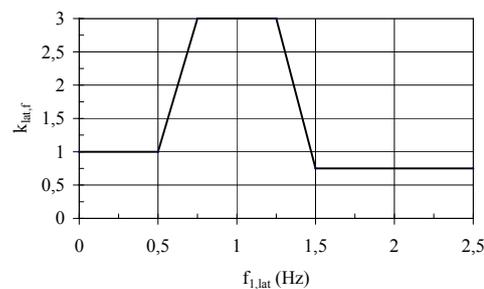


Figura 3. Relação entre o fator de grupo e a primeira frequência natural da passarela na direção lateral.

As normas SIA (1989), CEB-FIP (1993) e AASHTO (1997) abordam por exclusão o problema de vibrações verticais nas passarelas. As normas SIA (1989) e CEB-FIP (1993) reconhecem as faixas críticas de frequências de excitação produzida por um pedestre ao caminhar, e recomendam que seja evitado projetar passarelas com frequências naturais entre 1,6 e 2,4 Hz e também entre 3,5 e 4,5 Hz. Tais limitações são baseadas no fato de que a frequência de caminhada está distribuída dentro de uma faixa de 1,6 a 2,4 Hz e 3,2 a 4,8 Hz que são as faixas do primeiro e segundo harmônicos, respectivamente. A norma AASHTO (1997) também reconhece a mesma abordagem

e recomenda que seja evitado projetar passarelas com frequências naturais inferiores a 3 Hz e 5 Hz, caso sejam esperados problemas de vibrações causados pelo segundo harmônico.

A norma ISO 10137 (1992) foi desenvolvida com o objetivo de apresentar os princípios para prever vibrações na fase de projeto e avaliar a aceitabilidade de vibrações em estruturas usando curvas básicas para vibrações na direção vertical e lateral, Figura 4 e 5.

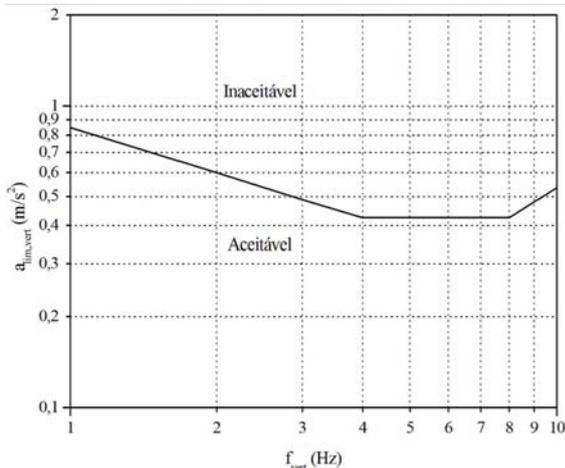


Figura 4. Curva base de frequência na direção vertical versus aceleração na direção vertical (ISO 10137, 1992).

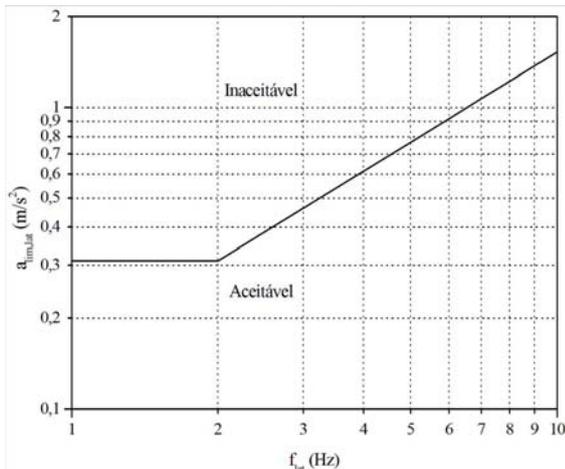


Figura 5. Curva base de frequência na direção lateral versus aceleração na direção lateral (ISO 10137, 1992).

A norma BRO (2004) é aplicada a projetos e construções das pontes na Suécia. Essa declara que as passarelas devem ter frequências naturais na direção vertical acima de 3,5 Hz. Conseqüentemente a passarela deve ser checada para as vibrações de serviço, caso uma frequência natural de vibração na direção vertical seja menor ou igual a 3,5 Hz e para esse caso a aceleração limite na direção vertical seja menor ou igual a 0,5 m/s² em qualquer parte da passarela. O método simplificado dado nesta norma é aplicado unicamente para passarelas biapoizadas e fala somente de acelerações limite na direção vertical. Embora, não apresente um critério de cálculo para aceleração máxima e limite na direção lateral nesta há a condição que se a frequência natural na direção lateral for

menor do que 1,5 Hz, o projeto deve considerar o risco de movimento lateral de magnitude inaceitável.

4 – SUGESTÕES DADAS POR PESQUISADORES PARA O CÁLCULO DAS ACELERAÇÕES

Os cálculos das acelerações em passarelas são sugeridos em várias formulações desenvolvidas durante as últimas décadas com a finalidade de quantificar a aceleração máxima que os pedestres podem sofrer quando caminham sobre uma passarela. Os pesquisadores Rainer *et al.* (1988) propuseram um método de cálculo para determinar a aceleração máxima na direção vertical resultando da passagem de pedestre devido à frequência de caminhada ressonante com a passarela, Equação 10.

$$a_{\max, \text{vert}} = 4 \cdot \pi^2 \cdot f_{1, \text{vert}}^2 \cdot y_{\text{est}} \cdot \alpha_i \cdot \Phi \quad [\text{m/s}^2] \quad \text{Eq. 10}$$

Tabela 3. Coeficientes de Fourier para faixas de frequência de passo na caminhada normal (RAINER *et al.*, 1988).

