

## Aplicação do ensaio de vibração transversal livre na avaliação não-destrutiva de vigas de madeira laminada colada (MLC)

**Marcelo Rodrigo Carreira**, *Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Campo Mourão, Coordenação de Engenharia Civil, Campo Mourão, PR. e-mail: carreira@utfpr.edu.br*

**Pedro Gutemberg de Alcântara Segundinho, Carlito Calil Neto, Antônio Alves Dias e Carlito Calil Junior**, *Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia de Estruturas, São Carlos, SP. e-mail: p\_gutemberg2001@yahoo.com.br, netounesp@gmail.com, dias@sc.usp.br e calil@sc.usp.br*

**Claudio José dos Santos**, *Companhia Paulista de Força e Luz, Ribeirão Preto, SP. e-mail: claudio@cpfl.com.br*

**Resumo:** A classificação das lâminas é um dos pontos críticos na fabricação de elementos estruturais de madeira laminada colada (MLC), pois além de permitir o melhor aproveitamento da madeira contribui também para otimizar as propriedades mecânicas desses elementos. Em função do elevado custo dos elementos estruturais de MLC, as técnicas de Avaliação Não-Destrutiva (AND) são alternativas interessantes para verificar a qualidade desses elementos. Este trabalho apresenta um estudo sobre a utilização do ensaio de vibração transversal livre para a avaliação do módulo de elasticidade de vigas de MLC. Para tanto, foram produzidas 54 vigas de MLC com dimensões nominais de 9 cm x 9 cm x 200 cm, com madeira extraída a partir de florestas plantadas. As vigas foram submetidas aos ensaios de flexão estática e de vibração transversal livre para obtenção dos módulos de elasticidade estático e dinâmico, respectivamente. Na análise dos resultados obteve-se uma boa correlação  $R^2$  igual a 0,9671. Concluiu-se que o ensaio de vibração transversal livre é prático para avaliação do módulo de elasticidade à flexão de elementos estruturais de MLC, sendo este uma alternativa ao ensaio de flexão estática, um vez que também possibilita o controle de qualidade dos produtos acabados.

**Palavras-chave:** ensaio não destrutivo, vibração transversal, vigas de MLC.

**Abstract:** The grading of the lumber is a critical point in the manufacture of glued-laminated (glulam) timber members, because allow better use of wood and also contributes to optimize the mechanical properties of these members. Due to the high cost of the structural glulam members the Nondestructive Evaluation (NDE) techniques are interesting alternatives to verify the quality of them. This paper presents a study on the use of transverse free vibration test for evaluating the bending modulus of glulam beams. Thus, were produced 54 glulam beams with nominal dimensions of 9 cm x 9 cm x 200 cm, with wood from planted forests. The beams were subjected to static bending and transverse free vibration tests to obtain the static and dynamic modulus of elasticity, respectively. In analyzing the results it was obtained a good correlation  $R^2$  equal to 0,9671. Concluded the transverse free vibration test is practical to evaluate the bending modulus of elasticity of structural glulam members, this being an alternative to static bending, also enables quality control of finished products.

**Keywords:** nondestructive testing, transverse vibration, MLC beams.

## 1. Introdução

A Madeira Laminada Colada (MLC) é um produto de engenharia que requer precisão de fabricação em todos os seus estágios. O produto acabado pode somente ser testado em condições laboratoriais, portanto é necessário o controle de qualidade na produção para assegurar que as propriedades físicas da MLC sejam adequadas com aquelas especificadas nas normas vigentes, conforme (CAN/CSA 0177, 2006)(3).

A maior vantagem da MLC é que se pode aproveitar uma grande quantidade de madeira de pequenas dimensões para serem usadas como parte de laminações de vigas estruturais. Outro fator importante é que madeiras de variadas classes de resistência podem ser usadas nas vigas de forma que as peças com maiores resistências componham as partes mais externas e as de menor resistência a região interna da viga. Pode-se também variar a espécie de madeira na estrutura, de acordo com a solicitação de resistência das laminações em cada região da viga, (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 1999)(4).

