

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL**

**PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS DE VIGAS DE  
MADEIRA LAMINADA COLADA PRODUZIDAS COM  
LOURO VERMELHO (*Sextonia rubra*)**

**RICARDO FAUSTINO TELES**

**ORIENTADOR: PROF. DR. CLÁUDIO HENRIQUE SOARES DEL  
MENEZZI**

**MESTRADO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS**

**BRASÍLIA/DF: JANEIRO - 2009**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL**

**PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS DE VIGAS DE MADEIRA LAMINADA  
COLADA PRODUZIDAS COM LOURO VERMELHO (*Sextonia rubra*)**

**RICARDO FAUSTINO TELES**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE  
ENGENHARIA FLORESTAL DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA  
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS  
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.**

**APROVADA POR:**

---

**CLÁUDIO HENRIQUE SOARES DEL MENEZZI, Doutor (Departamento de Engenharia Florestal, UnB)**

---

**AILTON TEIXEIRA DO VALE, Doutor (Departamento de Engenharia Florestal, UnB)**

---

**GERALDO BORTOLETTO JÚNIOR, Doutor (Departamento de Ciências Florestais, ESALQ/USP)**

---

**ALEXANDRE FLORIAN DA COSTA, Doutor (Departamento de Engenharia Florestal, UnB)**

**Brasília, 28 de janeiro de 2009.**

## FICHA CATALOGRÁFICA

TELES, RICARDO FAUSTINO

Propriedades tecnológicas de vigas de madeira laminada colada produzidas com louro vermelho (*Sextonia rubra*).

XVII, 118, 210 x 297 mm (EFL/FT/UNB), Mestre, Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Florestal

- |                                  |                                  |
|----------------------------------|----------------------------------|
| 1. Propriedades mecânicas        | 2. Madeira laminada colada (MLC) |
| 3. Ensaios não-destrutivos (END) | 4. Adesivos de madeira           |
| I. EFL/FT/UNB                    | II. Título (série)               |

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

TELES, R. F. (2009). Propriedades tecnológicas de vigas de madeira laminada colada produzidas com louro vermelho (*Sextonia rubra*). Dissertação de Mestrado em Ciências Florestais, Publicação PPGEFL.DM-107/2009, Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 118.

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Ricardo Faustino Teles.

TÍTULO: Propriedades tecnológicas de vigas de madeira laminada colada produzidas com louro vermelho (*Sextonia rubra*).

GRAU: Mestre ANO: 2009

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

---

Ricardo Faustino Teles

QI 22 Bloco G Apartamento 208, Guará I.

71015-078 Guará I – DF – Brasil.

## AGRADECIMENTOS

- Inicialmente a Deus, por ter dado força e oportunidades em toda a minha vida.
- A minha esposa, Priscilla de França Silva Teles, minha eterna companheira e incentivadora em meus projetos de vida.
- Aos meus pais, Douglas Guimarães Teles e Maria do Socorro Faustino, pela educação, ensino, amor e presteza, estando sempre ao meu lado.
- Ao professor, orientador e amigo Dr. Cláudio H. S. Del Menezzi, o qual não mediu esforços, dedicação e conhecimento durante todo esse período.
- Ao analista ambiental, Dr. Mário Rabelo de Souza do Laboratório de Produtos Florestais do Serviço Florestal Brasileiro, grande estopim da minha vida acadêmica pelo qual tenho grande admiração e apreço.
- Ao amigo Frederico de Souza, parceiro de toda hora, o qual colaborou de forma imensurável na realização desse trabalho.
- A Ariel Andrade, o qual me recebeu em sua casa em Piracicaba sem ao menos nos conhecermos e foi de uma grande hospitalidade e camaradagem como se fôssemos velhos amigos.
- Aos demais amigos do Programa de Pós-graduação em Ciência Florestais (UnB), companheiros que contribuem de forma efetiva no vasto mundo florestal.
- A Universidade de Brasília e ao Departamento de Engenharia Florestal, pela qualidade de ensino proporcionado da graduação a Pós-graduação.
- Ao Laboratório de Produtos Florestais do Serviço Florestal Brasileiro (LPF/SFB), e a todos os funcionários dos diversos setores que de forma direta ou indireta proporcionaram a execução desse trabalho, de forma especial aos Srs. Júlio Eustáquio de Melo, Mário Rabelo de Souza, João Evangelista e ao pessoal da carpintaria.
- A ESALQ/USP e ao Laboratório de Ensaios Mecânicos e Derivados - LEMMAD, representado na figura do professor Dr. Geraldo Bortoletto Júnior que concedeu total suporte à execução dos ensaios mecânicos do presente trabalho, com grande presteza e orientação, e ao técnico Alex Canale que se dispôs em grade ajuda e presteza durante toda a minha estadia em Piracicaba.
- A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pela concessão da bolsa de estudos.
- Ao CNPq, pelo edital universal 2007, processo número 474737/2007-1, o qual financiou todo o material e equipamentos da presente dissertação.
- A Fundação de Tecnologia Florestal – Funtec, pelo auxílio técnico e financeiro prestado em todo o período de mestrado.
- A todas as pessoas que estiveram presentes, de forma direta ou indireta, e torceram e me incentivaram durante todo esse período.

A minha esposa,

Priscilla de França Silva Teles

Aos meus Pais,

Douglas Guimarães Teles

Maria do Socorro Faustino

Dedico

## **RESUMO**

### **PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS DE VIGAS DE MADEIRA LAMINADA COLADA PRODUZIDAS COM LOURO VERMELHO (*Sextonia rubra*).**

**Autor: Ricardo Faustino Teles**

**Orientador: Dr. Cláudio Henrique Soares Del Menezzi**

**Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais**

**Brasília, janeiro de 2009.**

O presente trabalho teve como objetivo caracterizar o comportamento tecnológico de vigas de madeira laminada colada (MLC) utilizando a espécie *Sextonia rubra*, por meio da avaliação do comportamento na adesão com o uso do adesivo resorcinol formaldeído para referida espécie e avaliar teórica e experimentalmente o módulo de elasticidade ( $E_M$ ), o módulo de ruptura ( $f_M$ ), o momento fletor ( $M$ ) e a flecha ( $\delta$ ) das vigas de MLC produzidas com lâminas classificadas não-destrutivamente. Com o intuito de estudar o efeito da gramatura do adesivo sobre a qualidade das juntas coladas, foram avaliadas três gramaturas, na ordem de 200, 300 e 400 g/m<sup>2</sup>. As lâminas foram classificadas mecanicamente sendo avaliado o módulo de elasticidade dinâmico ( $E_d$ ). Paralelamente, ensaios de flexão estática foram realizados para determinar o módulo de elasticidade estático ( $E_s$ ), de acordo com a norma ASTM D4761. Em seguida, as relações entre o módulo de elasticidade dinâmico e estático foram comparados e analisados por meio de análises de regressão, sendo as suas propriedades utilizadas na composição das vigas e nos modelos teóricos. Os resultados indicam que a gramatura 300 g/m<sup>2</sup> obteve desempenho estatisticamente igual a de 400 g/m<sup>2</sup>, sendo a primeira indicada para o uso em vigas de MLC. De acordo com os resultados obtidos, os modelos de regressão linear entre  $E_s$  e  $E_d$  apresentaram boa previsibilidade e significância, podendo ser utilizados para estimar as propriedades de rigidez das lâminas. Verificou-se que os resultados teóricos para as propriedades mecânicas apresentaram boa concordância em relação aos experimentais, sendo os modelos propostos válidos para as propriedades avaliadas. A madeira de louro vermelho é indicada para o uso em vigas de madeira laminada.

## **ABSTRACT**

### **THECNOLOGICAL PROPERTIES OF LOURO VERMELHO (*Sextonia rubra*) GLULAM BEAMS**

**Author: Ricardo Faustino Teles**

**Advisor: Dr. Cláudio Henrique Soares Del Menezzi**

**Post-graduate Program on Forest Science**

**Brasília, january of 2009.**

The objective of this study was characterize the technological behavior of glulam beams (MLC) using the wood from Louro Vermelho (*Sextonia rubra* – Lauraceae), through the evaluation of the adhesion with adhesive resorcinol-formaldehyde and evaluate theoretically and experimental the modulus of elasticity ( $E_M$ ), the modulus of rupture ( $f_M$ ), the bending moment ( $M$ ) and the deflection ( $\delta$ ) of MLC beams produced with non-destructive classified lumbers. The performance of the adhesion was evaluated by shear in glue line, tension perpendicular of glue line, and in tension parallel to grain with scarf joint, as indicated by the standard NBR 7190 (1997). In order to study the effect of spread rate of the adhesive on the quality of glued line, three spread of rate (200, 300 and 400 g/m<sup>2</sup>) were evaluated. The lumbers were classified mechanically and was being evaluated the dynamic modulus of elasticity, using two non-destructive techniques, stress wave transmission ( $E_{SW}$ ) and by transverse vibration ( $E_{TV}$ ). Parallel, bending tests were conducted to determine the static modulus of elasticity ( $E$ ), according to ASTM D4761. After that, relations between the dynamic modulus of elasticity and static were compared and analyzed by linear regressions, and their properties used in the composition of the beams and in theoretical models. The beams were produced and tested in static bending, according to ASTM D 198. The spread of rate of 300 g/m<sup>2</sup> was statistically identical as 400 g/m<sup>2</sup>, witch was indicated to produce glulam beams. It was found that theoretical model showed good predictability and significance. The transverse vibration technique is viable to classify the lumber as well the glulam beams. The wood of louro vermelho is indicated for use in glulam beams.

# SUMÁRIO

<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>X</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>XIII</b>
<b>1 - INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2 - HIPÓTESE .....</b>	<b>3</b>
<b>3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>4</b>
<b>3.1 – GENERALIDADE A RESPEITO DA MADEIRA LAMINADA COLADA . 4</b>	
3.1.1 - Vantagens da MLC .....	7
3.1.2 - Processo de Fabricação da MLC.....	8
<b>3.2 - ADESIVOS .....</b>	<b>15</b>
<b>3.3 - CRITÉRIOS PARA O DIMENSIONAMENTO DE VIGAS DE MADEIRA LAMINADA COLADA .....</b>	<b>19</b>
3.3.1 Vigas: Aspectos gerais .....	20
3.3.2 - Métodos de estimativa da resistência em madeira laminada colada .....	24
<b>3.4. LOURO VERMELHO (Sextonia rubra) .....</b>	<b>28</b>
<b>4 - MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>30</b>
<b>4.1 MATERIAL LENHOSO .....</b>	<b>30</b>
<b>4.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA SÓLIDA .....</b>	<b>32</b>
<b>4.3 RESISTÊNCIA DA JUNTA COLADA.....</b>	<b>32</b>
<b>4.4 AVALIAÇÃO NÃO DESTRUTIVA .....</b>	<b>35</b>
<b>4.5 - MONTAGEM DAS VIGAS DE MLC .....</b>	<b>39</b>
<b>4.6 - MODELO TEÓRICO E EXPERIMENTAL .....</b>	<b>41</b>
4.6.1 – Avaliação teórica .....	41
4.6.2 – Avaliação experimental .....	42
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>46</b>

<b>5.1. PROPRIEDADES DE RESISTÊNCIA E RIGIDEZ DA MADEIRA DE LOURO VERMELHO.....</b>	<b>46</b>
<b>5.2. AVALIAÇÃO DAS JUNTAS COLADAS .....</b>	<b>49</b>
<b>5.3 AVALIAÇÃO NÃO DESTRUTIVA DAS LÂMINAS .....</b>	<b>55</b>
<b>5.4 PROPRIEDADES DE FLEXÃO E AVALIAÇÃO NÃO DESTRUTIVA DAS VIGAS DE MLC.....</b>	<b>60</b>
<b>5.5 COMPORTAMENTO TEÓRICO E EXPERIMENTAL DAS VIGAS DE MLC.....</b>	<b>72</b>
<b>6. CONCLUSÃO.....</b>	<b>80</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>81</b>
<b>APÊNDICE .....</b>	<b>89</b>
<b>A. ANÁLISE ESTATÍSTICA.....</b>	<b>90</b>
<b>B. AVALIAÇÃO NÃO DESTRUTIVA DAS LÂMINAS DE MLC .....</b>	<b>95</b>
<b>C. PROPRIEDADES DE FLEXÃO DAS VIGAS DE MLC .....</b>	<b>99</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Variação do tempo de prensagem em função da temperatura para resina resorcinol.....	17
Tabela 2. Propriedades mecânicas (IBAMA, 2002).....	29
Tabela 3. Dimensões e teor de umidade das pranchas. ....	30
Tabela 4. Valores médios da densidade aparente e das propriedades de resistência da madeira de louro vermelho. ....	46
Tabela 5. Valores médios de módulo de elasticidade ( $E_M$ ) e módulo de ruptura ( $f_M$ ) à flexão estática da madeira de louro vermelho. ....	46
Tabela 6. Valores característicos de resistência ( $N/mm^2$ ) das propriedades avaliadas da madeira de louro vermelho. ....	46
Tabela 7. Propriedades geométricas, massas e teor de umidade das vigas de MLC. ....	61
Tabela 8. Propriedades experimentais das vigas de MLC de louro vermelho. ....	61
Tabela 9. Valores e relação entre de $E_{Mvt}$ e $E_{Mexp}$ . ....	62
Tabela 10. Valores e relação entre o módulo de elasticidade da viga com valor do módulo de elasticidade transversal corrigido ( $E_G$ ) e o módulo de elasticidade experimental $E_{Mexp}$ . ....	65
Tabela 11. Correlação de Pearson entre as propriedades de resistência, rigidez e densidade aparente da madeira de louro vermelho.....	68
Tabela 12. Relação teórico e experimental para $f_M$ , $M$ e $E_M$ . ....	73
Tabela 13. Relação teórico e experimental para flecha ( $\delta$ ). ....	76
Tabela 14. Análise de variância para o $E_M$ com a força aplicada na face tangencial e com a força aplicada na face radial, com 5% de significância.....	90
Tabela 15. Análise de variância para o $f_M$ com a força aplicada na face tangencial e com a força aplicada na face radial, com 5% de significância.....	90
Tabela 16. Análise de regressão entre $E_M$ e DA com 5% de significância. ....	90
Tabela 17. Análise de regressão entre $f_M$ e DA com 5% de significância. ....	90
Tabela 18. Resultados do ensaio de cisalhamento na lâmina de cola.....	92
Tabela 19. Resultados do ensaio de tração normal à lâmina de cola.....	93
Tabela 20. Resultado do ensaio de emendas biseladas em tração paralela às fibras.....	93
Tabela 21. Análise de variação para $f_{gv,0}$ , $f_{gt90}$ e $f_{gt0}$ com 5% de significância.....	94
Tabela 22. Teste de Tukey para os ensaios de adesão com 5% de significância. ....	94
Tabela 23. Análise de regressão entre as gramatura para $f_{gv,0}$ , com 5% de significância. ..	94

Tabela 24. Análise de regressão entre as gramatura para $f_{gt,90}$ , com 5% de significância...	94
Tabela 25. Análise de regressão entre as gramatura para $f_{gt,0}$ , com 5% de significância....	95
Tabela 26. Módulo de elasticidade das lâminas, ordenados de forma crescente.....	97
Tabela 27. Freqüência relativa e acumulada para as classes de qualidade das lâminas de louro vermelho.....	98
Tabela 28. Análise de regressão entre $E_s$ e $E_{dsw}$ .....	99
Tabela 29. Análise de regressão entre $E_s$ e $E_{dvt}$ .....	99
Tabela 30. Análise de variância entre o $E_{Mvt}$ e $E_M$ experimental, com 5% de significância. ....	99
Tabela 31. Análise de variância entre o $E_{Mvt}$ e $f_M$ experimental, com 5% de significância.	99
Tabela 32. Análise de regressão entre o $E_{Mvt}$ e $E_M$ experimental, com 5% de significância. ....	99
Tabela 33. Análise de regressão entre o $E_{Mvt}$ e $f_M$ experimental, com 5% de significância. ....	99
Tabela 34. Análise de variância entre o $E_G$ e $E_M$ , com 5% de significância. ....	100
Tabela 35. Análise de regressão entre o $E_G$ e $E_M$ , com 5% de significância.....	100
Tabela 36. Análise de variância entre $f_M$ teórico e experimental, com 5% de significância. ....	100
Tabela 37. Análise de variância entre $M$ teórico e experimental, com 5% de significância. ....	100
Tabela 38. Análise de regressão entre o $f_M$ teórico e experimental, com 5% de significância.....	100
Tabela 39. Análise de regressão entre o momento ( $M$ ) teórico e experimental, com 5% de significância.....	100
Tabela 40. Análise de variância entre o $E_M$ teórico e experimental, com 5% de significância.....	101
Tabela 41. Análise de variância entre $E_M$ teórico e $f_M$ experimental, com 5% de significância.....	101
Tabela 42. Análise de regressão entre o $E_M$ teórico e experimental, com 5% de significância.....	101
Tabela 43. Análise de regressão entre o $E_{Mteo}$ e $f_M$ experimental, com 5% de significância. ....	101
Tabela 44. Análise de variância entre $\delta$ teórico e experimental, com 5% de significância. ....	101

Tabela 45. Análise de regressão entre  $\delta$  teórico e experimental, com 5% de significância.

..... 101

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema e montagem de uma viga de madeira laminada colada .....	5
Figura 2. Construção do FPL (USDA, 1999). .....	6
Figura 3. Vistas laterais de elementos de MLC (USDA, 1999). .....	7
Figura 4. Processo de fabricação da MLC.....	9
Figura 5. Tipos de emendas utilizadas na MLC. ....	13
Figura 6. Tipos de emendas dentadas disponíveis para o uso em elementos de MLC.....	14
Figura 7. Tipos de flexão. (a) Flexão pura; (b) flexão não uniforme, com região central em flexão pura e extremidades em flexão não-uniforme (GERE, 2003). ....	20
Figura 8. Relação entre o momento fletor e as direções normais (GERE, 2003). .....	22
Figura 9. Exemplo de uma viga composta por três zonas (ASTM, 1996). ....	25
Figura 10. Variação do fator modificador da resistência em função da quantidade de defeitos na viga de MLC (FIORELLI, 2005). .....	26
Figura 11. Árvore, tora e corte tangencial da espécie <i>Sextonia rubra</i> (IBAMA, 2002).....	28
Figura 12. Pranchas de louro vermelho adquiridas no mercado madeireiro do DF. ....	30
Figura 13. Esquema do corte das tábuas de madeira e dimensionamento das lâminas. (ZANGIÁCOMO, 2003, adaptado). .....	31
Figura 14. Lâminas de louro vermelho fabricadas para o uso em vigas de MLC. ....	32
Figura 15. Dimensões (mm) do CP para ensaio de resistência de emendas biseladas à tração paralela às fibras. ....	33
Figura 16. Detalhes da emenda biselada utilizada com relação 1:10, em mm. ....	33
Onde A = altura e B = extensão do bisel. ....	33
Figura 17. Esquema do ensaio de flexão estática segundo a norma ASTM D 4761 (2002). .....	36
Figura 18. Esquema do ensaio de ondas de tensão, com o uso do equipamento <i>stress wave timer</i> . .....	37
Figura 19. Esquema do ensaio de vibração transversal com o uso do equipamento <i>Transverse Vibration E-Computer</i> modelo E 340. Acima posicionamento da amostra e detalhe da célula de carga. Abaixo, indução da vibração na amostra e análise dos dados. ....	38
Figura 20. Dimensão média das vigas de MLC produzidas. ....	39
Figura 21. Aplicação do adesivo resorcinol formadeído nas lâminas. ....	40

Figura 22. Sistema de prensagem desenvolvido. (A) Vista geral do sistema. (B) Detalhes da célula de carga. ....	40
Figura 23. Posicionamento da viga, da célula de carga e aplicação de carga via sistema hidráulico. ....	41
Figura 24. Esquema estático utilizado no ensaio de flexão estática de quatro pontos medindo a flecha no vão total da viga. ....	43
Figura 25. Esquema estático utilizado no ensaio de flexão estática de quatro pontos, com medição da flecha em flexão pura. ....	44
Figura 26. Localização do CP retirado das vigas para aferição do teor de umidade. ....	45
Figura 27. Análise de regressão entre $f_M \times DA$ e $E_M \times DA$ para os ensaios mecânicos realizados em madeira maciça de louro vermelho. ....	48
Figura 28. Valores médios e desvios padrão de .....	51
Figura 29. Percentual médio e desvio padrão de falha na madeira de acordo com as gramaturas avaliadas em ensaio de cisalhamento na lâmina de cola. ....	52
Figura 30. Eficiência do adesivo de acordo com as gramaturas avaliadas. ....	53
Figura 31. Classificação das lâminas de louro vermelho, segundo o método estático e os dois métodos não destrutivos estudados. Linha em vermelho representa a frequência acumulada. ....	56
Figura 32. Valores médios e desvios padrão dos módulos de elasticidades avaliados pelos métodos não destrutivos. ....	57
Figura 33. Análise de regressão entre os módulos de elasticidade estático e dinâmico. ....	58
Onde: A = ondas de tensão (stress wave timer); B = vibração transversal. ....	58
Figura 34. Relação entre $E_{Mexp}$ , $f_{Mexp}$ com $E_{Mvt}$ (A e B) e $E_{Mvt}$ com $E_{Mlam}$ (C) para as vigas de MLC de louro vermelho. ....	63
Figura 35. Análise de regressão entre $E_G$ e $E_M$ das vigas de MLC. ....	66
Figura 36. Tipos de rupturas ocorridas nas vigas de MLC de números 1 a 4. ....	69
Figura 36 (continuação). Tipos de rupturas ocorridas nas vigas de MLC de números 5 a 8. ....	70
Figura 36 (continuação). Tipos de rupturas ocorridas nas vigas de MLC de números 9 e 10. ....	71
Figura 37. Análise de regressão do $f_M$ e $M$ teórico e experimental das vigas de MLC, com o modelo de regressão linear. ....	74
Figura 38. Análise de regressão entre $E_M$ teórico e experimental das vigas de MLC e $E_{Mteo}$ e $f_{Mexp}$ , com o modelo de regressão linear. ....	75

Figura 39. Comportamento teórico e experimental das flechas em flexão pura das vigas 1 a 5. ....	77
Figura 40. Comportamento teórico e experimental das flechas em flexão pura das vigas 6 a 10. ....	78
Figura 41. Análise de regressão entre a flecha teórica e experimental das vigas de MLC com o modelo de regressão linear. ....	79
Figura 42. Regressão linear com 95% de segurança para flechas experimentais.....	79
Figura 43. Análise de <i>outlier</i> para cisalhamento paralelo às fibras e cisalhamento na lâmina de cola.....	91
Figura 44. Análise de <i>outlier</i> para tração normal às fibras e tração normal à lâmina de cola. ....	91
Figura 45. Análise de <i>outlier</i> para tração paralela às fibras e resistência de emendas biseladas à tração paralela às fibras.....	92
Figura 46. Análise de <i>outlier</i> para a avaliação das lâminas de acordo com a norma ASTM D 4761. ....	95
Figura 47. Análise de <i>outlier</i> para a avaliação das lâminas de acordo com o método de ondas de tensão.....	96
Figura 48. Análise de <i>outlier</i> para a avaliação das lâminas de acordo com o método de vibração transversal. ....	96

## LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

A	- área da peça
a	- distância entre os aplicadores de carga
b	- largura da viga
CP	- corpos-de-prova
d	- distância entre os sensores
DA	- densidade aparente
$d_i$	- distância do centróide da lâmina na posição i até a linha neutra
$E_{12}$	- valor de rigidez corrigido para a umidade padrão de 12%
$E_{dsw}$	- módulo de elasticidade dinâmico por ondas de tensão
$E_{dvt}$	- módulo de elasticidade dinâmico por vibração transversal
$E_G$	- módulo de elasticidade da viga com valor de G corrigido
$E_i$	- módulo de elasticidade da lâmina na posição i
EI	- rigidez a flexão
$E_{Mexp}$	- módulo de elasticidade da viga experimental
$E_{ML}$	- módulo de elasticidade da lâmina tracionada da viga
$E_{MLam}$	- módulo de elasticidade das vigas obtido por média aritmética das lâminas
$E_{Mteo}$	- módulo de elasticidade teórico
$E_s$	- módulo de elasticidade estático obtido em ensaio não destrutivo
$E_{U\%}$	- valor de rigidez no teor de umidade do ensaio
$f_{12}$	- valor de resistência corrigido para a umidade padrão de 12%
$f_{gv,0}$	- cisalhamento na lâmina de cola
$f_{gt,90}$	- tração normal à lamina de cola
$f_{gt,0}$	- resistência de emendas dentadas e/ou biseladas em tração paralela às fibras
$f_M$	- módulo de ruptura da viga
$f_{t,0}$	- resistência a tração paralela às fibras
$f_{t,90}$	- tração normal às fibras
$f_{v,0}$	- cisalhamento paralelo às fibras
FT	- face tangencial
FR	- face radial
fr	- frequência natural de vibração
$f_{U\%}$	- valor de resistência no teor de umidade do ensaio

$f_{wk}$	- valor característico da resistência
$g$	- aceleração da gravidade
$G$	- módulo de elasticidade transversal
$h$	- altura da viga
$I$	- momento de inércia
$K$	- curvatura
$k$	- fator de forma em função da geometria da viga
$L$	- distância entre os apoios (vão)
$M$	- momento fletor
$M_{teo}$	- momento fletor teórico
$M_i$	- massa inicial
$M_s$	- massa seca
$n$	- número de amostras
$N$	- newtons
$P$	- carga aplicada
$P_{ndt}$	- carga aplicada na avaliação não destrutiva
$P_{rup}$	- carga de ruptura
$S$	- módulo de seção
$t$	- tempo de propagação da onda
$U_{(%)}$	- teor de umidade
$V$	- tensão de cisalhamento
$v$	- velocidade de propagação da onda
$X_{CG}$	- centro de gravidade no eixo X.
$W$	- massa da lâmina
$y$	- distância da linha neutra à borda mais solicitada
$Y_{CG}$	- centro de gravidade no eixo Y.
$\delta$	- flecha atuante
$\delta_{teo}$	- flecha teórica
$\delta_f$	- deformação devido ao momento fletor
$\delta_t$	- deformação total
$\delta_v$	- deformação devido ao cisalhamento
$\epsilon_x$	- deformações longitudinais

## 1 - INTRODUÇÃO

A madeira é um material utilizado em larga escala pela construção civil. No Brasil, o seu emprego é destinado aos mais variados usos, desde fôrmas de concreto a componentes estruturais. Sendo assim, o conhecimento de suas propriedades físicas e mecânicas favorece a um uso mais racional e eficiente. O emprego da madeira na construção de estruturas, nem sempre ocorre em condições satisfatórias no tocante à tecnologia agregada ao material, apesar de sua versatilidade e de sua disponibilidade. No Brasil, a diversidade de espécies de madeiras é significativa, demonstrando um forte potencial madeireiro a ser explorado. Entretanto, a seleção e comercialização de poucas espécies contribuem para uma exploração inadequada das reservas, aumentando a pressão de seleção em poucas espécies florestais.

Partindo dessa realidade, têm surgido no cenário madeireiro, novas tecnologias e pesquisas para o uso da madeira no âmbito da construção civil. Sendo assim, a madeira laminada colada (MLC), também conhecida na literatura como *glued laminated timber* ou *glulam*, apresenta-se como uma alternativa para o aproveitamento racional da madeira serrada. A MLC pode ser dimensionada para atender uma disponibilidade geométrica antes não disponível pela madeira serrada, sendo possível utilizar peças de madeiras com seções transversais e espessuras menores. A possibilidade de formar arcos e componentes estruturais com curvaturas e grandes vãos aumentou a popularidade da MLC em países da Europa e nos Estados Unidos. No Brasil, existem poucas fábricas no setor, porém um número significativo de trabalhos acadêmicos tem sido desenvolvido nos últimos 10 anos, aumentando o número de informações a respeito do assunto.

Devido a sua grande versatilidade, torna-se necessário o conhecimento dos fatores que influem diretamente na resistência e rigidez desse material. Dentre os principais fatores pode-se destacar: a espécie de madeira utilizada, as propriedades da espécie, a quantidade de defeitos (nós, desvios de grã e rachaduras), a direção de corte e o módulo de elasticidade das lâminas. Com relação às lâminas que compõem a viga, a quantidade, posição, espessuras e os tipos e posições das emendas são aspectos de grande relevância no dimensionamento final da MLC.

## **OBJETIVO GERAL**

Produzir e caracterizar o comportamento tecnológico de vigas de madeira laminada colada utilizando a espécie *Sextonia rubra*.

## **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Avaliar o comportamento na adesão da espécie *Sextonia rubra*;
- Avaliar teórica e experimentalmente as propriedades de flexão.

## **2 - HIPÓTESE**

É possível produzir vigas de madeira laminada colada com propriedades mecânicas adequadas ao uso estrutural com a espécie *Sextonia rubra* (louro vermelho), a partir da determinação das propriedades mecânicas das lâminas que às compõem, avaliadas por meio de métodos não destrutivos.

### **3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

A utilização de madeira como material de construção competitivo economicamente e ao mesmo tempo aceitável em termos ecológicos baseia-se nas modernas técnicas de reflorestamento aliadas ao desenvolvimento de produtos industrializados de madeira com minimização de perdas. Pesquisas sobre o comportamento mecânico desses produtos e seu uso em sistemas estruturais têm propiciado a expansão do uso da madeira como material de construção (PFEIL e PFEIL, 2003).

Atualmente, com o emprego de projetos construtivos mais eficientes que, por sua vez exigem o conhecimento da rigidez de cada peça a ser utilizada e, conseqüentemente, uma classificação da madeira em classes de qualidade, a madeira apresenta-se como um material versátil e economicamente viável para a construção civil. Assim, para Carreira (2003) a classificação para esse propósito é realizada através de testes não destrutivos, como por tensões, vibração transversal, ultra-som e visualmente. O uso de madeiras classificadas quanto a sua rigidez propicia maior segurança em relação ao produto adquirido pelo consumidor, a padronização do material seguindo as normas vigentes no mercado e a redução dos custos finais na construção.

De acordo com o Instituto de Pesquisa Tecnológica do Estado de São Paulo (IPT, 2003), no Brasil, a madeira é utilizada na construção civil em diversas formas, como em usos temporários (fôrmas para concreto, andaimes e escoramentos), de forma definitiva (estruturas de cobertura, esquadrias, portas e janelas), e em forros e pisos. Sendo assim, a madeira é utilizada com uma grande versatilidade, podendo ser aproveitada em sua forma bruta, como madeira roliça, e em peças que necessitam de um alto grau de beneficiamento, como a madeira serrada, lâminas para painéis e partículas.

#### **3.1 – GENERALIDADE A RESPEITO DA MADEIRA LAMINADA COLADA**

Madeira laminada colada (MLC), conhecida na literatura como *glued laminated timber* ou *glulam*, é um dos produtos engenheirados de madeira (PEM) mais antigos utilizado no setor da construção civil. É caracterizada pela abrangência de dimensões e por possuir uma

variedade de formação de peças estruturais. Os elementos estruturais são formados por lâminas de madeira de determinada seção transversal, consolidadas entre si, com o emprego de adesivo entre suas camadas e pressão (Figura 1). Góes (2002) afirma que o uso de peças compostas de madeira apresenta características que permitem o emprego em diversos tipos de construções, tendo destaque para a possibilidade de atingir grandes vãos, um maior aproveitamento da tora, melhor adaptação às condições climáticas, redução da possibilidade de defeitos, entre outros.

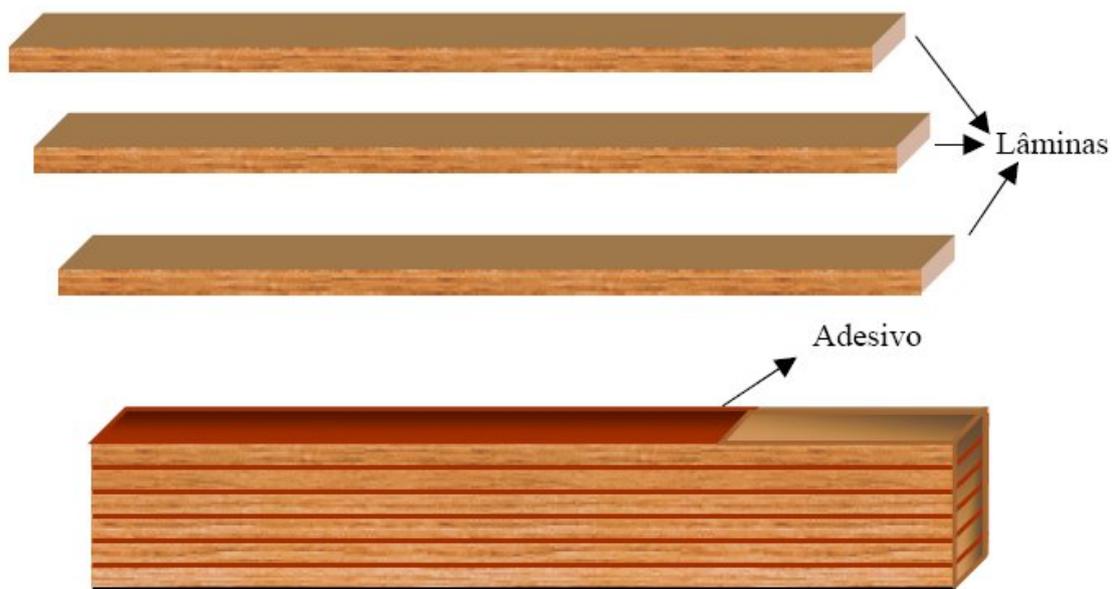


Figura 1. Esquema e montagem de uma viga de madeira laminada colada (ZANGIÁCOMO, 2003).