Nº i	1	2	3	4
α_i	0,4	0,2	0,1	0,05
f_p (Hz)	1,6-2,2	3,2-4,4	4,8-6,6	6,4-8,8

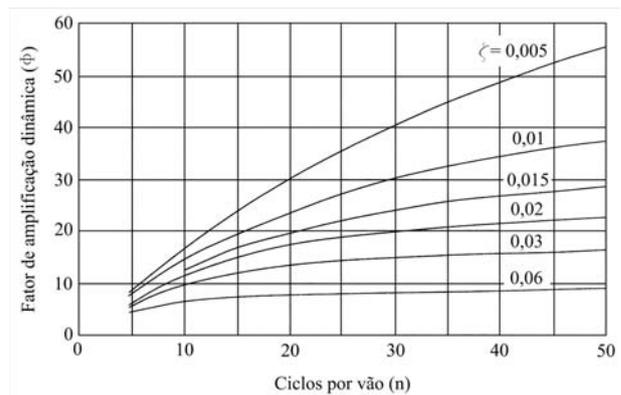


Figura 6. Fator de amplificação dinâmica devido à carga móvel senoidal cruzando uma passarela biapoizada (RAINER *et al.*, 1988).

A Equação 10 pode ser representada pela Equação 11 com algumas modificações. Contudo, nesta forma de apresentação não mudam os resultados finais de aceleração máxima na direção vertical.

$$a_{\max, \text{vert}} = (2 \cdot \pi \cdot f_{1, \text{vert}})^2 \cdot \frac{\alpha_i \cdot P}{k} \cdot \Phi \quad [\text{m/s}^2] \quad \text{Eq. 11}$$

Outra expressão para calcular as acelerações de pico foi proposta por Rainer *et al.* (1988), Equação 12, obtida modelando-se a passarela como um sistema de um grau de liberdade, também. O coeficiente de Fourier é escolhido de acordo com o harmônico de excitação da carga do pedestre empregada para excitar o modo de vibração da passarela. Este é utilizado para modular a amplitude da excitação, visando simular o efeito de carga móvel. Nesta formulação a carga móvel é reduzida a uma carga estacionária de amplitude variável.

$$a_{\max, \text{vert}} = \Phi \cdot \frac{2 \cdot \alpha_i \cdot P}{M} \left[\text{m/s}^2 \right] \quad \text{Eq. 12}$$

A vantagem da formulação apresentada por Rainer *et al.* (1988) é a flexibilidade de escolha do coeficiente de Fourier a ser adotado de acordo com o harmônico de excitação da carga de pedestre para excitar a estrutura em sua frequência natural. Por exemplo, uma passarela de frequência natural igual a 4 Hz pode ser excitada pelo segundo harmônico da carga produzido por um pedestre deslocando-se em uma frequência de passo igual a 2 Hz.

Os pesquisadores Pimentel e Fernandes (2002) estenderam o procedimento proposto por (Rainer *et al.*, 1988) introduzindo o fator de configuração que depende do número de vãos, conforme Tabela 4. Este é similar àqueles encontrados na norma britânica BS5400 (1978) e norma européia EUROCODE 5 (1993). Os pesquisadores Pimentel e Fernandes (2002) obtiveram o gráfico da Figura 7, que representa a ampliação do gráfico mostrado na Figura 6 com a extensão do número de ciclos por vão e introdução da taxa de amortecimento igual a 0,008 referenciada pela norma britânica BS5400 (1978). Segundo Pimentel (1997) amparado pela norma européia EUROCODE 5 (1993) deve-se eliminar a verificação de conforto humano em passarelas quando a frequência natural na direção vertical for maior ou igual a 5 Hz, do contrário a aceleração máxima na direção vertical será calculada por meio da Equação 13:

$$a_{\max, \text{vert}} = 4 \cdot \pi^2 \cdot f_{1, \text{vert}}^2 \cdot y_{\text{est}} \cdot \alpha_i \cdot K_{\text{PF}} \cdot \Phi_d \left[\text{m/s}^2 \right] \quad \text{Eq. 13}$$

Tabela 4. Fator de configuração (PIMENTEL; FERNANDES, 2002).

Configuração da passarela	a/L	K _{PF}
	-	1,0
	1,0	0,69
	0,8	0,92
	0,6	0,96
	0,4	0,97
	0,2	0,97
	1,0	0,60
	0,8	0,81
	0,6	0,90
	0,4	0,96
	0,2	0,96

A formulação apresentada por Grundmann *et al.* (1993) é aplicável a passarelas biapoiadas de um só vão, baseada na analogia de sistema de um grau de liberdade e frequência natural da igual à frequência de passo. O cálculo da aceleração máxima na direção vertical produzida por um pedestre cruzando a passarela é dado pela Equação 14:

$$a_{\max, \text{vert}} = 0,6 \cdot \frac{\alpha_i \cdot P}{0,5 \cdot M} \cdot \frac{\pi}{\delta} \cdot (1 - e^{-n \cdot \delta}) \left[\text{m/s}^2 \right] \quad \text{Eq. 14}$$

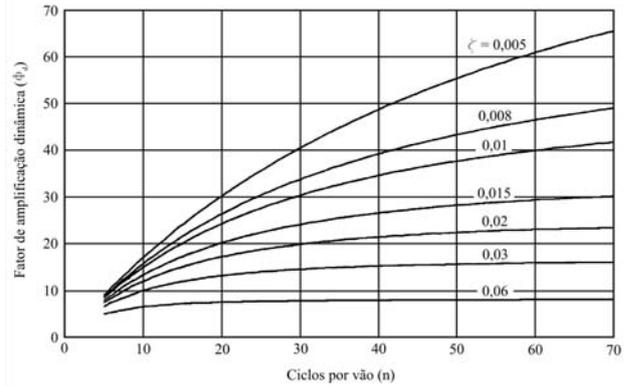


Figura 7. Fator de amplificação dinâmica devido a carga móvel senoidal cruzando uma passarela biapoiada (PIMENTEL; FERNANDES, 2002).