Entre a utilização mais comum, vem ganhando cada vez mais espaço no mercado nacional da construção civil, o emprego de elementos estruturais de MLC, solução estrutural que tem sido utilizada com sucesso há muito tempo na construção de habitações com resultados satisfatórios na Europa, Japão e Estados Unidos. Nesses países, há muitos anos, os produtos de MLC têm sido produzidos com um elevado controle de qualidade das suas propriedades. Eles têm recebido um aumento contínuo de utilização em estruturas de engenharia, (BODIG e JAYNE, 1982)(2).

Mesmo com rigoroso controle sobre as matérias primas e o processo de produção, os elementos estruturais de MLC apresentam certa variabilidade nas propriedades mecânicas inerente ao próprio material empregado. Assim sendo, é fundamental verificar se as propriedades mecânicas definidas em projeto foram atendidas. Para tanto, usualmente emprega-se o ensaio não-destrutivo de flexão estática pelo qual estima-se a resistência mecânica à partir da rigidez à flexão dos elementos. Porém, dependendo das dimensões dos elementos estruturais é necessário dispor de um sistema de reação de grandes proporções.

A rigidez à flexão também pode ser obtida por meio de ensaios dinâmicos como ondas de tensão, ultrassom e vibração transversal os quais podem ser realizados equipamentos de menores custo e dimensões em relação ao sistema necessário para a realização do ensaio de flexão estática.

O objetivo deste trabalho foi avaliar a exatidão da técnica de vibração transversal na estimativa do módulo de elasticidade à flexão de vigas de MLC, para efeito de controle de qualidade. Nesse sentido foi avaliada a técnica de Avaliação Não-Destrutiva (AND), vibração transversal, versus ensaio estático padronizado na norma brasileira NBR 8458 (1984)(1).

## 2. Materiais e métodos

### 2.1. Materiais

Para a produção das vigas de MLC, foram utilizadas as espécies de madeira Teca (*Tectona grandis*), Pinus Oocarpa (*Pinus oocarpa shiede*) e Lyptus®. Esta última não tem nome científico, por se tratar de uma marca registrada da Aracruz Produtos de Madeira (APM). Todas essas madeiras foram extraídas a partir de florestas renováveis de árvores plantadas no Brasil, portanto sem correr o risco de agredir o meio ambiente. Para cada espécie foram produzidas 18 vigas de MLC, sendo 9 coladas com o adesivo Resorcina Fenol Formaldeído (RFF) e 9 com o adesivo Poliuretano (PUR), totalizando 54 vigas para as três espécies de madeira. Tais vigas de MLC foram montadas com peças classificadas, visual e mecanicamente, que foram coladas com intensidade de pressão igual a 1,0 MPa, distribuições não aleatórias das lâminas e gramatura da linha de cola situada na faixa de 300 a 350 g/m<sup>2</sup>. As vigas de MLC tinham comprimento de 200 cm e seção transversal de 9

cm x 9 cm e foram confeccionadas com três peças de madeira, cada lâmina com 30 mm de espessura. Na fig. 1 é mostrado a fabricação das vigas de MLC numa prensa tipo “A”.



Figura 1 – Fabricação das vigas de MLC na prensa tipo “A”

## 2.2. Ensaio de flexão estática

O ensaio estático das vigas de MLC foi realizado de acordo com a norma brasileira NBR 8458 (1984)(1), com a viga apoiada no centro do vão e a aplicação de forças iguais situadas a 10 cm das extremidades, fig. 2, e as flechas sendo medidas nos pontos de aplicação dessas forças.



Figura 2 – Ensaio de flexão estática nas vigas de MLC

O módulo de elasticidade estático ( $E_{M,stat}$ ) é obtido aplicando-se os valores médios de deslocamentos e esforços na eq. 1 e, considerando a simetria, assumindo cada metade como uma viga em balanço.

$$E_{M,stat} = \frac{P \cdot a^3}{3 \cdot I \cdot \delta} \quad (1)$$

Sendo:  $P = 4$  kN (valor de cada força);  $a$  = distância entre o ponto de aplicação de cada força até o centro do vão (m);  $\delta$  = flechas medidas nos pontos de aplicação das forças (m);  $I$  = momento de inércia da seção transversal ( $m^4$ ).