A madeira laminada colada é utilizada principalmente em coberturas e pilares de estruturas, elementos estruturais de pontes e edifícios bem como partes decorativas, esquadrias e móveis. A sua versatilidade é devida à facilidade de montagem e a possibilidade de criar elementos estruturais com formas, como arcos e elementos curvos, diferentemente da madeira serrada. De acordo com Pfeil e Pfeil (2003), os produtos estruturais industrializados de MLC são fabricados sob rígidos padrões de qualidade, garantido para os produtos alta resistência e durabilidade. Em função do processo de fabricação, a homogeneização da MLC é superior ao da madeira serrada, pois a presença de nós e defeitos da madeira são distribuídos ao longo da peça e de forma mais aleatória.

A MLC teve origem na Suíça, onde foi observada no final do século XIX a técnica de laminação em pequenas peças de madeira para a formação de grandes elementos

estruturais. A técnica ficou conhecida como “Hetzer System”, patenteada por Hetzer. Entretanto, essa patente utilizava adesivos que não eram resistentes à água, o que limitava o seu uso em ambientes internos ou em lugares secos. Apesar disso, o Sistema Hetzer, como conhecido hoje, se tornou mais evidente a partir de 1913 quando a técnica se expandiu e começou a ser utilizada na montagem de coberturas e pontes, sendo então aceito em outros países da Europa, como Dinamarca, Suécia e Noruega. Nos Estados Unidos, um dos primeiros exemplos da utilização da MLC foi em uma construção do *Forest Product Laboratory* em Madison, Wisconsin (Figura 2) construído em 1934, o qual foi projetado com base nos princípios de engenharia para sistema de arcos (SMULSKI, 1997).



Figura 2. Construção do FPL (USDA, 1999).

No Brasil, a empresa pioneira na industrialização e confecção de MLC foi a Esmara Estruturas de Madeiras Ltda, fundada em 1934 em Curitiba (PR) com tecnologia trazida por alemães. Atualmente, a Battistella Indústria e Comércio Ltda, localizada em Lages (SC), é a empresa mais antiga no ramo, com mais de 40 anos de existência, e vem atuando no setor produzindo peças e casa pré-fabricadas com uma larga utilização de MLC em suas peças estruturais. Observa-se ainda a existência de pequenas empresas na região Sudeste, principalmente em Minas Gerais, na região metropolitana de Belo-Horizonte, onde estão produzindo peças de MLC com madeira de *Eucalyptus grandis*.

### 3.1.1 - Vantagens da MLC

A madeira laminada colada quando comparada à madeira serrada e a outros materiais estruturais apresenta diversas vantagens, conforme USDA (1999) e Smulki (1997):

- Dimensão: a MLC pode ser composta por várias lâminas de madeiras, com dimensões variadas; grandes estruturas podem ser dimensionadas, utilizando peças de madeiras de dimensões comerciais para a confecção das peças de MLC; oferece a possibilidade de produzir grandes vãos, diferentemente da madeira sólida.
- Arquitetura: a possibilidade de criar arcos e peças curvas é um dos grandes diferenciais da MLC; com isso, uma gama de efeitos estruturais que podem ser compostos, garante uma diversidade arquitetônica aos projetistas, arquitetos e engenheiros. A taxa de curvatura é controlada pela espessura das lâminas de madeira. Os elementos estruturais podem ser projetados com sua seção transversal variando ao longo de seu comprimento em função da resistência solicitada. A Figura 3, ilustra a variação do perfil lateral em elementos de MLC.

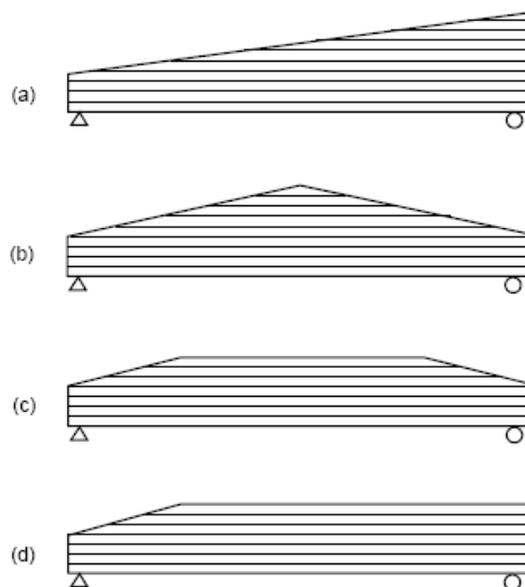


Figura 3. Vistas laterais de elementos de MLC (USDA, 1999).

- Defeitos da madeira: diminuição da presença de defeitos oriundos da secagem da madeira, como rachaduras e empenos, comuns em peças de madeiras de grandes dimensões.
- Qualidade de peças: possibilita a utilização de peças de madeira menos resistentes, de qualidade inferior nas regiões onde ocorrem menores sollicitação e de maior resistência nos bordos das vigas, podendo, assim, aumentar o número e combinações da montagem da MLC e homogeneizar o comportamento das peças.
- Resistência: Boa resistência quanto a ação do fogo, em função de sua seção transversal robusta; alta resistência a agentes corrosivos.
- Impacto ao meio ambiente: por poder utilizar peças de madeiras de menor qualidade, de diferentes dimensões e de várias espécies, a utilização da MLC possibilita que espécies de madeiras alternativas sejam utilizadas, diminuindo a pressão de seleção que ocorre com poucas espécies comerciais, e gerando alternativas para o uso da madeira serrada.

As principais desvantagens da MLC esbarram no processo de fabricação das peças, o qual é mais oneroso e demorado, necessitando de equipamentos especiais para a montagem, colagem, treinamento de funcionários, utilização de adesivos para a consolidação das peças e a modificação da planta da fábrica, os quais não são necessários para a produção de madeira serrada. Outro fator importante é o transporte das peças, que por possuírem dimensões especiais, dificultam a sua locomoção (USDA, 1999).

### **3.1.2 - Processo de Fabricação da MLC**

O princípio do processo de fabricação da madeira laminada colada tem como objetivo melhorar as características das propriedades físicas e mecânicas dos elementos estruturais. A Figura 4 ilustra o processo de fabricação da MLC. De acordo com a figura, os processos são: separação e classificação das lâminas (1), secagem e acondicionamento (2), união das emendas (3), dimensionamento das lâminas (4), aplicação do adesivo (5), prensagem (6), dimensionamento da viga (7), teste de resistência e linha de cola (8) e aplainamento e acabamento da viga (9).

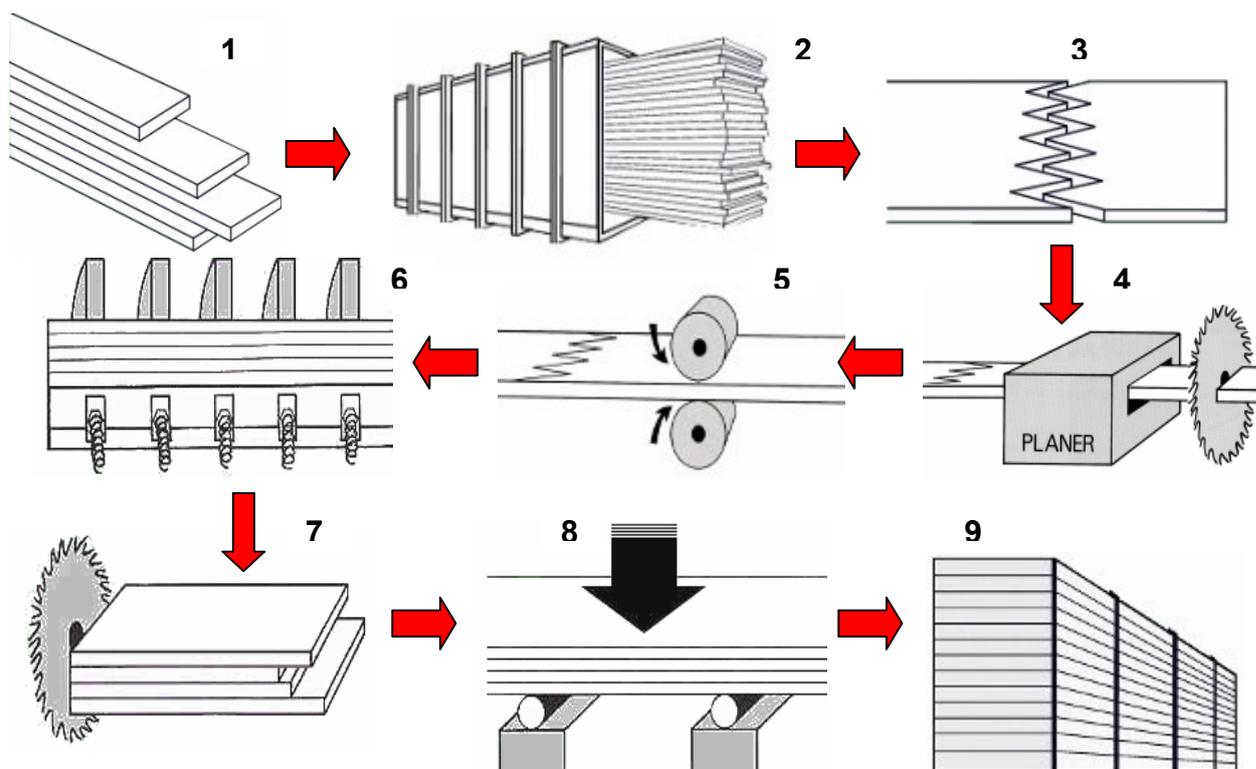


Figura 4. Processo de fabricação da MLC.

A densidade da madeira utilizada é um fator primordial para a eficiência dos elementos estruturais de MLC. Zangiácomo (2003) e Fiorelli (2005) afirmam que uma faixa de densidade entre 0,40 e 0,75 g/cm<sup>3</sup> é considerada ideal para a confecção de MLC e que, preferencialmente, possuam baixo coeficiente de retração. Madeiras com densidade acima desse valor indicado apresentam dificuldade para colagem, em função de uma baixa penetração do adesivo. Segundo a Norma NBR 7190 (1997), madeiras do gênero *Pinus* são indicadas para o uso de MLC por possuírem densidade em torno de 0,50 g/cm<sup>3</sup>.

Para Zangiácomo (2003), a indicação de uma determinada espécie para a produção de elementos estruturais de madeira laminada colada com base apenas na sua densidade poderá levar a resultados indesejados, pois tão importante quanto a densidade é a permeabilidade da espécie em relação aos adesivos disponíveis comercialmente.

A secagem das lâminas é um fator significativo na qualidade das peças de MLC, uma vez que influencia diretamente no processo de colagem das peças. O teor de umidade ideal para as lâminas está na faixa entre 7 e 14% de umidade, em função do adesivo utilizado

(SZÜCS, 1992; CHUGG, 1964). Diferenças no teor de umidade entre as lâminas devem ser evitadas e não deve ser maior do que 5% em um elemento estrutural (BREYER et al., 1998). Se existir uma diferença significativa entre os teores de umidade das lâminas adjacentes no momento de prensagem, o teor de umidade médio da peça será distribuído e, quando em uso, poderão ocorrer contração e inchamento das lâminas, ocasionando delaminações, em função das tensões internas geradas.

De acordo com a ASTM D 3737 (1996), a qualidade das lâminas influencia significativamente a resistência de vigas de MLC. Sendo assim, uma classificação previa das lâminas de madeiras utilizadas no processo de produção da MLC poderá garantir um produto de melhor qualidade e estabilidade. Utilizando-se as lâminas de maiores resistências nas regiões das bordas externas da viga e as de menor qualidade próximas à linha neutra, a resistência e a rigidez dos elementos estruturais serão aumentadas, conforme a norma ASTM D 3737 (1996), que utiliza o método da seção transformada para avaliação da rigidez, considerando um comportamento elástico linear da madeira. Para a determinação da resistência, é utilizado método empírico desenvolvido por Freas e Selbo (1954) que determina o coeficiente de redução da resistência da madeira em função dos defeitos existentes nas peças.

A norma ASTM D 3737 (1996) admite um valor de até  $50 \text{ mm} \pm 0,30 \text{ mm}$  para a espessura das lâminas. A norma brasileira NBR 7190 (1997) considera um valor máximo de 30 mm. Sendo assim, a norma adotada para o dimensionamento é um fator determinante para a produção das lâminas, bem como para um melhor racionamento do uso da madeira.

Moody e Bohannan (1970) afirmam que o princípio básico da construção em MLC consiste em distribuir racionalmente as lâminas selecionadas para a melhor utilização do material disponível. Nesse sentido, de acordo com Grohmann e Szücs (1998), materiais com qualidades mais elevadas são colocados nas regiões do elemento que estarão mais solicitadas, e as lâminas com qualidade inferior serão posicionadas nas regiões com menores solicitações. Bodig e Jayne (1993) e Arruda (1995) apresentam estudos sobre a contribuição do momento de inércia de cada lâmina em relação ao momento de inércia total da peça.

Fagundes e Szücs (1998) apresentam o desenvolvimento de um sistema de pré-classificação das lâminas de madeira *Pinus taeda* e *Pinus elliottii* para o uso em MLC produzidos pela empresa Battistella. Nesse estudo, os autores adotaram um sistema de pré-classificação composto por cinco subgrupos (A1, A2, B1, B2, B3), sendo o subgrupo A dividido em duas categorias e o subgrupo B dividido em três categorias. As lâminas pertencentes a tais subgrupos e categorias foram classificadas a partir do módulo de elasticidade, utilizando o ensaio não-destrutivo de flexão a três pontos. As vigas foram constituídas por todas cinco lâminas, sendo uma de subgrupo, totalizando 30 peças ensaiadas. As vigas foram ensaiadas em ensaio de flexão estática a quatro pontos. Os resultados indicaram que a divisão nos subgrupos A e B não apresentaram diferenças significativas, podendo ser adotado apenas duas classes, facilitando a operação em uma linha de produção.

Desse modo, Grohmann e Szücs (1998) avaliaram o efeito da distribuição das lâminas de *Eucalyptus grandis* em vigas de MLC com lâminas pré-classificadas. Nesse trabalho, foi adotado três conjuntos de distribuição das lâminas nas vigas de MLC: pela rigidez, aleatoriamente e por meio do módulo de elasticidade da viga pré-determinado, sendo este último composto por dois grupos de classes de qualidade de lâminas, com duas e três classes de resistências. Os autores concluem que o conjunto de vigas com duas classes de resistências foi o mais adequado visando uma aplicação prática, pois foi o que apresentou desempenho superior no conjunto de distribuição das lâminas e pela facilidade de aplicação no processo de fabricação.

Zangiácomo (2003) estudou quatro espécies de madeiras tropicais para o uso em madeira laminada colada. A espécie que apresentou melhor compatibilidade dentre as características desejadas para o uso em MLC foi o cedrinho (*Erismia* sp). O autor montou vigas compostas por lâminas classificadas e foram confeccionadas de forma aleatória e não-aleatória. Observou-se que as propriedades de rigidez das vigas com distribuição não-aleatória podem apresentar propriedades de rigidez superiores às de vigas montadas com distribuição aleatória.

No processo de classificação das lâminas, uma avaliação visual e mecânica é recomendada. A classificação visual tem por intuito avaliar e quantificar a presença de nós e de desvios de grã nas lâminas. A presença desses elementos diminuem significativamente a resistência

das vigas, sendo a ruptura ocasionada, normalmente na região onde ocorrem esses defeitos (COIADO e DIAS, 2004). Na classificação mecânica o processo de avaliação não destrutiva da madeira é usado para se determinar o módulo de elasticidade longitudinal ( $E_M$ ) das lâminas.

Para Pellerin e Ross (2002), o ensaio não-destrutivo (END) é a ciência de identificação das propriedades físicas e mecânicas de um dado material sem alterar as suas capacidades de usos finais, e usar essas informações para o uso em aplicações apropriadas do material. Nesse sentido, o END de madeiras assume um importante papel, pois permite obter e analisar o maior número de informações sobre o material, objetivando não apenas maior precisão dos resultados, como também estabelecer critérios práticos de classificação e caracterização do material. Existem diversos métodos e técnicas de END de madeiras, sendo que cada um deles é adequado à avaliação de determinadas propriedades e características desse material (TARGA et al., 2005).

Esses métodos apresentam muitas vantagens sendo uma das mais importantes a possibilidade de a madeira ser caracterizada eficazmente sem a extração de corpos-de-prova, uma vez que a avaliação é feita na própria peça ou estrutura (OLIVEIRA, 2001). Proporcionam também maior rapidez para analisar uma grande população e versatilidade para se adequar a uma rotina padronizada numa linha de produção (OLIVEIRA e SALES, 2000).

Em materiais homogêneos e isotrópicos como aço, plásticos e cerâmicas, o END detecta falhas surgidas no processo de fabricação. Na madeira, essas irregularidades ocorrem naturalmente, e a sua influência sobre as propriedades mecânicas podem ser avaliadas através de métodos não destrutivos (BUCUR, 1995). Quase todos os tipos de ensaios não-destrutivos podem ser utilizados com a madeira e derivados de madeira, sendo que a escolha para a sua utilização depende da aplicação específica (BODIG, 2001).

Para tanto, equipamentos como o *stress wave timer*, o ultra-som, o *E-computer* e a flexão estática tem sido utilizados para tal finalidade. Com esses processos de classificação podem-se dividir as lâminas de madeira em classes de qualidade, sendo então possível distribuí-las de forma a garantir uma melhor resistência dos elementos estruturais (TARGA et al., 2005).

A união longitudinal das lâminas pode ser realizada de três formas: de topo, biselada e dentada (Figura 5). Essas emendas são realizadas quando se deseja construir vigas de MLC com vãos superiores aos da madeiras serrada, sendo necessária à junção de várias peças de madeira (MACEDO, 2000).

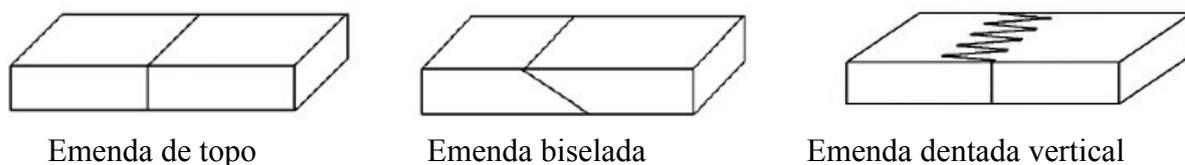


Figura 5. Tipos de emendas utilizadas na MLC.

A qualidade dessas emendas é de grande importância na composição da MLC. As emendas de topo são de fácil execução, porém apresentam colagem deficiente, sendo as menos eficientes em termos de resistência e não são admitidas de acordo com a norma NBR 7190 (1997) (OLIVEIRA JUNIOR et al., 2006). As emendas biseladas foram desenvolvidas para suprir as limitações de resistência das emendas de topo, porém essa limitação só é superada quando há uma baixa inclinação (da ordem de 1:10) no corte do bisel, tornando este tipo de emenda mais dispendioso, do ponto de vista da quantidade excessiva de madeira e adesivo a serem utilizados (NASCIMENTO et al., 2001).. Atualmente, as emendas dentadas são largamente utilizadas na fabricação de MLC, por reunir boas características de resistência à tração (intermediária entre as emendas de topo e biseladas) e praticidade de produção. A Figura 6 apresenta diferentes tipos de emendas dentadas.



Figura 6. Tipos de emendas dentadas disponíveis para o uso em elementos de MLC.

Matthieses (1998) avaliou a influência da inclinação de emendas biseladas em corpo-de-prova de tração paralela às fibras. Quatro inclinações foram avaliadas (1:3, 1:5, 1:8 e 1:10). Foi utilizado o adesivo Cascophen RS-216, à base de resorcinol e as madeiras utilizadas foram o *Pinus taeda* e o *Eucalyptus citriodora*. Foi observado uma maior eficiência para as inclinações de 1:8 e 1:10, sendo o último o mais próximo da madeira maciça e a sua indicação para ligações em elementos estruturais.

Nascimento et al. (2002) avaliando o comportamento de vigas retas de MLC com emendas de topo e bisel observaram que as emendas de topo posicionadas na região comprimida da viga são tão eficientes quanto as emendas biseladas. Os autores sugerem ainda que as emendas biseladas da região tracionada devam ser realizadas antes da colagem das vigas, proporcionando uma junta colada de melhor qualidade.

A eficiência da colagem das lâminas possui ligação direta com a pressão aplicada para a consolidação da MLC. A pressão influencia na penetração do adesivo na madeira, e pressões muito altas podem gerar uma movimentação excessiva do adesivo fazendo com que ele transborde para fora da junta colada, enquanto pressões muito baixas podem diminuir a penetração do adesivo pela madeira. A pressão de colagem também pode variar segundo a densidade da madeira. Sendo assim, para madeiras de densidade inferior ou igual a  $0,5 \text{ g/cm}^3$  deve-se utilizar uma pressão de colagem igual a  $0,7 \text{ N/mm}^2$  e para

madeiras de densidade superior a  $0,5 \text{ g/cm}^3$  pressão igual a  $1,2 \text{ N/mm}^2$ , ou então atender a recomendação do fabricante da cola (HENRIQUES DE JESUS, 2000). Entretanto, Zangiácomo (2003) estudando quatro espécies tropicais para uso em MLC, afirma que é conveniente utilizar pressão de colagem de  $1,6 \text{ N/mm}^2$  na confecção dos corpos-de-prova para determinação da resistência das emendas à tração. Petrusky e Della Lucia (1998) avaliaram o efeito do incremento de pressão na qualidade de juntas colada para a madeira de *Eucalyptus grandis* na ordem de  $0,3$  a  $1,5 \text{ N/mm}^2$ , e observaram que uma pressão de  $0,7 \text{ N/mm}^2$  apresenta resultados de falha na madeira equivalentes à pressões mais elevadas.

A temperatura de colagem é outro fator importante para a qualidade da colagem. A temperatura controla o tempo de cura e a viscosidade que diretamente afetam a capacidade do adesivo se espalhar e ser absorvido. O tempo de prensagem é um fator que depende do tipo de adesivo utilizado. Como o resorcinol é o adesivo mais comumente usado na fabricação de MLC, o tempo de prensagem é de no mínimo 10 horas, considerando uma temperatura ambiente de  $20^\circ \text{ C}$  e umidade relativa de 65%. Esses valores podem mudar em função da região de ensaio e fabricação (CHUGG, 1964).

### **3.2 - ADESIVOS**

O processamento da madeira na forma de serrados, incrementou a gama de utilização da madeira e, posteriormente, o uso de adesivos para colagem de peças de madeira, possibilitou a fabricação de produtos compostos de madeira para as mais variadas aplicações (IWAKIRI, 2005). Para Chugg (1964), o adesivo é definido como uma substância capaz de unir através do contato duas superfícies aderentes.

Um adesivo estrutural deve permitir que a peça colada opere como membro estrutural por todo o seu tempo de serviço, conforme planejado. Sob condições de exposições mais rigorosas, ele deve mostrar completa resistência à água, calor, agentes biodegradantes e não ser poluente ao meio ambiente (IWAKIRI, 2005; CHUGG, 1964; KOLLMANN et al., 1975).

Albuquerque e Latorraca (2000) afirmam que a variabilidade estrutural e anatômica existente na madeira afeta de modo significativo a performance da ligação adesiva. Vital et

al. (2006), corroboram com o princípio e afirmam que a variabilidade que ocorre na densidade e porosidade entre os lenhos inicial e tardio, cerne e alburno, e ainda nas madeiras de reação, além da presença de extrativos nas cavidades dos elementos anatômicos, são os fatores que mais afetam o processo de adesão.

Lobão e Gomes (2006) e Plaster et al. (2008) indicam que a densidade da madeira é um fator que influencia diretamente na qualidade da adesão, sendo que para madeira de alta densidade ocorre um aumento da resistência e uma diminuição para o percentual de falha na madeira.

Pizzi et al. (1981) afirmam que os adesivos mais comuns utilizados no processo de fabricação da MLC são: o resorcinol, o resorcinol-formaldeído e a base de melamina. A principal característica do adesivo utilizado para a fabricação da MLC é a resistência à umidade. Isso se deve ao fato de que no processo de produção da MLC os locais usados para a montagem das peças possuem um teor de umidade elevado, como galpões e pátios.

O resorcinol-formaldeído é uma resina de cura a frio, sendo necessário o uso de catalisador e, além da utilização em peças de madeira laminada colada, é usado em construções navais, aviação e outros. Os adesivos a base de resorcinol são normalmente capazes de suportar condições severas de exposições, incluindo calor e umidade, e a rigidez da linha da cola é amplamente determinada pela habilidade da madeira em resistir a condições de exposições. Ele produz não só ligações de altas resistências mecânicas, mas também é resistente a água e a variações climáticas. De acordo com Iwakiri (2005), a resina apresenta coloração marrom, viscosidade de 500 a 800 cP e vida útil em armazenagem por volta de um ano, se mantido à temperatura ambiente, por volta de 25° C. Kollmann et al. (1975) afirma que como a resina é de cura a frio, o tempo de prensagem é variável, em função da temperatura ambiente (Tabela 1).

Tabela 1. Variação do tempo de prensagem em função da temperatura para resina resorcinol.

Temperatura (°C)	Tempo de prensagem
20	10 horas
30	6 horas
40	2 horas
60	20 minutos
80	5 minutos

Fonte: Kollman et al. (1975).

Chugg (1964) afirma que a lâmina de madeira a ser colada com adesivos à base de resorcinol não deve exceder 15% de teor de umidade no momento da colagem, pois existe a possibilidade de falha nas linhas de colas se a madeira ficar exposta a uma baixa umidade relativa. Isto se deve ao fato de que todos adesivos são menos resistentes em tração do que em cisalhamento, e quando as lâminas perdem água e contraem, tensões de tração são formadas ao longo da peça, as quais podem ser fortes suficientes para que ocorra a delaminação ou falha na linha de cola.

Quimicamente, o resorcinol é uma resina fenólica de reatividade mais elevada que o fenol. Entretanto, a resina possui alto custo de produção, tornando o processo mais oneroso (KOLLMAN, et al. 1975; PIZZI, 1983). Sendo assim, o resorcinol é misturado, comumente, na mesma proporção com o fenol, sendo adicionado paraformaldeído instantes antes da sua utilização.

No Brasil o adesivo resorcinol formaldeído é fabricado pela ALBA QUÍMICA, e conhecido como CASCOPHEN RS, sendo um adesivo líquido sintético, à base de resorcinol-formol, em solução aquosa/alcoólica. Apresenta dois componentes, sendo um a resina (CASCOPHEN RS), de cor marrom avermelhada, e o outro o endurecedor (Preparado Endurecedor F-60-M), que se apresenta na forma de pó bege. Os dois componentes, depois de misturados, resultam em um produto adesivo de alto desempenho, à prova d'água (fria ou fervente), resistente a diversos solventes orgânicos, fungos e às intempéries (AZAMBUJA e DIAS, 2006).

Propezi et al. (2003) avaliaram o desempenho dos adesivos poliuretano (PU), fenol-resorcinol formaldeído (FRF) e melamina-uréia-formaldeído (MUF) aplicados à madeira de beech (*Fagus sylvatica*) com teor de umidade a 12 e 22%, de acordo com a norma britânica BS 1204, com uma área de sobreposição colada da ligação de 25 x 25 mm, avaliando o aumento da resistência ao longo do tempo, utilizando o modelo sigmoidal de Boltzmann. Os resultados indicaram que dentre os três adesivos testados para a madeira, com um teor de umidade de 12%, o adesivo fenol-resorcinol formaldeído foi o primeiro a atingir a resistência exigida pela norma. Observa-se também que a rigidez máxima atingida entre os adesivos foi diferente, ficando na ordem de 6,3 N/mm<sup>2</sup>, 6 N/mm<sup>2</sup> e 5,4 N/mm<sup>2</sup> para o PU, FRF e MUF, atendendo a referida norma. Para o teor de umidade de 22%, todos os adesivos apresentaram uma queda na resistência, sendo que o único a ficar acima do valor indicado pela norma foi o poliuretano. Isso se deve ao fato de que tanto o FRF quanto a MUF atinge o seu máximo de resistência com o teor de umidade médio de 12-14%, acima desses valores há uma queda significativa em sua resistência. Desta forma, Chugg (1964), atenta para que as ligações devem ser mantidas por um longo período na prensagem até que a madeira esteja relativamente seca, evitando qualquer distorção não desejada com qualquer tipo de adesivo utilizado.

Novos adesivos têm sido desenvolvidos para a fabricação de MLC, como é o caso da resina extraída da mamona, utilizada por Zangiácomo (2003) e Azambuja e Dias (2006). É um adesivo poliuretânico bicomponente (isocianato), desenvolvido e produzido por pesquisadores do Instituto de Química de São Carlos da Universidade de São Paulo (IQSC – USP). Derivado do óleo da mamona, esse adesivo é do tipo bicomponente e de cura a frio, composto do prepolímero A249 e do polioliol B16030. Uma vez misturados, o tempo de utilização é em torno de 20 minutos, com sua viscosidade aumentando após esse período. Os autores supracitados concluíram que a resina à base de mamona pode ser utilizada para a fabricação de elementos estruturais, apresentando bons resultados nas propriedades de rigidez.

A norma brasileira NBR 7190 (1997) recomenda o uso de adesivo à prova d'água, indicando os testes de cisalhamento na lâmina de cola e de tração na lâmina de cola como parâmetros para se determinar a eficiência do adesivo utilizado. Sendo assim, uma resistência mínima de 90% do valor da resistência da madeira utilizada deverá ser encontrada para que o mesmo seja utilizado no processo de fabricação da MLC.

Vital et al. (2006) avaliaram a eficiência de adesivos em emulsão aquosa à base de poliacetato de vinila (PVAc) de média viscosidade (2000-4000 cP) (Cascorez 2250) e alta viscosidade (4000-6000 cP) Cascorez 2280 e resina à base de resorcinol-formaldeído (Cascophen RS 216), com teores médios de sólidos iguais a 50,0; 51,3; e 55,5%, respectivamente, aplicando uma pressão de 1 N/mm<sup>2</sup>. As espécies utilizadas foram o *Pinus elliottii*, *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna* e avaliada a eficiência dos adesivos em pranchas oriundas de três regiões dos troncos e ensaiados em cisalhamento paralelo às fibras. A madeira de *Pinus elliottii* foi a que apresentou a maior porcentagem de falha na madeira. Entretanto, a resistência ao cisalhamento foi inferior ao esperado. Os adesivos em emulsão aquosa à base de poliacetato de vinila de alta e média viscosidade foram os que apresentaram melhor resultado.

Plaster et al. (2008) avaliaram a capacidade de adesão da madeira serrada de *Eucalyptus* sp, por meio de ensaio de cisalhamento paralelo às fibras, empregando-se os adesivos à base de resorcinol-formaldeído e acetato de polivinila. Os resultados indicaram que o adesivo à base de resorcinol-formaldeído apresentou maiores valores para falha na madeira (74,41%) do que o acetato de polivinila (65,94%). Os autores concluem que a densidade da madeira influenciou a adesão das juntas para os dois adesivos empregados.

### **3.3 - CRITÉRIOS PARA O DIMENSIONAMENTO DE VIGAS DE MADEIRA LAMINADA COLADA**

Vigas de madeira seguem os mesmos princípios básicos usados no dimensionamento de qualquer material estrutural. Os fatores que devem ser considerados são: a flexão, o cisalhamento e a deflexão (BREYER et al., 1998). Esses fatores estão diretamente relacionados com o dimensionamento da peça a ser usada. Em muitos casos, a tensão de flexão é o fator principal na análise do dimensionamento, sendo o mais avaliado, e os demais fatores apenas verificados. A viga de madeira laminada colada é considerada uma viga composta uma vez que são fabricadas a partir de dois ou mais pedaços de madeira unidos para formar uma viga simples. A MLC é projetada de tal forma que se comporte como uma viga única. Tais vigas podem ser construídas em uma grande variedade de

formas para satisfazer necessidades arquitetônicas ou estruturais especiais e promover seções transversais maiores do que as comumente disponíveis.

### 3.3.1 Vigas: Aspectos gerais

Quando uma viga sofre a ação de forças ou momentos, são criadas tensões e deformações em seu interior. A resultante das tensões agindo na seção transversal de uma peça de madeira pode ser reduzida a uma força de cisalhamento ( $V$ ) e um momento fletor ( $M$ ) (GERE, 2003; BREYER et al., 1998; HARTSUIJKER e WELLEMAN, 2006). As resultantes de tensões em uma viga estaticamente determinadas podem ser calculadas a partir das equações de equilíbrio. As cargas que atuam na viga a fazem fletir e, assim, deformar o seu eixo em uma curva. A deflexão de uma viga em qualquer ponto ao longo do seu eixo é o deslocamento desse ponto em relação à sua posição original. Na análise de vigas, é necessário distinguir entre a flexão pura e a flexão não-uniforme.

De acordo com Gere (2003) flexão pura é referente à flexão na viga submetida a um momento fletor constante, ocorrendo apenas em regiões da viga onde a força de cisalhamento é zero. A flexão não-uniforme é referente à flexão na presença de forças de cisalhamento, o que significa que o momento fletor varia ao longo da peça (Figura 7).