Na Equação 14, um coeficiente de Fourier igual a 0,4 pode ser adotado para o primeiro harmônico da carga corresponde à caminhada normal de pedestre e também é possível considerar a validade de harmônicos superiores. Na Equação 14 é possível considerar um pequeno número de pedestre por meio do fator de multiplicação S mostrado na Figura 8, que é obtido em função da frequência natural da passarela na direção vertical. Nesta o termo $1 - e^{-n \cdot \delta}$ foi obtido da expressão teórica da resposta do sistema de um grau de liberdade submetido à carga senoidal de amplitude constante (CLOUGH; PENZIEN, 1993). Para considerar o efeito do movimento da carga é introduzido um fator multiplicativo igual a 0,6 que desempenha o papel de converter uma viga biapoiada no modo de vibrar de um sistema de um grau de liberdade. Em se tratando de passarelas de madeira tem-se um valor médio de amortecimento crítico em termos de decremento logarítmico igual a 0,075.

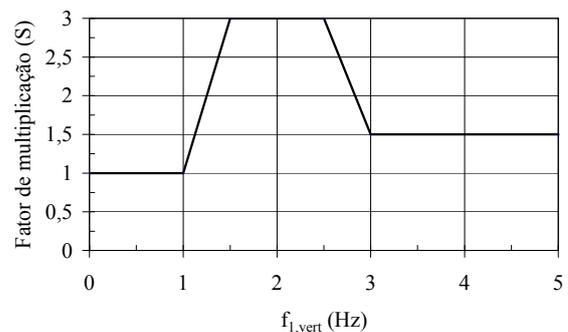


Figura 8. Fator de multiplicação devido à carga móvel de vários pedestres cruzando a passarela (GRUNDMANN *et al.*, 1993).

5 – AVALIAÇÕES DAS PASSARELAS DE MADEIRA

O modelo estrutural adotado consiste de passarelas de madeira biapoiadas, conforme Figura 9. A análise foi realizada com vãos L na faixa de 5 a 35 m, variando de 1,0 m em 1,0 m, e larguras b constantes de 150 cm e 200 cm. Nos cálculos das frequências e acelerações levou-se em conta somente a rigidez das vigas de madeira, cuja altura H foi obtida conforme variação do vão L, largura b e classe de resistência da madeira. Antes das avaliações dinâmicas realizaram-se os cálculos estáticos para dimensionamento

das passarelas de madeira biapoiada, conforme as normas brasileiras (ABNT NBR7190:1997; ABNT NBR 7188:1982).

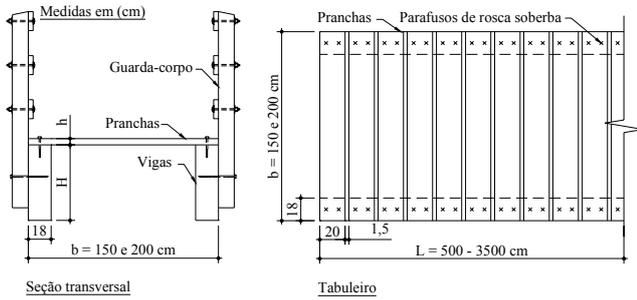


Figura 9. Esquema das passarelas de madeira.

No estudo dos modelos das passarelas de madeira foram escolhidas madeiras de classe de resistência das dicotiledôneas C40 e C60 de acordo com (ABNT NBR7190:1997), cujos valores das propriedades físicas são mostrados na Tabela 6. No dimensionamento estático foram levados em conta os coeficientes de segurança, Tabela 7, e coeficientes de modificação aplicados às propriedades da madeira, conforme Tabela 8. Na Tabela 9, têm-se os valores de cálculo utilizados no dimensionamento estático de acordo com a norma brasileira, (ABNT NBR7190:1997).

Após o dimensionamento estático é investigado o comportamento dinâmico das passarelas de madeira biapoiadas e inicialmente são obtidas as frequências naturais e os modos de vibrar dos modelos propostos. Em seguida, obtém-se a resposta dinâmica das passarelas de madeira em termos de suas acelerações limites e máximas. Os resultados obtidos teoricamente são comparados com as diretrizes propostas nos códigos internacionais EUROCODE 5 (1993); BS5400 (1978); OHBDC (1991); SIA (1989); CEB-FIP (1993); AASHTO (1997); ISO 10137 (1992); BRO (2004) e aqueles obtidos por meio das formulações sugeridas em Pimentel e Fernandes (2002); Rainer *et al.* (1988); Grundmann *et al.* (1993).

Tabela 6. Valores característicos na condição-padrão de referência (Umidade = 12%) (ABNT NBR7190:1997).

Madeira	$f_{c0,k}$ (MPa)	$f_{v0,k}$ (MPa)	$E_{c0,m}$ (MPa)	ρ_{ap} (kg/m ³)
C40	40	6	19500	950
C60	60	8	24500	1000

Tabela 7. Coeficientes de segurança utilizados no dimensionamento das passarelas (ABNT NBR 7190:1997).

γ_q	γ_g	γ_{wc}	γ_{wv}
1,4	1,4	1,4	1,8

Tabela 8. Coeficientes de modificação aplicados nas propriedades das madeiras (ABNT NBR 7190:1997).

$k_{mod,1}$	$k_{mod,2}$	$k_{mod,3}$	k_{mod}
0,7	1,0	0,8	0,56

Tabela 9. Valores de cálculo utilizados no dimensionamento estático e avaliações dinâmicas.

Madeira	$f_{c0,d}$ (MPa)	$f_{v0,d}$ (MPa)	$E_{c0,ef}$ (MPa)	ρ_{ap} (kg/m ³)
C40	16	1,87	10920	950
C60	24	2,50	13720	1000

A configuração de carregamento crítico utilizada no dimensionamento estático é composta nas vigas de madeira pelas ações permanentes e pedestres uniformemente distribuídas em toda a superfície da passarela, conforme Figura 10. Nas pranchas de madeira a configuração de carregamento é composta pelas cargas permanente uniformemente distribuída em toda a superfície da passarela e pela força concentrada de 1 kN, referente ao peso próprio do pedestre no centro da prancha de madeira.