## 2.3. Ensaio de vibração transversal

No ensaio de vibração transversal livre foi adotada a condição de contorno livre-livre e, para tanto, as vigas foram suspensas utilizando linhas de Nylon e molas de pequena rigidez, conforme mostrado o esquema de ensaio na fig. 3. A linha de Nylon foi posicionada nos

pontos nodais do primeiro modo de flexão de uma viga em suspensão livre-livre. O módulo de elasticidade dinâmico é obtido por meio da eq. 2.

$$E_{M,VT} = \frac{f^2 \cdot (2 \cdot \pi)^2 \cdot M \cdot L^3}{(\lambda)^4 \cdot I} \quad (2)$$

Sendo:  $f$  = frequência do primeiro modo de flexão (Hz);  $M$  = massa da viga (kg);  $L$  = comprimento (m);  $\lambda$  = constante para a condição de contorno livre-livre (4,73);  $I$  = momento de inércia da seção transversal ( $m^4$ ).

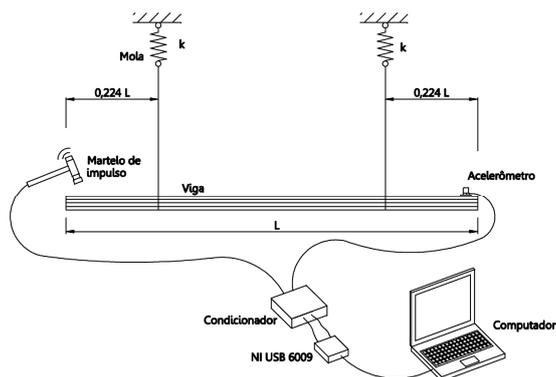


Figura 3 – Esquema do ensaio de vibração transversal

A vibração foi produzida por meio de impactos desferidos verticalmente em uma das extremidades da viga com um martelo de impulso modelo 8206-002 fabricado pela *Brüel & Kjær* com sensibilidade igual a 2,3 mV/N. A resposta foi medida por meio de um acelerômetro modelo *ISOTRON 7254A-100* fabricado pela *Endevco Corporation* com sensibilidade igual a 111,6 mV/g, fixado na outra extremidade da viga de MLC utilizando cera de abelha. Os sinais do martelo e do acelerômetro foram condicionados por uma placa condicionadora desenvolvida pelo primeiro autor. O sinal resultante foi digitalizado por uma placa de aquisição modelo NI USB 6009, fabricada pela National Instruments. Para cada impacto desferido foram amostrados 65536 leituras a uma taxa de amostragem de 10 kHz. O tempo necessário para ensaiar cada viga variou de 4 a 6 minutos.

Os sinais foram processados em um programa feito na linguagem de programação desenvolvida pela National Instruments chamada LabVIEW (*Laboratory Virtual Instruments Engineering Workbench*) no qual foi possível obter a Função de Resposta em Frequência (FRF) de cada viga para uma média de 10 espectros. A partir da FRF de aceleração foi feita a identificação dos parâmetros modais por meio do programa Modal-Id, desenvolvido pelo primeiro autor, o qual emprega o método Rational Fraction Polynomial (RFP). Na fig. 4 tem-se o exemplo de uma FRF utilizada para obtenção da frequência do primeiro modo de flexão (parâmetro modal empregado na obtenção do módulo de elasticidade dinâmico).

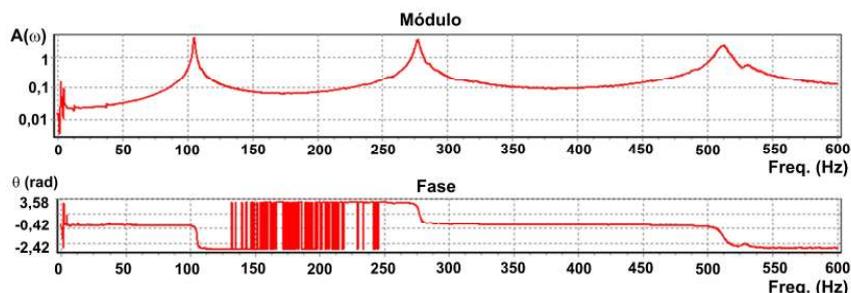


Figura 4 – Exemplo de uma FRF.

