

## ASPECTOS TEÓRICOS DA AVALIAÇÃO DE VIBRAÇÕES EM PASSARELA DE MADEIRA POR MEIO DE MODELO REDUZIDO

Segundinho, P.G.A.<sup>1</sup>, Dias, A.A.<sup>2</sup>, Carreira, M. R.<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup>Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo

<sup>3</sup>Coordenação 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 físicos ao longo dos anos. Este trabalho tem como objetivo avaliar o modelo teórico do cálculo de vibrações excessivas por meio das análises em modelo físico, em escala reduzida, de uma passarela de madeira no sistema estrutural de vigas simplesmente apoiadas. Os dados foram obtidos de forma teórica, numérica, experimental e experimental dinâmico. 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 do modelo físico, foram feitas comparações com os resultados numéricos e teóricos. Concluiu-se que os resultados teóricos apresentam valores menores de frequências naturais do que numéricos e experimentais.

### 1- INTRODUÇÃO

As passarelas de madeira em vigas biapoiadas, em algumas situações, podem apresentar vibrações excessivas, causando desconforto aos pedestres. Portanto, há a necessidade de avaliar o conforto humano em passarelas de madeira com sistema estrutural em vigas biapoiadas.

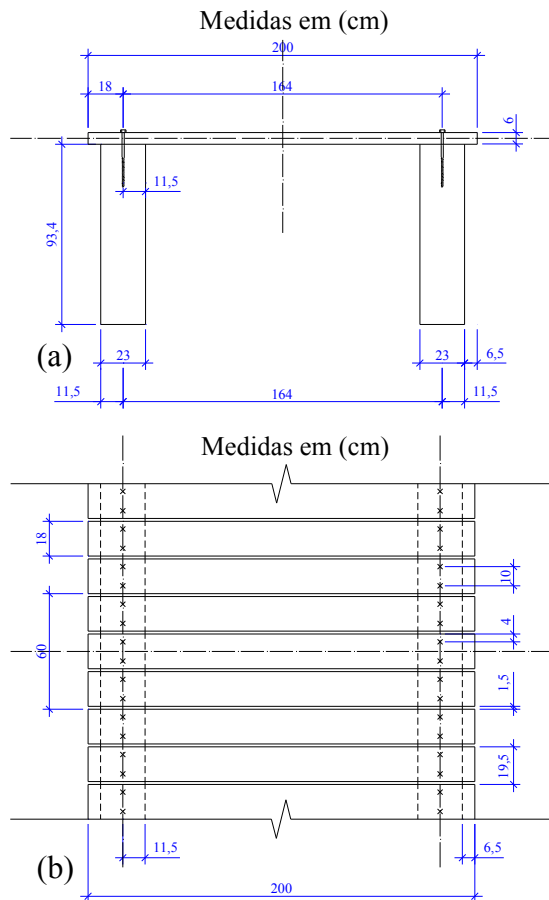
Neste trabalho, a avaliação foi feita por meio de modelo reduzido de passarela de madeira com 24 m vão e 2 m de largura. Essas dimensões foram estipuladas a partir de trabalho preliminar, no qual foram avaliadas as vibrações de passarelas de madeira com vãos entre 5 a 35 m, 2 m de largura e classe de resistência da madeira C60. Nessa avaliação, as passarelas foram dimensionadas utilizando os critérios de

dimensionamento da norma brasileira NBR 7190 (1997), que considera os carregamento de maneira estática, não fornecendo critérios para avaliação das vibrações.

A partir desta passarela, cujas dimensões estão mostradas na Fig. 1, foi construído um modelo reduzido com a finalidade de fazer uma avaliação por meio de ensaios experimentais. Também foi realizada análise teórica e numérica desse modelo físico, para fins de comparação entre as vibrações medidas no modelo físico.

As frequências naturais na direção vertical  $f_{\text{vert}}$  e lateral  $f_{\text{lat}}$ , tanto da passarela de madeira, quanto do modelo reduzido foram obtidas teoricamente por meio da teoria de viga de Euler-Bernoulli para as

condições de contorno biapoimada, também conhecido com sistema estrutural de vigas simplesmente apoiadas.



### 1.1 - Conforto humano em passarelas de madeira biapoimadas

O 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 na passarela de madeira com vão  $L$  igual a 24 m, largura  $b$  igual a 200 cm feita de madeira de classe de resistência C60.