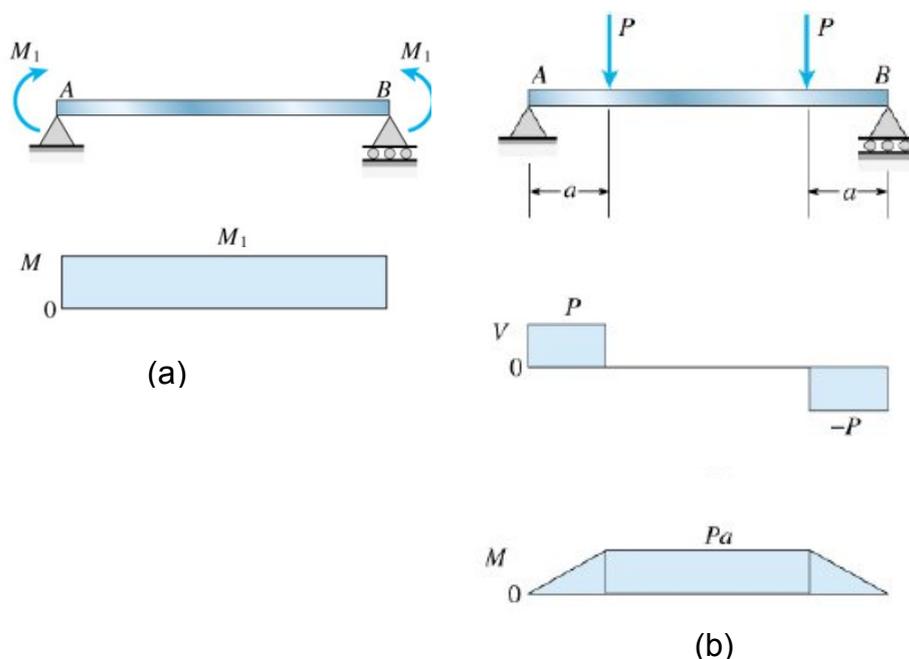


Figura 7. Tipos de flexão. (a) Flexão pura; (b) flexão não uniforme, com região central em flexão pura e extremidades em flexão não-uniforme (GERE, 2003).

As deformações longitudinais em uma viga podem ser encontradas analisando-se a curvatura da viga e as deformações associadas. As deformações em uma viga em flexão pura variam linearmente com a distância em relação à superfície neutra, independente da forma da curva de tensão-deformação do material (GERE, 2003; HARTSUIJKER e WELLEMAN, 2006). As deformações longitudinais em uma viga são acompanhadas por deformações transversais devido ao efeito do coeficiente de Poisson. As deformações longitudinais são expressas pela Equação 1:

$$\varepsilon_x = \frac{y}{\rho} = \kappa y \quad (\text{Eq. 1})$$

onde:

$\varepsilon_x$  = deformações longitudinais;

$y$  = distância a partir da linha neutra;

$K$  = curvatura;

$\rho$  = raio de curvatura

As tensões e deformações resultantes quando uma carga é aplicada estão diretamente relacionadas à curvatura da curva de deflexão. A curvatura é uma medida de quão intensamente a viga é flexionada. A curvatura é definida conforme a Equação 2.

$$\kappa = \frac{1}{\rho} = \frac{M}{EI} \quad (\text{Eq. 2})$$

onde:

$K$  = curvatura;

$\rho$  = raio de curvatura;

$M$  = momento fletor;

$EI$  = rigidez de flexão

Dessa forma, a Equação 2 pode ser rearranjada para expressar a curvatura em termos de momento fletor na viga, sendo conhecida como equação momento-curvatura, mostrando que a curvatura é diretamente proporcional ao momento fletor ( $M$ ) e inversamente proporcional à rigidez de flexão (HARTSUIJKER e WELLEMAN, 2006). Assim, a rigidez de flexão é uma medida da resistência da viga ao momento (GERE, 2003). As tensões desenvolvidas em função do momento fletor podem ser determinadas a partir da Equação 3. A relação do momento positivo implicará em tensões de flexão positiva na parte da seção transversal de  $y$  negativo, na parte inferior da viga, formando tração nessa região. Na parte superior da viga, as tensões serão positivas, indicando a compressão (Figura 8).

$$\sigma_x = \frac{M}{I} \cdot y = \frac{M}{S} \leq f_d \quad (\text{Eq. 3})$$

onde:

$\sigma_x$  = tensão de flexão

$M$  = momento fletor

$y$  = distância a partir da linha neutra

$I$  = momento de inércia

$S$  = módulo de seção

$f_d$  = tensão admissível

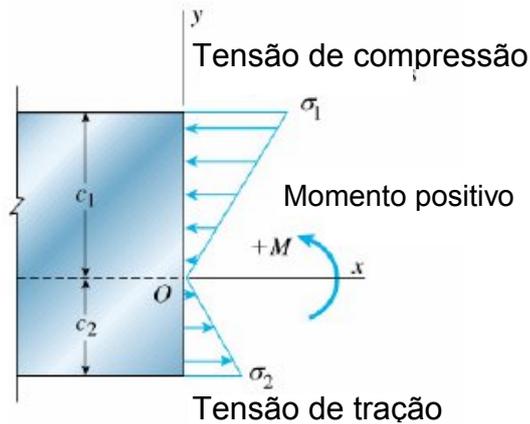


Figura 8. Relação entre o momento fletor e as direções normais (GERE, 2003).

A deflexão de uma viga em qualquer ponto ao longo do seu eixo é o deslocamento desse ponto em relação à sua posição original. As cargas que atuam na viga a fazem fletir, e assim, deformar o seu eixo em uma curva (BODIG e JAYNE, 1993). A equação para deformação devido à flexão é baseada na suposição que a seção transversal da peça permaneça plana após a deformação. Entretanto, considerando que as tensões de cisalhamento em vigas são causadas pela mudança do momento, a seção transversal apenas permanece plana em flexão pura, sendo que as distorções causadas pelo cisalhamento resultam em uma deformação adicional na viga. Conseqüentemente, existem duas contribuições para a deformação total em uma viga: devido ao momento fletor e causada pelo cisalhamento transversal. Normalmente essa segunda parcela é desprezada quando a relação vão/ altura da viga é maior ou igual a 21, para vigas de seção retangular. Skaggs e Bender (1995) indicam que a deformação devido ao cisalhamento é governada por características geométricas da viga e do tipo de carregamento aplicado. A Equação 4 (BORESI e SIDEBOTTOM, 1985, *apud* SKAGGS e BENDER, 1995) representa a equação genérica de deformação devido à flexão para vigas homogêneas.

$$\delta_i = \int_0^L \frac{M}{EI} \frac{\partial M}{\partial F_i} dx + \int_0^L \frac{kV}{GA} \frac{\partial V}{\partial F_i} dx \quad (\text{Eq. 4})$$

Onde:

$\delta_i$  = deformação no ponto  $i$ ;

$A$  = área da seção transversal;

$E$  = módulo de elasticidade;

$F_i$  = carga concentrada no ponto  $i$ ;

$G$  = módulo de elasticidade transversal;

$I$  = momento de inércia;

$k$  = fator de forma em função da geometria da viga;

$M$  = momento fletor em torno de  $x$ ;

$V$  = tensão de cisalhamento em torno de  $x$ .

Dessa forma, os fatores que compõem a deformação em uma viga podem ser representados conforme as Equações 5 e 6, onde os fatores  $K_b$  e  $K_v$  são constantes que dependem do tipo de carregamento, posição da medição da deformação e do esquema estático utilizado (USDA, 1999).

$$\delta_f = \frac{k_b PL^3}{EI} \quad (\text{Eq. 5})$$

$$\delta_v = \frac{K_v PL}{GA} \quad (\text{Eq. 6})$$

Onde:

$\delta_f$  = deformação devido ao momento fletor;

$\delta_v$  = deformação devido ao cisalhamento;

$A$  = área da seção transversal da viga

$E$  = módulo de elasticidade;

$G$  = módulo de elasticidade transversal;

$K_b$  e  $K_v$  = constantes;

$L$  = vão livre;

$P$  = carga aplicada;

Assim, a fórmula que considera toda a deformação real em uma viga pode ser escrita conforme a Equação 7.

$$\delta_t = \frac{k_b PL^3}{EI} + \frac{K_v PL}{GA} \quad (\text{Eq. 7})$$

Onde:

$\delta_t$  = deformação total;

Observa-se que a deformação devido ao cisalhamento está intimamente relacionada ao módulo de elasticidade transversal (G) do material. Biblis (1966) indica que ignorando esse componente, ainda que pequeno em termos percentuais, contribui para uma medição errônea do material. Um método empregado que tende a evitar o efeito da deformação por cisalhamento é a medição somente no trecho de flexão pura da viga, região na qual o efeito do cisalhamento é zero, com ação de momento fletor constante em ensaios de flexão em quatro pontos (GERE, 2003).

### 3.3.2 - Métodos de estimativa da resistência em madeira laminada colada

Um dos métodos de se determinar às propriedades de resistência da MLC é através de ensaios destrutivos. Entretanto, a sua inviabilidade encontra-se na indisponibilidade do uso do material após o ensaio. Com isso, muitas tentativas têm sido realizadas com o intuito de modelar o comportamento mecânico de vigas de madeira laminada colada. De acordo com Hernandez et al. (1992), diferentes abordagens têm sido feitas, passando por técnicas empíricas até métodos estocásticos mais sofisticados.

O método da seção transformada é um procedimento alternativo para analisar as tensões de flexão em uma viga composta. O método é válido para relações lineares plásticas. O método consiste em transformar a seção transversal de uma viga composta em uma seção transversal equivalente de uma viga imaginária, que é constituída por apenas um material. Essa nova seção é chamada seção transformada. De acordo com Gere (2003), a viga imaginária com seção transversal é analisada da maneira convencional para uma viga de um material. Como último passo, as tensões na viga transformada são convertidas para aquelas na viga original (LEE et al., 2005). A norma ASTM D3737 (1996) utiliza o conceito de seção transformada para avaliação da rigidez. A norma exemplifica uma viga de MLC em três zonas de rigidez (Figura 9). O fator da seção transformada do momento de inércia ( $T_i$ ) pode ser expresso como (Equação 8).

$$T_i = \frac{E_1 d_1^3 - d_2^3 (E_1 - E_2) - d_3^3 (E_2 - E_3)}{E_1 d_1^3} \quad (\text{Eq. 8})$$

onde:

$E_1, E_2$  e  $E_3$  = módulo de elasticidade para as zonas 1, 2 e 3 (Figura 9)

$d_1, d_2$  e  $d_3$  = espessura da zona 1, 2 e 3 (Figura 9)

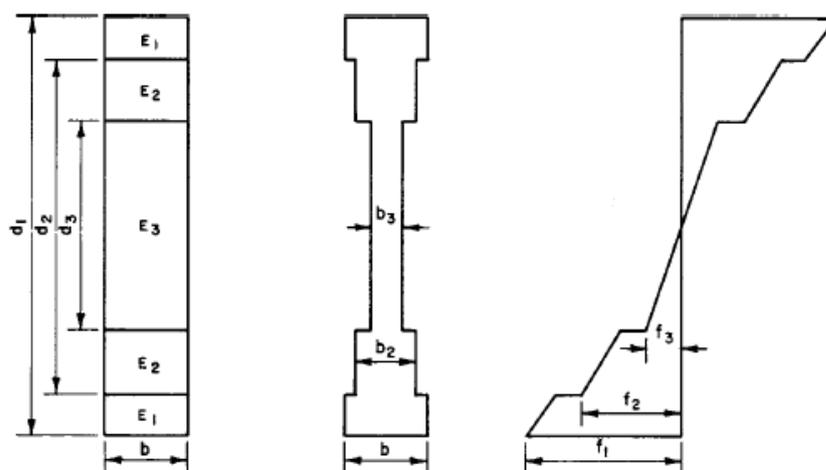


Figura 9. Exemplo de uma viga composta por três zonas (ASTM, 1996).

De acordo com a norma, deve-se checar o valor do módulo de elasticidade de cada zona. Para fins de cálculo, se  $E_1 > E_2 > E_3$  pode-se considerar o valor médio do módulo de elasticidade da peça conforme a Equação 9.

$$E = E_1 * T_i \quad (\text{Eq. 9})$$

onde:

$E$  = módulo de elasticidade para seção transformada;

$E_1$  = módulo de elasticidade da zona 1;

$T_i$  = fator da seção transformada do momento de inércia.

A determinação da rigidez é avaliada através do método  $I_k/I_g$ . O modelo foi desenvolvido por Freas e Selbo (1954), e tem como base a relação da redução de resistência influenciada pela presença dos nós nas lâminas de madeira. Ele utiliza a redução do momento de inércia em função dos nós. O termo  $I_k$  é definido como o momento de inércia da seção transversal de todos os nós e o termo  $I_g$  é o momento de inércia da seção transversal da viga. Este método considera um comportamento elástico linear da madeira, sendo a resistência à flexão diminuída por meio de um coeficiente obtido em função da relação ( $R=I_k/I_g$ ), de acordo com a Equação 10. O fator modificador da resistência é denotado como  $SMF_b$  (Equação 11).

$$R = \frac{1}{\sum_0^{n_1} Z} \left\{ x_1 \sum_{n_2}^{n_1} Z + \left( \frac{E_2}{E_1} \right) x_2 \sum_{n_3}^{n_2} Z + \left( \frac{E_3}{E_1} \right) x_3 \sum_0^{n_3} Z + \left[ h_1^2 \sum_{n_2}^{n_1} Z^2 + \left( \frac{E_2}{E_1} h_2 \right)^2 \sum_{n_3}^{n_2} Z^2 + \left( \frac{E_3}{E_1} h_2 \right)^2 \sum_0^{n_3} Z^2 \right]^{1/2} \right\}$$

(Eq. 10)

Onde:

$$R = I_k/I_g$$

$x_1, x_2, e x_3$  = tamanhos médios dos nós expressos como fração decimal do tamanho de cada classe de madeira, com os valores médios de rigidez de  $E_1, E_2, E_3$ , respectivamente;

$h_1, h_2, h_3$  = diferença do percentual 99,5 e dos tamanhos médios dos nós como fração decimal da largura das respectivas classes de madeira;

$Z, Z^2$  = fatores de ponderação;

$n_1, n_2, n_3$  = número de lâminas em  $d_1, d_2, e d_3$ , respectivamente.

$$SMF_b = (1 + 3R) * (1 - R)^3 * \left( 1 - \frac{R}{2} \right) \quad (\text{Eq. 11})$$

onde:

$SMF_b$  = fator modificador da resistência

$$R = I_k/I_g$$

É possível observar que o fator SMF diminui em função do aumento da quantidade de defeitos graficamente (Figura 10).

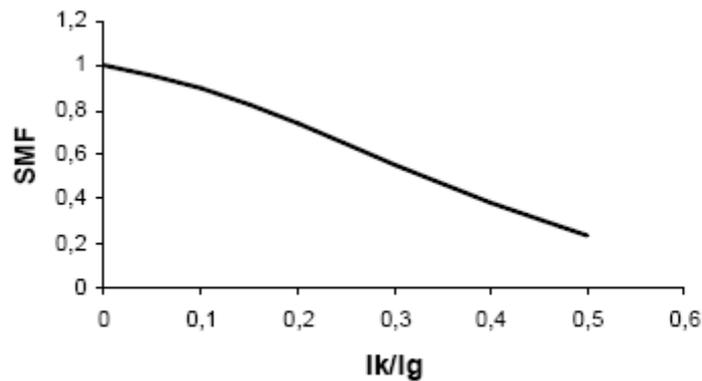


Figura 10. Variação do fator modificador da resistência em função da quantidade de defeitos na viga de MLC (FIORELLI, 2005).

Os modelos teóricos têm por objetivo estimar as propriedades de rigidez das vigas de MLC utilizando, normalmente, métodos não-destrutivos para determinar a resistência e a rigidez dessas peças. Esses modelos são validados por meio de ensaios destrutivos, comparando-se os resultados teóricos com os obtidos experimentalmente.

Nascimento et al (2002) avaliaram o comportamento teórico e experimental de vigas retas de MLC com emendas de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*. As vigas foram dimensionadas em tamanho estrutural, com vão superior a 5,4 m. O estudo apresentou uma diferença entre o  $E_M$  teórico e experimental igual a 4,43%.

Lee e Kim (2000) estimaram a resistência de vigas de MLC utilizando a espécie *Larix leptolepis*, caracterizando não destrutivamente as peças a partir do módulo de elasticidade das lâminas. Para tanto, cinco métodos foram avaliados: uso do *stress wave timer* aplicado no sentido longitudinal e radial em seis pontos ao longo da peça, pelo método da flexão estática aplicado no sentido longitudinal, e com o uso de uma classificadora mecânica (*machine stress rating*). Os módulos de elasticidade usados nos cálculos das vigas foram corrigidos em função do cisalhamento transversal. O uso da classificadora mecânica apresentou os melhores resultados, embora com poucas diferenças entre os valores encontrados para os demais métodos.

Santos (2008a) avaliou o comportamento teórico e experimental em vigas “I” produzidas com alma de OSB e compensado naval e flanges de LVL de *Pinus kesya*. O autor utilizou modelos teóricos para estimar a rigidez a flexão, módulo de ruptura e a flecha. Os flanges foram classificados por meio da técnica de ondas de tensão com o equipamento *stress wave timer*. Para vigas com alma de OSB, os resultados indicaram uma estimativa significativa das propriedades, com valores teóricos de  $E_M$  e  $f_M$  iguais 7 e 11% respectivamente acima do experimental, diferentemente para vigas com a alma de compensado onde os valores teóricos superestimaram em 46 e 14% os valores experimentais para  $E_M$  e  $f_M$ . Entretanto, o autor não descarta a possibilidade de se poder estimar as propriedades dos materiais por meio de outros modelos.

Fiorelli (2005) avaliou o aumento da resistência em vigas de madeira laminada de *Pinus caribea* var *hondurensis* reforçadas com fibra de vidro. O autor propôs um modelo numérico para cálculo do momento fletor resistente e da rigidez à flexão ( $EI$ ) de vigas de MLC sem reforço e com polímeros reforçados com fibras (PRF). A hipótese de distribuição linear de deformações ao longo da altura da viga, comportamento elásto-frágil-linear da madeira na tração paralela às fibras e bi-linear na compressão paralela às fibras foi avaliada. Resultados experimentais obtidos por meio de ensaios em vigas de MLC

reforçadas com fibra de vidro indicam a validade do modelo teórico proposto, com diferenças em torno de 5% entre a comparação do modelo teórico/experimental.

Outro método utilizado é o uso de análise numérica por meio do Método de Elementos Finitos (MEF). Carrasco e Moita (1998) avaliaram vigas com tamanhos estruturais de MLC de Pinho do Paraná, e aplicaram a técnica do MEF utilizando um modelo bidimensional e um tridimensional. O modelo bidimensional foi o que representou com maior semelhança o comportamento das vigas de MLC, com exceção das análises de tensões normais.

### 3.4. LOURO VERMELHO (*Sextonia rubra*)

*Sextonia rubra* (Mez) C. K. Allen, conhecida popularmente como louro-vermelho, pertence à família Lauraceae e possui sinonímia botânica com os gêneros *Ocotea* e *Nectandra* (IBAMA, 2002; IPT, 2003; CIRAD, 2008). A espécie é encontrada em alguns estados no norte do Brasil, como o Amazonas, Pará, Amapá e Rondônia. A Figura 11 ilustra a árvore, a tora e o corte tangencial da madeira.



Figura 11. Árvore, tora e corte tangencial da espécie *Sextonia rubra* (IBAMA, 2002).

A árvore apresenta cerne marrom-amarelado-claro, sem diferenciação com o alburno. Possui grã direita ou reversa, textura média, com brilho moderado e com cheiro imperceptível (IBAMA, 1989).

A madeira é classificada como de média densidade, com densidade a 12% de umidade igual a 0,65 g/cm<sup>3</sup> e saturada igual a 1,05 g/cm<sup>3</sup> (IBAMA, 2002). Apresenta secagem lenta ao ar, dificultada pela presença de óleos essenciais (IBAMA, 1997), com tendências de ocorrência de empenos e rachaduras (IPT, 2003).

A madeira de louro-vermelho é fácil de ser trabalhada, tanto com ferramentas manuais como com máquinas. Aceita bem pregos e parafusos. Não apresenta problemas de colagem. É fácil de serrar, aplainar, laminar, faquear, torneirar, colar, parafusar e pregar, com acabamento considerado bom. Segundo IPT (2003), a madeira é utilizada principalmente na construção civil, como em batentes, portas e janelas e estruturalmente como ripas e partes secundárias de estruturas, sendo utilizada também em móveis, tablados, molduras, laminados decorativos (IBAMA, 2002). Macedo et al. (2000) avaliou o uso de madeiras da Amazônia para a aplicação em madeira laminada colada e indicaram o louro vermelho, quarubarana e o angelim pedra como espécies com potencial para a fabricação de MLC. A Tabela 2 apresenta as propriedades mecânicas do louro vermelho.

Tabela 2. Propriedades mecânicas (IBAMA, 2002).

PROPRIEDADES MECÂNICAS						
Condição	Flexão Estática		Compressão		Dureza Janka	
	Módulo de Ruptura (kgf/cm <sup>2</sup> )	Módulo de Elasticidade (1.000kgf/cm <sup>2</sup> )	Paralelas às Fibras	Perpendicular às Fibras	Paralelas às Fibras (kgf)	Transversal às Fibras (kgf)
		Resistência à Ruptura (kgf/cm <sup>2</sup> )	Resistência no Limite Proporcional (kgf/cm <sup>2</sup> )			
Verde	620	89	309	47	311	326
Seca	794	109	509	49	342	343

PROPRIEDADES MECÂNICAS		
Condição	Tração	Cisalhamento
	Perpendicular às Fibras	Resistência à Ruptura(kgf/cm)
Resistência à Ruptura (kgf/cm <sup>2</sup> )		
Verde	35	69
Seca	30	75

## 4 - MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 MATERIAL LENHOSO

Oito pranchas de madeira de louro vermelho (*Sextonia rubra*) foram adquiridas no mercado madeireiro do Distrito Federal (DF) e mantidas no pátio da carpintaria do Laboratório de Produtos Florestais (LPF) do Serviço Florestal Brasileiro (SFB) até o momento do processamento (Figura 12). As pranchas foram medidas e aferido o teor de umidade por meio de um medidor de umidade elétrico. A Tabela 3 apresenta as dimensões das pranchas e o teor de umidade. As pranchas foram identificadas macroscopicamente por meio da comparação com o material depositado na Xiloteca (Index Xylarium FPBw) do LPF/SFB.

Tabela 3. Dimensões e teor de umidade das pranchas.

Prancha	Dimensões (mm)	Teor de umidade (%)
1	1900 x 150 x 60	16,0
2	3200 x 160 x 60	15,5
3	3900 x 160 x 60	14,0
4	4500 x 290 x 60	15,0
5	4700 x 210 x 60	17,5
6	5000 x 260 x 60	18,0
7	6000 x 150 x 60	17,0
8	6500 x 280 x 60	18,5



Figura 12. Pranchas de louro vermelho adquiridas no mercado madeireiro do DF.

Após a aferição do teor de umidade, as pranchas 1 a 4 foram serradas em forma de tábuas na dimensão média de 20 x 250 x 2100 mm (espessura x largura x comprimento), e secas ao ar na área de secagem natural do LPF, por um período de 60 dias, quando atingiram o teor de umidade médio de 12%. Essas tábuas foram separadas para a produção das lâminas de MLC. As demais foram destinadas a confecção dos corpos-de-prova de avaliação das propriedades mecânicas e juntas coladas. Para a produção das lâminas que irão compor as vigas de MLC, as pranchas 1 a 4 foram desdobradas em tábuas e serradas em lâminas de 20 x 50 x 2000 mm, totalizando 60 lâminas (Figura 13). Destas, oito foram descartadas por apresentarem rachaduras, ataque de insetos (brocas) e encurvamento, sendo utilizadas efetivamente um total de 52 lâminas (Figura 14). As peças foram mantidas em sala de climatização a  $65 \pm 1\%$  de umidade relativa e temperatura de  $20 \pm 3^\circ\text{C}$  até atingirem massa constante. Todas as lâminas foram medidas com paquímetro digital e suas massas aferidas por meio de uma balança digital com precisão de 0,5 gramas.

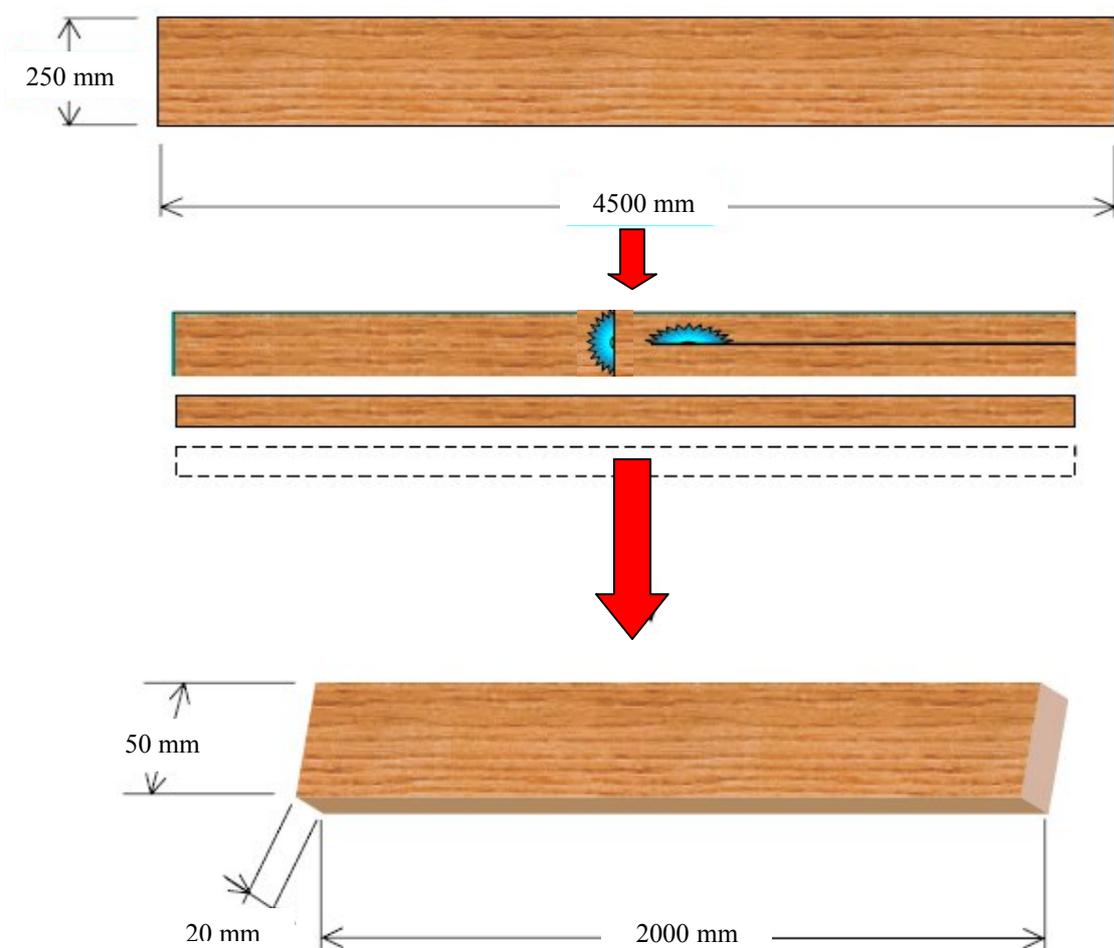


Figura 13. Esquema do corte das tábuas de madeira e dimensionamento das lâminas. (ZANGIÁCOMO, 2003, adaptado).



Figura 14. Lâminas de louro vermelho fabricadas para o uso em vigas de MLC.

## 4.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA SÓLIDA

O comportamento mecânico da madeira de louro vermelho foi determinado por meio de ensaios de cisalhamento paralelo às fibras ( $f_{v,0}$ ), tração normal às fibras ( $f_{t,90}$ ), e tração paralela às fibras ( $f_{t,0}$ ), conduzidos conforme a norma brasileira NBR 7190 (1997), e ensaio de flexão estática de acordo com a norma ASTM D143 (2002), sendo a força aplicada na face tangencial (FT) e na face radial (FR). A partir do ensaio de flexão estática foi obtido o módulo de elasticidade ( $E_M$ ), módulo de ruptura ( $f_M$ ), sendo estes corpos-de-prova utilizados posteriormente para aferição da densidade aparente (DA).

## 4.3 RESISTÊNCIA DA JUNTA COLADA

A Norma Brasileira NBR 7190 (1997), indica que para a caracterização da madeira para a produção de madeira laminada colada devem ser realizados três ensaios específicos: cisalhamento na lâmina de cola ( $f_{gv,0}$ ), tração normal à lamina de cola ( $f_{gt,90}$ ) e resistência de emendas dentadas e/ou biseladas em tração paralela às fibras ( $f_{gt,0}$ ), conforme a Figura 15. Nesse sentido, a caracterização da madeira de louro vermelho foi realizada conforme indicado no Anexo B da citada norma. A relação entre altura e extensão do bisel utilizado nos ensaios de  $f_{gt,0}$  foi igual a 1:10 (Figura 16).

Para a confecção dos corpos-de-prova (CP) colados de cisalhamento na linha de cola e tração normal à lamina de cola, foram utilizadas 12 peças de madeira na dimensão de 30 x 60 x 1000 mm (espessura x largura x comprimento), coladas em pares. Os CP de emendas biseladas à tração paralela às fibras foram confeccionados a partir de 48 peças de madeira nas dimensões de 20 x 50 x 450 mm (espessura x largura x comprimento). Os CP ficaram em sala de climatização a  $65 \pm 1\%$  de umidade relativa e temperatura de  $20 \pm 3^\circ\text{C}$  até atingirem massa constante.

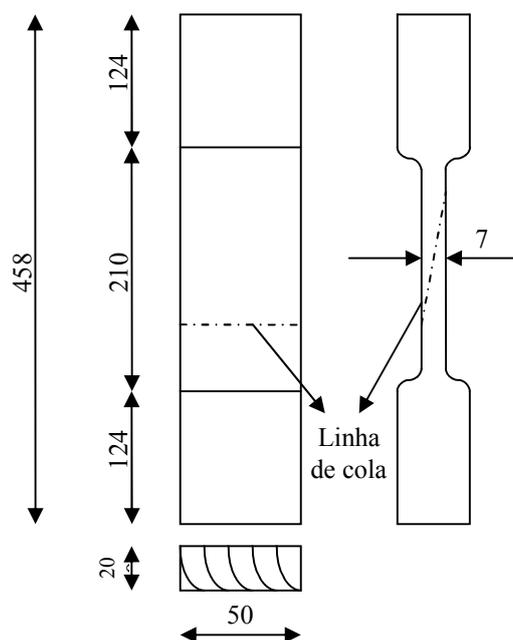


Figura 15. Dimensões (mm) do CP para ensaio de resistência de emendas biseladas à tração paralela às fibras.

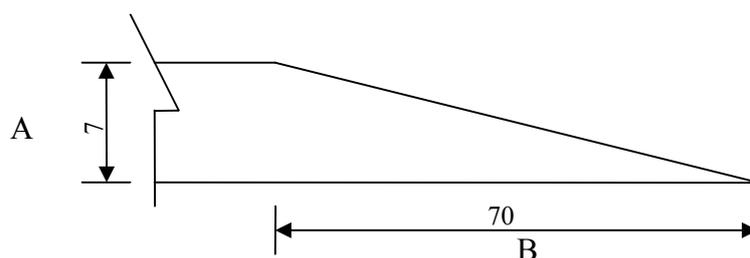


Figura 16. Detalhes da emenda biselada utilizada com relação 1:10, em mm.  
Onde A = altura e B = extensão do bisel.

Com o intuito de estudar o efeito da gramatura do adesivo sobre a qualidade das juntas coladas, foram avaliadas três gramaturas do adesivo resorcinol-formaldeído Cascophen RS

215, da empresa Alba Química, na ordem de 200, 300 e 400 g/m<sup>2</sup>, utilizando-se 12 corpos-de-prova por tratamento. O adesivo foi preparado conforme a indicação do fabricante, com cinco partes de resina para uma parte de catalizador (pó endurecedor). Os resultados foram analisados por meio de uma análise de variância (ANOVA) seguida pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. A melhor gramatura observada foi utilizada na produção das vigas de madeira laminada colada.

Os ensaios foram realizados em Máquina Universal de Ensaio do Laboratório de Ensaio Mecânicos de Madeira e Derivados (LEMMAD) do Departamento de Ciências Florestais da ESALQ/USP. A velocidade de carregamento para o ensaio de cisalhamento e tração normal foi de 2,5 MPa/min e para o ensaio de resistência de emendas biseladas à tração paralela às fibras foi de 10 MPa/min. Os CP foram pesados antes e após os ensaios, sendo colocados posteriormente em estufa à 103 ±3°C e pesados a cada 8 horas até que ocorresse uma variação de massa inferior a 0,5% da medida anterior, sendo então considerado com a massa seca a 0% de umidade definido o teor de umidade da amostra. De acordo com a norma NBR 7190 (1997), os CP com teor de umidade diferente de 12%, tiveram os seus valores de resistências e rigidez corrigidos para o teor de umidade padrão de 12 %.

A Norma NBR 7190 (1997) admite que as resistências das madeiras tenham distribuições normais de probabilidade e que seus valores característicos correspondam ao quantil de 5% das respectivas distribuições. Dessa forma, os resultados para cada ensaio foram colocados em ordem crescente e encontrado o valor característico ( $f_{wk}$ ) para cada ensaio e respectivas gramaturas.

A eficiência do adesivo para cada gramatura estudada foi avaliada como sendo a relação entre a resistência média obtida no ensaio da junta colada pela resistência média da propriedade obtida no ensaio com madeira maciça, conforme o item 4.1, obedecendo à norma NBR 7190 (1997), onde se exige uma eficiência mínima de 90% do adesivo comparada com a resistência obtida com a madeira maciça.

Após o ensaio de cisalhamento na lâmina de cola, avaliou-se o percentual de falha na madeira das partes pertencentes a cada corpo-de-prova, utilizando uma lâmina transparente, previamente quadriculada, e com dimensão de 50 x 50 mm. O quadriculado da lâmina dividiu o plano cisalhado em 100 partes, de modo que cada quadrícula

representava 1% da área analisada. Foi considerado como falha na madeira a fratura profunda, com o arrancamento de partes de madeira, mas também a falha rasa, desde que com presença visível de fibras de madeira na superfície da ruptura.

#### **4.4 AVALIAÇÃO NÃO DESTRUTIVA**

As laminas foram classificadas por meio de três métodos não-destrutivos: método estático conforme indicado pela norma ASTM D 4761 (2002), método de ondas de tensão e por vibração transversal. O método estático foi utilizado como padrão por se aproximar dos métodos estáticos laboratoriais.