### 3. Resultados

A tab. 1 mostra o resultado dos ensaios mecânicos com as vigas de MLC.

Tabela 1 – Resultados dos ensaios mecânicos nas vigas de MLC

Viga	Madeira	Adesivo	b <sub>m</sub> (mm)	h <sub>m</sub> (mm)	Massa (kg)	l (m)	Freq. (Hz)	E <sub>M,stat</sub> (GPa)	E <sub>M,VT</sub> (GPa)
1	Teca	Purbound	90,89	94,16	10,70	2,00	101,32	9,93	11,00
2			90,73	99,37	10,05	2,00	108,20	9,45	10,03
3			90,66	92,97	10,20	2,00	105,30	10,31	11,81
4			90,88	99,77	10,00	2,00	114,87	10,51	11,11
5			91,17	98,54	10,35	2,01	106,93	9,67	10,37
6			90,78	100,24	10,25	2,00	107,07	9,01	9,77
7			90,68	98,01	10,20	2,01	105,26	8,92	10,10
8			90,67	99,66	10,20	2,00	110,67	9,64	10,58
9			90,72	98,76	10,50	2,00	104,18	8,92	9,90
10		91,65	97,54	9,85	2,00	110,77	9,65	10,80	
11		92,44	89,87	8,70	2,00	97,84	8,58	9,43	
12		92,07	90,45	9,45	2,00	98,13	9,20	10,13	
13		92,57	91,23	9,85	2,00	96,30	8,90	9,89	
14		92,62	90,34	9,10	2,00	90,72	8,73	8,32	
15		92,67	90,55	9,20	2,01	95,77	8,35	9,36	
16		92,39	89,74	9,20	2,00	99,41	8,93	10,33	
17		92,65	90,74	9,40	2,00	115,98	10,45	13,85	
18		92,43	91,84	10,00	2,00	101,75	10,24	10,98	
19	Pinus	Purbound	90,30	94,08	11,25	2,00	118,58	13,67	15,88
20			90,21	92,81	10,70	2,00	127,62	16,08	18,24
21			90,06	91,92	10,90	2,00	113,25	14,03	15,04
22			89,98	88,30	8,35	2,00	105,10	10,63	11,21
23			90,58	92,92	10,65	2,00	115,26	13,32	14,71
24			89,85	92,26	8,55	2,00	116,80	11,28	12,43
25			90,01	91,56	9,60	2,00	112,85	12,05	13,32
26			91,27	96,65	9,85	2,00	105,48	9,71	10,05
27			90,80	91,53	9,70	2,00	118,64	13,02	14,86
28		91,17	94,47	9,80	2,00	93,48	7,46	8,44	
29		91,11	92,41	9,10	2,00	103,65	8,67	10,29	
30		90,85	95,71	10,05	2,00	129,33	14,28	15,97	
31		91,33	90,72	9,95	2,00	108,21	12,82	12,93	
32		91,15	90,72	9,30	2,00	97,79	9,57	9,88	
33		91,19	85,75	9,20	2,00	121,29	16,08	17,81	
34		91,28	91,02	9,50	2,00	106,86	10,62	11,92	
35		90,55	97,67	9,85	2,00	107,90	8,72	10,27	
36		90,86	96,78	10,45	2,00	119,71	12,46	13,76	
37	Lyptus	Purbound	90,51	91,13	12,10	2,00	123,42	20,13	20,33
38			89,58	88,45	11,00	2,00	109,33	15,62	16,15
39			91,80	88,97	12,20	2,01	125,72	21,32	22,77
40			91,77	90,02	12,30	2,00	117,33	18,59	19,23
41			92,62	89,27	11,70	2,00	120,10	18,79	19,44
42			92,67	89,90	11,55	2,01	114,89	16,10	17,32
43			92,84	89,00	11,80	2,01	110,88	16,05	16,96
44			92,86	90,73	12,25	2,01	113,17	18,10	17,31
45			92,30	88,22	11,85	2,01	114,13	18,13	18,61
46		92,68	88,09	13,85	2,00	107,83	17,90	19,26	
47		91,43	87,59	12,45	2,00	122,97	22,01	23,34	
48		92,85	87,10	11,95	2,00	117,97	19,47	20,53	
49		92,74	88,61	13,00	2,00	105,65	15,97	17,09	
50		92,59	89,19	14,15	2,00	115,65	21,16	21,85	
51		92,51	87,52	12,70	2,00	109,95	17,82	18,76	
52		92,56	89,24	12,40	2,00	112,21	17,63	18,07	
53		92,45	88,42	12,40	2,01	113,76	18,18	19,23	
54		92,07	90,62	12,65	2,02	111,73	17,44	18,10	

#### 3.1. Análise dos Resultados

A fig. 5 mostra o diagrama de dispersão entre os módulos de elasticidade estáticos e dinâmicos.