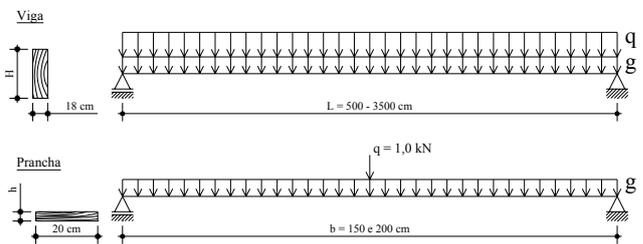


Figura 10. Carregamento nas passarelas de madeira.

A partir dos resultados obtidos teoricamente foi possível construir o gráfico da Figura 11 referente às dimensões, altura e vão, das vigas das passarelas de madeira biapoiadas. Na Tabela 10 têm-se as espessura das pranchas das passarelas de madeira.

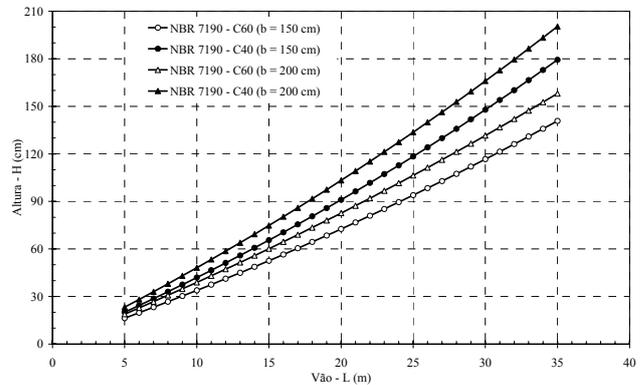


Figura 11. Variação da altura em relação aos vão L das passarelas de madeira.

Tabela 10. Dimensões das pranchas de madeira.

Madeira	h (cm) - b = 150 cm	h (cm) - b = 200 cm
C40	3,80	4,67
C60	3,52	4,32

Os resultados apresentados a seguir consistem da avaliação teórica dinâmica das passarelas de madeira biapoiadas. O cálculo das frequências e acelerações foram realizados por meio das diretrizes normativas e sugestões de pesquisadores. É importante lembrar que todos os resultados foram obtidos a partir de sistemas contínuos que

utilizam as propriedades geométricas e de elasticidade. Os gráficos da Figura 12 à 13 dizem respeito à primeira frequência do primeiro modo de vibrar nas direções vertical e lateral das passarelas de madeira. Os gráficos da Figura 14 à 21 são referentes às acelerações máximas nas direções vertical e lateral relacionadas ao vão L e largura b das passarelas de madeira.

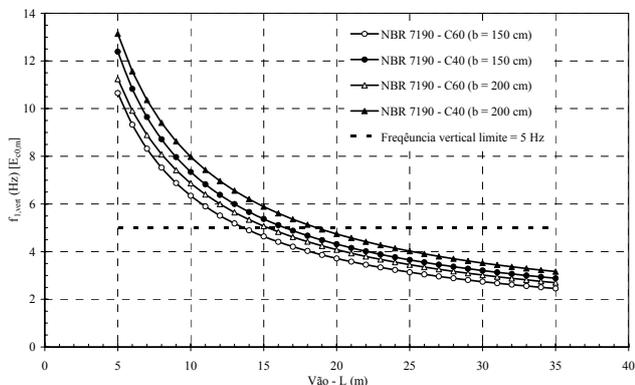


Figura 12. Frequências na direção vertical em relação ao vão L.

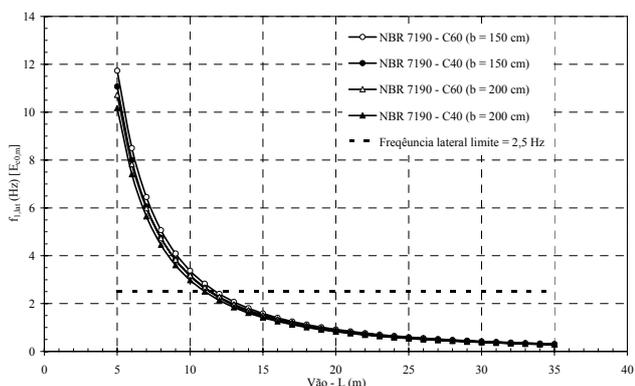


Figura 13. Frequências na direção lateral em relação ao vão L.

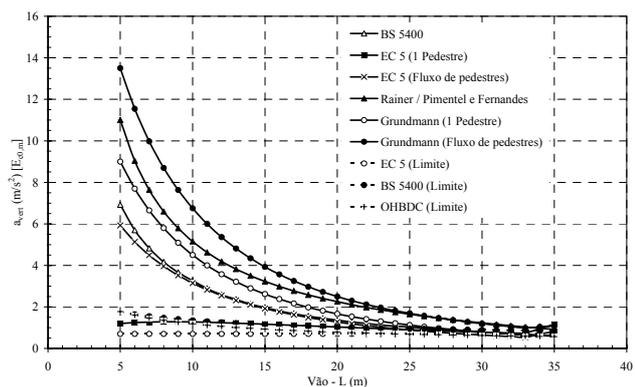


Figura 14. Acelerações na direção vertical em relação ao vão L (b=150 cm e C40).