A norma ASTM D 4761 (2002) é indicada para a classificação de peças de madeira, com métodos mais flexíveis do que os adotados pela norma ASTM D 198 (1997), podendo ser adotados em campo, e utilizada como forma de controle de qualidade do material. Dessa forma, o módulo de elasticidade é calculado a partir da flecha medida no sentido de menor inércia da peça (flatwise) com carregamento central e relação vão/altura aproximadamente igual a 100 (Figura 17). Para a classificação das peças, foram utilizados dois apoios de madeira maciça e um vão de 1900 mm. Um relógio comparador da marca MARH modelo MILLILAST 1082 com precisão de 0,01 mm foi utilizado, posicionado na porção central da peças. Após o posicionamento das peças, um pré-carregamento foi realizado com peso de ferro maciço de massa igual a 14 N, para acomodar a peça. Em seguida, foi aplicado um carregamento com um peso calibrado de 50 N, induzindo uma flecha na amostra, e a partir da Equação 12, obtido o módulo de elasticidade estático.



Figura 17. Esquema do ensaio de flexão estática segundo a norma ASTM D 4761 (2002).

$$E_s = \frac{P_{ndt} L^3}{48\delta I} \quad (\text{Eq. 12})$$

Onde:

$E_s$  = módulo de elasticidade estático,  $N/mm^2$ ;

$I$  = momento de inércia,  $mm^4$ ;

$L$  = vão livre,  $mm$ ;

$P_{ndt}$  = carga aplicada,  $N$ ;

$\delta$  = flecha,  $mm$ ;

Para o ensaio por ondas de tensão, foi utilizado o equipamento *stress wave timer* 239A da marca Metriguard. O aparelho mede o tempo de passagem ( $t$ ) de uma onda entre a fonte geradora e a receptora, percorrida por uma distância ( $L$ ) conhecida, permitindo o cálculo da velocidade de propagação da onda ( $v$ ). Nesse ensaio, a distância ( $d$ ) entre os sensores foi de 1900 mm. As lâminas de madeira maciça foram pesadas e medidas as suas dimensões, obtendo-se a densidade aparente do material. Assim, de posse do tempo de propagação de onda de tensão, da densidade aparente do material e da distância percorrida pela onda, o módulo de elasticidade dinâmico ( $E_{dsw}$ ) foi calculado com base nas Equações 13 e 14. A Figura 18 ilustra o esquema do ensaio realizado.

$$v = \frac{d}{t \cdot 10^{-6}} \quad (\text{Eq. 13})$$

$$E_{dsw} = \frac{v^2 \cdot \rho}{g} \cdot 10^{-5} \quad (\text{Eq. 14})$$

Onde:

$E_{dsw}$  = módulo de elasticidade dinâmico,  $N/mm^2$ ;

$v$  = velocidade de propagação da onda,  $m/s$ ;

$\rho$  = densidade aparente,  $kg/m^3$

$g$  = aceleração da gravidade,  $980,4 \text{ cm/s}^2$ ;

$d$  = distância entre os sensores,  $m$

$t$  = tempo de propagação da onda,  $\mu s$ .



Figura 18. Esquema do ensaio de ondas de tensão, com o uso do equipamento *stress wave timer*.

Para o ensaio de vibração transversal foi utilizado o equipamento *Transverse Vibration E-Computer* modelo E 340 da marca Metriguard. O sistema é composto por dois tripés metálicos, uma unidade de interface, uma célula de carga, uma unidade de controle manual e cabos, sendo o sistema controlado por meio de um *software*. A unidade de interface recebe os sinais provenientes da célula de carga localizada sobre um dos tripés e o transmite para o computador, onde o *software* calcula e transmite os dados obtidos, como o módulo de elasticidade, a densidade aparente, a frequência de vibração e a massa da amostra (METRIGUARD, 2007). Antes do início dos trabalhos de classificação o equipamento foi calibrado utilizando-se para isso uma barra de alumínio com módulo de elasticidade já conhecido. Neste ensaio, as lâminas de madeira maciça foram apoiadas sobre os tripés, com vão ( $L$ ) de 1900 mm, e a vibração induzida por um impacto manual não quantificado no meio do vão. Com o sistema em excitação, a frequência de vibração, a massa e o módulo de elasticidade dinâmico ( $E_{dvt}$ ) das amostras foram obtidos diretamente por meio do software. O  $E_{dvt}$  obtido via software foi validado por meio da Equação 15. A Figura 19 ilustra o esquema do ensaio realizado.

$$E_{dvt} = \frac{fr^2 \cdot W \cdot L^3}{2,46 \cdot I \cdot g} \quad (\text{Eq. 15})$$

Onde:

$E_{dvt}$  = módulo de elasticidade dinâmico por vibração transversal, N/mm<sup>2</sup>;

$fr$  = frequência de vibração, Hz;

$g$  = aceleração da gravidade (9,8 m/s<sup>2</sup>);

$I$  = momento de inércia, cm<sup>4</sup>;

$L$  = vão livre, m

$g$  = aceleração da gravidade, 980,4 cm/s<sup>2</sup>;

$W$  = massa da lâmina, g.



Figura 19. Esquema do ensaio de vibração transversal com o uso do equipamento *Transverse Vibration E-Computer* modelo E 340. Acima posicionamento da amostra e detalhe da célula de carga. Abaixo, indução da vibração na amostra e análise dos dados.

Os dados obtidos pelos métodos não destrutivos foram avaliados por meio de análise estatística descritiva e por análises de regressão linear a fim de se avaliar as relações existentes entre  $E_s$ ,  $E_{dsw}$  e  $E_{dvt}$ . O método que obteve o melhor resultado foi utilizado na montagem das vigas de MLC. Com as vigas prontas, o método de vibração transversal foi aplicado em cada viga, com as peças disposta no sentido de menor inércia.

#### 4.5 - MONTAGEM DAS VIGAS DE MLC

Para cada uma das vigas de MLC produzidas, foram utilizadas cinco lâminas de louro vermelho com suas interfaces coladas com o adesivo resorcinol-formaldeído Cascophen RS 215 na melhor gramatura atingida conforme item 4.3, sendo aplainadas após a colagem, tendo as vigas uma dimensão média de 100 mm de altura por 40 mm de largura e 1900 mm de comprimento (Figura 20). A viga número 1 foi composta pelas cinco lâminas de maior  $E_M$ , a número 2 com as próximas cinco lâminas de maior  $E_M$  e assim até a viga 10 onde foram utilizadas as cinco lâminas de menor  $E_M$  dentro das lâminas classificadas de acordo com o melhor método de classificação não destrutivo conforme item 4.4.

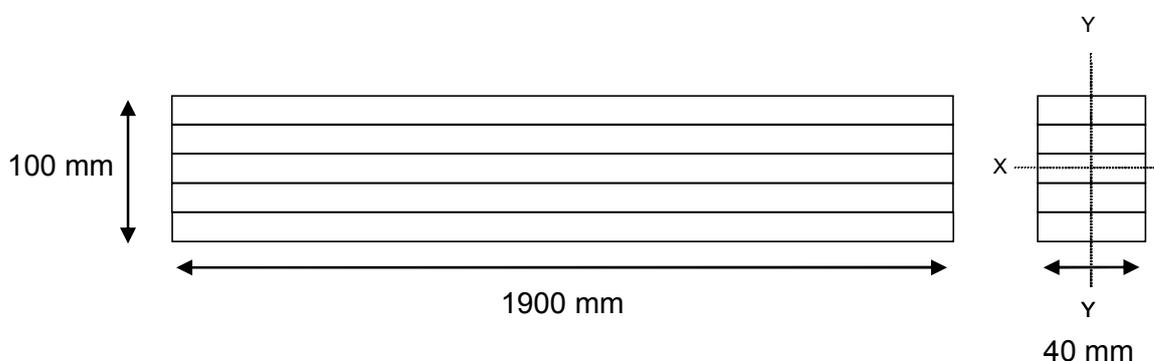


Figura 20. Dimensão média das vigas de MLC produzidas.

O adesivo foi aplicado diretamente na lâmina de madeira em linha simples, sendo a gramatura controlada pelo incremento de massa total do conjunto madeira/adesivo, realizado a partir de uma balança digital com precisão de 0,01g. Posteriormente, com o auxílio um rolo de espuma, o adesivo foi distribuído em toda a área da lâmina de madeira. A Figura 21 ilustra o esquema de aplicação do adesivo.



Figura 21. Aplicação do adesivo resorcinol formadeído nas lâminas.

O sistema de prensagem foi desenvolvido na área de Engenharia da Madeira do LPF/SFB. Para a consolidação das vigas, a prensagem das peças foi realizada por meio de um sistema hidráulico composto de um pistão hidráulico cilíndrico de área igual a  $7150 \text{ mm}^2$ , o qual aplicava força na célula de carga de capacidade de 20 toneladas, e essa distribuída na viga “I” de aço. A aferição do carregamento foi realizada por meio de um controlador digital ligado à célula de carga. A pressão efetiva aplicada foi de  $1,0 \text{ N/mm}^2$ , constante por um período de 20 horas. Esse sistema admitiu a consolidação de duas vigas por vez. A Figura 22 ilustra o sistema de prensagem.

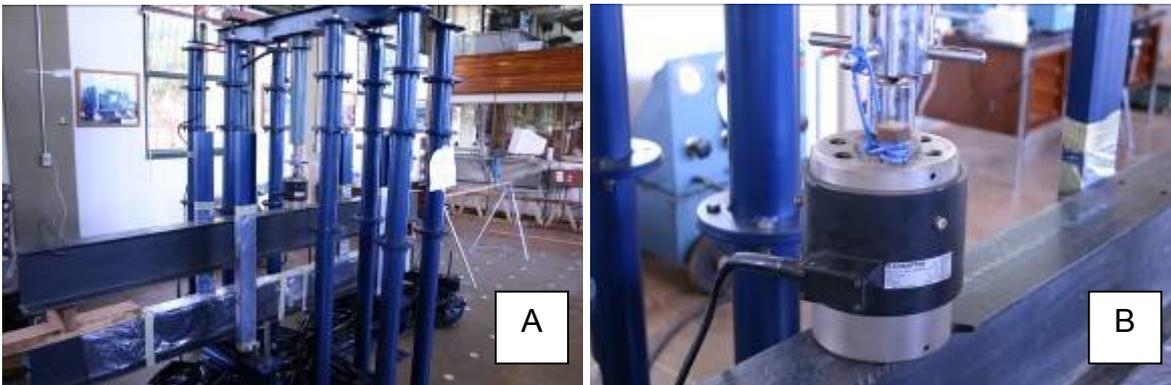


Figura 22. Sistema de prensagem desenvolvido. (A) Vista geral do sistema. (B) Detalhes da célula de carga.

Quatro barras laterais foram utilizadas para garantir o posicionamento correto da viga “I”, bem como apoiar lateralmente as vigas de MLC, e entre as vigas dois separadores foram utilizados para evitar que as peças aderissem lateralmente. As vigas foram posicionadas no sistema de prensa cuidadosamente, de forma a garantir que a transferência da pressão

ocorresse por igual em ambas as vigas. A Figura 23 ilustra o posicionamento das peças e a aplicação de carga no sistema.



Figura 23. Posicionamento da viga, da célula de carga e aplicação de carga via sistema hidráulico.

## 4.6 - MODELO TEÓRICO E EXPERIMENTAL

### 4.6.1 – Avaliação teórica

O modelo teórico proposto tem como princípio a avaliação da rigidez à flexão ( $EI$ ) da viga (Equação 16) conforme proposto por Dansoh (2004). As demais propriedades foram estimadas a partir de sua determinação. Os cálculos da flecha teórica ( $\delta_{teo}$ ) foram realizados conforme o indicado pela norma ASTM D 198 (1997) (Equação 18). Foram calculados o módulo de ruptura ( $f_M$ ) e o momento fletor teórico a partir das Equações 19 e 20.

$$(EI)_x = \sum E_i \cdot (I_i + A_i \cdot d_i^2) \quad (\text{Eq. 16})$$

$$E_{Mteo} = \frac{(EI)_x}{I_{xx}} \quad (\text{Eq. 17})$$

$$\delta_{teo} = \frac{PLa^2}{48(EI)_x} \quad (\text{Eq. 18})$$

$$f_{Mteo} = \frac{M \cdot E_{ML}}{(EI)_x} \cdot y \quad (\text{Eq. 19})$$

$$M_{teo} = \frac{f_{t,0} \cdot (EI)_x}{E_{ML} \cdot y} \quad (\text{Eq. 20})$$

Onde:

$a$  = distância entre os aplicadores de carga, mm;

$A_i$  = seção transversal da lâmina na posição  $i$ , mm<sup>2</sup>;

$d_i$  = distância do centróide da lâmina na posição  $i$  até a linha neutra, mm;

$E_{Mteo}$  = módulo de elasticidade teórico, N/mm<sup>2</sup>;

$E_{ML}$  = módulo de elasticidade da lâmina tracionada da viga  $i$ , N/mm<sup>2</sup>

$EI_x$  = rigidez de flexão no eixo  $x$ , N\*mm<sup>2</sup>.

$E_i$  = módulo de elasticidade da lâmina na posição  $i$ , N/mm<sup>2</sup>;

$f_{Mteo}$  = módulo de ruptura teórico, N/mm<sup>2</sup>;

$f_{t,0}$  = tração paralela às fibras, N/mm<sup>2</sup>;

$h$  = altura da viga, mm;

$I_i$  = momento de inércia da lâmina na posição  $i$ , mm<sup>4</sup>;

$L$  = distância entre os apoios da viga (vão), mm;

$M_{teo}$  = momento fletor teórico, N\*mm;

$P$  = carga aplica, N;

$y$  = distância da linha neutra à borda mais solicitada, mm;

$\delta_{est}$  = flecha estimada, mm.

#### 4.6.2 – Avaliação experimental

Os ensaios de flexão estática em quatro pontos foram realizados conforme a norma ASTM D 198 (1997) em uma máquina universal de ensaios INSTRON no LPF/SFB, com velocidade de carregamento de 6 mm/min e momento fletor ocorrendo em torno do eixo X-X. O vão livre ( $L$ ) utilizado foi de 1800 mm com a distância entre os aplicadores de carga igual a 600 mm. Um relógio comparador da marca MARH modelo MILLILAST 1082 com precisão de 0,01 mm posicionado na porção central da peça foi empregado para a aferição direta da flecha. Uma barra suporte posicionada lateralmente foi utilizada servindo de apoio ao relógio comparador, posicionada paralelamente à linha neutra da viga.

Esse esquema estático foi utilizado em dois momentos. No primeiro, foi aplicada uma força de 2000 N, com a barra suporte fixada na linha dos apoios, com o relógio comparador medindo a flecha no vão total da peça. A Figura 24 ilustra o esquema estático utilizado. Para esse esquema, admitiu-se uma relação  $E_M/G$  igual a 16, conforme indicado por USDA (1999), sendo o utilizado o  $E_M$  teórico da viga, obtido por meio da Equação 17. A Equação 21 foi utilizada para o cálculo do módulo de elasticidade compondo-se o módulo de elasticidade transversal ( $E_G$ ).

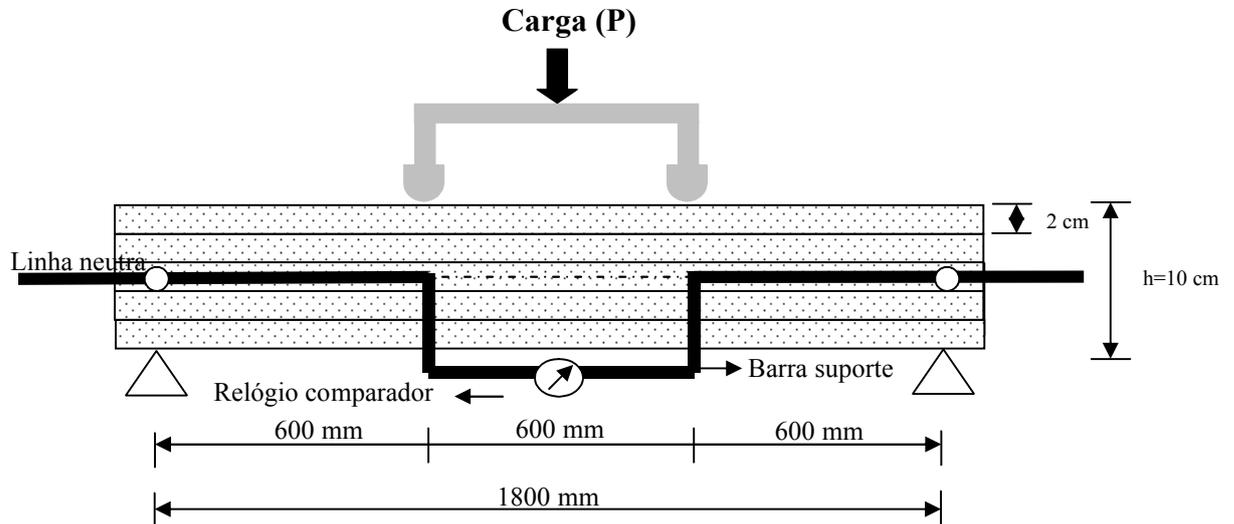


Figura 24. Esquema estático utilizado no ensaio de flexão estática de quatro pontos medindo a flecha no vão total da viga.

$$E_G = \frac{PL^3}{4,7bh^3\delta \cdot \left(1 - \frac{PL}{5bhG\delta}\right)} \quad (\text{Eq. 21})$$

Onde:

$b$  = largura da viga, mm;

$E_G$  = módulo de elasticidade da viga, N/mm<sup>2</sup>;

$f_M$  = módulo de ruptura, N/mm<sup>2</sup>;

$G$  = módulo de elasticidade transversal, assumido como 16:1 de  $E_M$ , N/mm<sup>2</sup>;

$h$  = altura da viga, mm;

$L$  = distância entre os apoios da viga (vão), mm;

$P_{rup}$  = carga de ruptura, N;

$\delta$  = flecha atuante, mm.

Passados quinze dias após o primeiro ensaio, as vigas foram ensaiadas com o mesmo esquema estático, porém com a barra suporte posicionada na linha dos aplicadores de carga, com o relógio comparador medindo a flecha em flexão pura, sem efeito do cisalhamento transversal (Figura 25). Nesse ensaio, foi utilizada a flecha obtida com a

aplicação de força de 4000 N, sendo o relógio comparador retirado após esse valor de carregamento, e as vigas levadas à ruptura. Com isso, foram calculados o  $E_{Mexp}$ ,  $f_{Mexp}$  e o momento fletor ( $M_{exp}$ ), conforme as Equações 22 a 24.

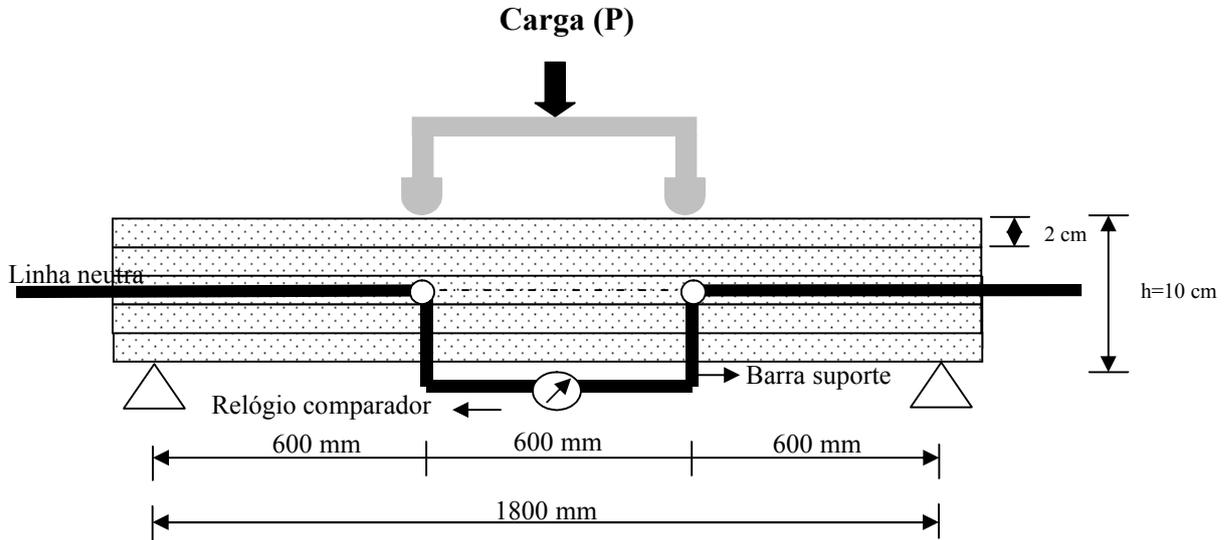


Figura 25. Esquema estático utilizado no ensaio de flexão estática de quatro pontos, com medição da flecha em flexão pura.

$$E_{Mexp} = \frac{4000La^2}{4bh^3\delta} \quad (\text{Eq. 22})$$

$$f_{Mexp} = \frac{P_{rup}L}{bh^2} \quad (\text{Eq. 23})$$

$$M_{exp} = \frac{P_{rup}L}{6} \quad (\text{Eq. 24})$$

Onde:

$a$  = distância entre os aplicadores de carga, mm;

$b$  = largura da viga, mm;

$E_{Mexp}$  = módulo de elasticidade experimental da viga, N/mm<sup>2</sup>;

$f_{Mexp}$  = módulo de ruptura experimental, N/mm<sup>2</sup>;

$h$  = altura da viga, mm;

$L$  = distância entre os apoios da viga (vão), mm;

$M_{exp}$  = momento fletor experimental, N\*mm;

$P_{rup}$  = carga de ruptura, N;  
 $\delta_{exp}$  = flecha experimental, mm.

Após os ensaios, de cada viga foi retirado um CP de 100 mm de comprimento e colocadas em estufa a  $103 \pm 2^\circ\text{C}$ , a fim de averiguar o teor de umidade das vigas (Figura 26).

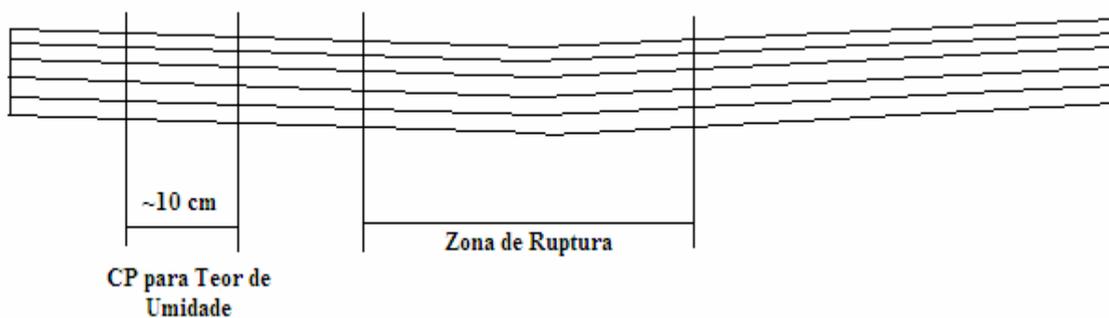


Figura 26. Localização do CP retirado das vigas para aferição do teor de umidade.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. PROPRIEDADES DE RESISTÊNCIA E RIGIDEZ DA MADEIRA DE LOURO VERMELHO

A média, o desvio padrão e o coeficiente de variação para densidade aparente (DA) e para as propriedades mecânicas estão presentes nas Tabelas 4 e 5, e os valores característicos na Tabela 6. A análise de *outlier* (Figuras 43 a 45, Apêndice A) indicou a ocorrência de um valor discrepante para  $f_{v,0}$  e dois em  $f_{t,90}$ , sendo estes retirados das análises posteriores. Todos os valores foram corrigidos para o teor de umidade de 12%, conforme as Equações 13 e 14.

Tabela 4. Valores médios da densidade aparente e das propriedades de resistência da madeira de louro vermelho.

	Densidade			
	aparente (g/cm <sup>3</sup> )	$f_{v,0}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_{t,90}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_{t,0}$ (N/mm <sup>2</sup> )
Média	0,76	7,6	3,9	73,2
Desvio Padrão	0,04	1,0	0,9	26,2
CV (%)	4,72	12,6	22,1	35,8

Onde:  $f_{v,0}$  = cisalhamento paralelo às fibras;  $f_{t,90}$  = tração normal às fibras;  $f_{t,0}$  = tração paralela às fibras.  
CV = coeficiente de variação

Tabela 5. Valores médios de módulo de elasticidade ( $E_M$ ) e módulo de ruptura ( $f_M$ ) à flexão estática da madeira de louro vermelho.

	Flexão Estática	
	$E_M$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_M$ (N/mm <sup>2</sup> )
Força aplicada na face tangencial	11343,8 a	84,5 a
Força aplicada na face radial	11221,5 a	85,0 a
Média	11282,6	84,7
Desvio padrão	1969,4	16,5
CV (%)	17,6	19,9

Onde:  $E_M$  = módulo de elasticidade;  $f_M$  = módulo de ruptura; Médias seguidas pela mesma letra não apresentam diferenças significativas pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade.

Tabela 6. Valores característicos de resistência (N/mm<sup>2</sup>) das propriedades avaliadas da madeira de louro vermelho.

$f_{v0,k}$	$f_{t90,k}$	$f_{t0,k}$
6,6	2,8	51,2

O valor médio da densidade aparente encontrado ( $0,76 \text{ g/cm}^3$ ) é concordante ao apresentado por IPT (2003), o qual apresenta valor igual  $0,77 \text{ g/cm}^3$  para a madeira de louro vermelho. O resultado encontrado é superior a  $0,65 \text{ g/cm}^3$  conforme indicado por IBAMA (2002) para essa espécie. Comparando o valor obtido com espécies de sinonímia botânica ao louro vermelho, como do gênero *Nectandra*, o resultado obtido é próximo ao apresentado para a espécie de louro canela (*Nectandra spp.*) com valor igual a  $0,70 \text{ g/cm}^3$  e superior ao louro pichrim (*Nectandra cuspidata*) com DA igual a  $0,46 \text{ g/cm}^3$  (IBAMA, 2002).

Com relação às propriedades de resistência observou-se um alto coeficiente de variação para os resultados de tração normal às fibras e para tração paralela às fibras, sendo superior ao indicado pela norma NBR 7190 (1997), como 18% para resistência de esforços normais e de 28% para esforços tangenciais. Para esses ensaios foram observadas que em alguns corpos-de-prova as rupturas ocorreram em regiões acima do local de tensão de tração, ocasionando rupturas precoces, subestimando os resultados. De acordo com Kollmann e Côté Jr (1968), este fato pode ser explicado devido às altas tensões nas extremidades do corpo-de-prova, sendo estes influenciados por ações de compressão e cisalhamento, onde em alguns casos são maiores do que as ocorridas na porção de tensão de pura tração do corpo-de-prova.

Outro fator que chama a atenção é a possibilidade de uso de CP retirados da porção de lenho juvenil de baixa resistência mecânica. IBAMA (1989) indica que para o louro vermelho não é possível identificar a olho nu a ocorrência de anéis de crescimento, nem a diferenciação entre cerne e alburno. Nesse sentido, Bendtsen e Senft (1986); Pearson (1988); Evans II et al., (2000) e Kretschmann (2008) reportam que o módulo de elasticidade, a resistência à compressão paralela e normal, a flexão estática e a tração paralela e perpendicular às fibras são seriamente afetadas pela presença de madeira juvenil.

Comparando os resultados obtidos com IBAMA (2002) onde o valor de  $E_M$  e  $f_M$  iguais a  $10900 \text{ N/mm}^2$  e  $79,4 \text{ N/mm}^2$  respectivamente, e cisalhamento paralelo às fibras e tração normal às fibras iguais a  $7,5 \text{ N/mm}^2$  e  $3,0 \text{ N/mm}^2$ , observou-se que os valores obtidos no presente estudo são próximos aos indicados na literatura.

Por meio das Tabelas 14 e 15 (Apêndice A) observa-se que não houve diferença significativa do  $E_M$  e  $f_M$  da madeira de louro vermelho quando as forças foram aplicadas na face tangencial e na face radial do corpo-de-prova no ensaio de flexão estática. Dessa forma, os valores das duas faces foram utilizados em conjunto para representar o valor médio para cada propriedade.

Observou-se uma relação linear entre a densidade aparente (DA) e  $f_M$  e  $E_M$ . Os coeficientes de determinação obtido para as relações DA x  $E_M$  e DA x  $f_M$  foram significativos ( $R^2=0,4983$  e  $R^2 = 0,5296$ , respectivamente), sendo as análises de regressão significativas ao nível de 5% de probabilidade (Tabelas 16 e 17, Apêndice A). A Figura 27 ilustra essas relações. As Equações 25 e 26 representam os modelos obtido pela análise de regressão.

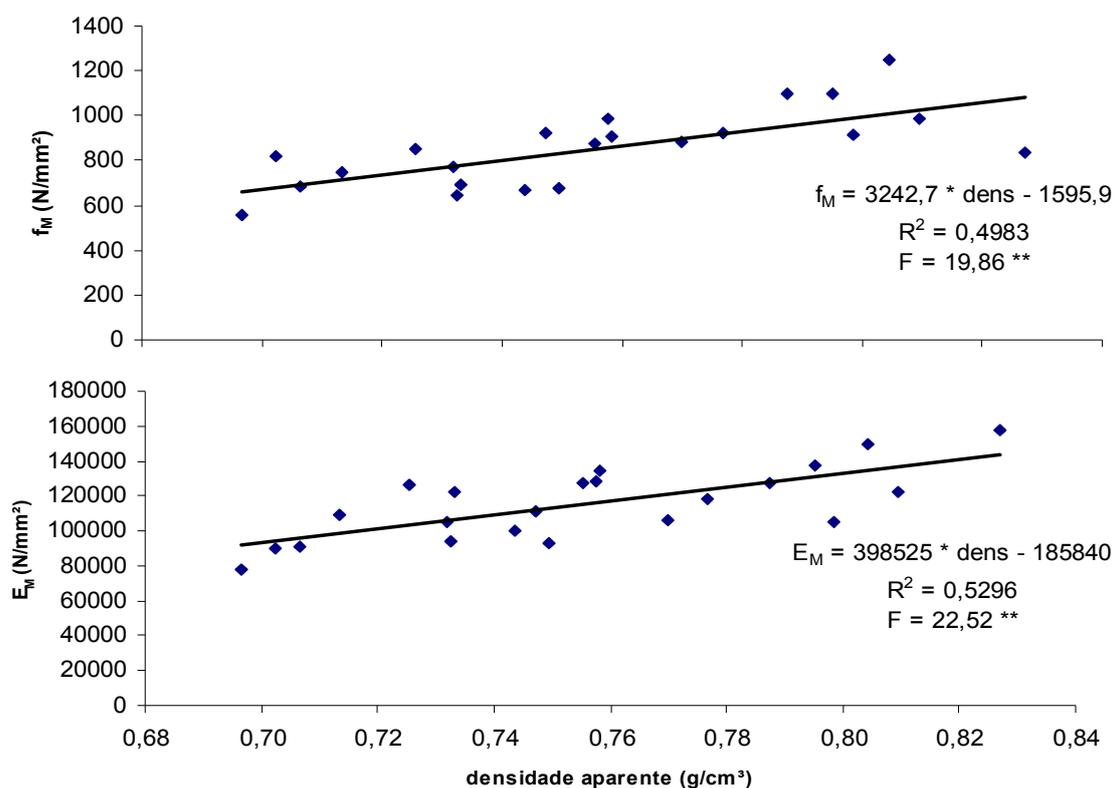


Figura 27. Análise de regressão entre  $f_M$  x DA e  $E_M$  x DA para os ensaios mecânicos realizados em madeira maciça de louro vermelho.

Onde: \*\* Significativa ao nível de 5% de probabilidade.

$$E_M = 398525 * DA - 185840 \quad (\text{Eq. 25})$$

$$f_M = 3242,7 * DA - 1595,9 \quad (\text{Eq. 26})$$

Onde:

$DA$  = densidade aparente,  $g/cm^3$

$E_M$  = módulo de elasticidade,  $N/mm^2$

$f_M$  = módulo de ruptura,  $N/mm^2$ ;

Embora o valor do coeficiente de determinação encontrado seja baixo, as relações entre as propriedades avaliadas seguem a tendência observada na literatura. Melo e Siqueira (1992) correlacionaram as propriedades físicas e mecânicas de madeiras da Amazônia, e obtiveram um valor de  $R^2$  para a relação densidade úmida e  $f_M$  igual a 0,56. Rocco Larh e Dias (2004) correlacionaram a densidade aparente à 12% de umidade de quarenta espécies de madeiras tropicais com suas propriedades físicas e mecânicas e observaram um de  $R^2$  igual a 0,75. Ressalta-se que esses autores estudaram um grupo de espécies, diferentemente do observado para análise individual por espécie. Melo (1991) em seu estudo com nove espécies da Amazônia, observou que analisando as propriedades mecânicas de forma grupal para todas as espécies proporciona uma melhor correlação do que a análise individual. Dessa forma, é possível estimar os valores de  $E_M$  e  $f_M$  para as lâminas que compõem as vigas de MLC de louro vermelho por meio da sua densidade básica.

## 5.2. AVALIAÇÃO DAS JUNTAS COLADAS

A Figura 31 apresenta os resultados médios das propriedades avaliadas e o efeito da gramatura sob a resistência das juntas coladas. Pela análise de *outliers* foi observada a presença de um valor discrepante, sendo este excluído das análises posteriores (Figuras 43 a 45, Apêndice A). Os resultados das análises estatísticas descritivas dos ensaios de avaliação das juntas coladas estão presentes nas Tabelas 18 a 20 (Apêndice A). A análise de variância (Tabela 21, Apêndice A) indicou diferença significativa entre as gramaturas avaliadas em cada ensaio de adesão, e pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade (Tabela 22, Apêndice A). As análises de regressão entre as propriedades estão presentes nas Tabelas 23 a 25 (Apêndice A).