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

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

$$E_{c0,ef} = 1,372 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$$

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

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

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

$$A_{\text{sec,pass}} = 2 \cdot 0,23 \cdot 0,934 + 2 \cdot 0 \cdot 0,05$$

$$A_{\text{sec,pass}} = 5,296 \cdot 10^{-1} \text{ m}^2$$

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/m<sup>3</sup>. Como os valores de frequências naturais são abaixo dos limites de 5,0 Hz na direção vertical e 2,5 Hz na direção lateral estabelecidos no Eurocode 5 (2004), recomenda-se que sejam feitas as verificações de acelerações limites nas direções vertical e lateral. A norma europeia estabelece acelerações limites nas direções vertical, menor ou igual a 0,7 m/s<sup>2</sup> (7 % g), e lateral, menor ou igual a 0,2 m/s<sup>2</sup> (2 % g). O cálculo das acelerações nas direções vertical  $a_{\text{vert}}$  e lateral  $a_{\text{lat}}$  da passarela de madeira por meio do Eurocode 5 (2004) é realizado da seguinte forma:

#### • Caso I - 1 Pedestre caminhando

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

$$a_{1,\text{vert}} = \frac{100}{(1000 \cdot 24 \cdot 5,296 \cdot 10^{-1}) \cdot 0,010} \Rightarrow$$

$$= 0,787 \text{ m/s}^2$$

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

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

$$= 0,393 \text{ m/s}^2$$

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

$$a_{n_{ped},vert} = 0,23 \cdot a_{1,vert} \cdot n_{ped} \cdot k_{1,vert} \Rightarrow$$

$$= 0,23 \cdot 0,787 \cdot 13 \cdot 1 = 2,353 \text{ m/s}^2$$

$$a_{n_{ped},lat} = 0,18 \cdot a_{1,lat} \cdot n_{ped} \cdot k_{1,lat} \Rightarrow$$

$$= 0,18 \cdot 0,393 \cdot 13 \cdot 1 = 0,920 \text{ m/s}^2$$

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

$$a_{n_{ped},vert} = 0,23 \cdot a_{1,vert} \cdot n_{ped} \cdot k_{1,vert} \Rightarrow$$

$$= 0,23 \cdot 0,787 \cdot (6 \cdot 2 \cdot 24) \cdot 1 = 52,131 \text{ m/s}^2$$

$$a_{n_{ped},lat} = 0,18 \cdot a_{1,lat} \cdot n_{ped} \cdot k_{1,lat} \Rightarrow$$

$$= 0,18 \cdot 0,393 \cdot (6 \cdot 2 \cdot 24) \cdot 1 = 20,373 \text{ m/s}^2$$

## 2- MODELO REDUZIDO

A preparação do modelo físico 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. Nota-se que nem todas as dimensões das peças de madeira utilizadas no modelo reduzido correspondem fielmente às do protótipo. As vigas no projeto original possuem 93,40 cm de altura, que em escala 1:4 seria aproximadamente 23,35 cm, porém esta altura foi reduzida para 8,5 cm no modelo. Da mesma forma que no projeto original as tábuas de madeira possuem 6 cm de espessura, e no modelo reduzido corresponderiam a 1,5 cm, no entanto foram aumentadas para 2 cm. Na Tabela 1 tem-se um resumo dos fatores de escala obtidos entre passarela de madeira e modelo reduzido.

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 à 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<sup>3</sup>, esta foi seca em temperatura ambiente. Tais alterações realizadas nas dimensões do modelo reduzido, que não correspondem a escala 1:4, tiveram como objetivo, aproximar às frequências naturais do modelo reduzido às frequências naturais da passarela de madeira.

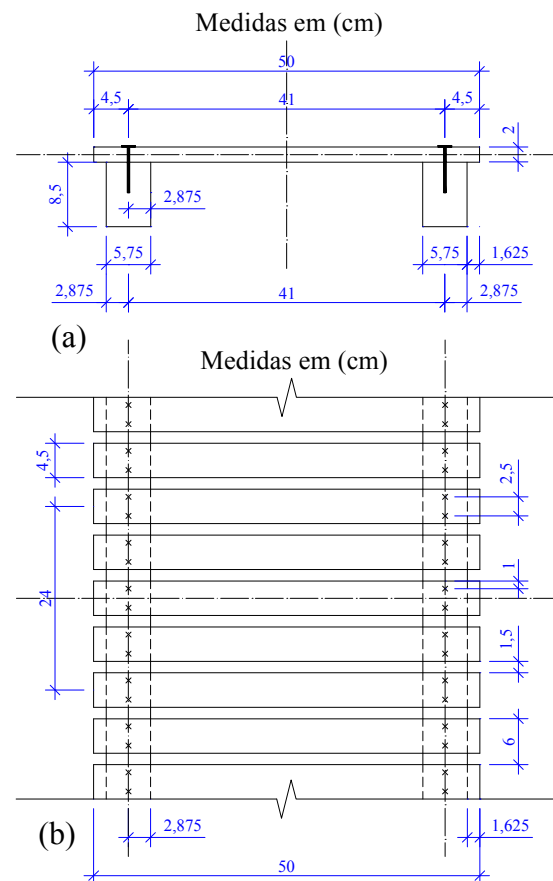


Fig. 2 – Dimensões do modelo reduzido de passarela (a) seção transversal e (b) tabuleiro.

