

AVALIAÇÃO DE VIBRAÇÕES EM PASSARELA DE MADEIRA POR MEIO DE MODELO REDUZIDO

P. G. A. Segundinho¹, A. A. Dias², M. R. Carreira³

^{1,2}Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo

³Coordenação de Engenharia de Produção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Campo Mourão



RESUMO

O desempenho das passarelas devido às vibrações causadas por carregamentos humanos tem sido investigado por meio de estruturas reais e modelos reduzidos ao longo dos anos. Este trabalho tem como objetivo principal avaliar o modelo teórico do cálculo de vibrações excessivas por meio das análises em modelo reduzido de uma passarela de madeira no sistema estrutural de vigas simplesmente apoiadas. Os dados foram obtidos de forma teórica, numérica, experimental estática e dinâmica. Quanto aos resultados do ensaio dinâmico experimental, esses foram obtidos por meio impacto, sendo medida a frequência natural na seção central do modelo reduzido. Após a obtenção dos resultados experimentais no modelo reduzido, foram feitas comparações com os resultados numéricos e teóricos. Concluiu-se que a formulação de Euler-Bernoulli é adequada para o cálculo da primeira frequência natural nas direções vertical e lateral em passarelas de madeira simplesmente apoiadas; entretanto, especial atenção deve ser dada para a avaliação da rigidez à flexão na direção lateral.

1- INTRODUÇÃO

As passarelas de madeira, assim como as de concreto e aço, podem apresentar vibrações excessivas devido às ações dinâmicas induzidas por pedestres. Inicialmente, há a necessidade de avaliar o conforto humano em passarelas de madeira com sistema estrutural em vigas simplesmente apoiadas, sendo este o sistema estrutural mais utilizado em passarelas de pequeno e médio porte.

Neste trabalho foi feita a avaliação experimental em modelo reduzido, com a finalidade de comprovação das análises teóricas e numéricas, principalmente com relação as frequências naturais nas direções vertical e lateral. Para ser tomado como base para o modelo reduzido escolheu-se uma passarela de madeira de 24 m de vão,

largura igual a 200 cm e classe de resistência da madeira C60, conforme mostrada na Fig. 1. Tal escolha deu-se porque esta estrutura se encontra na faixa de vãos, onde podem ocorrer problemas de vibrações excessivas, conforme resultados obtidos em estudo prévio, no qual foram avaliadas as vibrações em passarelas de madeira com vãos entre 5 a 35 m, 2 e 1,5 m de largura e classe de resistência da madeira C40 e C60.

Nessa avaliação prévia, as passarelas de madeira foram dimensionadas utilizando os critérios de dimensionamento da norma brasileira NBR 7190 (1997) de projeto de estruturas de madeira, que considera os carregamento de maneira estática, não fornecendo critérios para avaliação das vibrações em passarelas de madeira.