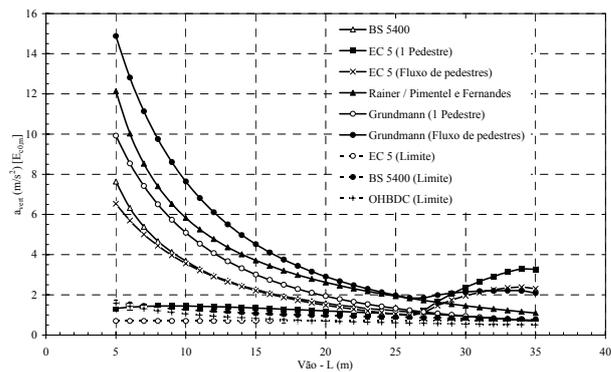


Figura 15. Acelerações na direção vertical em relação ao vão L (b=150 cm e C60).

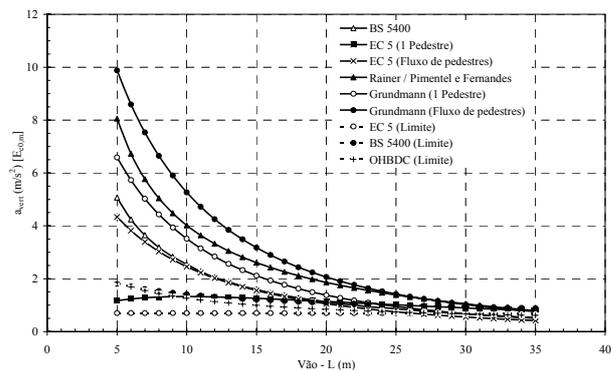


Figura 16. Acelerações na direção vertical em relação ao vão L (b=200 cm e C40).

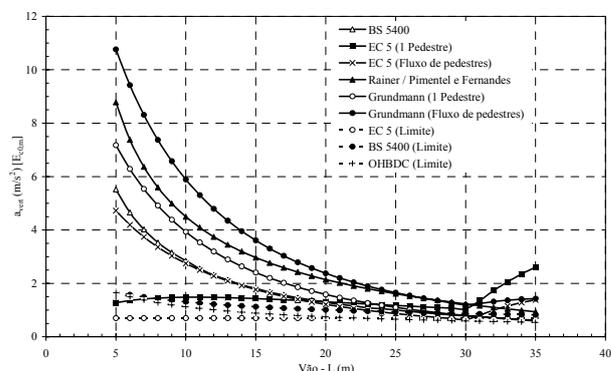


Figura 17. Acelerações na direção vertical em relação ao vão L (b=200 cm e C60).

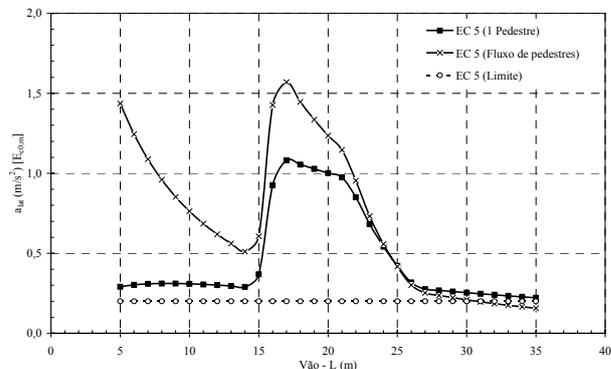


Figura 18. Acelerações na direção lateral em relação ao vão L (b=150 cm e C40).

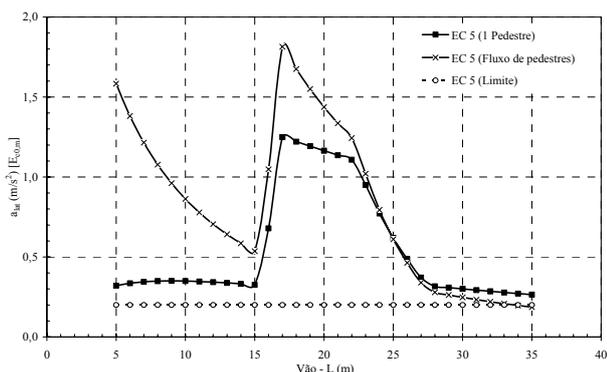


Figura 19. Acelerações na direção lateral em relação ao vão L (b=150 cm e C60).

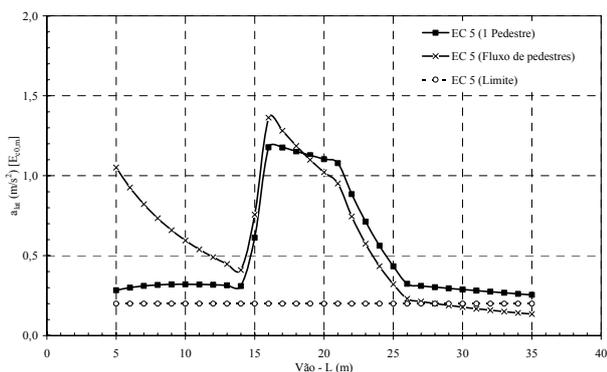


Figura 20. Acelerações na direção lateral em relação ao vão L (b=200 cm e C40).

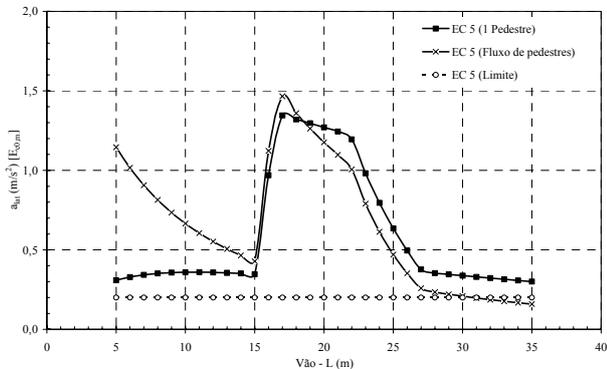


Figura 21. Acelerações na direção lateral em relação ao vão L (b=200 cm e C60).