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 espécie de madeira Louro preto (*Ocotea spp*).

Os dados do modelo reduzido de passarela de madeira são:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Tabela 1 – Resumo teórico dos fatores de escala entre passarela de madeira e modelo reduzido.

Propriedades	Fator de escala
Vão da passarela	1:4
Largura da passarela	1:4
Altura da viga	1:10,988
Largura da viga	1:4
Altura das tábuas	1:3
Largura das tábuas	1:4
Distância entre tábuas	1:1
Módulo de elasticidade	1:1,987
Densidade	1:1,538
Frequência vertical	1:1
Frequência lateral	1:0,364

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



Fig. 3 – Montagem do modelo reduzido.



Fig. 4 – Modelo reduzido.

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



Fig. 5 – Modelo numérico de passarela de madeira.

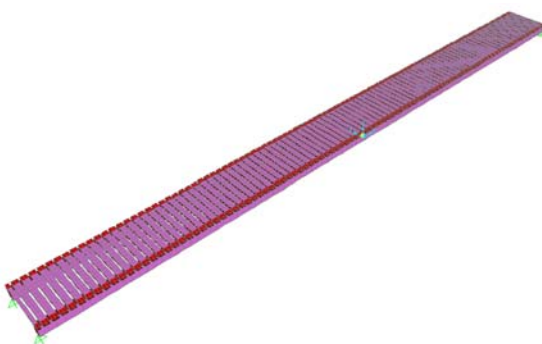


Fig. 6 – Modelo numérico reduzido de passarela de madeira.

#### 4- ENSAIO ESTÁTICO

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 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  $417886 \text{ kN.cm}^2$ . Enquanto que o valor obtido teoricamente para o cálculo da frequência natural na direção vertical foi igual a  $406300 \text{ kN.cm}^2$ , o que equivale a aproximadamente 97 % do obtido experimentalmente, ou seja, do valor real. 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 biapoiada, pois o primeiro modo de vibrar do modelo reduzido é semelhante ao primeiro modo de vibrar de uma viga biapoiada dado por meio da teoria de viga de Euler-Bernouille. Logo, é conhecido da literatura que o primeiro modo de vibrar de uma viga biapoiada 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  $0,8325 \text{ mV/g}$ , faixa de leitura de frequências de 0 a 72 Hz com capacidade de obtenção de leituras de aceleração de 0 a 2 g, aproximadamente de 0 a  $19,61 \text{ m/s}^2$ . O acelerômetro resistivo corresponde ao modelo AS-2GA fabricado pela *Kyowa*, conforme mostrado na Fig. 7.



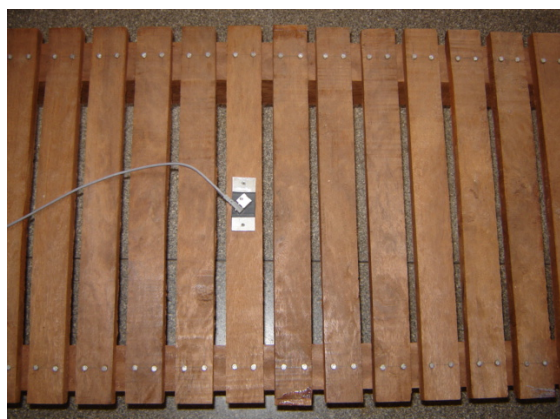


Fig. 7 – Acelerômetro resistivo localizado na seção central do modelo reduzido.

## 6- RESULTADOS

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

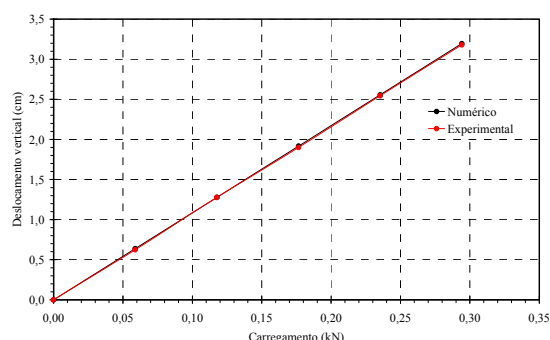


Fig. 8 – Deslocamento vertical do modelo reduzido de passarela de madeira.