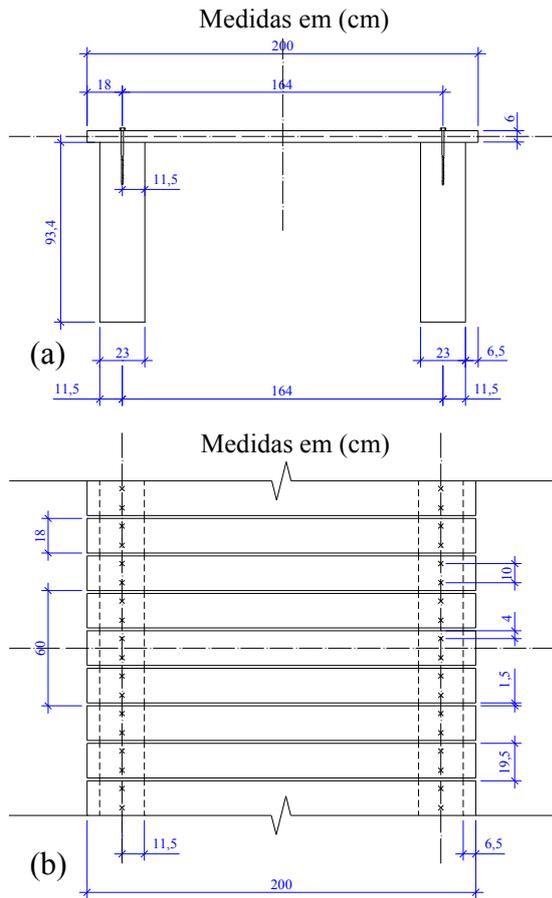


Fig. 1 – Dimensões da passarela de madeira (a) seção transversal e (b) tabuleiro.

As frequências naturais na direção vertical f_{vert} e lateral f_{lat} , tanto da passarela de madeira, quanto do modelo reduzido foram obtidas teoricamente por meio da formulação de Euler-Bernoulli para vigas simplesmente apoiadas.

1.1 - Conforto humano em passarelas de madeira simplesmente apoiadas

A avaliação do conforto humano na passarela de madeira mostrada na Fig. 1, foi feito tomando as recomendações sugeridas pelo Eurocode 5 (2004). Na sequência tem-se o cálculo para avaliação do conforto humano nesta passarela.

Os dados desta passarela de madeira utilizados para avaliação do conforto humano são os seguintes:

$$L = 24 \text{ m}$$

$$E_{\text{e0,ef}} = 1,372 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$$

$$\rho_{\text{ap}} = 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$I_{\text{vert,vig}} = 2 \cdot \frac{0,23 \cdot (0,934)^3}{12} = 3,123 \cdot 10^{-2} \text{ m}^4$$

$$I_{\text{lat,vig}} = 2 \cdot \frac{0,934 \cdot (0,23)^3}{12} = 1,894 \cdot 10^{-3} \text{ m}^4$$

$$A_{\text{sec,pass}} = 2 \cdot 0,23 \cdot 0,934 + 2,0 \cdot 0,05 = 5,296 \cdot 10^{-1} \text{ m}^2$$

$$\zeta = 0,010$$

Cálculo das frequências nas direções vertical e lateral da passarela de madeira por meio da teoria de viga de Euler-Bernoulli:

$$f_{\text{vert}} = \frac{\pi}{2 \cdot 24^2} \sqrt{\frac{(1,372 \cdot 10^{10}) \cdot 3,123 \cdot 10^{-2}}{1000 \cdot 5,296 \cdot 10^{-1}}} \Rightarrow = 2,453 \text{ Hz}$$

$$f_{\text{lat}} = \frac{\pi}{2 \cdot 24^2} \sqrt{\frac{(1,372 \cdot 10^{10}) \cdot 1,894 \cdot 10^{-3}}{1000 \cdot 5,296 \cdot 10^{-1}}} \Rightarrow = 0,604 \text{ Hz}$$

Tal, passarela de madeira apresentou as primeiras frequências naturais nas direções vertical e lateral iguais a 2,453 Hz e 0,604 Hz, respectivamente, tomando módulo de elasticidade efetivo igual a 13720 MPa e densidade da madeira igual a 1000 kg/m³. Como os valores de frequências naturais são abaixo dos limites de 5,0 Hz na direção vertical e 2,5 Hz na direção lateral conforme estabelecidos no Eurocode 5 (2004), recomenda-se que sejam feitas as verificações de acelerações limites nas direções vertical e lateral.