A seguir tem-se um exemplo de cálculo para verificação do conforto humano em uma passarela com vão L igual a 18 m, largura b igual a 150 cm feita de madeira dicotiledônea C40.

Dados da passarela de madeira:

$$L = 18 \text{ m}$$

$$E_{c0,m} = 1,95 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$$

$$\rho_{ap} = 950 \text{ kg/m}^3$$

$$I_{vert,vig} = 2 \cdot \frac{0,18 \cdot (0,8059)^3}{12} = 0,015701 \text{ m}^4$$

$$I_{lat,vig} = 2 \cdot \frac{0,8059 \cdot (0,18)^3}{12} = 0,000783 \text{ m}^4$$

$$A_{sec,pass} = 2 \cdot 0,18 \cdot 0,8059 + 1,5 \cdot 0,038 = 0,347124 \text{ m}^2$$

Cálculo das frequências nas direções vertical e lateral da passarela de madeira:

$$f_{1,vert} = \frac{(1)^2 \cdot \pi \sqrt{(1,95 \cdot 10^{10}) \cdot 0,015701}}{2 \cdot 18^2} = 4,671 \text{ Hz}$$

$$f_{1,lat} = \frac{(1)^2 \cdot \pi \sqrt{(1,95 \cdot 10^{10}) \cdot 0,000783}}{2 \cdot 18^2} = 1,043 \text{ Hz}$$

Cálculo das acelerações nas direções vertical e lateral da passarela de madeira:

- Norma britânica (BS5400, 1978)

$$a_{lim,vert} = 0,5 \cdot \sqrt{f_{1,vert}} = 0,5 \cdot \sqrt{4,671} = 1,081 \text{ m/s}^2$$

$$a_{max,vert} = 4 \cdot \pi^2 \cdot f_{1,vert}^2 \cdot y_{est} \cdot K \cdot \psi \Rightarrow$$

$$a_{max,vert} = 4 \cdot \pi^2 \cdot (4,671)^2 \cdot (2,778 \cdot 10^{-4}) \cdot 1 \cdot 6,5 \Rightarrow$$

$$a_{max,vert} = 1,556 \text{ m/s}^2$$

$$y_{est} = \frac{P \cdot L^3}{48 \cdot E_{c0,m} \cdot I_{vert,vig}} = \frac{0,70 \cdot 1800^3}{48 \cdot 1950 \cdot 2 \cdot \left(\frac{18 \cdot 80,59^3}{12}\right)} \Rightarrow$$

$$y_{est} = 2,778 \cdot 10^{-2} \text{ cm ou } 2,778 \cdot 10^{-4} \text{ m}$$

- Norma canadense (OHBC, 1978)

$$a_{lim,vert} = 0,25 \cdot f_{1,vert}^{0,78} = 0,25 \cdot (4,671)^{0,78} = 0,832 \text{ m/s}^2$$

- Norma europeia (EUROCODE 5, 1993)

Fluxo de pedestres

$$a_{lim,vert} \leq 0,7 \text{ m/s}^2 \text{ (7\% g)}$$

$$a_{max,vert} = 165 \cdot k_a \cdot k_{vert,f} \cdot \frac{1 - e^{-2 \cdot \pi \cdot n \cdot \zeta}}{M \cdot \zeta} \Rightarrow$$

$$a_{max,vert} = 165 \cdot 1 \cdot 0,75 \cdot \frac{\left(1 - e^{-2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{18}{0,90}\right) \cdot 0,010}\right)}{950 \cdot 18 \cdot 0,347124 \cdot 0,010} \Rightarrow$$

$$a_{max,vert} = 1,491 \text{ m/s}^2$$

$$a_{lim,lat} \leq 0,2 \text{ m/s}^2 \text{ (2\% g)}$$

$$a_{max,lat} = 40 \cdot k_a \cdot k_{lat,f} \cdot \frac{1 - e^{-2 \cdot \pi \cdot n \cdot \zeta}}{M \cdot \zeta} \Rightarrow$$

$$a_{max,lat} = 40 \cdot 1 \cdot 3 \cdot \frac{\left(1 - e^{-2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{18}{0,90}\right) \cdot 0,010}\right)}{950 \cdot 18 \cdot 0,347124 \cdot 0,010} \Rightarrow$$

$$a_{max,lat} = 1,446 \text{ m/s}^2$$

1 Pedestre

$$a_{lim,vert} \leq 0,7 \text{ m/s}^2 \text{ (7\% g)}$$

$$a_{max,vert} = 0,027 \cdot L \cdot b \cdot 165 \cdot k_a \cdot k_{vert,f} \cdot \frac{1 - e^{-2 \cdot \pi \cdot n \cdot \zeta}}{M \cdot \zeta} \Rightarrow$$

$$a_{max,vert} = 0,027 \cdot 18 \cdot 1,5 \cdot 165 \cdot 1 \cdot 0,75 \cdot \frac{\left(1 - e^{-2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{18}{0,90}\right) \cdot 0,010}\right)}{950 \cdot 18 \cdot 0,347124 \cdot 0,010} \Rightarrow$$

$$a_{max,vert} = 1,087 \text{ m/s}^2$$

$$a_{lim,lat} \leq 0,2 \text{ m/s}^2 \text{ (2\% g)}$$

$$a_{\max, \text{lat}} = 0,027 \cdot L \cdot b \cdot 40 \cdot k_a \cdot k_{\text{lat}, f} \cdot \frac{1 - e^{-2\pi \cdot n \cdot \zeta}}{M \cdot \zeta} \Rightarrow$$

$$a_{\max, \text{lat}} = 0,027 \cdot 18 \cdot 1,5 \cdot 40 \cdot 1 \cdot 3 \cdot \frac{\left(1 - e^{-2\pi \cdot \left(\frac{18}{0,90}\right) \cdot 0,010}\right)}{950 \cdot 18 \cdot 0,347124 \cdot 0,010} \Rightarrow$$