A partir da Figura 28, observa-se que o modelo que melhor representou o comportamento dos dados foi o quadrático. Embora os valores dos coeficientes de determinação obtidos sejam baixos, os mesmos são significativos ao nível de 5% de probabilidade. Santos (2008b) avaliando o efeito da gramatura de 200, 300 e 400 g/m<sup>2</sup> do adesivo resorcinol-formaldeído sob a qualidade da adesão para as madeiras de Seru (*Allantoma lineata*) e Marupá (*Simarouba amara*), observou que a resistência ao cisalhamento na lâmina de cola apresentou o mesmo efeito quadrático, sendo o mesmo observado por Petruski e Della Lucia (1998), para o mesmo ensaio com a madeira de *Eucalyptus grandis*.

As gramaturas 300 e 400 g/m<sup>2</sup> foram estatisticamente iguais para todos os ensaios, sendo a de 400 g/m<sup>2</sup> inferior às demais apenas no ensaio de tração normal à lâmina de cola. A gramatura 200 g/m<sup>2</sup> apresentou diferença significativa às demais, sendo igual somente no ensaio de tração normal à lâmina de cola. Um valor ótimo de gramatura deverá estar presente entre as gramaturas 300 e 400 g/m<sup>2</sup>, sendo indicado que, de modo geral, o aumento da gramatura aumenta a resistência da junta colada.

A gramatura 200 g/m<sup>2</sup> apresentou os maiores desvios padrões, exceto para resistência de emendas biseladas em tração paralela às fibras, fato esse que pode ser explicado pela insuficiência de adesivo na madeira, formando linhas de cola pouco espessas ou famintas, ocasionando juntas coladas de baixa qualidade, em função da quantidade de adesivo formulado para essa gramatura. Shields (1988) afirma que a espessura da lâmina de cola influencia diretamente na qualidade da junta colada, sendo uma faixa de 0,06 a 0,12 mm como ideal para adesões de qualidade, e que valores abaixo de 0,03 mm a resistência é drasticamente reduzida. River (1994) avalia que se o adesivo apresenta má formulação, má aplicação, baixa penetração ou processo de cura indevido, a sua resistência deverá ser inferior ao apresentado pela madeira. Para a gramatura 400 g/m<sup>2</sup> foi observada que uma maior quantidade de adesivo para a junta colada ocasionou, em alguns casos, a dispersão do adesivo no momento de prensagem, sendo notado um desperdício do adesivo, entretanto, não sendo observada queda na resistência da junta colada para esta gramatura.

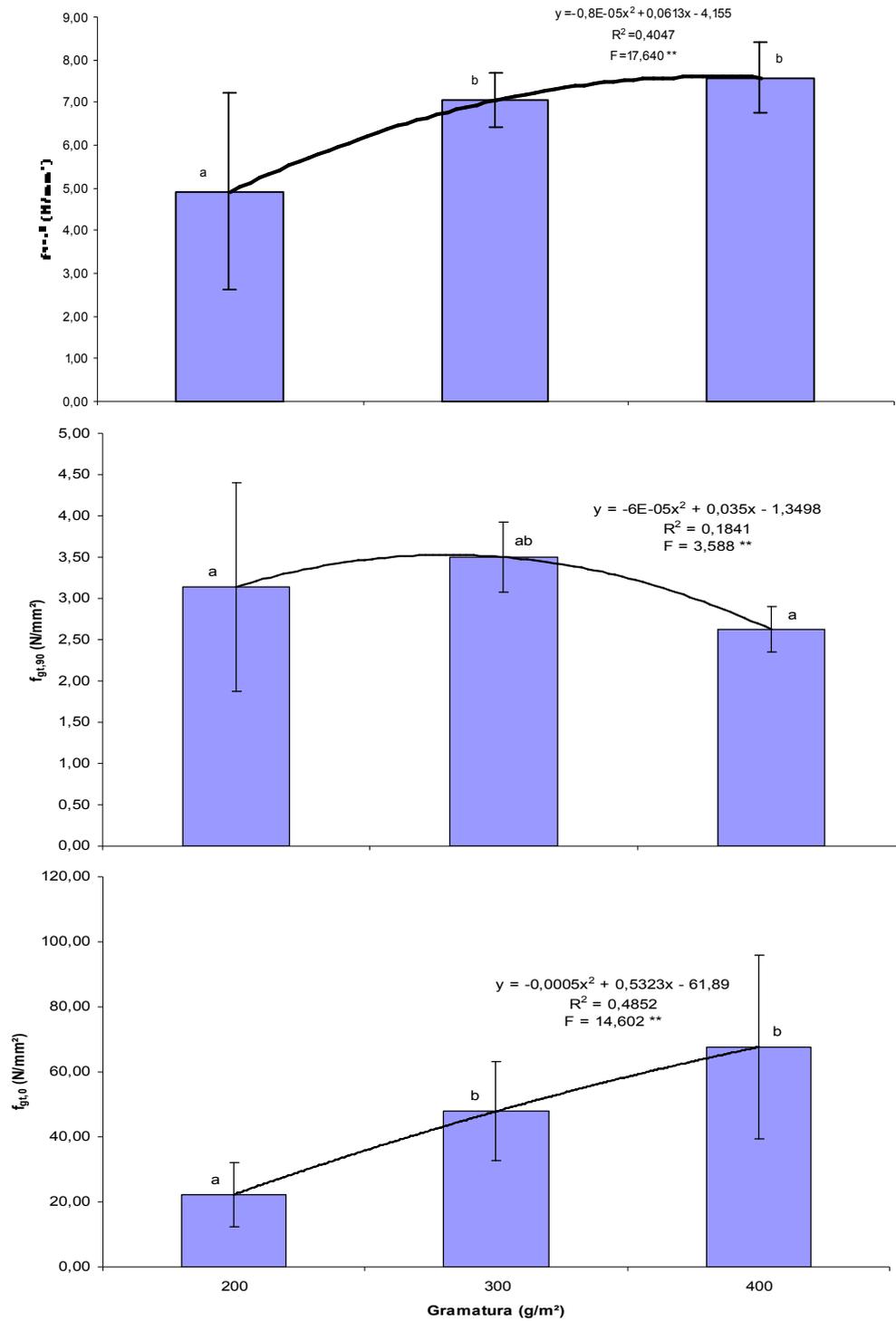


Figura 28. Valores médios e desvios padrão de cisalhamento na lâmina de cola, tração normal à lamina de cola e resistência de emendas biseladas em tração paralela às fibras. (Colunas seguidas pela mesma letra não apresentam diferenças significativas pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade).

O percentual de falha na madeira de louro vermelho está ilustrado na Figura 29. O percentual de falha na madeira para a gramatura de 200 g/m<sup>2</sup> ficou abaixo de 50%, indicando uma baixa adesão para esta gramatura. Para a gramatura de 300 e 400 g/m<sup>2</sup> (79% e 86%) o resultado encontrado foi satisfatório, conforme o citado pela literatura para madeiras de média densidade. Zangiácomo (2003) estudando quatro espécies da Amazônia para uso alternativo em MLC, observou que a madeira de cedrinho (*Erisma* sp) foi a que apresentou maior potencial dentre as avaliadas, em virtude da qualidade da adesão apresentada para o adesivo resorcinol formaldeído, com valores de falha na madeira para o ensaio de cisalhamento na linha de cola superiores a 95%. Para a madeira de *Eucalyptus* sp Plaster et al. (2008), observaram um percentual de falha na ordem de 74%, e Lobão e Gomes (2006) um valor de 84,0% para a mesma madeira.

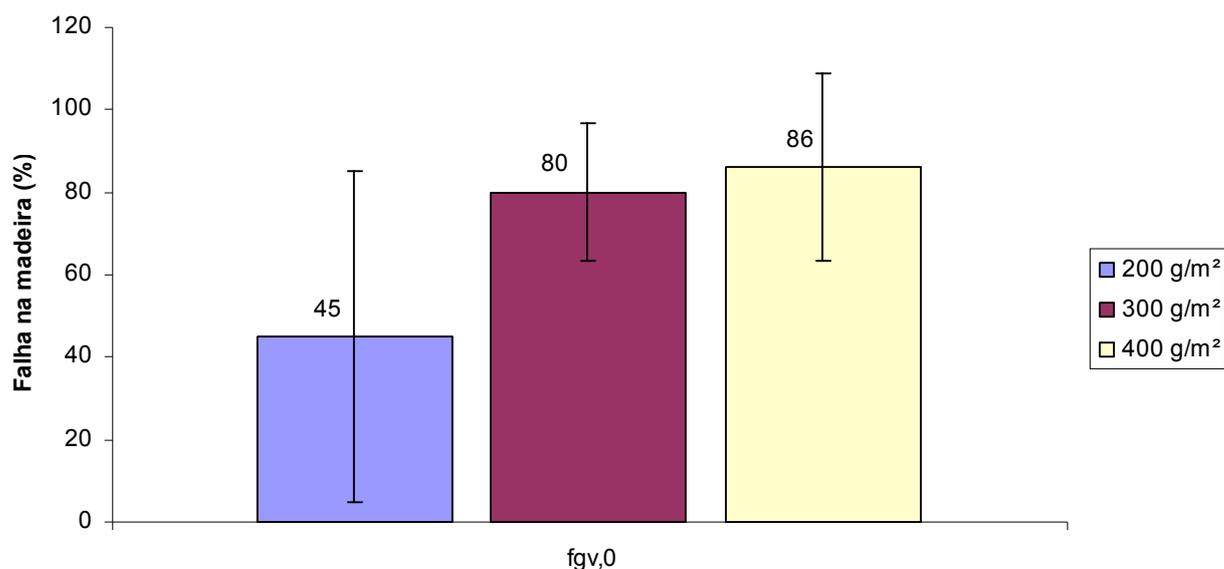


Figura 29. Percentual médio e desvio padrão de falha na madeira de acordo com as gramaturas avaliadas em ensaio de cisalhamento na lâmina de cola.

Zangiácomo (2003) chama a atenção para o fato da porosidade da madeira ser um fator intimamente ligado à características de permeabilidade e diretamente relacionado à qualidade da adesão. A permeabilidade, por sua vez, está associada não somente às particularidades anatômicas da espécie como também às características de viscosidade do adesivo. Dessa forma, segundo IBAMA (1989), a madeira de louro vermelho apresenta

poros visíveis a olho nu, pouco numeroso, com diâmetros médios, obstruídos por tilos, com a ocorrência de óleos. Essas características influem na permeabilidade da espécie e diretamente na qualidade da junta colada, sendo compensada, em parte, pela quantidade de adesivo empregado no momento da colagem.

A Figura 30 apresenta a eficiência do adesivo para cada ensaio realizado, calculados de acordo com a Equação 16. Os resultados indicam uma boa eficiência do adesivo resorcinol-formaldeído para gramaturas acima de 300 g/m<sup>2</sup>. Petruski e Della Lucia (1998) avaliando o desempenho de juntas coladas de *Eucalyptus grandis* com níveis de gramaturas de 150, 200, 250 e 300 g/m<sup>2</sup> do adesivo resorcinol-formaldeído observaram que baixas gramaturas tendem a melhorar a resistência da junta colada quando aplicadas pressões de colagem acima de 1,1 N/mm<sup>2</sup>, e similarmente, juntas coladas com baixas pressões sofrem incremento significativo de resistência com o aumento da gramatura.

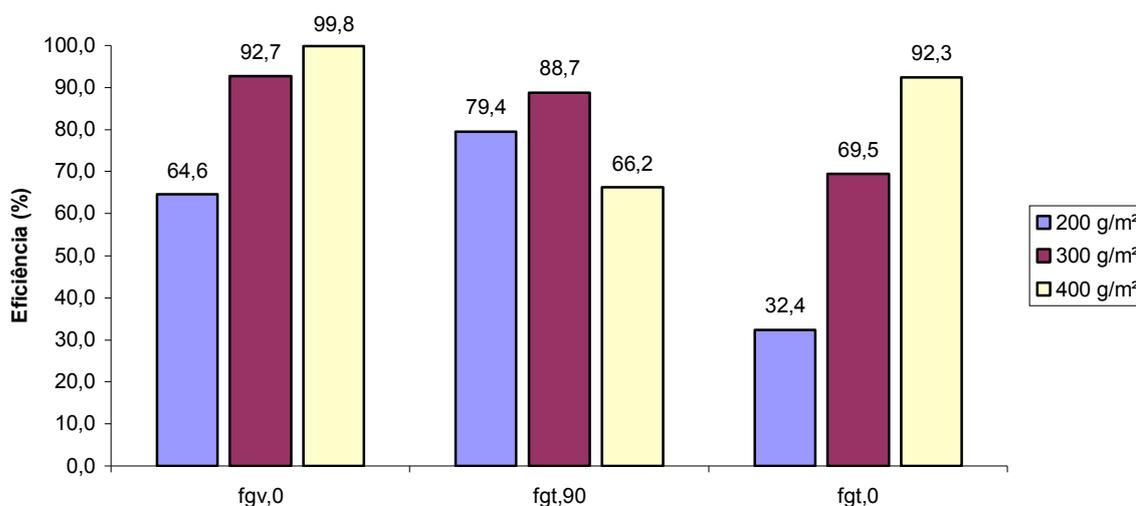


Figura 30. Eficiência do adesivo de acordo com as gramaturas avaliadas.

Com relação à inclinação do bisel, a relação a 1:10 mostrou-se eficiente, considerando que a eficiência da adesão obtidos pelo ensaio de resistência de emendas biseladas para a gramatura de 400 g/m<sup>2</sup> (92%) é concordante com o apresentando por Matthiesen (1998), o qual avaliou a eficiência de emendas biseladas na ordem de 1:3, 1:5, 1:8 e 1:10 para madeiras de *Pinus taeda* e *Eucalyptus citriodora* com o uso do adesivo resorcinol-

formaldeído com gramatura de 600 g/m<sup>2</sup>, e observou que a inclinação de 1:10 proporcionou a melhor eficiência dentre as emendas estudadas (84 a 90%). Os resultados para a gramatura de 300 g/m<sup>2</sup>, embora estatisticamente igual à de 400 g/m<sup>2</sup>, apresentaram uma eficiência próxima a 70%. Resultado semelhante foi observado por Nascimento et al. (2001) estudando o efeito da inclinação do bisel na ordem de 1:6, 1:8, 1:10 e 1:12 para as madeiras de *Pinus spp* e *Eucalyptus citriodora*, com valores de resistências relativas em torno de 80%, sendo a pressão de colagem considerada ideal situada entre 0,7 a 1,1 N/mm<sup>2</sup>.

O uso da inclinação do bisel igual a 1:10, apesar de apresentar maior desperdício de madeira, e certa dificuldade de execução, é indicada para o uso em elemento de MLC. Matthiesen (1998), afirma que inclinações inferiores, como 1:15 e 1:20, proporcionam ganho de eficiência pouco significativo e um alto grau de dificuldade de execução, ocasionando um junta colada deficiente, sendo inviável essa utilização. Para o uso em vigas de MLC. Nascimento et al. (2002), avaliando vigas de MLC de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda* construídas com emendas em bisel igual a 1:10 nas lâminas tracionadas, indicam que a colagem das emendas devem ser realizadas previamente à colagem da viga. A partir desses resultados obtidos e levando-se em consideração que a gramatura de 300 g/m<sup>2</sup> foi estatisticamente igual a de 400 g/m<sup>2</sup>, a gramatura 300 g/m<sup>2</sup> foi escolhida para a produção das vigas MLC.

### 5.3 AVALIAÇÃO NÃO DESTRUTIVA DAS LÂMINAS

Todas as 52 lâminas foram avaliadas pelos métodos não destrutivos. Pela análise de *outliers* a lâmina 2 apresentou um valor considerado discrepante, sendo excluído das análises estatísticas posteriores (Figuras 46 a 48, Apêndice B). A Tabela 26 (Apêndice B) apresenta os resultados do módulo de elasticidade das lâminas, ordenados de forma crescente, para cada método.

A partir dos resultados obtidos, as lâminas foram classificadas em oito classes de distribuição (Figura 31). A Tabela 27 (Apêndice B) apresenta as frequências relativas e a frequência acumulada para as classes de qualidade. Observa-se uma tendência de distribuição normal para os dados, sendo mais evidente para  $E_s$ . Apenas  $E_{dvt}$  apresentou valores acima de 22000 N/mm<sup>2</sup>. Observa-se que para  $E_s$  74,5% das lâminas estão presentes entre as classes 14000 a 18000 e para  $E_{dsw}$  e  $E_{dvt}$  mais de 75% das lâminas encontram-se nas classes entre 16000 e 20000. Com essas distribuições, evidencia-se que em um determinado lote de madeira de louro a probabilidade de ocorrência de uma peça de louro vermelho com  $E_M$  igual ou acima à 14000 N/mm<sup>2</sup> é superior a 70%.

O uso do equipamento stress wave timer para a avaliação das lâminas se mostrou satisfatório, sendo os procedimentos de fácil execução. O equipamento vem sendo empregado para tal finalidade em fábrica nos EUA, com uso principalmente em madeiras de coníferas. Bortoletto Júnior (2008) classificou lâminas de 2 e 3 mm de *Pinus merkusii* para o uso em LVL por meio do uso do método de ondas de tensão e observou que o método apresenta significância e possibilidade de emprego para tal finalidade.

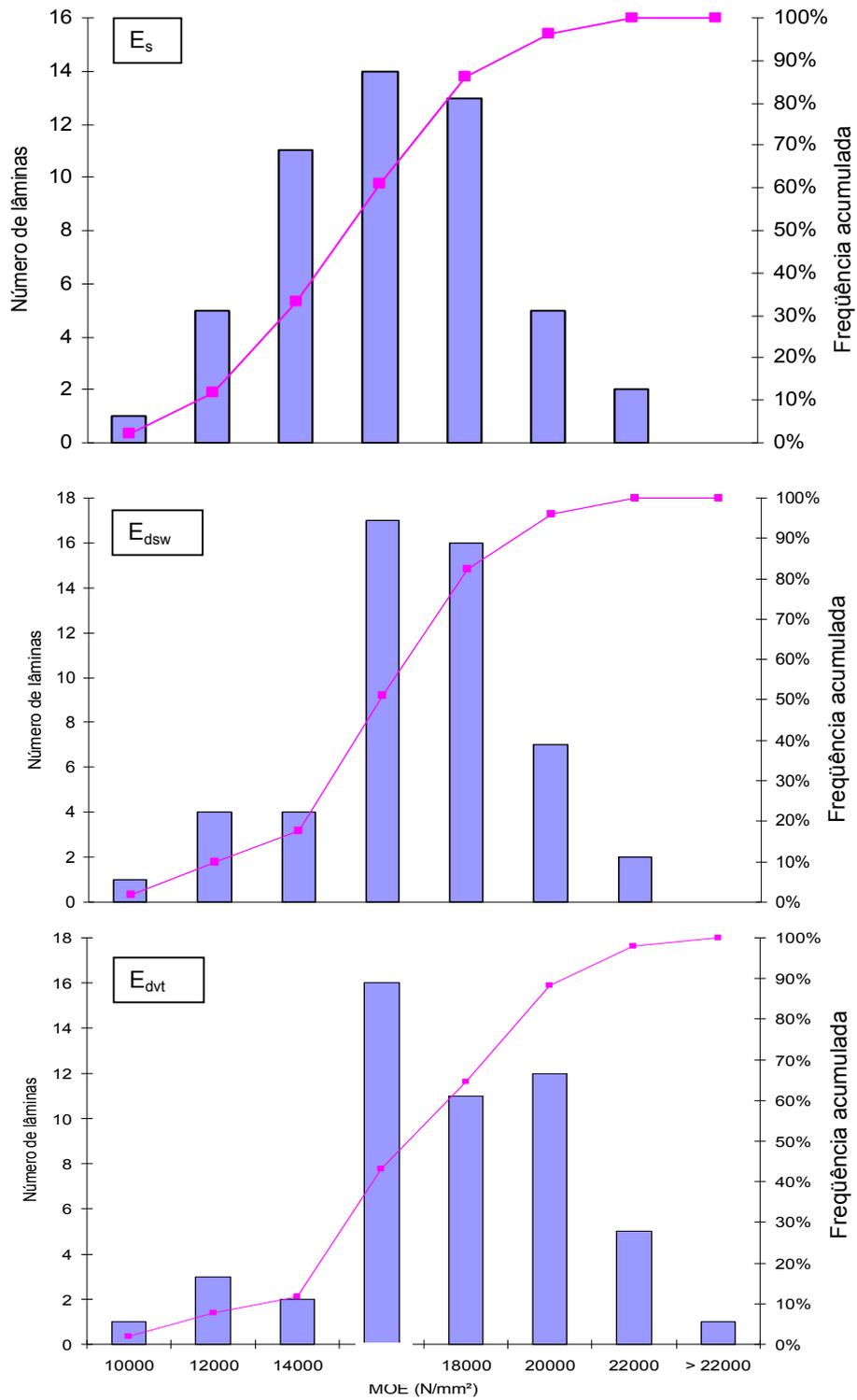


Figura 31. Classificação das lâminas de louro vermelho, segundo o método estático e os dois métodos não destrutivos estudados. Linha em vermelho representa a frequência acumulada.

A Figura 32 apresenta os valores médios dos módulos de elasticidade para as lâminas. Foi observado que os métodos dinâmicos ( $E_{dsw}$  e  $E_{dvt}$ ) apresentaram resultados superiores ao estático ( $E_s$ ), sendo 3,5% e 9,4% para  $E_{dsw}$  e  $E_{dvt}$ , respectivamente. O método de onda de tensão tem sido vastamente utilizado para avaliar a qualidade da madeira de diversas espécies de coníferas e folhosas, sendo indicado para o uso na madeira de louro vermelho. Porém, poucos são os trabalhos desenvolvidos com o *stress wave timer* envolvendo espécies da Amazônia.

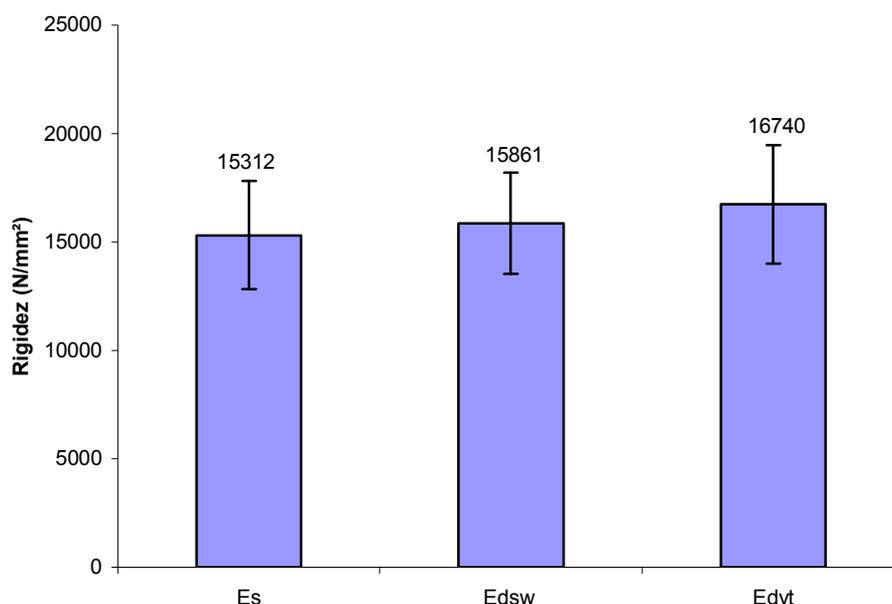


Figura 32. Valores médios e desvios padrão dos módulos de elasticidades avaliados pelos métodos não destrutivos. Onde:  $E_s$  = módulo de elasticidade pelo método estático;  $E_{dsw}$  = módulo de elasticidade dinâmico pelo método de ondas de tensão;  $E_{dvt}$  = módulo de elasticidade dinâmico pelo método de vibração transversal.

As relações entre os módulos de elasticidade estáticos e dinâmicos observadas seguiram uma tendência linear. Dessa forma, foram gerados modelos de regressão linear entre  $E_s$  x  $E_{dsw}$  e  $E_s$  x  $E_{dvt}$ , os quais apresentaram previsibilidade e significância satisfatórias, podendo ser utilizados para estimar as propriedades mecânicas (Figura 33).

Para a relação  $E_s$  x  $E_{dsw}$  foi obtido um coeficiente de correlação ( $R^2 = 0,84$ ) sendo a análise de regressão da equação estatisticamente significativa ao nível de 5% de probabilidade (Tabela 28, Apêndice B). Del Menezzi et al. (2008) estimaram o  $E_M$  e  $f_M$  de seis espécies florestais Amazônicas (*Balfourodendron riedelianum*, *Cedrela fissilis*, *Cordia goeldiana*, *Bowdichia virgilioides*, *Dipteryx odorata* and *Tabebuia* sp.) pelo método de ondas de

tensão e por variáveis colorimétricas e ensaiadas em ensaio de flexão estática conforme a norma ASTM D 143 (2000). Os modelos obtidos apresentam alta significância com valores de coeficiente de determinação igual a 0,90 tanto para  $E_M$  como para  $f_M$  quando avaliado o grupo das espécies como um todo. Chama a atenção o fato de que analisando isoladamente uma das espécies os autores observaram um decréscimo em  $R^2$ . Este fato ocorre quando a variabilidade da resistência dentro de uma espécie é baixa.

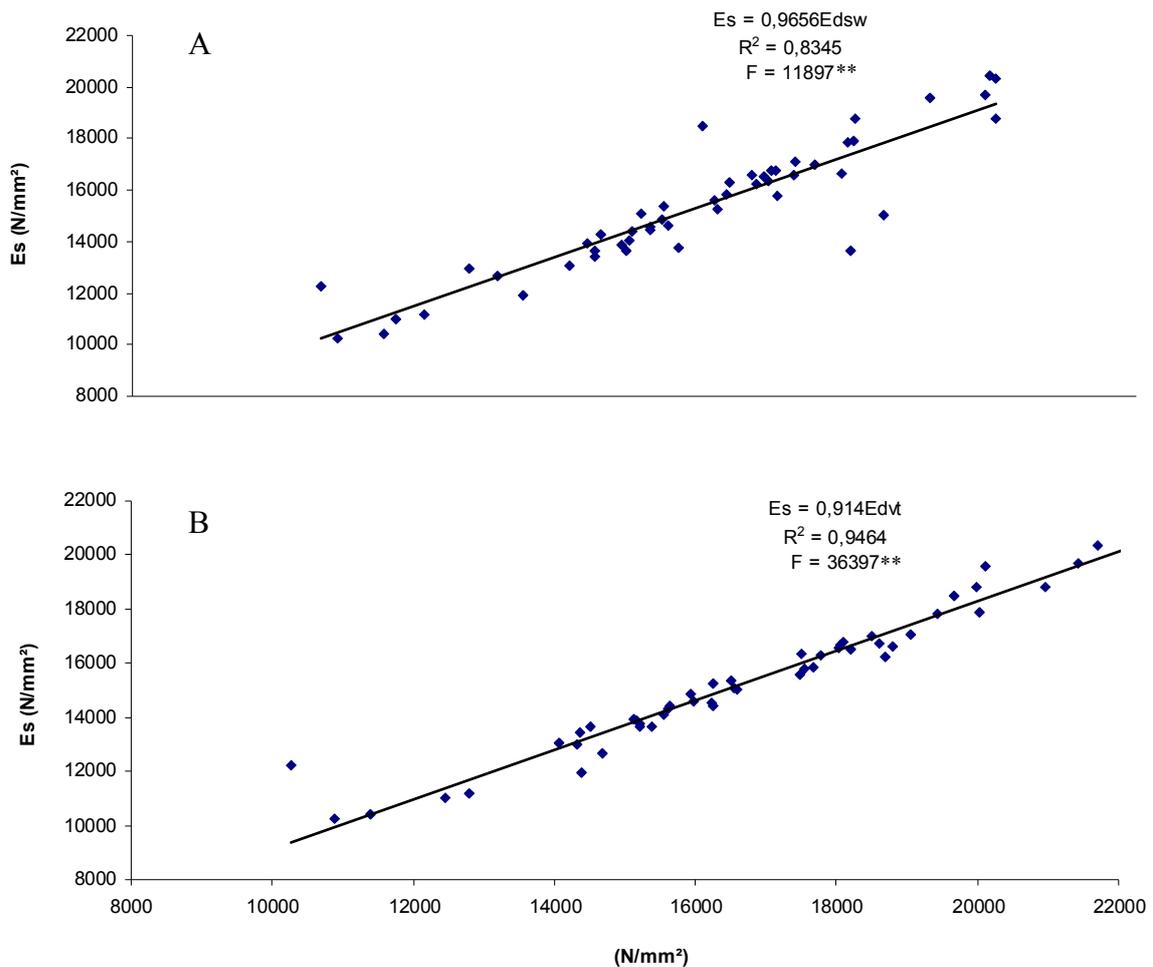


Figura 33. Análise de regressão entre os módulos de elasticidade estático e dinâmico. Onde: A = ondas de tensão (stress wave timer); B = vibração transversal. **\*\*** Significativo ao nível de 5% de probabilidade.

Resultados similares foram obtidos por Gabriel (2007), onde foi avaliado o  $E_{dsw}$  de painéis de LVL de 25 lâminas de 3 mm de espessura das madeiras de Pinus tropicais (*P. caribaea* var. *caribaea*, *P. caribaea* var. *bahamensis*, *P. caribaea* var. *hondurensis* e *P. oocarpa*)

comparados com  $E_M$  obtido em ensaio de flexão estática, onde foi observado que o  $E_{dsw}$  foi superior ao estático (8%).

Rocha (2003) estudou a viabilidade de emprego de ensaios não-destrutivos (ondas de tensão e ultra-som) na caracterização elástica e da resistência de algumas amostras de madeiras para dormentes. Concluiu que os dois métodos apresentaram sensibilidade para as duas finalidades, com leve superioridade nos coeficientes de determinação das regressões lineares (velocidade das ondas – módulo de elasticidade de corpos-de-prova) dos ensaios pelo método das ondas de tensão.

O resultado obtido para a relação  $E_s \times E_{dvt}$  foi expressivo, com o valor do coeficiente de determinação igual a ( $R^2 = 0,95$ ) sendo a análise de regressão da equação estatisticamente significativa ao nível de 5% de probabilidade (Tabela 29, Apêndice B). O resultado obtido para essa relação no presente estudo é comparável ao apresentado na literatura. Os valores encontrados estão próximos aos observado por Calil Jr. e Mina (2003), os quais avaliaram o grau de relacionamento entre o módulo de elasticidade dinâmico por meio de vibração transversal e estático para peças estruturais de madeira de Southern Pine (*Pinus taeda*) obtiveram um alto  $R^2$  igual a 0,98. Zangiácomo (2003) empregou a mesma metodologia do presente estudo aplicada à madeira de cedrinho (*Erismia* sp) e obteve um  $R^2$  igual a 0,92. Candian (2007) observou coeficientes de determinação para madeiras de *Eucalyptus grandis* ( $R^2=0,75$ ), *Eucalyptus citriodora* ( $R^2=0,80$ ), *Goupia glabra* ( $R^2=0,89$ ) e *Pinus* sp ( $R^2=0,93$ ).

A técnica de vibração transversal apresentou valores confiáveis para o módulo de elasticidade estático. Candian (2007) afirma que o método de vibração transversal é considerado uma técnica que apresenta valores confiáveis para o módulo de elasticidade e que pode ser usado em qualquer tipo de madeira, com qualquer seção transversal e, também, em madeira laminada colada ou, ainda, em painéis de madeira.

Os altos valores de coeficiente de determinação atribuídos aos ensaios dinâmicos demonstram que as técnicas não destrutivas são importantes ferramentas na inferência do modulo de elasticidade da madeira, sendo potencialmente aptos para a classificação de peças de madeira de louro vermelho e estimam o módulo de elasticidade com precisão. Nesse sentido, observou-se que o método de vibração transversal foi o que apresentou

melhores resultados quando comparado com o método estático, sendo então empregado no sistema de composição das lâminas das vigas de MLC. Recomenda-se que para uma melhor elucidação do uso dessas técnicas com madeiras tropicais necessita-se de um maior número de pesquisas a serem realizadas, pois as referências encontradas na literatura ainda são escassas quando comparado com as pesquisas realizadas no exterior.

#### 5.4 PROPRIEDADES DE FLEXÃO E AVALIAÇÃO NÃO DESTRUTIVA DAS VIGAS DE MLC

O Quadro 1 ilustra o esquema de posicionamento das lâminas nas vigas de MLC bem como a composição das dez vigas confeccionada, com os seus respectivos módulos de elasticidade teóricos ( $E_{Mteo}$ ), calculados conforme a Equação 22, e pelo método de vibração transversal ( $E_{Mvt}$ ), assim como o valor do módulo de elasticidade das vigas obtido por média aritmética das lâminas ( $E_{Mlam}$ ) que as compõem. No ensaio de vibração transversal, foi obtido o  $E_{Mvt}$  no sentido de menor inércia das peças (flatwise).

Quadro 1. Composição das vigas de MLC, com o posicionamento de cada lâmina e com a rigidez teórica, pelo método de vibração transversal e por média aritmética das lâminas.

Lâmina	Posição	Viga									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	1	4	47	40	11	48	32	42	13	36	14
		51	24	39	41	6	25	35	44	26	10
	2	52	19	38	27	37	33	29	49	5	46
		21	28	17	20	8	23	30	34	9	3
	3	50	45	22	16	12	31	18	15	43	1
	$E_{Mteo}$ (N/mm <sup>2</sup> )		21115	19828	18415	18037	17094	16257	15634	15097	13537
$E_{Mvt}$ (N/mm <sup>2</sup> )		19312	18090	17471	16147	16293	15386	14392	13681	12421	11859
$E_{Mlam}$ (N/mm <sup>2</sup> )		21312	19631	18563	17925	17136	16246	15620	15076	14327	11612

Onde:  $E_{Mteo}$  = módulo de elasticidade teórico;  $E_{Mvt}$  = módulo de elasticidade pelo método de vibração transversal;  $E_{Mlam}$  = módulo de elasticidade das vigas obtido por média aritmética das lâminas.