O cálculo das acelerações nas direções vertical a_{vert} e lateral a_{lat} da passarela de madeira por meio do Eurocode 5 (2004) é realizado da seguinte forma:

- Caso I - 1 Pedestre caminhando

$$a_{1,\text{vert}} = \begin{cases} \frac{200}{M \cdot \zeta} & \text{para } f_{1,\text{vert}} \leq 2,5 \text{ Hz (m/s}^2\text{)} \\ \frac{100}{M \cdot \zeta} & \text{para } 2,5 \text{ Hz} < f_{1,\text{vert}} \leq 5,0 \text{ Hz (m/s}^2\text{)} \end{cases}$$

$$a_{1,\text{vert}} = \frac{200}{(1000 \cdot 24 \cdot 5,296 \cdot 10^{-1}) \cdot 0,010} \Rightarrow = 1,574 \text{ m/s}^2$$

$$a_{1,lat} = \frac{50}{M \cdot \zeta} \text{ para } 0,5 \text{ Hz} \leq f_{1,lat} \leq 2,5 \text{ Hz}$$

$$a_{1,lat} = \frac{50}{(1000 \cdot 24 \cdot 5,296 \cdot 10^{-1})} \cdot 0,010 \Rightarrow 0,393 \text{ m/s}^2$$

- Caso II - Grupo distinto de pedestres caminhando ($n_{ped} = 13$)

$$a_{n_{ped},vert} = 0,23 \cdot a_{1,vert} \cdot n_{ped} \cdot k_{1,vert} \Rightarrow 0,23 \cdot 1,574 \cdot 13 \cdot 1 = 4,705 \text{ m/s}^2$$

$$a_{n_{ped},lat} = 0,18 \cdot a_{1,lat} \cdot n_{ped} \cdot k_{1,lat} \Rightarrow 0,18 \cdot 0,393 \cdot 13 \cdot 1 = 0,920 \text{ m/s}^2$$

- Caso III - Grupo contínuo de pedestres caminhando ($n_{ped} = 6A_{piso}$)

$$a_{n_{ped},vert} = 0,23 \cdot a_{1,vert} \cdot n_{ped} \cdot k_{1,vert} \Rightarrow 0,23 \cdot 1,574 \cdot (6 \cdot 2 \cdot 24) \cdot 1 = 104,262 \text{ m/s}^2$$

$$a_{n_{ped},lat} = 0,18 \cdot a_{1,lat} \cdot n_{ped} \cdot k_{1,lat} \Rightarrow 0,18 \cdot 0,393 \cdot (6 \cdot 2 \cdot 24) \cdot 1 = 20,373 \text{ m/s}^2$$

Para o Caso I esta passarela de madeira apresentou acelerações superiores aos limites estabelecidos no Eurocode 5 (2004). A norma europeia estabelece acelerações limite nas direções vertical, igual a $0,7 \text{ m/s}^2$ (7 % g), e lateral, igual a $0,2 \text{ m/s}^2$ (2 % g).

Para o Caso II a densidade de pedestres é igual a $0,271 \text{ ped/m}^2$ e segundo Oeding (1961) um pedestre pode caminhar livremente. No Caso III a densidade de pedestres é igual a $6,0 \text{ ped/m}^2$ e segundo Oeding (1961) valores de densidade de pedestres acima de $1,0 \text{ ped/m}^2$ trata-se de multidão.

Nos dois últimos casos as acelerações foram superiores aos limites estabelecidos no Eurocode 5 (2004). No entanto, observou-se que os limites estabelecidos em norma tratam das acelerações para um pedestre, enquanto os dois últimos casos referem-se a situação de vários pedestres. Portanto, nos três casos avaliados as passarelas de madeira podem ser desconfortantes para os usuários, devido às vibrações excessivas.

2- MODELO REDUZIDO

A preparação do modelo reduzido a partir da passarela de madeira mostrada na Fig. 1 envolve o estudo de aspectos relacionados com a reprodução das características geométrica e física do protótipo. Na Fig. 2 são apresentadas as dimensões dos elementos do modelo reduzido de passarela de madeira.