$$a_{\max, \text{lat}} = 1,054 \text{ m/s}^2$$

- (RAINER *et al.*, 1988)

$$a_{\max, \text{vert}} = 4 \cdot \pi^2 \cdot f_{1, \text{vert}}^2 \cdot y_{\text{est}} \cdot \alpha_i \cdot \Phi \Rightarrow$$

$$a_{\max, \text{vert}} = 4 \cdot \pi^2 \cdot (4,671)^2 \cdot (2,778 \cdot 10^{-4}) \cdot 0,4 \cdot 26,95 \Rightarrow$$

$$a_{\max, \text{vert}} = 2,580 \text{ m/s}^2$$

$$y_{\text{est}} = \frac{P \cdot L^3}{48 \cdot E_{c0, m} \cdot I_{\text{vert}, \text{vig}}} = \frac{0,70 \cdot 1800^3}{48 \cdot 1950 \cdot 2 \cdot \left(\frac{18 \cdot 80,59^3}{12}\right)} \Rightarrow$$

$$y_{\text{est}} = 2,778 \cdot 10^{-2} \text{ cm ou } 2,778 \cdot 10^{-4} \text{ m}$$

- (PIMENTEL; FERNANDES, 2002)

$$a_{\max, \text{vert}} = 4 \cdot \pi^2 \cdot f_{1, \text{vert}}^2 \cdot y_{\text{est}} \cdot \alpha_i \cdot K_{\text{PF}} \cdot \Phi_d \Rightarrow$$

$$a_{\max, \text{vert}} = 4 \cdot \pi^2 \cdot (4,671)^2 \cdot (2,778 \cdot 10^{-4}) \cdot 0,4 \cdot 1 \cdot 26,95 \Rightarrow$$

$$a_{\max, \text{vert}} = 2,580 \text{ m/s}^2$$

$$y_{\text{est}} = \frac{P \cdot L^3}{48 \cdot E_{c0, m} \cdot I_{\text{vert}, \text{vig}}} = \frac{0,70 \cdot 1800^3}{48 \cdot 1950 \cdot 2 \cdot \left(\frac{18 \cdot 80,59^3}{12}\right)} \Rightarrow$$

$$y_{\text{est}} = 2,778 \cdot 10^{-2} \text{ cm ou } 2,778 \cdot 10^{-4} \text{ m}$$

- (GRUNDMANN *et al.*, 1993)

Fluxo de pedestres

$$a_{\max, \text{vert}} = \frac{0,6 \cdot \alpha_i \cdot P \cdot \pi \cdot S}{0,5 \cdot M \cdot \delta} \cdot (1 - e^{-n \cdot \delta}) \Rightarrow$$

$$a_{\max, \text{vert}} = \frac{0,6 \cdot 0,4 \cdot 700 \cdot \pi \cdot 1,5}{0,5 \cdot 950 \cdot 18 \cdot 0,347124 \cdot 0,075} \cdot \left(1 - e^{-\left(\frac{18}{0,75}\right) \cdot 0,075}\right) \Rightarrow$$

$$a_{\max, \text{vert}} = 2,969 \text{ m/s}^2$$

1 Pedestre

$$a_{\max, \text{vert}} = \frac{0,6 \cdot \alpha_i \cdot P \cdot \pi}{0,5 \cdot M \cdot \delta} \cdot (1 - e^{-n \cdot \delta}) \Rightarrow$$

$$a_{\max, \text{vert}} = \frac{0,6 \cdot 0,4 \cdot 700 \cdot \pi}{0,5 \cdot 950 \cdot 18 \cdot 0,347124 \cdot 0,075} \cdot \left(1 - e^{-\left(\frac{18}{0,75}\right) \cdot 0,075}\right) \Rightarrow$$

$$a_{\max, \text{vert}} = 1,979 \text{ m/s}^2$$

6 – CONCLUSÕES

As verificações das condições de utilização têm sido cada vez mais importantes, isto é, a verificação dos estados limites de utilização devido às vibrações tem sido um dos fatores decisivos nos projetos das passarelas. A partir deste trabalho conclui-se que a norma brasileira de madeira e de estruturas de madeira (ABNT NBR 7190:1997) precisa avançar nas diretrizes normativas que dizem respeito ao conforto humano nas passarelas de madeira. É o que mostra este trabalho pelas sugestões apresentadas que permitem o avanço deste tema para as passarelas de madeira construídas no Brasil, uma vez que, essas

estruturas são projetadas em sua maioria em sistema estrutural de vigas biapoiadas. Os estudos realizados até então não levaram em conta que a madeira pode ser um material com grande possibilidade de uso na construção de passarelas com vãos curtos e médios.

As comparações dos critérios de vibrações vertical e lateral apresentadas nas Figuras 13 à 21 mostraram que o conforto humano nas passarelas de madeira não foi atendido para passarelas de madeira com vãos acima de 15 m, ou seja, ultrapassaram os limites estabelecidos nas diretrizes normativas e sugestões de autores citadas neste trabalho. Ainda, com relação aos critérios normativos e as indicações de pesquisadores da atualidade, é preciso lembrar que esses foram estabelecidos e aproximados supondo que os modelos de carregamentos de pedestres são periódicos.

As indicações da norma brasileira de madeira e estruturas de madeira são relativas a pisos de residências e escritórios, certamente se esses critérios fossem estendidos às passarelas de madeira, levaria à construção de estruturas robustas, acarretando uma solução antieconômica, uma vez que o critério estabelece uma frequência natural acima de 8 Hz. Mas, isso será somente atendido caso obtenha-se uma flecha imediata abaixo de 15 mm devido ao carregamento de curta duração.