Na Tabela 2 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.

Tabela 2 – Resultados teóricos “T” versus numéricos “N” das frequências naturais na direção vertical e lateral da passarela de madeira.

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

Os valores teóricos e numéricos das frequências naturais nas direções vertical e lateral apresentados na Tabela 3

são referentes a modelo reduzido de passarela de madeira.

Tabela 3 – Resultados teóricos “T” versus numéricos “N” das frequências naturais na direção vertical e lateral do modelo reduzido de passarela de madeira.

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

Na Tabela 4 fez-se a comparação entre os valores de frequências naturais nas direções vertical e lateral obtidas de forma teórica e experimental para o modelo reduzido. A frequência natural na direção vertical foi obtida de forma experimental a partir da rigidez do ensaio estático e da massa do modelo.

Tabela 4 – Resultados teóricos “T” versus experimentais “E” das frequências naturais na direção vertical e lateral do modelo reduzido de passarela.

Modo	Frequência (Hz)		Desvio (%)
Ø	$f_{vert,T}$	$f_{vert,E}$	$f_{vert,T}$ v.s. $f_{vert,E}$
1 - Vertical	2,453	2,626	6,59
Ø	$f_{lat,T}$	$f_{lat,E}$	$f_{lat,T}$ v.s. $f_{lat,E}$
1 - Lateral	1,659	-	-

Na Tabela 5 fez-se a comparação entre os valores de frequências naturais nas direções vertical e lateral obtidas de forma numérica e experimental para o modelo reduzido.

Tabela 5 – Resultados numéricos “N” versus experimentais “E” das frequências naturais na direção vertical e lateral do modelo reduzido de passarela.

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

Na Tabela 6 fez-se a comparação entre os valores de frequências naturais nas direções vertical e lateral obtidas de forma experimental e experimental dinâmica para o modelo reduzido. A frequência natural experimental dinâmica na direção vertical foi obtida por meio de ensaio descrito no item cinco. Na avaliação experimental a frequência natural experimental na direção

lateral do modelo reduzido de passarela foi imitada, uma vez que numericamente o valor desta encontra-se acima de 2,5 Hz no modelo reduzido, portanto está fora do limite de verificação.

Tabela 6 – Resultados experimentais “E” *versus* experimentais dinâmicos “Ed” das frequências naturais na direção vertical e lateral do modelo reduzido de passarela.

Modo	Frequência (Hz)		Desvio (%)
$\phi$	$f_{\text{vert,E}}$	$f_{\text{vert,Ed}}$	$f_{\text{vert,T}}$ vs. $f_{\text{vert,E}}$
1 - Vertical	2,626	2,734	3,95
$\phi$	$f_{\text{lat,N}}$	$f_{\text{lat,E}}$	$f_{\text{lat,T}}$ vs. $f_{\text{lat,E}}$
1 - Lateral	-	-	-

## 7- CONCLUSÕES

As passarela de madeira projetadas por meio da norma brasileira NBR 7190 (1997) podem apresentar vibrações excessivas nas direções vertical e lateral.

O modelo reduzido de passarela de madeira pode ser utilizado para validar o modelo teórico e a modelagem numérica.

Neste modelo reduzido de passarela de madeira privilegiou-se o estudo relativo a frequência natural na direção vertical, uma vez que é a mais estudada devido ao maior número de caso de vibrações excessivas serem atribuídas a parcela de carregamento dinâmicos de pedestres nesta direção.

Os cálculos teóricos, tanto no projeto de passarela de madeira, quanto no modelo reduzido apresentam valores de frequências naturais na direção vertical inferiores aos resultados numéricos e experimentais.

A partir dos resultados pôde-se verificar que as previsões numéricas, teóricas e experimentais para a frequência natural do primeiro modo de vibrar na direção vertical proporcionou resultados, com desvio máximo da ordem de 9%.

É preciso deixar claro que o modelo teórico de cálculo de frequência naturais apresenta valores inferiores aos numéricos e experimentais no projeto de passarela de madeira e modelo reduzido. Tais valores apresentam-se menores porque no modelo teórico não é contemplado a inércia das

tábuas de madeira e também a rigidez proporcionada ligação entre as tábuas e vigas de madeira.

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

## 8- REFERÊNCIAS

- CSI: CSI ANALYSIS REFERENCE MANUAL FOR SAP2000. 2006. Computers and Structures, Inc., California, USA.
- 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.
- EUROPEAN COMMITTEE OF STANDARDIZATION. EUROCODE 5: Design of timber structures, Part 2, Bridges. Brussels, 29 p, 2004.