A espécie de madeira utilizada para construção do modelo reduzido foi o Louro preto (*Ocotea spp*). Esta espécie de madeira foi caracterizada por meio de ensaio de flexão estática para determinação do valor médio do módulo de elasticidade á flexão ($E_{M, flecha}$), cujo valor obtido do $E_{M, flecha}$ das peças de madeira foi igual a 6904 MPa. A densidade média da madeira utilizada no modelo reduzido é igual a 650 kg/m^3 , esta foi seca em temperatura ambiente.

A seguir tem-se o cálculo para verificação do conforto humano no modelo reduzido de passarela de madeira com vão L igual a 6 m, largura b igual a 0,50 cm e

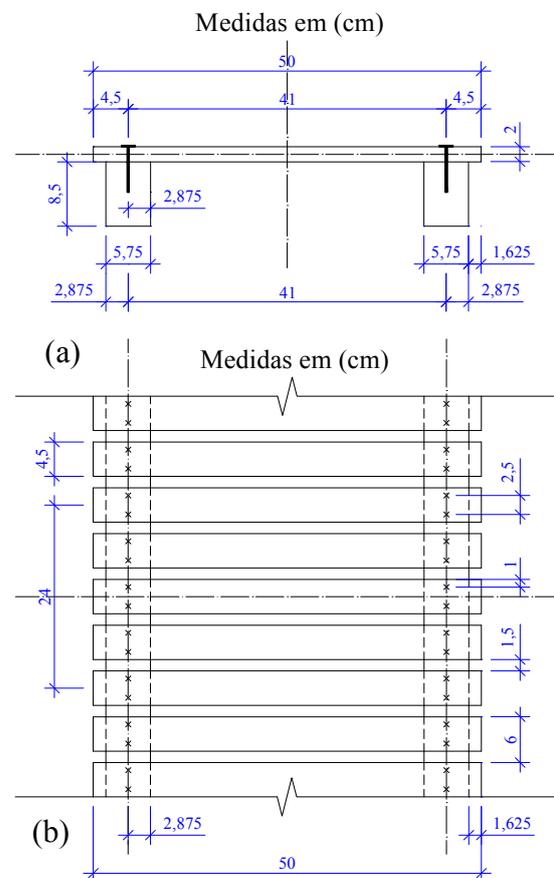


Fig. 2 – Dimensões do modelo reduzido de passarela (a) seção transversal e (b) tabuleiro.

espécie de madeira Louro preto (*Ocotea spp*). Os dados do modelo reduzido de passarela de madeira são:

$$L = 6 \text{ m}$$

$$E_{M, flecha} = 6,904 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$$

$$\rho_{ap} = 650 \text{ kg/m}^3$$

$$I_{vert, vig} = 2 \cdot \frac{0,0575 \cdot (0,085)^3}{12} \Rightarrow$$

$$= 5,885 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$$

$$I_{lat, vig} = 2 \cdot \frac{0,085 \cdot (0,0575)^3}{12} \Rightarrow$$

$$= 2,693 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$$

$$A_{sec, pass} = 2 \cdot 0,0575 \cdot 0,085 + 0,5 \cdot 0,02 \Rightarrow$$

$$= 1,978 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2$$

Cálculo das frequências nas direções vertical e lateral do modelo reduzido de passarela de madeira:

$$f_{vert} = \frac{\pi}{2 \cdot 6^2} \sqrt{\frac{(6,904 \cdot 10^9) \cdot 5,885 \cdot 10^{-6}}{650 \cdot 1,978 \cdot 10^{-2}}} \Rightarrow$$

$$= 2,453 \text{ Hz}$$

$$f_{lat} = \frac{\pi}{2 \cdot 6^2} \sqrt{\frac{(6,904 \cdot 10^9) \cdot 2,693 \cdot 10^{-6}}{650 \cdot 1,978 \cdot 10^{-2}}} \Rightarrow$$