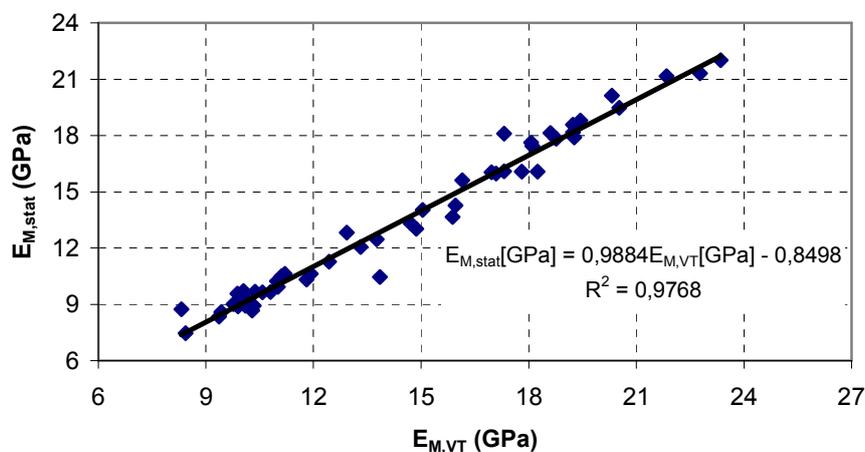


Figura 5 – Diagrama de dispersão entre  $E_{M,VT}$  e  $E_{M,stat}$

A comprovação da validade do modelo de regressão mostrado na fig. 5, inicia-se pela análise do gráfico dos resíduos contra os valores estimados. Na fig. 6 verifica-se que a suposição de variância constante é confirmada.

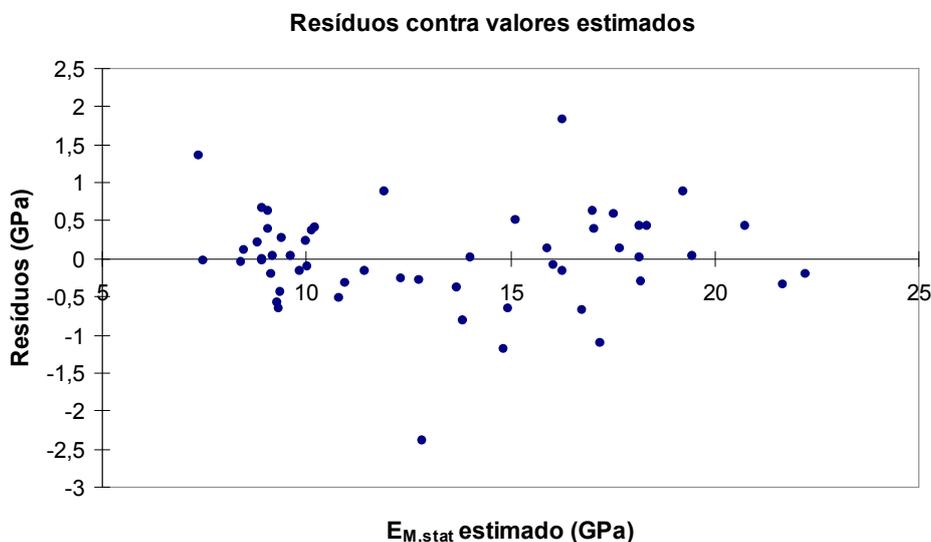


Figura 6 – Gráfico de resíduos contra valores estimados

A fig. 7. mostra o teste de normalidade dos resíduos, no qual observa-se que os resíduos não seguem uma distribuição normal uma vez que o Valor-p é inferior a 0,05. Assim sendo, o modelo de regressão linear mostrado na fig. 5. não pôde ser validado. Portanto, embora o modelo de regressão mostrado na fig. 5 mostre um valor elevado para  $R^2$ , não se pode fazer inferências sobre a amostra a partir desse modelo.