Posição 1 = borda superior, 2 = lâmina central, 3 = borda inferior.

As dimensões das vigas, bem como o momento de inércia e o teor de umidade das mesmas encontram-se na Tabela 7. A Tabela 8 apresenta os resultados experimentais das vigas de MLC.

Tabela 7. Propriedades geométricas, massas e teor de umidade das vigas de MLC.

Viga	Geometria (mm)			Massa (g)	X <sub>CG</sub> (mm)	Y <sub>CG</sub> (mm)	Momento de Inércia (mm <sup>4</sup> )	Teor de Umidade (%)
	b	h	Comprimento					
1	40,0	102,5	1900	5510	20,0	51,2	3,6E+06	12,92
2	39,9	99,8	1900	5340	20,0	49,9	3,3E+06	12,16
3	40,0	99,8	1900	5280	20,0	49,9	3,3E+06	12,44
4	40,2	99,7	1900	5065	20,1	49,9	3,3E+06	11,56
5	39,8	99,3	1900	5180	19,9	49,7	3,2E+06	12,64
6	39,9	99,7	1900	5015	19,9	49,9	3,3E+06	12,15
7	40,3	102,4	1900	5080	20,2	51,2	3,6E+06	12,99
8	40,5	100,7	1900	5130	20,3	50,4	3,4E+06	12,82
9	40,7	101,2	1900	4615	20,4	50,6	3,5E+06	13,28
10	40,7	99,3	1900	4085	20,3	49,6	3,3E+06	12,81

Onde b = largura da viga; h = altura da viga; X<sub>CG</sub> = Centro de gravidade no eixo X; Y<sub>CG</sub> = centro de gravidade no eixo Y.

Tabela 8. Propriedades experimentais das vigas de MLC de louro vermelho.

Viga	P <sub>rup</sub> (N)	E <sub>Mexp</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	E <sub>G</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	f <sub>Mexp</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	M <sub>exp</sub> (N.mm)	DA (g/cm <sup>3</sup> )
1	19246,7	20285,9	18517,8	82,6	5,8E+06	0,71
2	18511,0	18693,4	17066,6	83,9	5,6E+06	0,71
3	17609,2	18853,3	17974,0	79,6	5,3E+06	0,70
4	11225,3	16903,5	16034,5	50,5	3,4E+06	0,66
5	18511,0	15362,4	16071,9	83,9	5,6E+06	0,69
6	13912,9	13682,7	14337,2	63,1	4,2E+06	0,66
7	15698,8	13853,9	14397,9	66,9	4,7E+06	0,65
8	14375,7	15352,7	13724,5	63,0	4,3E+06	0,66
9	10299,7	13375,2	12862,5	44,5	3,1E+06	0,59
10	7321,4	11938,5	11918,9	31,4	2,2E+06	0,53
<b>Média</b>	<b>14671,2</b>	<b>15830,2</b>	<b>15290,57</b>	<b>64,9</b>	<b>4,4E+06</b>	<b>0,66</b>
<b>Desvio Padrão</b>	<b>3693,1</b>	<b>2276,4</b>	<b>1882,6</b>	<b>17,2</b>	<b>1,1E+06</b>	<b>0,06</b>
<b>CV (%)</b>	<b>25,2</b>	<b>14,9</b>	<b>12,3</b>	<b>26,5</b>	<b>25,2</b>	<b>8,7</b>

Onde CV = coeficiente de variação; P<sub>rup</sub> = carga de ruptura; E<sub>Mexp</sub> = módulo de elasticidade experimental da viga; E<sub>G</sub> = módulo de elasticidade da viga com valor de G corrigido; f<sub>Mexp</sub> = módulo de ruptura experimental; M<sub>exp</sub> = momento fletor experimental; DA = densidade aparente.

As relações entre E<sub>Mexp</sub>, f<sub>Mexp</sub> com E<sub>Mvt</sub> e E<sub>Mvt</sub> e E<sub>Mlam</sub> estão presentes na Figura 34. Observou-se que os valores de E<sub>Mteo</sub> e E<sub>Mlam</sub> obtidos são bastante próximos, indicando uma baixa variabilidade entre os módulos de elasticidade das lâminas que compõem cada viga. Essa baixa variabilidade pode ser explicada pelo fato de que cada viga é composta por

lâminas com valores próximos de  $E_M$ , conforme classificação obtida pelo método de vibração transversal. As vigas foram montadas propositalmente, sendo a viga 1 produzida com as lâminas de maior  $E_M$  e as demais seguindo esse mesmo critério até a viga 10 produzida com as lâminas de menor  $E_M$ , sendo essas classificadas pelo método de vibração transversal.

Verificou-se, de maneira geral, que os resultados de  $E_{Mvt}$  apresentaram boa concordância em relação aos valores de  $E_M$  experimentais (Tabela 9), sendo 2% inferior aos experimentais. Não foi observada diferença significativa entre  $E_{Mvt}$  e  $E_{Mexp}$  e  $E_{Mvt}$  e  $f_{Mexp}$  (Tabelas 30 e 31, Apêndice C) ao nível de 5% de probabilidade. As análises de regressão entre  $E_{Mvt}$  e  $E_{Mexp}$  e  $E_{Mvt}$  e  $f_{Mexp}$  foram significativas com 5% de significância (Tabelas 32 e 33, Apêndice C). Observa-se que a montagem das vigas conforme a qualidade das lâminas que as compõem proporciona um ganho efetivo de rigidez, validando a proposta da utilização de lâminas classificadas. Resultado semelhante foi obtido por Zangiácomo (2003), com vigas de MLC de cedrinho (*Erisma* sp). O autor aplicou o método de vibração transversal nas vigas de MLC e obteve valores teóricos 2,2% inferior aos experimentais.

Tabela 9. Valores e relação entre de  $E_{Mvt}$  e  $E_{Mexp}$ .

Viga	$E_{Mvt}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$E_{Mexp}$ (N/mm <sup>2</sup> )	Relação $E_{Mvt}/E_{Mexp}$
1	19312	20286	0,95
2	18090	18693	0,97
3	17471	18853	0,93
4	16147	16904	0,96
5	16293	15362	1,06
6	15386	13683	1,12
7	14392	13854	1,04
8	13681	15353	0,89
9	12421	13375	0,93
10	11859	11939	0,99
<b>Média</b>	<b>15505</b>	<b>15830</b>	<b>0,98</b>
<b>Desvio Padrão</b>	<b>2437</b>	<b>2758</b>	<b>0,07</b>
<b>CV</b>	<b>15,7%</b>	<b>17,4%</b>	<b>7,2%</b>

Onde:  $E_{Mvt}$  = módulo de elasticidade da viga por vibração transversal;  $E_{Mexp}$  = módulo de elasticidade experimental; CV = coeficiente de variação.

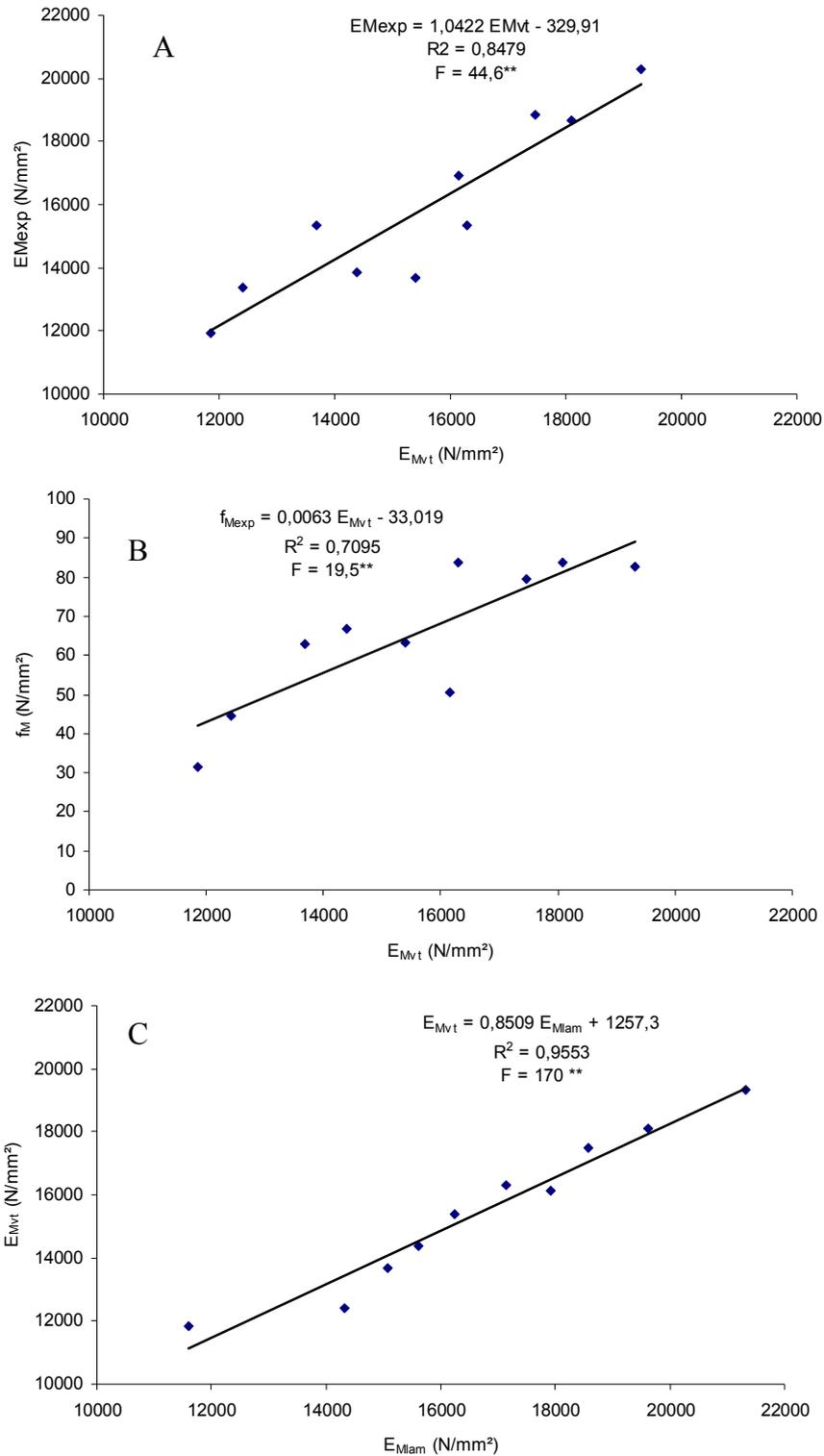


Figura 34. Relação entre  $E_{Mexp}$ ,  $f_{Mexp}$  com  $E_{Mvt}$  (A e B) e  $E_{Mvt}$  com  $E_{Mlam}$  (C) para as vigas de MLC de louro vermelho.

\*\* Significativo ao nível de 5% de probabilidade.

O uso de lâminas com alto módulo de elasticidade proporcionaram um ganho efetivo na rigidez das vigas de MLC. Resultados semelhantes foram obtidos por Nascimento et al. (2002), onde os autores verificaram que grãos irregulares e presença de nós da madeira de *Pinus* sp diminuem significativamente a carga de ruptura. Os resultados obtidos para as vigas 4, e 10 ilustram essa afirmação (Tabela 9). Para estas vigas, a ruptura ocorreu abaixo do valor máximo da carga prevista, refletindo em uma tensão de ruptura e momento fletor abaixo do esperado, conforme será discutido adiante.

O método de vibração transversal é uma técnica confiável, podendo ser aplicado em processos de qualificação de vigas de MLC em um processo de produção industrial. Da mesma forma, o modelo proposto ( $E_{Mteo}$ ) apresentou-se satisfatório, com boa previsibilidade com relação ao  $E_M$  experimental. Entretanto, é interessante observar que o módulo de elasticidade empregado em  $E_{Mteo}$  é oriundo da classificação das lâminas, sendo utilizado o método de vibração transversal. Dessa forma, os resultados indicam que uso da técnica não destrutiva é válida para ambas as situações, tanto para a classificação das lâminas de MLC quanto para as vigas prontas.

Os resultados de  $E_G$  obtidos foram próximos aos encontrados para o  $E_M$ , sendo em média 3% inferiores aos de  $E_M$  (Tabela 10). O resultado da análise de variância para a relação  $E_G/E_{Mexp}$  não apresentou diferença significativa ao nível de probabilidade de 5% (Tabela 34, Apêndice C). O coeficiente de determinação obtido pela análise de regressão para a relação  $E_G/E_M$  ( $R^2 = 0,8995$ ) foi significativo (Figura 35, Tabela 35, Apêndice C).

Tabela 10. Valores e relação entre o módulo de elasticidade da viga com valor do módulo de elasticidade transversal corrigido ( $E_G$ ) e o módulo de elasticidade experimental  $E_{Mexp}$ .

Viga	$E_G$ (N/mm <sup>2</sup> )	$E_{Mexp}$ (N/mm <sup>2</sup> )	Relação $E_G / E_{Mexp}$
1	18517,8	20285,9	0,91
2	17066,6	18693,4	0,91
3	17974,0	18853,3	0,95
4	16034,5	16903,5	0,95
5	16071,9	15362,4	1,05
6	14337,2	13682,7	1,05
7	14397,9	13853,9	1,04
8	13724,5	15352,7	0,89
9	12862,5	13375,2	0,96
10	11918,9	11938,5	1,00
<b>Média</b>	<b>15290,6</b>	<b>15830,1</b>	<b>0,97</b>
<b>Desvio Padrão</b>	<b>1882,6</b>	<b>2276,4</b>	<b>0,05</b>
<b>CV</b>	<b>12,3%</b>	<b>14,9%</b>	<b>5,6%</b>

Onde CV = coeficiente de variação;  $E_{Mexp}$  = módulo de elasticidade experimental da viga;  $E_G$  = módulo de elasticidade da viga com valor de G corrigido.

A relação entre o módulo de elasticidade e o módulo de elasticidade transversal ( $E/G$ ) igual a 16, sugerida por USDA (1999), mostrou-se satisfatória para as vigas de MLC. A deformação devido ao cisalhamento transversal está diretamente relacionada ao módulo de elasticidade transversal ( $G$ ) da viga. USDA (1999) apresenta a taxa  $E/G$  com um valor médio entre 11 a 16 e Bodig e Jayne (1993) indicam um intervalo entre 14 a 20, enquanto que Ohlsson e Perstorper (1992) encontraram um valor de 10,7 para Norway spruce. Yang et al. (2007) avaliaram o módulo de elasticidade transversal por meio de vibração transversal para vigas de MLC de japonese cedar (*Cryptomeria japonica*) e southern pine (*Pinus* spp.) e observaram uma relação  $E/G$  variando entre 13,2 a 19,1, sendo de  $G$  superiores para vigas compostas por lâminas de maior MOE. Esta taxa é alta, considerando que para o aço ela representa um valor em torno de 2,6. Skaggs e Bender (1995) afirmam que esta alta taxa  $E/G$  indica que o componente de cisalhamento na deformação total pode ser mais significativo para vigas de madeira do que para vigas de aço.

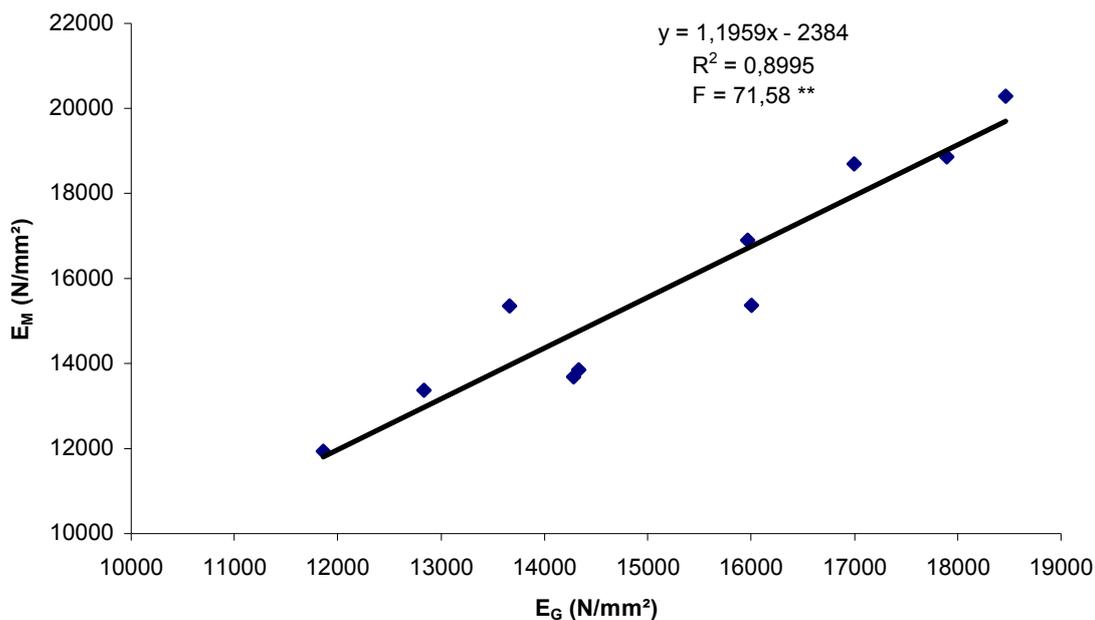


Figura 35. Análise de regressão entre  $E_G$  e  $E_M$  das vigas de MLC.

\*\* Significativo ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

A deformação por cisalhamento é mais importante para vigas compostas, pois normalmente utilizam-se materiais de qualidade inferiores na porção central da viga, sendo posicionados na região de máxima tensão de cisalhamento. Bodig e Jayne (1993) alertam que ignorando a deformação devido ao cisalhamento, o módulo de elasticidade não computado não é o real e apenas o aparente. Skaggs e Bender (1995) afirmam que a deformação devido ao cisalhamento é comumente ignorada em cálculos estruturais com vigas de madeira laminada colada (MLC) e madeira maciça.

La Rovere (1998) aplicou o método de homogeneização da seção transversal a 18 vigas de MLC de *Pinus taeda* e *Pinus elliottii*. O trabalho investigou o efeito do cisalhamento nas flechas, demonstrando o seu cálculo e estimativa. As vigas foram ensaiadas em flexão a quatro pontos. Os valores encontrados entre os valores teóricos e experimentais foram próximos, ficando por volta de 6% inferior ao experimental.

Biblis (1967) estudou o efeito da deformação por cisalhamento nas flechas em vigas de madeira laminada colada com tábuas de espécies provenientes de florestas tropicais. O autor afirma que a ação do cisalhamento é significativo e comumente negligenciado nos cálculos dos MOEs em vigas ensaiadas em flexão com carga centrada, causando erros de magnitude consideráveis. Bodig e Jayne (1993), Biblis (1966) e Biblis (1967) demonstram

que o percentual do efeito da deformação por cisalhamento nas flechas aumenta quando a relação vão/altura ( $L/h$ ) diminui. A característica da deformação por cisalhamento depende tanto da relação vão/espessura como das propriedades de resistências da espécie envolvida.

A norma ASTM D198 (1997), indica que para a avaliação unicamente das propriedades de cisalhamento, uma relação entre a distância do ponto de aplicação de carga e o apoio da viga ( $a$ ) com a altura da peça ( $h$ ) igual a 5, com um vão curto. Para razões  $a/h$  entre 5 e 12, o efeito de cisalhamento é ocorrente, devendo o cálculo do módulo de elasticidade ser corrigido. Para a razão  $a/h$  acima de 12, a deformação por cisalhamento é considerada muito pequena, sendo considerada apenas deformação devido ao momento fletor. No presente estudo, esta relação foi igual a seis, não sendo observado esse efeito de forma pronunciada.

Na norma brasileira NBR 7190 (1997) encontra-se o método para a determinação do módulo de elasticidade longitudinal em ensaio de flexão estática com carga concentrada. Nessa norma, a recomendação é que o corpo-de-prova deve ser vinculado a dois apoios articulados móveis, com vão livre entre apoios de 21 vezes a altura da seção do elemento. Utilizando-se esse espaçamento entre apoios, permite-se usar somente a parcela da deformação devido ao momento fletor, pois para vãos maiores que 21 vezes a altura ( $L \geq 21 h$ ), o efeito do cisalhamento torna-se desprezível na deformação total de elementos com seções retangulares. Costa Tienne e Nascimento (2006) observaram que o efeito do cisalhamento para a madeira de eucalipto citriodora (*Corymbia citriodora*) torna-se pouco significativa para relações  $L/h$  acima de 18.

Por meio da correlação de Pearson (Tabela 11) observou-se que todas as propriedades experimentais possuem forte correlação, sendo a maioria significativa ao nível de 1% de probabilidade, com destaque para a correlação entre  $P_{rup}$  e  $E_{Mexp}$ . As menores correlações foram obtidas entre  $E_M$  e  $f_M$  e  $E_M$  e  $M$ , entretanto significativos ao nível de 5 % de probabilidade.

Tabela 11. Correlação de Pearson entre as propriedades de resistência, rigidez e densidade aparente da madeira de louro vermelho.

	$P_{rup}$	$E_M$	$E_G$	$f_M$	M	DA
$P_{rup}$	1					
$E_M$	0,739 *	1				
$E_G$	0,825 **	0,948 **	1			
$f_M$	0,995 **	0,737 *	0,830 **	1		
M	1,000 **	0,742 *	0,829 **	0,996 **	1	
DA	0,923 **	0,827 **	0,887 **	0,934 **	0,924 **	1

Onde:  $P_{rup}$  = carga de ruptura;  $E_M$  = módulo de elasticidade;  $E_G$  = módulo de elasticidade corrigido com valor de G;  $f_M$  = módulo de ruptura; M = momento; DA = densidade aparente.

\* Correlação significativa ao nível de 5% de probabilidade.

\*\* Correlação significativa ao nível de 1% de probabilidade.

Observa-se que a densidade aparente, por ser um dos parâmetros mais simples de ser obtido no processo de produção das vigas de MLC, apresenta-se como uma importante característica que proporciona indicativos da qualidade das vigas produzidas, pois de modo geral, com aumento da densidade aparente tende-se a ter vigas com maiores resistência e rigidez. Ressalva-se que esse resultado para o presente estudo refere-se principalmente ao fato de as vigas serem produzidas com lâminas com densidades e propriedades de resistência e rigidez próximas, e sendo assim, promovendo pouca variabilidade em cada viga.

Resultado similar foi encontrado por Adorno e Garcia (2003) para madeira de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*, onde foi observado que a densidade aparente da madeira apresentou correlações positiva com todas as propriedades mecânicas avaliadas em laboratório, sendo corroborado por Scanavaca Júnior e Garcia (2004) para a madeira de *Eucalyptus urophylla*.

A Figura 36 ilustra as rupturas das vigas de MLC. Observou-se que as rupturas iniciaram-se na região tracionada, com posterior propagação por compressão, tração e cisalhamento. A ruptura na viga 2 ocorreu inicialmente por cisalhamento na lâmina número 4 sendo observada a ocorrência de esmagamento na região comprimida da viga 2 e 8. Uma baixa ocorrência de cisalhamento na linha de cola das vigas foi observada, apresentando assim, uma boa adesão e validando o sistema de prensagem desenvolvido. É interessante observar

que em todas as vigas as rupturas iniciaram-se na região de momento fletor máximo, e após um incremento de carga, ocorreu o rompimento final da viga.



Figura 36. Tipos de rupturas ocorridas nas vigas de MLC de números 1 a 4.



Figura 36 (continuação). Tipos de rupturas ocorridas nas vigas de MLC de números 5 a 8.



Figura 36 (continuação). Tipos de rupturas ocorridas nas vigas de MLC de números 9 e 10.

As rupturas, de modo geral, iniciaram-se nas lâminas da região tracionada da viga, sendo comum a ocorrência de ruptura por tração paralela na última lâmina das vigas, com propagação por cisalhamento. Nas vigas 1, 2, 3 foi observado esmagamento por compressão nos aplicadores de carga, sendo a deformação ocorrente do esmagamento computada na deformação total da viga. Isso ocorre devido às lâminas posicionadas na porção comprimida dessas vigas apresentarem rigidez elevada. A qualidade da adesão das vigas foi satisfatória, com baixa ocorrência de cisalhamento na lâmina de cola.

Fiorelli (2005) observou comportamento de ruptura semelhante aos observados no presente estudo em vigas de MLC produzidas com *Pinus caribaea* var *hondurensis* com e sem reforço de fibra de vidro. Nascimento et al. (2002) avaliando vigas de MLC produzidas com madeira de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*, observou que as rupturas iniciaram-se na porção tracionada das vigas nos locais de ocorrência das emendas, com propagação por cisalhamento. Segundo Burdzik (1997) citado por Nascimento et al. (2002) as lâminas menos resistentes são aquelas que iniciam o processo de ruptura na região solicitada à tração, contra àquelas que sofrem ruptura nas localidades dos defeitos naturais.

Falk e Colling (1995) avaliaram esse efeito em vigas de MLC produzidas na Europa e nos EUA e sugerem que a classe mecânica de qualidade das lâminas mais solicitadas à tração serve como um indicador das propriedades de resistência à flexão das vigas e parece ser uma forma efetiva de classificar a viga de MLC. Os autores afirmam ainda que a qualidade das lâminas que compõem a MLC afeta diretamente o comportamento mecânico da viga.

## 5.5 COMPORTAMENTO TEÓRICO E EXPERIMENTAL DAS VIGAS DE MLC

Hernandez e Moody (1996) e Fiorelli (2005) afirmam que a ruptura de uma viga de MLC geralmente se origina nas lâminas posicionadas na porção tracionada, principalmente quando essas lâminas apresentam algum tipo de defeito, como por exemplo, nós e fibras inclinadas em relação ao eixo da peça. A partir deste ponto, a ruptura se propaga pela viga, geralmente por pontos com emendas, conduzindo-a ao colapso. Com isso, a resistência em flexão em vigas de MLC é normalmente determinada a partir da resistência de tração da região tracionada da peça. Como a densidade aparente apresentou-se como uma propriedade física com elevada correlação com as demais propriedades mecânicas e com a análise de regressão entre  $DA$  e  $f_{t,0}$  significativa, conforme observado no item 5.1 e Equação 27, a  $f_{t,0}$  para as vigas foram estimados de acordo com a Equação 28.

$$f_{t,0} = 3242,7 * DA - 1595,9 \quad (\text{Eq. 27})$$

Onde:

$DA$  = densidade aparente da viga,  $g/cm^3$

$f_{t,0}$  = tração paralelas às fibras,  $N/mm^2$ ;

Os resultados dos valores encontrados para  $f_{M_{teo}}$  e do momento fletor teórico ( $M_{teo}$ ) estão presentes na Tabela 12. Uma análise de *outlier* foi realizada e indicou que a viga 10 representava um valor discrepante, sendo a mesma excluída das análises posteriores. Os valores teóricos encontrados foram inferiores aos experimentais, na ordem de 27% para  $f_M$  e de 6% para  $M$ , sendo este dependente direto de  $f_{t,0}$ , o qual observou-se que o modelo empregado da estimativa dessa propriedade pela densidade aparente das vigas mostrou-se satisfatória. Apesar de os modelos teóricos de  $f_M$  e  $M$  serem dependentes de variáveis estimadas, as quais apresentam as suas próprias variabilidades, os mesmo são aceitáveis.

Pelo resultado da análise de variância não foram observadas diferenças significativas, ao nível de 5% de probabilidade, entre os valores teóricos e experimentais de  $f_M$  e  $M$  (Tabelas 36 e 37, Apêndice C), com as equações significativas ao nível de 5% de probabilidade. A partir do exposto, os modelos teóricos propostos são válidos para as estimativas dessas propriedades em vigas de MLC de louro vermelho. A Figura 37 ilustra a análise de regressão do  $f_M$  e  $M$  teórico e experimental das vigas de MLC, com o modelo de regressão linear. Lee et al. (2005) avaliando a estimativa de propriedades de flexão para vigas de madeira laminada de Japanese larch com lâminas classificadas mecanicamente, observaram um comportamento teórico similar ao obtido no presente estudo, com coeficiente de determinação igual a 0,63 para  $f_M$ .

Tabela 12. Relação teórico e experimental para  $f_M$ ,  $M$  e  $E_M$ .

Viga	$f_M$ (N/mm <sup>2</sup> )		Relação	$M$ (N*mm)		Relação	$E_M$ (N/mm <sup>2</sup> )		Relação
	Teo	Exp	Teo / Exp	Teo	Exp	Teo / Exp	Teo	Exp	Teo / Exp
1	62,4	82,6	0,76	4,95E+06	5,77E+06	0,86	21115	20286	1,04
2	58,8	83,9	0,70	5,05E+06	5,55E+06	0,91	19828	18693	1,06
3	57,7	79,6	0,72	4,83E+06	5,27E+06	0,92	18415	18853	0,98
4	48,6	50,5	0,96	4,49E+06	3,37E+06	1,33	18037	16904	1,07
5	54,3	83,9	0,65	4,69E+06	5,55E+06	0,84	17094	15362	1,11
6	48,0	63,1	0,76	4,27E+06	4,17E+06	1,02	16257	13683	1,19
7	43,4	66,9	0,65	3,91E+06	4,71E+06	0,83	15634	13854	1,13
8	48,0	63,0	0,76	4,39E+06	4,31E+06	1,02	15097	15353	0,98
9	28,3	44,5	0,64	2,21E+06	3,09E+06	0,72	13537	13375	1,01
10 **	10,3	31,4	0,33	8,87E+05	2,20E+06	0,40	12311	11939	1,03
<b>Média</b>	<b>49,9</b>	<b>68,6</b>	<b>0,73</b>	<b>4,31E+06</b>	<b>4,64E+06</b>	<b>0,94</b>	<b>16732</b>	<b>15830</b>	<b>1,06</b>
<b>Desvio Padrão</b>	<b>9,1</b>	<b>13,9</b>	<b>0,1</b>	<b>8,31E+05</b>	<b>8,87E+05</b>	<b>0,17</b>	<b>2735</b>	<b>2758</b>	<b>0,07</b>
<b>CV (%)</b>	<b>18,2</b>	<b>20,2</b>	<b>13,5</b>	<b>19,3</b>	<b>19,1</b>	<b>18,5</b>	<b>16,3</b>	<b>17,4</b>	<b>6,3</b>

\*\* Outlier em  $f_{Mexp}$  e  $M_{exp}$ . Teo = teórico; Exp = experimental. CV = coeficiente de variação.

As análises de regressão para  $f_M$  e  $M$  teórico e experimental foram significativas ao nível de 5% de significância (Tabela 38 e 39, Apêndice C). As vigas 2 e 5 apresentaram maiores  $f_{Mexp}$  seguidas pela viga 1, e a viga 9 o menor valor para essa propriedade. Para  $M_{exp}$ , as vigas 2 e 3 apresentaram os maiores valores e a viga 9 o menor para essa propriedade, sendo a viga 4 a que apresentou um decréscimo de resistência superior às demais.

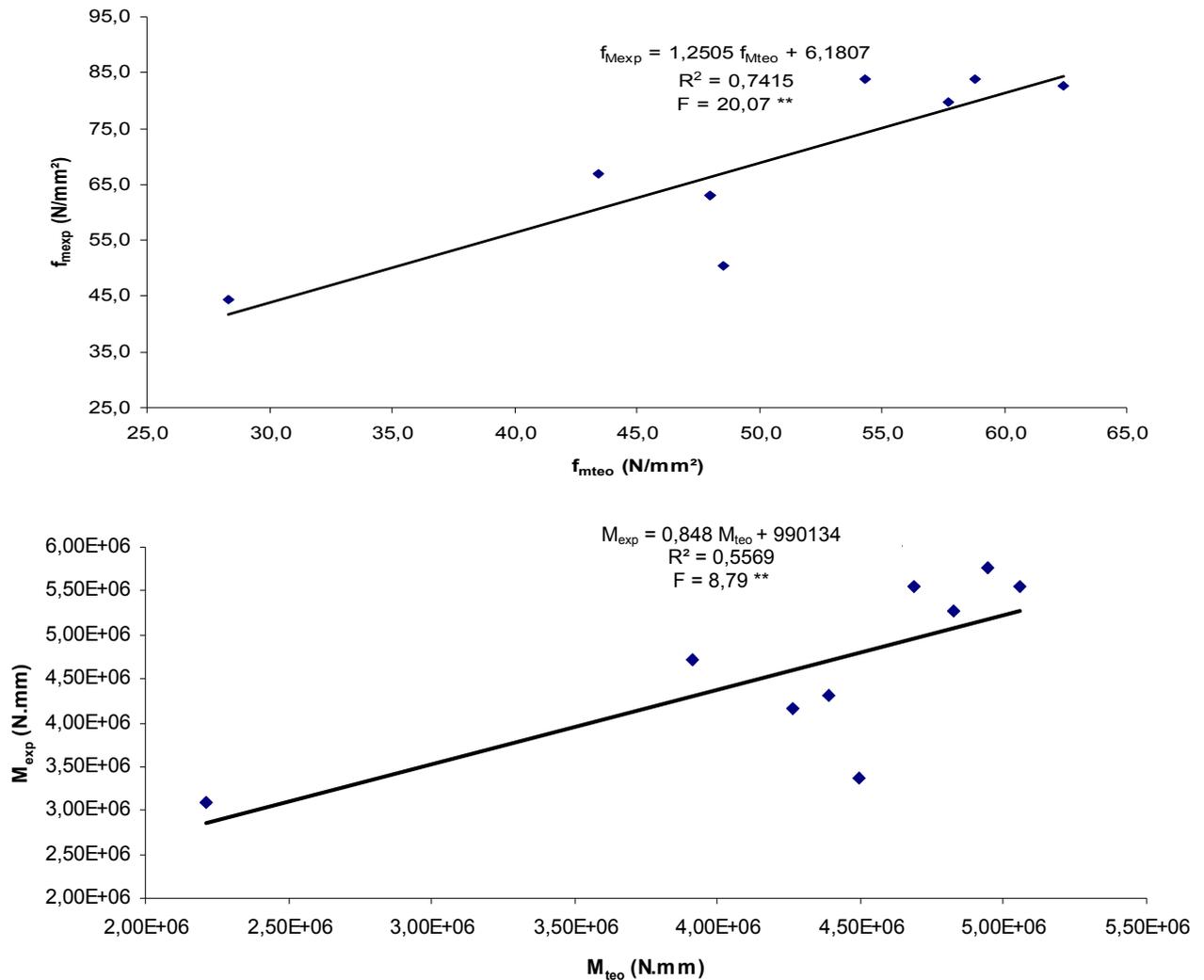


Figura 37. Análise de regressão do  $f_M$  e  $M$  teórico e experimental das vigas de MLC, com o modelo de regressão linear.