$$= 1,659 \text{ Hz}$$

A preparação do modelo, envolveu o estudo de aspectos relacionados com a reprodução das características geométrica e física do protótipo. Na Fig. 2, são apresentadas as dimensões dos elementos do modelo reduzido de passarela de madeira. O vão e largura foram reduzidos em escala geométrica (1:4). No entanto, os elementos estruturais, vigas e pranchas, foram reduzidos de forma a obter uma frequência natural na direção vertical semelhante à da passarela, considerando as propriedades da madeira empregada na confecção do modelo. Observa-se que não foi possível manter essa semelhança para o caso da vibração na direção lateral, pois isso conduziria a uma largura muito pequena para a viga. Assim, decidiu-se manter a redução da largura na escala geométrica (1:4) sendo adotada uma altura que conduziu a mesma frequência de vibração na direção vertical da passarela real.

O modelo reduzido foi montado atendendo as especificações de projeto, como espaçamento entre as vigas e tábuas, conforme mostrado na Fig. 3.



Fig. 3 – Motagem do modelo reduzido.



Fig. 4 – Modelo reduzido.

Todas as peças de madeira foram marcadas e pré-furadas para colocação dos pregos com cabeça que possuem bitola igual a 17x27 (2.1/2x11). Na Fig. 4 tem-se o modelo reduzido de passarela de madeira, após terminada a fase de confecção.

3 - AVALIAÇÃO NUMÉRICA DA PASSARELA DE MADEIRA E DO MODELO REDUZIDO

A avaliação numérica da passarela de madeira, Fig. 5, e do modelo reduzido de passarela de madeira, Fig. 6, foi conduzida

por meio de investigações computacionais em sistema estrutural de vigas simplesmente apoiadas. As simulações foram realizadas por meio do programa de análise estrutural SAP2000® (2006), que tem como base o MEF. Em razão das características e dimensões do modelo reduzido, optou-se por utilizar elemento finito do tipo SHELL com comportamento de casca para representar as peças de madeira. As malhas de elementos finitos para as tábuas de 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 vertical da viga, com espessura correspondente a da peça de madeira. 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 manual do programa SAP2000® (2006).



Fig. 5 – Modelo numérico de passarela de madeira.

O coeficiente de amortecimento ζ adotado na modelagem numérica foi igual a 0,010 considerando estruturas sem juntas mecânicas, segundo Eurocode 5 (2004).

4- ENSAIO ESTÁTICO DO MODELO REDUZIDO

A determinação da rigidez do modelo por meio de ensaio experimental foi necessária para efeito de comparação com o modelo numérico e teórico. O ensaio foi feito sob a



Fig. 6 – Modelo numérico reduzido de passarela de madeira.

ação de massas que resultavam em deslocamentos medidos por meio de relógio comparador de precisão igual a 0,01 mm localizados na região central do modelo. O deslocamento vertical foi tomado até um valor próximo do limite de $L/200$, segundo a NBR 7190 (1997). O valor obtido experimentalmente da rigidez do modelo reduzido da passarela de madeira foi igual a 417886 kN.cm^2 . Enquanto que o valor obtido teoricamente para o cálculo da frequência natural na direção vertical foi igual a 406300 kN.cm^2 . O modelo reduzido de passarela de madeira pesa aproximadamente 69,20 kg.

5- ENSAIO DINÂMICO

O ensaio dinâmico no modelo reduzido de passarela de madeira foi realizado a partir do posicionamento do sensor de resposta, acelerômetro, na seção central do modelo. Este ensaio deu-se com base na definição do primeiro do modo de vibrar de uma viga simplesmente apoiada, pois o primeiro modo de vibrar do modelo reduzido é semelhante ao primeiro modo de vibrar de uma viga simplesmente apoiada dado por meio da teoria de viga de Euler-Bernouille. Logo, é conhecido da literatura que o primeiro modo de vibrar de uma viga simplesmente apoiada apresenta amplitudes máximas em $L/2$.