**Teste de normalidade dos resíduos  
(Shapiro-Wilk)**

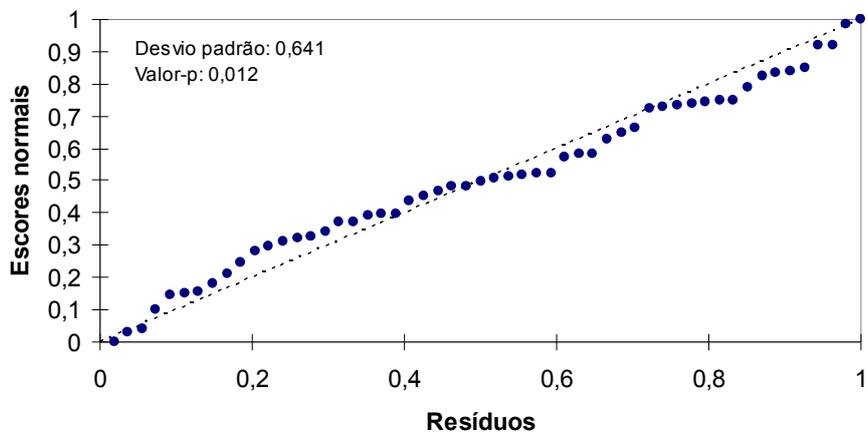


Figura 7 – Teste de normalidade dos resíduos

Foi então aplicada a transformação lognormal nos dados do módulo de elasticidade estático, conforme eq. 3.

$$E_{M,stat,trans} = \text{Ln}(E_{M,stat}) \quad (3)$$

O diagrama de dispersão entre o módulo de elasticidade dinâmico e o módulo de elasticidade estático transformado é mostrado na fig. 8.

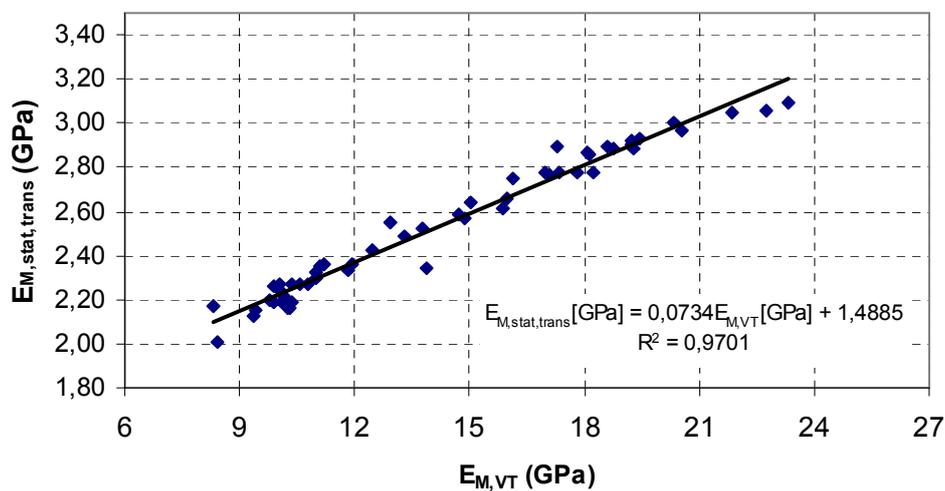


Figura 8 – Diagrama de dispersão entre  $E_{M,VT}$  e  $E_{M,stat,trans}$

Para o modelo mostrado na fig. 8, a suposição de variância constante foi confirmada como mostra a fig. 9.