Essa sugestão é uma primeira maneira de evitar problemas de vibrações, pois faz com que a estrutura tenha uma primeira frequência natural pelo menos acima do alcance do terceiro harmônico, ou seja, maior que três vezes a máxima frequência de caminhada ($3 \times 2,4 \text{ Hz} = 7,2 \text{ Hz}$). Na realidade, para estruturas com amortecimento relativamente alto será suficiente que a primeira frequência natural seja acima de 5 Hz, ou seja, a contribuição do terceiro harmônico já não será tão relevante. Com base nesse conhecimento as diretrizes mais conservadoras da atualidade dispensam a verificação de conforto humano em passarelas quando as frequências naturais dessas são superiores a 5 Hz.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - Brasil, pelo apoio financeiro na forma de bolsa (Doutorado) e taxa de bancada.

LISTA DE SÍMBOLOS

A = área da seção transversal, m²;

α_i = coeficiente de Fourier;

b = largura da passarela, m;

δ = amortecimento crítico, $\delta = 2\pi \zeta$;

$E_{c0, \text{ef}}$ = módulo de elasticidade efetivo, N/m²;

$E_{c0, m}$ = módulo de elasticidade médio, N/m²;

$f_{1, \text{lat}}$ = 1ª frequência natural na direção lateral, Hz;

$f_{1, \text{vert}}$ = 1ª frequência natural na direção vertical, Hz;

$f_{c0, d}$ = resistência de cálculo a compressão paralela, N/m²;

$f_{c0, k}$ = resistência característica a compressão paralela, N/m²;

f_p = frequência de passo, Hz;

$f_{v0,d}$ = resistência de cálculo ao cisalhamento paralelo, N/m^2 ;
 $f_{v0,k}$ = resistência característica ao cisalhamento paralelo, N/m^2 ;
 γ_{wc} = coeficiente de minoração da resistência da madeira a compressão;
 γ_{wv} = coeficiente de minoração da resistência da madeira ao cisalhamento;
 i = nº do *ith* harmônico;
 I_{lat} = inércia da passarela na direção lateral, m^4 ;
 I_{vert} = inércia da passarela na direção vertical, m^4 ;
 k = rigidez no centro do vão, N/m , $k = P/y_{est}$;
 K_a = fator de configuração (EUROCODE 5, 1993);
 K_{BS} = fator de configuração (BS5400, 1978);
 $k_{lat,f}$ = fator de grupo na direção lateral;
 k_{mod} = coeficiente de modificação;
 $k_{mod,1}$ = carregamento de longa duração;
 $k_{mod,2}$ = classe de umidade $\leq 65\% U_{amb}$;
 $k_{mod,3}$ = madeira de 2ª categoria;
 K_{PF} = fator de configuração (PIMENTEL; FERNANDES, 2002);
 $k_{vert,f}$ = fator de grupo na direção vertical;
 L = vão da passarela biapoiada, m ;
 M = massa total da passarela, kg ;
 n = número de ciclos para cruzar o vão em movimento de caminhada normal, nº do *ith* harmônico $*L/0,75$;
 n_s = número de passos para cruzar o vão, $n_s = L/0,9$;
 n = número de passos para cruzar o vão em movimento de caminhada normal, $n = L/0,75$;
 P = peso do pedestre, $P = 700 N$;
 S = fator de multiplicação;
 ρ_{ap} = densidade aparente do material, kg/m^3 ;
 y_{est} = flecha no centro do vão, m , $y_{est} = PL^3/(48E_{c0,m}I_{vert})$;
 ζ = taxa de amortecimento;
 Φ = fator de amplificação dinâmica;
 Φ_d = fator de amplificação dinâmica;
 Ψ = fator de resposta dinâmica.

REFERÊNCIAS

- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO**: Guide specifications for design of pedestrian bridges. USA, Aug. 1997.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7188**: Carga móvel em ponte rodoviária e passarela de pedestre. São Paulo, 4 p., 1982.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190**: Projeto de estruturas de madeira. São Paulo, 107 p., 1997.
- BACHMANN, H.; AMMANN, W. Vibrations in structures induced by man and machines. **IABSE Structural Engineering Document 3e**, 1987.
- BLANCHARD, J.; DAVIES, B. L.; SMITH, J.W. Design criteria and analysis for dynamic loading of footbridges. In: Symposium on Dynamic Behaviour of Bridges. **TRRL Supplementary Report**. Crowthorne, Berkshire, UK, n. 275, p. 90-106, 1977.
- 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.
- CLOUGH, R. W.; PENZIEN, J. **Dynamics of structures**. New York: McGraw-Hill, 1993.
- COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON. **CEB-FIP**: Bulletin d'information, n. 209, England, London, Aug. 1993.
- EUROPEAN COMMITTEE OF STANDARDIZATION. **EUROCODE 5**: Design of timber structures, Part 2, Bridges. Brussels, 45 p, 1993.
- GRUNDMANN, H.; KREUNZINGER, H.; SCHNEIDER, M. Dynamic calculations of footbridges. **Bauingenieur**, v. 68, n. 5, p. 215-225, 1993. (in German).
- INTERNATIONAL ORGANISATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 10137**: Bases for design of structures – Serviceability of buildings and walkways against vibration. Geneve, 32 p, 1992.
- INTERNATIONAL ORGANISATION 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). Geneve, 1989.
- ONTARIO HIGHWAY BRIDGE DESIGN CODE. **OHBCD**: 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**. 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 the Design and Dynamic Behaviour of Footbridges. **Proceedings...** Paris, France, p. 20-22, Nov. 2002.
- 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.
- SWISS NORM. **SIA 160**: Effects of loads on structures, 1989.
- ZIVANOVIC, S.; PAVIC, A.; REYNOLDS, P. Vibration serviceability of footbridges under human-induced excitation: a literature review. **Journal of Sound and Vibration**, v. 279, p. 1-74, 2005.