A medição da resposta dinâmica do modelo reduzido foi realizada por meio de acelerômetro uniaxial do tipo resistivo de sensibilidade igual a 0,8325 mV/g, faixa de leitura de frequências de 0 a 72 Hz com capacidade de obtenção de leituras de aceleração de 0 a 2 g. O acelerômetro resistivo corresponde ao modelo AS-2GA fabricado pela *Kyowa*, conforme mostrado na Fig. 7.



Fig. 7 – Acelerômetro resistivo localizado na seção central do modelo reduzido.

6 - RESULTADOS

Na Fig. 8 tem-se a avaliação estática entre o modelo numérico e experimental, onde foram tomados os mesmos carregamentos. Constatou-se que ambos os deslocamentos verticais são semelhantes.

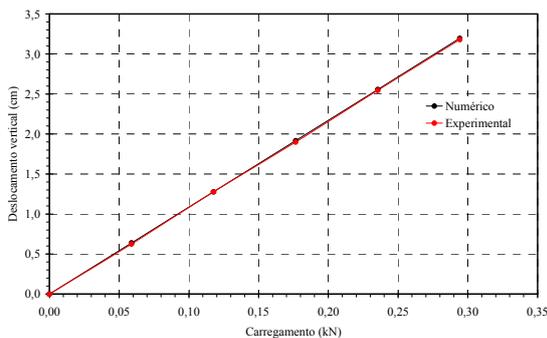


Fig. 8 – Deslocamento vertical do modelo reduzido de passarela de madeira.

Na Tabela 1 foi possível fazer uma comparação entre os valores de frequências naturais nas direções vertical e lateral obtidas de forma numérica (N) e teórica (T) para a passarela de madeira simplesmente apoiada.

Tabela 1 – Resultados teóricos (T) versus numéricos (N) das frequências naturais nas direções vertical e lateral da passarela de madeira.

Modo	Frequência (Hz)		Desvio (%)
□	$f_{vert,N}$	$f_{vert,T}$	$f_{vert,T}$ vs. $f_{vert,N}$
1 - Vertical	2,431	2,453	0,90
□	$f_{lat,N}$	$f_{lat,T}$	$f_{lat,T}$ vs. $f_{lat,N}$
1 - Lateral	0,822	0,604	26,52

Os valores teóricos (T) e numéricos (N) das frequências naturais nas direções vertical e lateral apresentados na Tabela 2 são referentes a modelo reduzido de

passarela de madeira simplesmente apoiada.

Na Tabela 3 fez-se a comparação entre os valores de frequências naturais nas direções vertical e lateral obtidas de forma teórica (T) e experimental (E) para o modelo reduzido. Estas frequências foram obtidas a partir da rigidez obtida no ensaio de flexão estática e da massa do modelo.

Na Tabela 4 fez-se a comparação entre os valores de frequências naturais nas direções vertical e lateral obtidas de forma numérica (N) e experimental (E) para o modelo reduzido.

Na Tabela 5 fez-se a comparação entre os valores de frequências naturais nas direções vertical e lateral obtidas de forma experimental estática (E) e experimental dinâmica (Ed) para o modelo reduzido. A

Tabela 2 – Resultados teóricos (T) versus numéricos (N) das frequências naturais nas direções vertical e lateral do modelo reduzido.

Modo	Frequência (Hz)		Desvio (%)
□	$f_{vert,T}$	$f_{vert,N}$	$f_{vert,T}$ vs. $f_{vert,N}$
1 - Vertical	2,675	2,453	8,30
□	$f_{lat,T}$	$f_{lat,N}$	$f_{lat,T}$ vs. $f_{lat,N}$
1 - Lateral	3,368	1,659	50,74

Tabela 3 – Resultados teóricos (T) versus experimentais (E) das frequências naturais nas direções vertical e lateral do modelo reduzido.