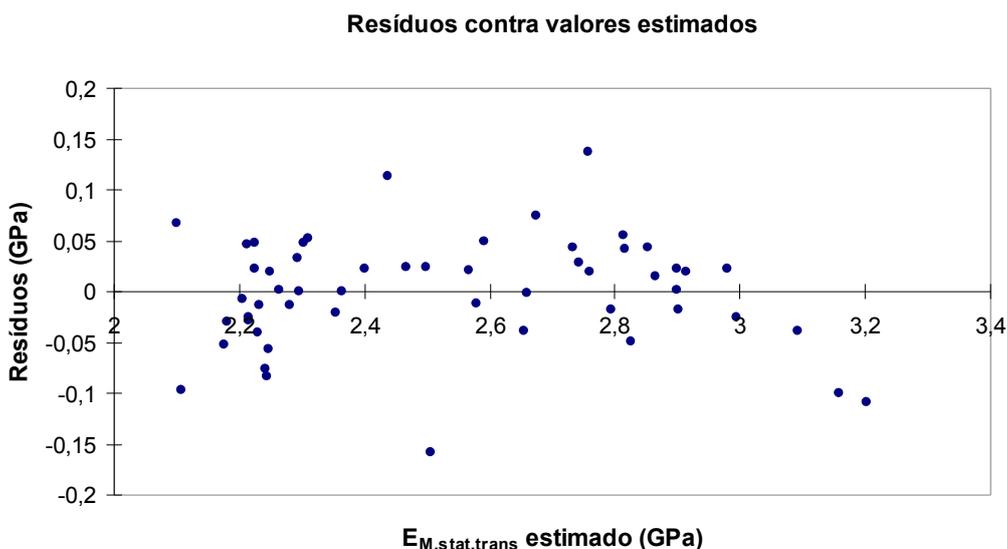


Figura 9 – Gráfico de resíduos contra valores estimados para os dados transformados

A fig. 10 mostra o gráfico do teste de normalidade dos resíduos no qual observa-se que a suposição de normalidade também foi confirmada.

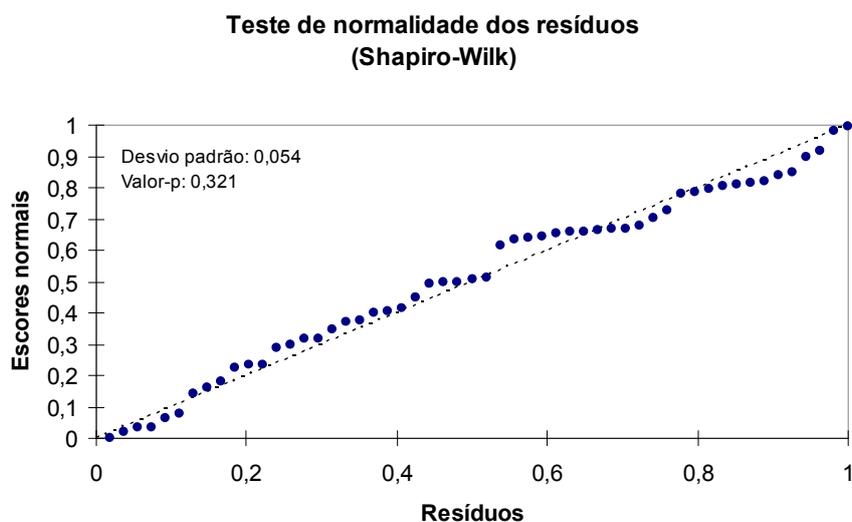


Figura 10 – Teste de normalidade dos resíduos para os dados transformados

Com as suposições do modelo de regressão linear confirmadas, aplica-se a Análise de Variância como mostra a tab. 2.

Tabela 2 – Análise de variância para os dados transformados

Fonte de variação	GL	SQ	QM	F <sub>cal</sub>
Modelo	1	5,067	5,067	1687,392
Erro	52	0,156	0,003	
Total	53	5,224		

Da tabela F, tem-se que  $F_{0,05;1;52} = 4,03$ . Logo, como  $F_{cal} > 4,03$  pode-se afirmar, a um nível de significância  $\alpha = 0,05$ , que a proporção da variância total explicada pela equação

$E_{M,stat,trans}$ [GPa] =  $0,0734E_{M,VT}$ [GPa] + 1,4885 é altamente significativa, de forma que essa equação pode ser empregada para se fazer inferências de  $E_{M,stat,trans}$  a partir de  $E_{M,VT}$ . Para encontrar a equação de regressão para os dados reais de  $E_{M,stat}$  aplica-se a transformação inversa à mostrada na eq. 4. Logo, tem-se:

$$E_{M,stat} \text{ [GPa]} = e^{0,0734E_{M,VT} \text{ [GPa]} + 1,4885} \quad (4)$$

A Fig. 11 mostra o diagrama de dispersão entre  $E_{M,stat}$  estimado e  $E_{M,stat}$  observado no qual observa-se uma forte correlação entre os dados.