\*\* Significativo ao nível de 5% de probabilidade.

Com relação à rigidez das vigas, os valores teóricos para  $E_{M_{teo}}$  foram em média 6% superior aos experimentais, conforme apresentado na Tabela 12. A análise de variância para a relação teórica e experimental do  $E_M$  não apresentou diferença significativa ao nível de 5% de probabilidade, assim como entre  $E_{M_{teo}}$  e  $f_{M_{exp}}$  (Tabela 40 e 41, Apêndice C). Foi observado uma relação linear entre a relação teórica e experimental de  $E_M$  sendo significativa ao nível de nível de 5% de probabilidade, como da mesma forma para  $E_{M_{teo}}$  e  $f_{M_{exp}}$  (Tabela 42 e 43, Apêndice C). A Figura 38 ilustra a análise de regressão entre  $E_{M_{teo}}$  e  $E_{M_{exp}}$  assim como  $E_{M_{teo}}$  e  $f_{M_{exp}}$ .

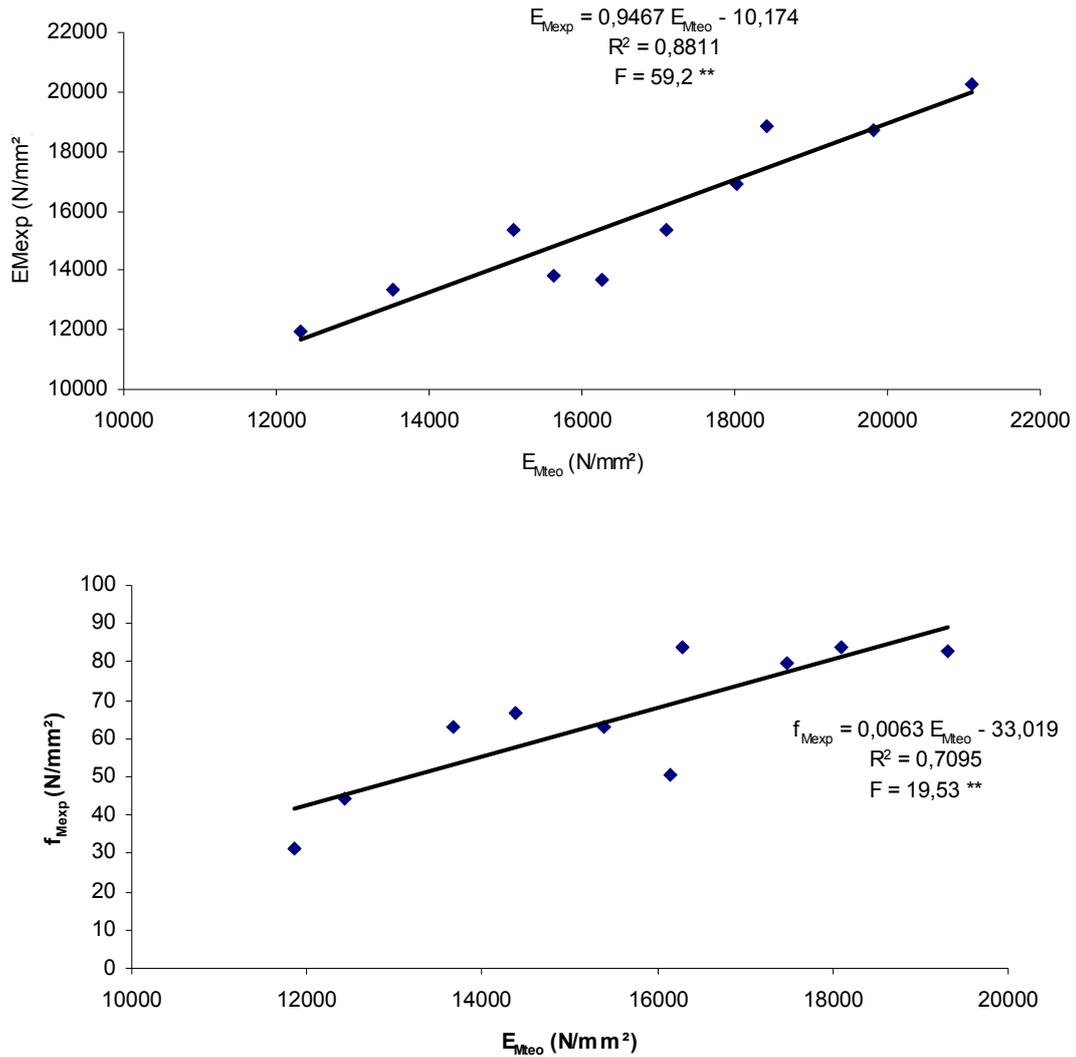


Figura 38. Análise de regressão entre  $E_M$  teórico e experimental das vigas de MLC e  $E_{Mteo}$  e  $f_{Mexp}$ , com o modelo de regressão linear.  
 \*\* Significativo ao nível de 5% de probabilidade.

Esses resultados indicam que o modelo de  $E_{Mteo}$  apresenta significância e pode ser utilizado para a estimativa da rigidez de vigas de MLC. Observa-se ainda que o processo de classificação das lâminas que compõem as vigas de MLC auxilia na qualidade final do produto, podendo assim, produzir vigas com classes de resistência que atendam as mais variadas necessidades de resistência e rigidez necessárias nos cálculos estruturais. Dessa forma, o uso de técnicas de avaliação não destrutiva da madeira apresenta-se como uma ferramenta complementar para o uso em modelos teóricos de resistência e rigidez de elementos estruturais de MLC.

De maneira geral, as flechas teóricas apresentaram concordância e proximidade em relação aos valores experimentais, sendo a viga 10 a que melhor ilustra essa indicação (Tabela 13). Somente para as vigas 5, 6 e 7 os valores experimentais foram superiores aos teóricos. Em média as flechas teóricas foram 2% superior às experimentais. Essa proximidade de valores pode ser observada conforme ilustram as Figuras 39 e 40, onde é apresentado o aumento da flecha com o incremento de carga aplicada até 4000 N.

Tabela 13. Relação teórico e experimental para flecha ( $\delta$ ).

Viga	$\delta$ (mm)		Relação Teo / Exp
	Teo	Exp	
1	0,78	0,74	1,06
2	0,89	0,86	1,03
3	0,92	0,85	1,08
4	0,98	0,94	1,05
5	1,00	1,06	0,94
6	1,04	1,17	0,89
7	1,02	1,06	0,96
8	1,12	1,00	1,12
9	1,22	1,13	1,08
10	1,35	1,34	1,01
<b>Média</b>	<b>1,03</b>	<b>1,02</b>	<b>1,02</b>
<b>Desvio Padrão</b>	<b>0,16</b>	<b>0,18</b>	<b>0,07</b>
<b>CV (%)</b>	<b>15,9</b>	<b>17,4</b>	<b>7,0</b>

Onde:  $\delta$  = flecha; Teo = teórico; Exp = experimental.

Não foi observada diferença significativa pela análise de variância entre as flechas teóricas e experimentais, ao nível de 5% de probabilidade, sendo a análise de regressão significativa ao nível de 5% de probabilidade (Tabelas 44 e 45, Apêndice C), conforme ilustra a Figura 41.

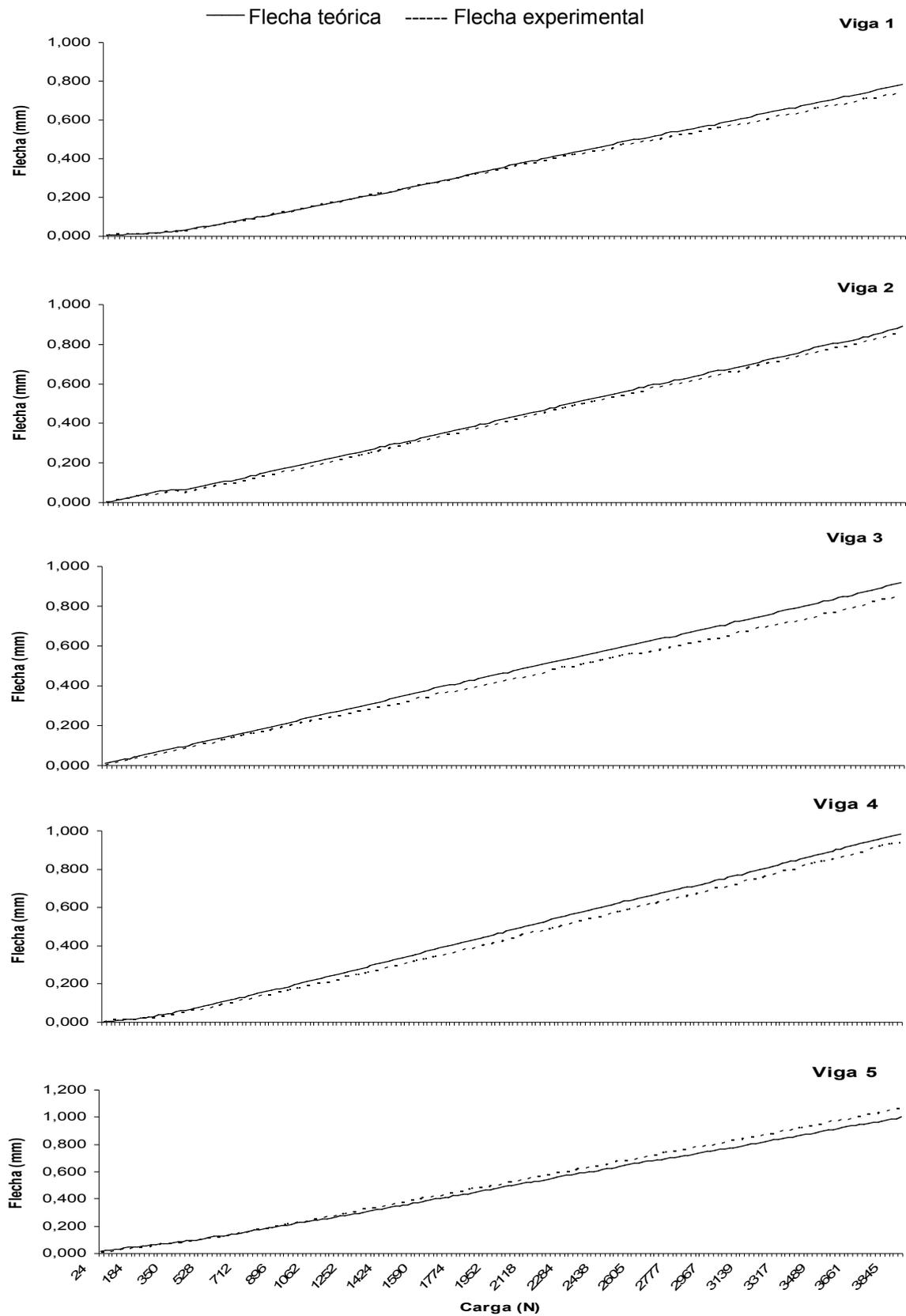


Figura 39. Comportamento teórico e experimental das flechas em flexão pura das vigas 1 a 5.

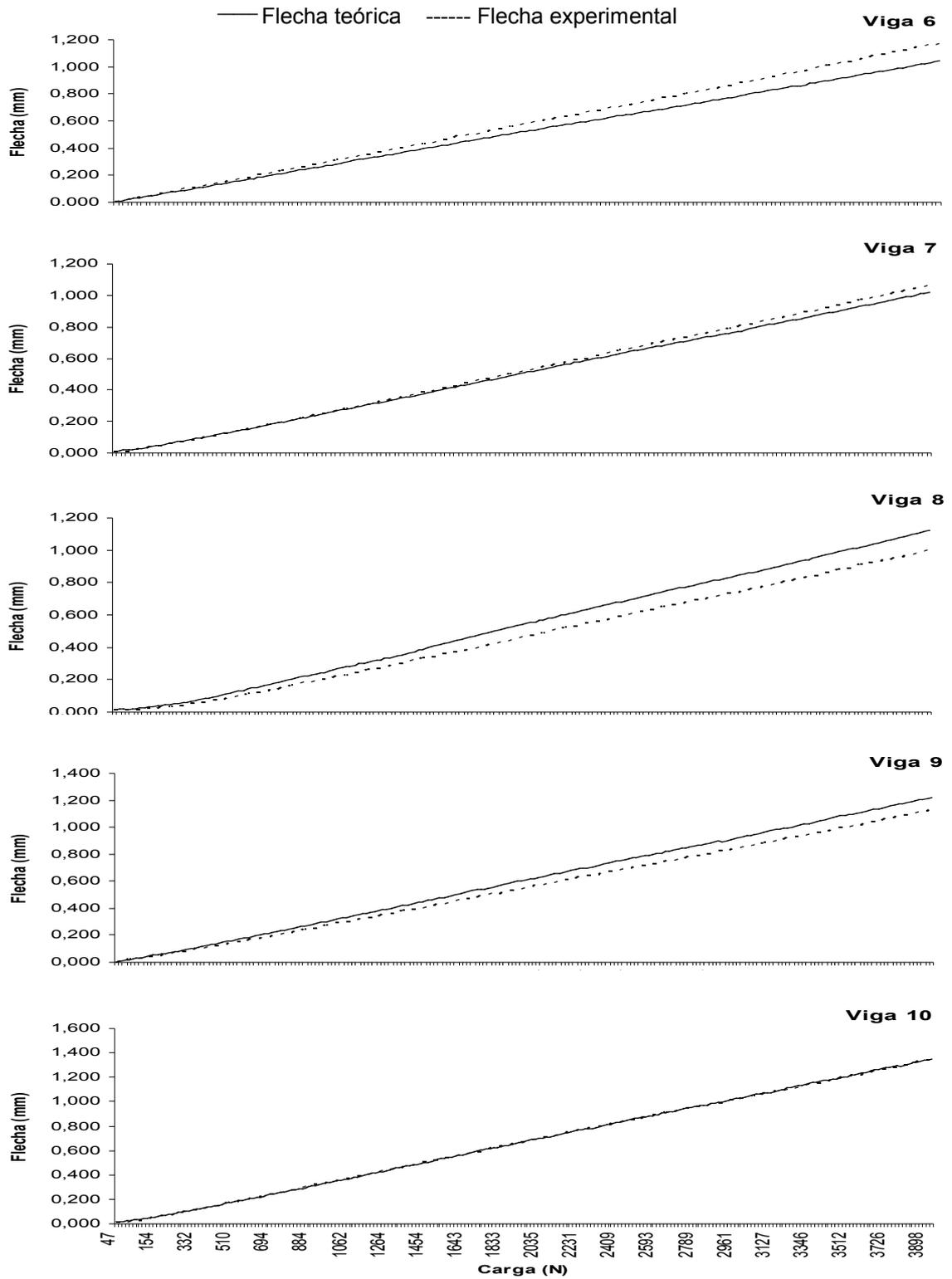


Figura 40. Comportamento teórico e experimental das flechas em flexão pura das vigas 6 a 10.

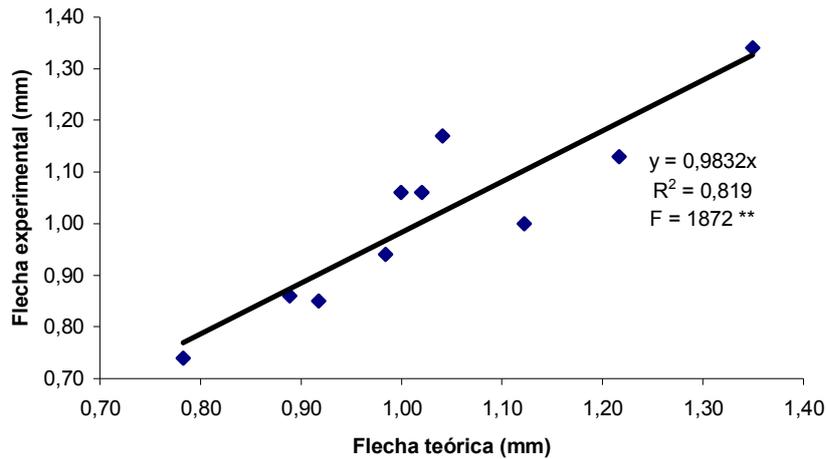


Figura 41. Análise de regressão entre a flecha teórica e experimental das vigas de MLC com o modelo de regressão linear.

\*\* Significativo ao nível de 5% de probabilidade.

Com o intuito de obter uma maior margem de segurança na estimativa dos valores de flecha experimental, uma equação linear significativa a 5% de probabilidade foi gerada ( $\delta_{exp} = 1,1132\delta_{teo}$ ), onde 95% dos valores experimentais encontram-se abaixo da reta da regressão gerada (Figura 42). Dessa forma, essa equação possui uma probabilidade de 95% de se obter valores de flecha experimental subestimadas. Com esta equação tem-se 95% de chance de os valores teóricos serem inferiores aos valores experimentais, que são os que ocorrerão quando a viga estiver em serviço. Inicialmente, as flechas experimentais foram subestimadas em 3,75%, e com o novo modelo proposto, o percentual passou para 11,3%.

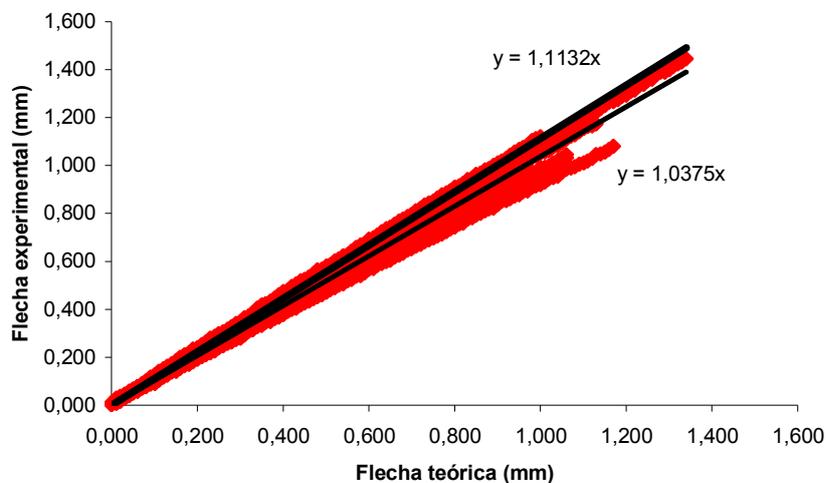


Figura 42. Regressão linear com 95% de segurança para flechas experimentais.

## 6. CONCLUSÃO

Observou-se que a qualidade e eficiência da adesão do adesivo resorcinol-formaldeído são influenciadas pela gramatura utilizada, existindo a tendência do aumento da resistência da junta colada com o aumento da gramatura do adesivo. Dessa forma, indica-se o uso da gramatura de 300 g/m<sup>2</sup>, a qual apresentou resultados satisfatórios e iguais estatisticamente à maior gramatura avaliada. O uso da inclinação do bisel igual a 1:10, apesar de apresentar maior desperdício de material, e certa dificuldade de execução, é indicada para o uso em vigas de MLC.

Todos os métodos não-destrutivos de avaliação da rigidez da madeira de louro vermelho são válidos para o uso no processo de classificação das lâminas de vigas de MLC. O método de vibração transversal apresentou uma correlação satisfatória com o método estático, utilizado no sistema de classificação das lâminas das vigas de MLC, sendo uma técnica confiável, podendo ser aplicada em processos de qualificação de vigas de MLC em um processo de produção industrial. Dessa forma, os resultados indicam que uso da técnica não destrutiva é válida para ambas as situações, tanto para a classificação das lâminas de MLC quanto para as vigas prontas.

A densidade aparente foi considerada uma propriedade física de fácil obtenção e que apresentou correlação significativa entre as propriedades mecânicas avaliadas, bem como as demais propriedades experimentais observadas nas vigas de MLC.

Os modelos teóricos utilizados apresentaram-se viáveis para a predição do  $E_M$ ,  $f_M$ ,  $M$  e para as flechas das vigas, não sendo observadas diferenças significativas entre o comportamento teórico / experimental dessas propriedades.

A madeira de louro vermelho é indicada para o uso em vigas de madeira laminada de boa qualidade, apresentando propriedades de resistência e de rigidez influenciadas pela rigidez das lâminas que as compõem.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADORNO, M. F. C.; GARCIA, J. N. Correlações lineares entre as principais características da madeira de clones de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*. **Scientia Forestalis**, n. 63, p. 44-56, jun, 2003.
- ALBUQUERQUE, C. E. C.; LATORRACA, J. V. F. Influência das características anatômicas da madeira na penetração e adesão de adesivos. **Floresta e Ambiente**, v. 7, n. 1, p. 158-166, jan./dez. 2000.
- AMERICAN SOCIETY for TESTING and MATERIALS. **ASTM D143 - Standard Test Methods for small clear specimens of timber**. Philadelphia, PA, 2000.
- AMERICAN SOCIETY for TESTING and MATERIALS. **ASTM D198-Standard Test Methods of Static Tests of Lumber in Structural Sizes**. Philadelphia, PA, 1997.
- AMERICAN SOCIETY for TESTING and MATERIALS. **ASTM D3737-Standard Test Method for Establishing Stresses for Structural Glue Laminated Timber (Glulam)**. Philadelphia, PA, 1996.
- AMERICAN SOCIETY for TESTING and MATERIALS. **ASTM D4761- Mechanical Properties of Lumber and Wood-Base Structural Material**. Philadelphia, PA, 1996.
- ARRUDA, H. A. C. **Influência da classificação das lâminas em vigas de MLC**. Dissertação (Mestrado). UFSC, 1995.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190 - Projeto de Estruturas de Madeira**. Rio de Janeiro, 1997.
- AZAMBUJA, M. A.; DIAS, A. A. Eficiência do Adesivo Poliuretano à base de óleo de mamona na colagem de emendas dentadas para as espécies Pinus E Eucalipto. In: x ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 2006. São Pedro - SP. **Anais...** São Pedro – SP: CEVEMAD: UNESP, (arquivo de computador), 2006.
- BENDTSEN, B.; SENFT, J. Mechanical and anatomical properties in individual growth rings of plantation-grown eastern Cottonwood and Loblolly Pine. **Wood and Fiber Science**, v. 18, n. 1, p. 21-38, 1986.
- BIBLIS, E. J. Laminated wood beams composed of two species. **Forest Products Journal**. v. 16, n. 7, p. 39-51, 1966.

- BIBLIS, E. J. Shear deflection of two species laminated wood beams. **Wood Science and Technology**. v. 1, p.231-238, 1967.
- BODIG, J.; JAYNE, B. A. **Mechanics of wood and wood composites**. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1993.
- BODIG, J. The process of NDE research for wood and wood composites. **The e-Journal of Nondestructive Testing**, v.6, n.03, mar. 2001. <http://www.ndt.net/index.html/>
- BORESI, A. P.; SIDEBOTTOM. **Advanced mechanics of materials**. 4 ed. John New Your: Wiley and Sons, 1985.
- BORTOLETTO JÚNIOR, G. Avaliação da qualidade da madeira de *Pinus merkusii* para produção de lâminas. **Scientia Forestalis**, v. 36, n. 78, p. 95-103, jun. 2008.
- BREYER, D. E.; FRIDLEY, K. J.; COBEEN, K. E. **Design of wood structures**. ASD. 4ª ed. New York: McGraw-Hill, 1998. 966p.
- BUCUR, V. **Acoustic of wood**. New York: CRC Press, 1995.
- BURDZIK, W. M. G. Finger joint strength. A laminated beam strength predictor? **South African Forestry Journal**, n. 178, p. 39-45, 1997.
- CALIL JUNIOR, C.; MINA, A. Vibração Transversal: um método eficiente para a classificação de peças estruturais de madeira. **Engenharia Agrícola**, Campina Grande - Pb, v. 7, n. 2, p. 335-338, 2003.
- CANDIAN, M. **Estudo da classificação não destrutiva de peças serradas de espécies cultivadas no Brasil para uso em estrutura**. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Sp, 2007. 154p.
- CARRASCO, E. V. M.; MOITA, G. F. Análise experimental e numérica do MEF de uma viga de madeira laminada colada. In: VI ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 1998. Florianópolis - SC. **Anais...** Vol. 1. Florianópolis – SC. 1998.
- CARREIRA, M. R. **Critérios para classificação visual de peças estruturais de *Pinus* sp.** Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Sp, 2003. 182p.
- CHUGG, W. A. **Glulam: the theory and practice of the manufacture of glued laminated timber structures**. London : E. Benn, 1964. 423p.
- CIRAD FORESTY DEPARTMENT. Tropix 5.0. Disponível em <[http://tropix.cirad.fr/index\\_gb.htm](http://tropix.cirad.fr/index_gb.htm)>. Acessado em: 17 de abril de 2008.
- COIADO, B., DIAS, A. A. **Avaliação da resistência à tração paralela às fibras de peças de madeira de *Pinus* Sp com dimensões estruturais e classificadas visualmente**.

- São Carlos, 2004. Relatório (Iniciação científica). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- COSTA TIENNE, D. L.; NASCIMENTO, A. M. Propriedades de resistência a flexão de vigas laminadas coladas de eucalipto citriodora (*Corymbia citriodora*). In: x ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 2006. São Pedro - SP. **Anais...** São Pedro – SP: CEVEMAD: UNESP, (arquivo de computador), 2006.
- DANSO, A. B., KOIZUMI, A., HIRAI, T. Bending strength and stiffness of glued butt joint glulam. **Forest Products Journal**, v. 54, n. 8, p. 40-44, 2004.
- DEL MENEZZI, C. H. S. ; SILVEIRA, R. R. ; SANTOS, A. P. DOS ; SOUZA, Mário Rabelo de ; CAMARGOS, José Arlete Alves . Evaluation of stress wave and colorimetric variables to predict flexural properties of Brazilian tropical woods. In: 10th World Conference on Timber Engineering, 2008, Miyazaki. **Proceedings...**, 2008. v. 1. p. 1-8.
- EVANS II, J. W.; SENFT, J. F.; GREEN, D. W. Juvenile wood effect in red alder: analysis of physical and mechanical data to delineate juvenile and mature wood zones. **Forest Products Journal**, v. 50, n. 7/8, p. 75-87, 2000.
- FAGUNDES, G., S. R.; SZÜCS, C. A. Composição racional de vigas de madeira laminada colada de Pinus. In: VI ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 1998. Florianópolis - SC. **Anais...** Vol. 1. Florianópolis – SC. 1998.
- FALK, R. H.; COLLING, F. Laminating effects in glued-laminated timber beams. **Journal of structural engineering**. v. 121, n. 12, p. 1857-1863, 1995.
- FIORELLI, J. Estudo teórico e experimental de vigas de madeira laminada colada reforçadas com fibra de vidro. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, SP, 2005. 108p.
- FREAS, A.D.; M.L. SELBO. **Fabrication and Design of Glued laminated Wood Members**. USDA Forest Products Laboratory. Technical Bulletin. Nº 1069, 1954.
- GABRIEL, M. S. C.; Desempenho físico-mecânico de painéis LVL de pinus tropicais da região de São Paulo Tese (Doutorado). Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, UNESP, SP, 2007.
- GERE, J. M. **Mecânica dos materiais**. São Paulo: Pioneira Thomsom Learning, 2003. 698p.

- GÓES, J. L. N. ; DIAS, A. A. . Avaliação experimental de vigas de madeira com seção composta. In: VIII ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 2002, Uberlândia-MG. **Anais...**, 2002.
- GROHMANN, S. Z.; SZÜCS, C. A. Vigas de madeira laminada colada com lâminas pré-classificadas de *Eucalyptus grandis*. In: VI ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 1998. Florianópolis - SC. **Anais...** Vol. 1. Florianópolis – SC. 1998.
- HARTSUIJKER, C.; WELLEMAN, J. W. **Engineering mechanics**. Vol 1: Equilibrium. Netherlands: Springer-verlag, 2006. 779p.
- HENRIQUES DE JESUS, J.M. (2000). **Estudo do adesivo poliuretano à base de mamona em madeira laminada colada**. São Carlos. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo.
- HERNANDEZ, R.; BENDER, D. A.; RICHBURG, B. A.; KLINE, K. S. Probabilistic modeling of glued-laminated timber beams. **Wood and Fiber Science**, v. 24, n. 3; p.294-306. 1992.
- HERNADEZ, R.; MOODY, R. C. Analysis of glulam timber beams with mechanically graded (E-rated) outer laminations. In: International wood engineering conference, 1996. New Orleans, LA. **Proceeding...** Boton Rouge, LA: Lousiana State University, 1996, v.1, p. 144-150.
- INSTITUTO DE PESQUISA TECNOLÓGICA DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Madeira: uso sustentável na construção civil**. IPT/SVMS/Sinduscom: São Paulo: IPT, 2003, 59p.
- INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS – IBAMA. **Madeiras da Amazônia**: descrição do lenho de 40 espécies ocorrentes na Floresta Nacional do Tapajós. Brasília: IBAMA-LPF, 1989. 156p.
- INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS – IBAMA. **Madeiras Tropicais Brasileiras**. Brasília: IBAMA-LPF, 1997. 152p.
- INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS – IBAMA. **Madeiras Tropicais Brasileiras**. 2 ed. Brasília: IBAMA-LPF, 2002. 152p.

- IWAKIRI, S. **Painéis de madeira reconstituída**. Curitiba: FUPEF, 2005. 247p.
- KRETSCHMANN, D. E. The influence of juvenile wood content on shear parallel, compression, and tension perpendicular to grain strength and mode I fracture toughness of loblolly pine at various ring orientation. **Forest Productions Journal**, v. 58, n. 7/8, p. 89-96, 2008.
- KOLLMANN, F. F. P.; CÔTÊ, A. C. **Principles of Wood Science and Technology**. Vol I. Solid Wood. New York: Springer-Verlag, 1968, 592p.
- KOLLMANN, F. F. P.; KUENZI, E. W.; STAM, A. J. **Principles of Wood Science and Technology**. Vol II. Wood based materials. New York: Springer-Verlag, 1975, 702p.
- LA ROVERE, H. L. Aplicação do método de homogeneização da seção a vigas de madeira laminada colada. In: VI ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 1998. Florianópolis - SC. **Anais...** Vol. 1. Florianópolis – SC. 1998.
- LEE, J. J.; PARK, J. S.; KIM, K. M.; OH, J. K. Prediction of bending properties for structural glulam using optimized distribution of knot characteristics and laminar MOE. **Journal of wood science**, v.51, p.640-647, 2005.
- LEE, J. J.; KIM, G. C. Study on the estimation of the strength properties of structural glued laminated timber I: determination of optimum MOE as input variable. **Journal of wood Science**. v. 46, n. 2, p. 115-121, 2000.
- LOBAO, M. S.; GOMES, A. Qualidade da adesão de madeira de eucalipto em corpos-de-prova colados em dois diferentes planos e densidades. **Cerne**, v. 12, n. 2, p. 194-200, abr./jun. 2006.
- MACEDO, A. N. **Fadiga em emendas dentadas em madeira laminada colada**. São Carlos, 2000. Tese (Doutorado) Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- MACEDO, A. N.; DIAS, A. A.; BARATA, T. Q. F. Madeiras Tropicais da Amazônia: Possibilidade de Aplicação em Madeira Laminada Colada. In: VII Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira, 2000, São Carlos-SP. VII Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira, 2000. p. 1-10.
- MATTHIESEN, J. A. Estudo das emendas biseladas em madeira laminada colada. In: VI ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 1998. Florianópolis - SC. **Anais...** Vol. 1. Florianópolis – SC. 1998.
- MELO, J. E. **Classes de tensões para nove espécies de madeiras brasileiras**. LPF - Série Técnica n° 17. Brasília: IBAMA/LPF, 1991.