Modo	Frequência (Hz)		Desvio (%)
□	$f_{vert,T}$	$f_{vert,E}$	$f_{vert,T}$ vs. $f_{vert,E}$
1 - Vertical	2,453	2,626	6,59
□	$f_{lat,T}$	$f_{lat,E}$	$f_{lat,T}$ vs. $f_{lat,E}$
1 - Lateral	1,659	3,443	51,82

Tabela 4 – Resultados numéricos (N) versus experimentais (E) das frequências naturais nas direções vertical e lateral do modelo reduzido.

Modo	Frequência (Hz)		Desvio (%)
□	$f_{vert,N}$	$f_{vert,E}$	$f_{vert,T}$ vs. $f_{vert,E}$
1 - Vertical	2,675	2,626	1,87
□	$f_{lat,N}$	$f_{lat,E}$	$f_{lat,T}$ vs. $f_{lat,E}$
1 - Lateral	3,368	3,443	2,18

Tabela 5 – Resultados experimentais estáticos (E) versus experimentais dinâmicos (Ed) das frequências naturais nas direções vertical e lateral do modelo reduzido.

Modo	Frequência (Hz)		Desvio (%)
□	$f_{vert,E}$	$f_{vert,Ed}$	$f_{vert,Ed}$ vs. $f_{vert,E}$
1 - Vertical	2,626	2,734	3,95
□	$f_{lat,N}$	$f_{lat,E}$	$f_{lat,T}$ vs. $f_{lat,E}$
1 - Lateral	3,443	7,520	54,22

frequência natural experimental dinâmica nas direções vertical e lateral foram obtidas por meio de ensaio descrito no item cinco.

7- CONCLUSÕES

Em análises prévias constatou-se que as passarelas de madeira em vigas simplesmente apoiadas projetadas por meio da norma brasileira NBR 7190 (1997) podem apresentar vibrações excessivas nas direções vertical e lateral.

Os valores de frequência teóricos e numéricos são próximos do experimental, quando se trata da direção vertical, indicando que a formulação teórica e a modelagem numérica utilizadas representam de maneira adequada o comportamento real do modelo. Como, no modelo avaliado experimentalmente, o tabuleiro pouco contribui para a rigidez vertical, pode-se concluir que estruturas reais construídas de forma semelhante (tabuleiro de madeira) podem ser avaliadas quanto às vibrações verticais utilizando a formulação de Euler-Bernoulli, considerando apenas as rigidezes à flexão das vigas principais.

Entretanto, para a direção lateral isso não é verificado, existindo uma grande discordância, mesmo entre os valores teóricos e numéricos. Uma das grandes dificuldades, nesse caso, é a avaliação da rigidez à flexão do conjunto na direção transversal, que é afetada pela forma de ligação das tábuas do tabuleiro nas vigas

principais. Ao contrário do caso anterior, a consideração da inércia apenas das vigas principais, desprezando o efeito do tabuleiro, conduz a um cálculo muito conservador.

O estudo em modelos reduzidos de passarelas de madeira em vigas simplesmente apoiadas pode ser uma ferramenta bastante útil para validar a aplicação de modelo teórico e modelagem numérica nessas estruturas.

Na sequência deste estudo pretende-se realizar a análise modal experimental do modelo reduzido de passarela de madeira com a finalidade de obter as propriedades modais.

8- REFERÊNCIAS

- CSI: CSI ANALYSIS REFERENCE MANUAL FOR SAP2000. 2006. Computers and Structures, Inc., California, USA.
- EUROPEAN COMMITTEE OF STANDARDIZATION. EUROCODE 5: Design of timber structures, Part 2, Bridges. Brussels, 29 p, 2004.
- McConnell, K.G. e Varoto, P.S. 2008. Vibration testing: theory and practice. New York, John Wiley & Sons, USA.
- NBR 7190: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 1997. Projeto de estruturas de madeira. São Paulo, 107 p.
- Oeding, D. 1961. Verkehrsanalyse Fußgänger, Stadt Stuttgart Planungsamt, Abt. Verkehr, (in German).