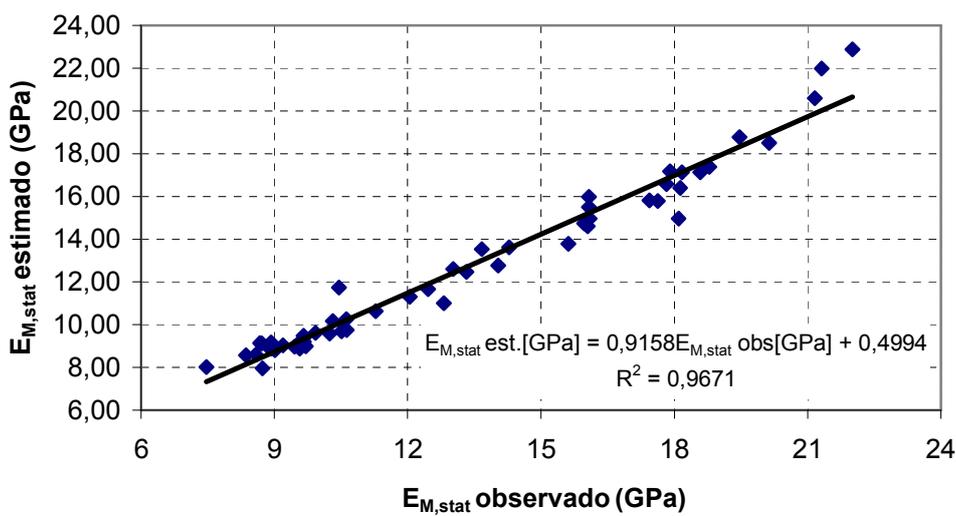


Figura 11 – Disgrama de dispersão entre  $E_{M,stat}$  estimado e  $E_{M,stat}$  observado.

#### 4. Conclusões

Na análise de resíduos verificou-se que o modelo de regressão linear inicialmente ajustado não pode ser usado para se fazer inferências sobre a amostra, pois, o mesmo viola a condição de normalidade dos resíduos. Assim observou-se que embora um modelo de regressão linear apresente um valor elevado de  $R^2$ , é possível que o mesmo não seja adequado para se fazer estimativas com finalidade de Avaliação Não-Destrutiva.

Embora sendo necessário realizar uma transformação nos dados dos ensaios, observou-se uma forte correlação entre  $E_{M,stat}$  estimado e  $E_{M,stat}$  observado.

O tempo necessário para realizar o ensaio de vibração transversal foi bastante inferior ao despendido no ensaio estático. Conclui-se, que o ensaio de vibração transversal livre demonstrou ser um método expedito e de boa exatidão. Pois, na análise dos resultados obteve-se uma boa correlação  $R^2$  igual a 0,9671.

Tais características tornam esse método de ensaio, além de viável, prático para avaliação do módulo de elasticidade à flexão de elementos estruturais de madeira laminada colada (MLC) em ambiente industrial, dispensando os equipamentos grandes e de elevado custo utilizados no ensaio de flexão estática e dessa forma possibilitando o controle de qualidade dos produtos acabados.

#### 5. Referências bibliográficas

(1) Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984). *NBR 8458 - Cruzetas de madeira para redes de distribuição de energia elétrica*. Rio de Janeiro.

- (2) Bodig, J.; Jayne, B.A. (1982). *Mechanics of wood composites*. Van Nostrand Reinhold Co. Inc. New York., 712 p.
- (3) Canadian Standards Association (2006). *CAN/CSA 077 - Qualification Code for Manufactures of Structural Glued – Laminated Timber*. 16 p.
- (4) Forest Products Laboratory (1999). *Wood Handbook: Wood as an Engineering Material*. U.S. Department of Agriculture. Madison, 463 p.