- MELO, J. E.; SIQUEIRA, M. J. Correlação entre as propriedades físicas e mecânicas de madeiras da Amazônia. In: IV ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 1992. São Carlos. Anais... São Carlos: USP, EESC, SET, LaMEM, 1992. v. 1, p.67-76.
- METRIGUARD. **Field and lab equipment**. Catálogo de produtos. Pullman, 2007.
- MOODY, R. C.; BOHANNAN, B. **Flexural properties of glued-laminates souther pine beams with laminatios positioned by visual-stiffness criteria**. FPL 127. Madison: Forest Produtcs Laboratory, 1970.
- NASCIMENTO, A. M.; DELLA LUCIA, R. M.; VITAL, B. R. Colagem de emendas biseladas em madeira de *Pinus sp* e *Eucalyptys citriodora*. **Floresta e Ambiente**. v. 8, n. 1, p.44-51, 2001.
- NASCIMENTO, A. M.; DELLA LUCIA, R. M.; BAETA, F. C. Comportamento de vigas retas em MLC com emendas de topo e bisel – Parte I. **Floresta e Ambiente**. v. 9, n. 1, p.63-71, 2002.
- OHLSSON, S; PERSTORPER, M. Elastic wood properties from dynamic tests and computer modeling. **Journal of Structural Engineering**. v. 18, p.2677–2690, 1992.
- OLIVEIRA, F. G. R.; SALES, A. (2000). Propagação de ondas acústicas na madeira. In: ENCONTRO BRASILEIRO DE MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, VII, São Carlos, 2000. **Anais**. São Carlos, SP, 10 p.
- OLIVEIRA, F. R. G. **Estudo de propriedades mecânicas de dicotiledôneas por meio de ensaio não destrutivo utilizando equipamentos de ultra-som**. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Materiais). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Interunidades, São Carlos, SP, 2001, 55p.
- OLIVEIRA JÚNIOR, S. F.; AZAMBUJA, M. A.; DIAS, A. A. Análise da viabilidade de aplicação de adesivos alternativos em emenda dentada estrutural para espécie *Eucalyptus grandis*. In: x ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 2006. São Pedro - SP. **Anais...** São Pedro – SP: CEVEMAD: UNESP, (arquivo de computador), 2006.
- PEARSON, R. G. Compressive properties of clear and knotty Loblolly Pine juvenile wood. **Forest Productions Journal**, v. 38, n. 7/8, p. 15-22, 1988.
- PELLERIN, R. F.; ROSS, J. R. **Nondestructive evaluation of wood**. Madison: USDA, Forest Service, 2002.
- PETRAUSKI, A.; DELLA LUCIA, R. M. Desempenho de juntas coladas de *Eucalyptus grandis* em função de diferentes níveis de pressão, consumo de cola e número de

- faces de aplicação do adesivo. In: VI ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 1998. Florianópolis - SC. **Anais...** Vol. 1. Florianópolis – SC. 1998.
- PFEIL, W.; PFEIL, M. **Estruturas de madeira**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora – LTC, 2003.
- PIZZI, A. **Wood adhesives: chemistry and technology**. New York: Marcel Dekker, 1983. 432p.
- PIZZI, A.; SCHARFETTER, H.; KES, E. W. Adhesives and techniques open new possibilities for the wood processing industry. **Hols als Roh und Werkstoff**. (1981) v. 39; p85-89.
- PLASTER, O. B.; OLIVEIRA, J. T. S.; ABRAHÃO, C. P.; BRAZ, R. L. Comportamento de juntas coladas da madeira serrada de Eucalyptus sp. **Cerne**, V. 14, n. 3, p. 251-258, jul./set. 2008.
- PROPEZI, M.; PIZZI, A.; UZIELI, L. Comparative wet wood glueing performance of different types of glulam wood adhesives. **Hols als Roh und Werkstoff**. (2003) v. 61; p77-78.
- RIVER, B. H. Fracture of Adhesive-Bonded Wood Joints. In: PIZZI, A.; MITTAL, K.L. **Handbook of adhesive technology**. New York: Marcel Dekker, Inc.; 1994. Capítulo 9, 27p.
- ROCHA, R. R. **Avaliação não-destrutiva de madeiras para dormentes ferroviários**. 2003. 113 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2003.
- ROCCO LAHR, F. A. ; DIAS, F. M. . Estimativa de propriedades de resistência e rigidez da madeira através da densidade aparente. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, SP, Brasil, v. 65, p. 102-113, 2004.
- SANTOS<sup>a</sup>, A. M. L. **Avaliação teórica e experimental de vigas em “I” pré-fabricadas de madeira com flange de painéis de lâminas paralelas (LVL) e alma de painéis de partículas orientadas (OSB) e compensado**. Brasília, 2008, 79p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais). Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Florestal.
- SANTOS<sup>b</sup>, C. M. T. **Efeito da gramatura sobre a resistência ao cisalhamento da linha de cola para as madeiras de seru (*Allantoma lineata*) e marupá (*Simarouba amara*)**. Brasília, 2008, 40p. Trabalho Final. Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Florestal.

- SCANAVACA JUNIOR, L.; GARCIA, J. N. Determinação das propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Eucalyptus urophylla*. **Scientia Forestalis**, n. 65, p.120-129, jun. 2004.
- SHIELDS, J. **Adhesives handbook**. 3 ed. UK: Butter & Tanner, 1988. 358p.
- SMULSKI, S. **Engineered wood products**. A guide for specifiers, designers and users. PFS Research Foundation, Madison, WI, 1997.
- SKAGGS, T. D.; BENDER, D. A. Shear deflection of composite wood beams. **Wood and Fiber Science**. v. 27, n. 3, p.327-338, 1995.
- SZÜCS, C.A. **Aplicação estrutural da madeira sob a técnica do laminado colado**. Florianópolis, 1992. Notas de aula - Universidade Federal de Santa Catarina.
- TARGA, L. A.; BALLARIN, A. W.; BIAGGIONI, M. A. M. Avaliação do módulo de elasticidade da madeira com uso de método não-destrutivo de vibração transversal. **Engenharia agrícola**, Jaboticabal, v. 25, n°2, maio/agosto 2005. pg 291-299.
- UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. **Wood Handbook: Wood as Engineering material**. USDA: Washington, 1999. 473p.
- VITAL, B. R.; MACIEL, A. S.; DELLA LUCIA, R. M. Qualidade de juntas coladas com madeira oriunda de três regiões do tronco de *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus saligna* e *Pinus elliottii*. **Revista Árvore**, v. 30, n. 4, p.637-644, 2006.
- ZANGIÁCOMO, A. L. **Emprego de espécies tropicais alternativas na produção de elementos estruturais de madeira laminada colada**. São Carlos, 2003. 78p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- YANG, T; WANG, S. Y; LIN, C. J.; TSAI, M. J.; LIN, F.C. Effect of laminate configuration on the modulus of elasticity of glulam evaluated using a strain gauge method. **Journal of Wood Science**. v. 53, p. 31-39, 2007.

## **APÉNDICE**

## A. ANÁLISE ESTATÍSTICA

Tabela 14. Análise de variância para o  $E_M$  com a força aplicada na face tangencial e com a força aplicada na face radial, com 5% de significância.

### ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	761399,3501	1	761399,4	0,1887321	0,668625	4,351243
Dentro dos grupos	80685741,3	20	4034287			
Total	81447140,65	21				

Tabela 15. Análise de variância para o  $f_M$  com a força aplicada na face tangencial e com a força aplicada na face radial, com 5% de significância.

### ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,592023	1	0,592023	0,002066	0,964195	4,351243
Dentro dos grupos	5730,388	20	286,5194			
Total	5730,98	21				

Tabela 16. Análise de regressão entre  $E_M$  e DA com 5% de significância.

### ANOVA

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	1	43138353	43138353	22,52139	0,000123616
Resíduo	20	38308788	1915439		
Total	21	81447141			

Tabela 17. Análise de regressão entre  $f_M$  e DA com 5% de significância.

### ANOVA

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	1	2856,008	2856,008	19,86808	0,000241627
Resíduo	20	2874,972	143,7486		
Total	21	5730,98			

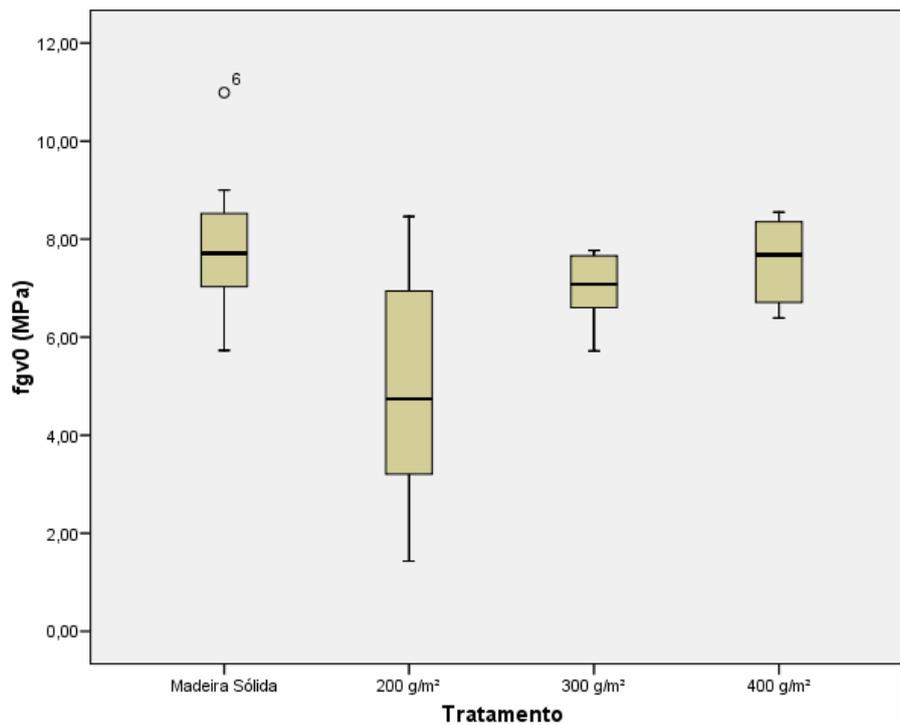


Figura 43. Análise de *outlier* para cisalhamento paralelo às fibras e cisalhamento na lâmina de cola.

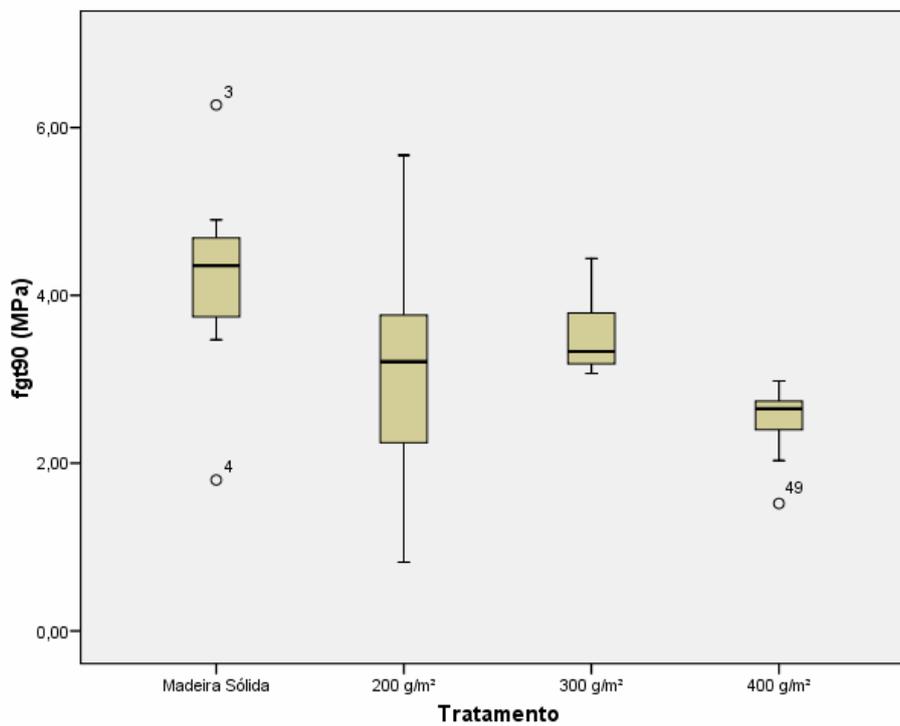


Figura 44. Análise de *outlier* para tração normal às fibras e tração normal à lâmina de cola.

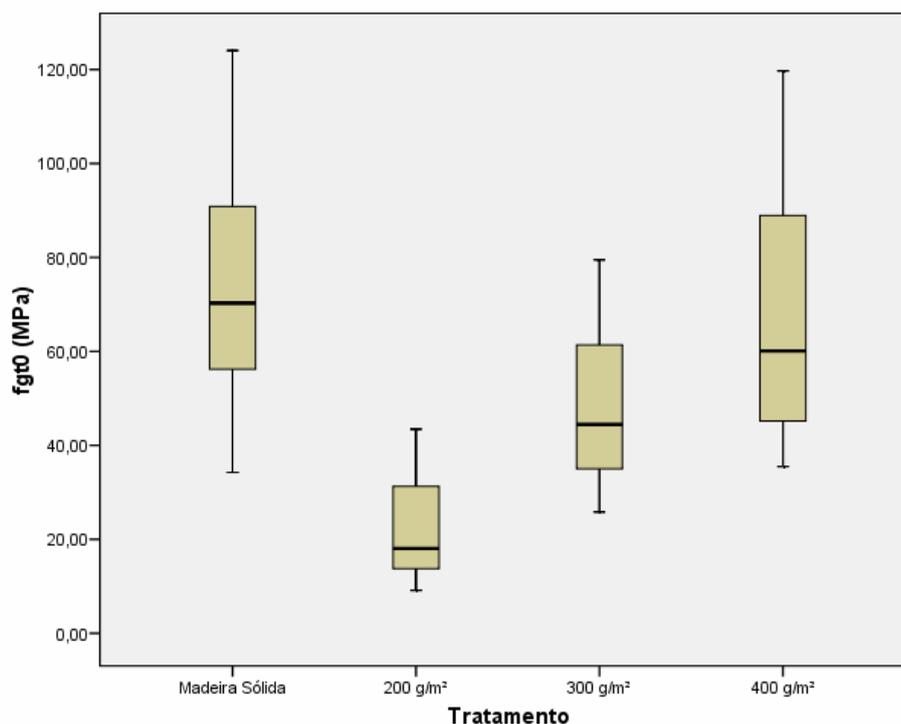


Figura 45. Análise de *outlier* para tração paralela às fibras e resistência de emendas biseladas à tração paralela às fibras.

Tabela 18. Resultados do ensaio de cisalhamento na lâmina de cola.

Amostra	fg,v0 (N/mm <sup>2</sup> )		
	200 g/m <sup>2</sup>	300 g/m <sup>2</sup>	400 g/m <sup>2</sup>
1	8,46	7,27	6,39
2	3,51	6,36	7,84
3	4,96	6,71	8,21
4	7,72	6,99	6,86
5	2,03	7,05	7,46
6	5,81	7,77	6,56
7	4,52	5,72	7,52
8	1,43	7,58	8,50
9	7,58	6,50	8,54
10	6,30	7,11	8,08
11	2,90	7,77	8,55
12	3,71	7,74	6,49
Média	4,91	7,05	7,58
Desvio Padrão	2,30	0,64	0,83
CV	46,91%	9,07%	10,97%

Onde: \* Outlier; CV = coeficiente de variação.

Tabela 19. Resultados do ensaio de tração normal à lâmina de cola.

Amostra	$f_{g,t90}$ (N/mm <sup>2</sup> )		
	200 g/m <sup>2</sup>	300 g/m <sup>2</sup>	400 g/m <sup>2</sup>
1	2,29	3,70	2,69
2	0,82	3,88	2,69
3	3,53	3,15	2,58
4	1,94	3,36	2,78
5	4,42	3,30	2,22
6	2,20	3,67	2,61
7	5,67	3,90	2,98
8	3,38	3,08	2,03
9	3,33	3,07	2,61
10	3,09	3,26	1,52 *
11	4,00	4,44	2,90
12	2,98	3,22	2,70
Média	3,14	3,50	2,62
Desvio Padrão	1,26	0,42	0,28
CV	40,12%	12,01%	10,52%

Onde: \* Outlier.; CV = coeficiente de variação.

Tabela 20. Resultado do ensaio de emendas biseladas em tração paralela às fibras.

Amostra	$f_{gt,90}$ (N/mm <sup>2</sup> )		
	200 g/m <sup>2</sup>	300 g/m <sup>2</sup>	400 g/m <sup>2</sup>
1	25,79	36,04	47,84
2	18,60	68,86	42,72
3	33,71	44,15	66,19
4	43,47	31,25	47,22
5	26,14	45,60	80,85
6	17,49	41,87	53,96
7	29,91	79,48	97,00
8	17,52	62,88	43,10
9	13,34	44,76	35,49
10	32,61	34,02	66,41
11	11,81	61,74	110,90
12	14,17	59,88	119,71
Média	23,71	50,88	67,62
Desv Pad	9,82	15,27	28,41
CV	41,43%	30,02%	42,01%

Onde CV = coeficiente de variação.

Tabela 21. Análise de variação para  $f_{gv,0}$ ,  $f_{gt90}$  e  $f_{gt0}$  com 5% de significância.

	<i>Fonte da variação</i>	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
$f_{gv,0}$	Entre grupos	2	47,979	23,989	11,231	0,000
	Dentro dos grupos	33	70,486	2,136		
	Total	35	118,465			
$f_{gt,90}$	Entre grupos	2	4,524	2,262	3,588	0,039
	Dentro dos grupos	32	20,177	0,631		
	Total	34	24,701			
$f_{gt,0}$	Entre grupos	2	11471,418	5735,709	13,590	0,000
	Dentro dos grupos	36	15193,819	422,051		
	Total	38	26665,237			

Tabela 22. Teste de Tukey para os ensaios de adesão com 5% de significância.

$f_{gv0}$	N	Nível de significância = 0,05	
		Grupo 1	Grupo 2
200 g/m <sup>2</sup>	12	4,9108	
300 g/m <sup>2</sup>	12		7,0475
400 g/m <sup>2</sup>	12		7,5833
$f_{gt90}$		Grupo 1	Grupo 2
400 g/m <sup>2</sup>	11	2,6173	
200 g/m <sup>2</sup>	12	3,1375	3,1375
300 g/m <sup>2</sup>	12		3,5025
$f_{gt0}$		Grupo 1	Grupo 2
200 g/m <sup>2</sup>	13	22,5931	
300 g/m <sup>2</sup>	13		48,9285
400 g/m <sup>2</sup>	13		64,1062

Tabela 23. Análise de regressão entre as gramatura para  $f_{gv,0}$ , com 5% de significância.

ANOVA

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	2	45,725	22,863	10,419	,000
Resíduo	32	70,217	2,194		
Total	34	115,942			

Tabela 24. Análise de regressão entre as gramatura para  $f_{gt,90}$ , com 5% de significância.

ANOVA

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	2	4,524	2,262	3,588	,039
Resíduo	32	20,177	,631		
Total	34	24,701			

Tabela 25. Análise de regressão entre as gramatura para  $f_{gt,0}$ , com 5% de significância.

ANOVA

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	2	45,725	22,863	10,419	,000
Resíduo	32	70,217	2,194		
Total	34	115,942			

## B. AVALIAÇÃO NÃO DESTRUTIVA DAS LÂMINAS DE MLC

### Análise de outliers

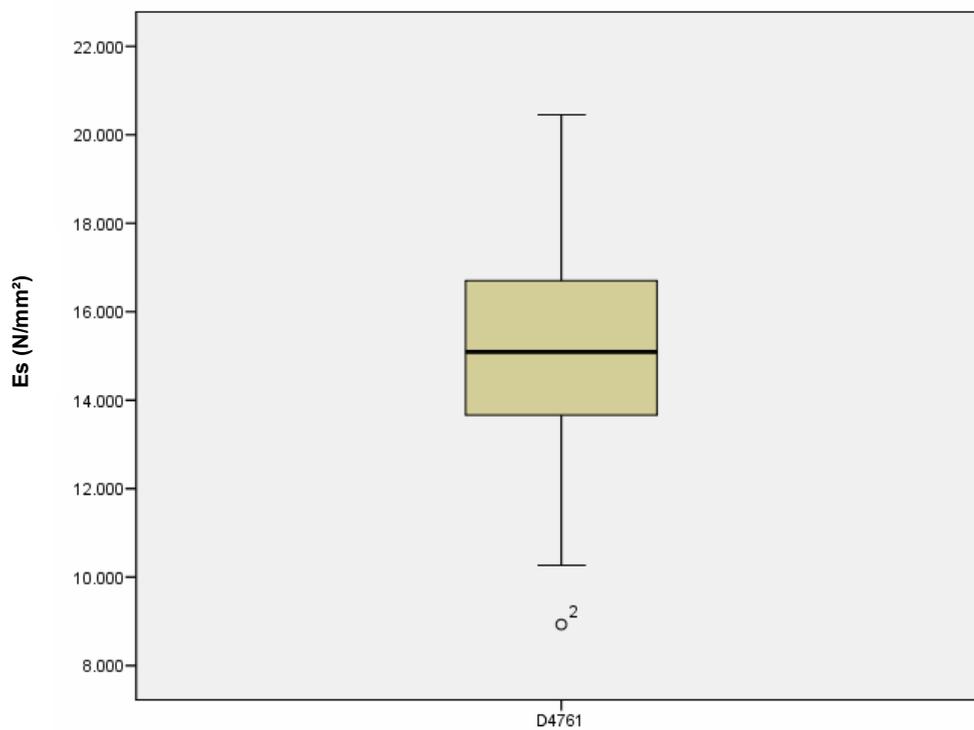


Figura 46. Análise de *outlier* para a avaliação das lâminas de acordo com a norma ASTM D 4761.

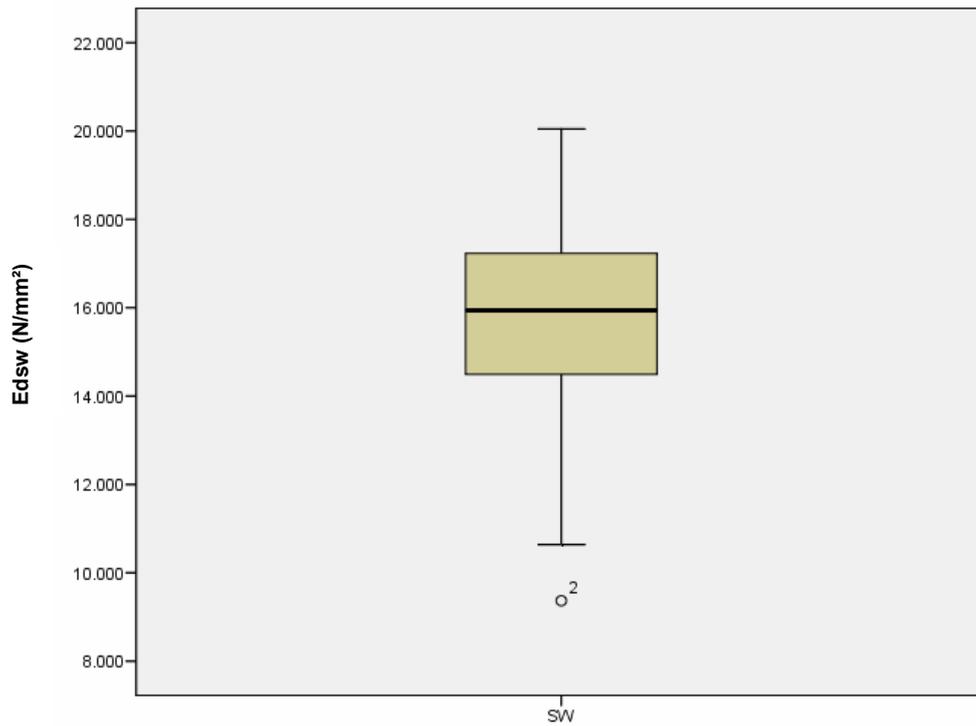


Figura 47. Análise de *outlier* para a avaliação das lâminas de acordo com o método de ondas de tensão.

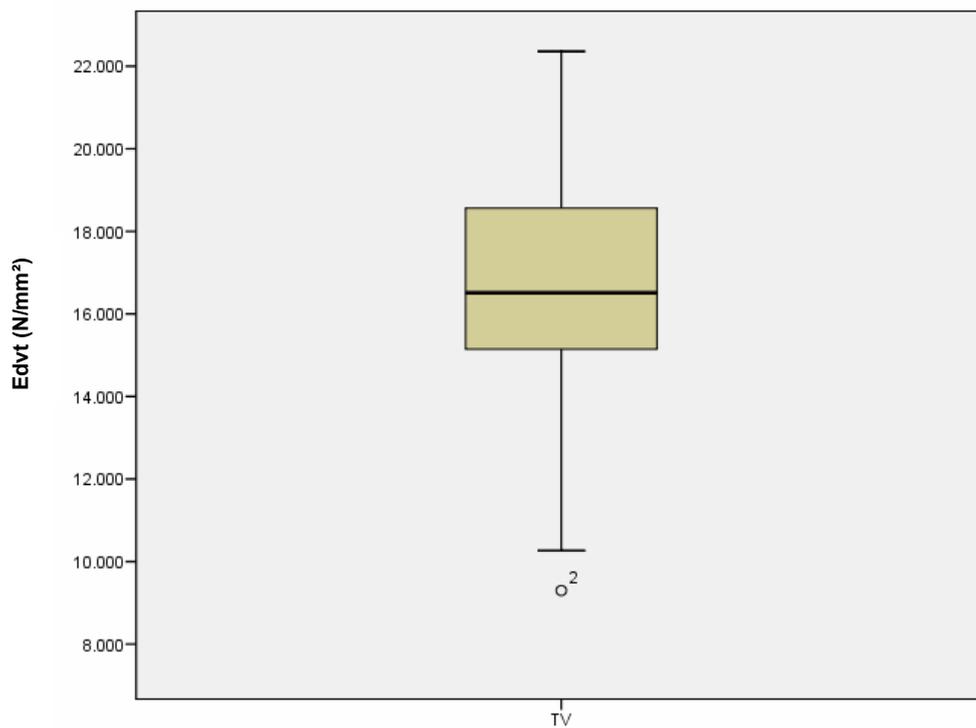


Figura 48. Análise de *outlier* para a avaliação das lâminas de acordo com o método de vibração transversal.

Tabela 26. Módulo de elasticidade das lâminas, ordenados de forma crescente.

$E_M$ (N/mm <sup>2</sup> )					
Lâmina	$E_{dsw}$	Lâmina	$E_s$	Lâmina	$E_{dvt}$
2	9367,3	2	8928,5	2	9300,0
10	10363,9	7	10265,7	5	10269,0
5	10637,2	46	10412,6	10	10528,0
7	10864,3	3	11007,3	7	10882,0
46	11512,4	14	11160,7	46	11400,0
3	11668,4	1	11940,2	3	12454,0
14	12067,8	5	12247,4	14	12795,5
9	12701,5	26	12691,1	36	14065,0
26	13083,9	9	12977,2	9	14314,0
1	13436,6	36	13075,2	43	14359,0
36	14093,9	43	13421,8	1	14376,7
29	14343,3	49	13629,5	44	14519,0
43	14445,0	44	13656,0	26	14676,0
49	14446,8	34	13674,2	29	15125,0
30	14536,3	13	13737,5	15	15170,0
15	14829,2	15	13848,5	34	15202,0
34	14875,7	29	13908,0	13	15208,0
35	14919,6	35	14069,1	49	15387,0
42	14978,4	30	14302,3	35	15548,0
31	15085,8	42	14420,0	30	15605,0
18	15213,3	18	14433,4	42	15628,0
33	15219,7	33	14541,0	23	15934,0
23	15384,6	25	14615,4	25	15969,0
6	15399,3	23	14861,5	33	16234,0
25	15474,2	32	15048,9	37	16253,0
13	15625,0	31	15092,4	18	16262,0
47	15941,8	37	15230,6	6	16510,0
8	16114,1	6	15358,2	31	16559,0
37	16160,1	8	15589,9	32	16591,0
12	16274,6	48	15783,6	8	17479,0
41	16318,3	12	15852,2	20	17495,0
16	16645,8	27	16254,1	48	17554,0
27	16707,5	41	16267,7	12	17674,0
11	16808,1	20	16353,1	41	17772,0
20	16858,7	11	16520,9	16	18025,0
40	16905,1	16	16563,4	39	18062,0
17	16968,2	38	16593,0	40	18092,0
48	16994,4	39	16650,4	11	18203,0
38	17226,6	17	16748,9	22	18510,0
24	17234,2	40	16783,6	17	18612,0
22	17515,7	22	17011,6	27	18691,0
39	17881,9	24	17076,6	38	18801,0
19	17968,0	19	17842,9	24	19047,0
44	18021,1	28	17883,4	19	19433,0

Continuação Tabela 26.

$E_M$ (N/mm <sup>2</sup> )					
Lâmina	$E_{dsw}$	Lâmina	$E_s$	Lâmina	$E_{dvt}$
28	18060,4	47	18496,4	47	19658,0
52	18082,1	45	18798,7	52	19983,0
32	18471,8	52	18901,8	28	20035,0
21	19125,8	21	19602,9	21	20103,0
51	19896,8	51	19708,7	45	20966,0
50	19962,7	4	20336,1	51	21433,0
4	20037,0	50	20455,0	4	21698,2
45	20048,6	10		50	22358,0

Tabela 27. Frequência relativa e acumulada para as classes de qualidade das lâminas de louro vermelho.

$E_s$

Classe	Frequência	Frequência relativa	Frequencia acumulada
10000	1	1,96%	1,96%
12000	5	9,80%	11,76%
14000	11	21,57%	33,33%
16000	14	27,45%	60,78%
18000	13	25,49%	86,27%
20000	5	9,80%	96,08%
22000	2	3,92%	100,00%
> 22000	0	0,00%	100,00%
Total	51	100%	

$E_{dsw}$

Classe	Frequência	Frequência relativa	% cumulativo
10000	1	1,96%	1,96%
12000	4	7,84%	9,80%
14000	4	7,84%	17,65%
16000	17	33,33%	50,98%
18000	16	31,37%	82,35%
20000	7	13,73%	96,08%
22000	2	3,92%	100,00%
> 22000	0	0,00%	100,00%
Total	51	100%	

$E_{dvt}$

Classe	Frequência	Frequência relativa	% cumulativo
10000	1	1,96%	1,96%
12000	3	5,88%	7,84%
14000	2	3,92%	11,76%
16000	16	31,37%	43,14%
18000	11	21,57%	64,71%
20000	12	23,53%	88,24%
22000	5	9,80%	98,04%
> 22000	1	1,96%	100,00%
Total	51	100%	

Tabela 28. Análise de regressão entre Es e Edsw.

ANOVA					
Fonte de Variação	gl	SQ	QM	F	F de significação
Regressão	1	1,2E+10	1,2E+10	11648,07	5,98061E-59
Resíduo	49	50382712	1028219		
Total	50	1,2E+10			

Tabela 29. Análise de regressão entre Es e Edvt.

ANOVA					
Fonte de Variação	gl	SQ	QM	F	F de significação
Regressão	1	1,2E+10	1,2E+10	36078,37	1,05E-70
Resíduo	49	16312565	332909,5		
Total	50	1,2E+10			

### C. PROPRIEDADES DE FLEXÃO DAS VIGAS DE MLC

Tabela 30. Análise de variância entre o  $E_{Mvt}$  e  $E_M$  experimental, com 5% de significância.

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	528389,6	1	528389,6	0,078001	0,783209	4,413873
Dentro dos grupos	1,22E+08	18	6774137			
Total	1,22E+08	19				

Tabela 31. Análise de variância entre o  $E_{Mvt}$  e  $f_M$  experimental, com 5% de significância.

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	1,19E+09	1	1,19E+09	401,3565	9,35E-14	4,413873
Dentro dos grupos	53458219	18	2969901			
Total	1,25E+09	19				

Tabela 32. Análise de regressão entre o  $E_{Mvt}$  e  $E_M$  experimental, com 5% de significância.

ANOVA					
	gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão		15806687558066875	44,61373		0,000155996
Resíduo		810412377	1301547		
Total		968479253			

Tabela 33. Análise de regressão entre o  $E_{Mvt}$  e  $f_M$  experimental, com 5% de significância.

ANOVA					
	gl	SQ	MQ	F	F de significação
Regressão		1 2133,351	2133,351	19,53987	0,002225
Resíduo		8 873,4353	109,1794		
Total		9 3006,787			

Tabela 34. Análise de variância entre o  $E_G$  e  $E_M$ , com 5% de significância.

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>QM</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	1	1455712	1455712	0,234299	0,634191	4,413873
Dentro dos grupos	18	1,12E+08	6213059			
Total	19	1,13E+08				

Tabela 35. Análise de regressão entre o  $E_G$  e  $E_M$ , com 5% de significância.

ANOVA					
	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>QM</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	1	2566434705	2566434705	2894,066612	1,58077E-11
Resíduo	9	7981126,711	886791,8568		
Total	10	2574415831			

Tabela 36. Análise de variância entre  $f_M$  teórico e experimental, com 5% de significância.

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	1573,014	1	1573,014	9,70503	0,06663	4,493998
Dentro dos grupos	2593,317	16	162,0823			
Total	4166,331	17				

Tabela 37. Análise de variância entre M teórico e experimental, com 5% de significância.

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	5,05E+11	1	5,05E+11	0,590777	0,453315	4,493998
Dentro dos grupos	1,37E+13	16	8,55E+11			
Total	1,42E+13	17				

Tabela 38. Análise de regressão entre o  $f_M$  teórico e experimental, com 5% de significância.

ANOVA					
	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	1	1304,388	1304,388	20,07565	0,002864264
Resíduo	7	454,8154	64,97363		
Total	8	1759,203			

Tabela 39. Análise de regressão entre o momento (M) teórico e experimental, com 5% de significância.

ANOVA					
	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	1	4,29E+12	4,29E+12	8,797	0,0020925687
Resíduo	7	3,42E+12	4,88E+11		
Total	8	7,71E+12			

Tabela 40. Análise de variância entre o  $E_M$  teórico e experimental, com 5% de significância.

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	4071230	1	4071230	0,539616	0,472054	4,413873
Dentro dos grupos	1,36E+08	18	7544685			
Total	1,4E+08	19				

Tabela 41. Análise de variância entre  $E_M$  teórico e  $f_M$  experimental, com 5% de significância.

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	1,39E+09	1	1,39E+09	371,3565	0,004553	4,413873
Dentro dos grupos	67328091	18	3740450			
Total	1,46E+09	19				

Tabela 42. Análise de regressão entre o  $E_M$  teórico e experimental, com 5% de significância.

ANOVA

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	1	60336909	60336909	59,28211	5,74643E-05
Resíduo	8	8142343	1017793		
Total	9	68479253			

Tabela 43. Análise de regressão entre o  $E_{Mteo}$  e  $f_M$  experimental, com 5% de significância.

ANOVA

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	1	1971,28	1971,28	15,2295	0,004529
Resíduo	8	1035,507	129,4383		
Total	9	3006,787			

Tabela 44. Análise de variância entre  $\delta$  teórico e experimental, com 5% de significância.

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	1	0,001468	0,001468	0,050667	0,824443	4,413873
Dentro dos grupos	18	0,52168	0,028982			
Total	19	0,523149				

Tabela 45. Análise de regressão entre  $\delta$  teórico e experimental, com 5% de significância.

ANOVA

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	1	10,53129	10,53129	1872,925	8,96339E-11
Resíduo	9	0,050606	0,005623		
Total	10	10,5819			