



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL**

**INFLUÊNCIA DE DIFERENTES COMBINAÇÕES DE LÂMINAS
DE *Eucalyptus saligna* E *Pinus taeda* EM
PAINÉIS ESTRUTURAIS LVL**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Marcos Theodoro Müller

Santa Maria, RS, Brasil

2009

**INFLUÊNCIA DE DIFERENTES COMBINAÇÕES DE LÂMINAS
DE *Eucalyptus saligna* E *Pinus taeda* EM
PAINÉIS ESTRUTURAIS LVL**

por

Marcos Theodoro Müller

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Área de Concentração em Tecnologia da Madeira, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Florestal**

Orientador: Prof. Clovis Roberto Haselein

Santa Maria, RS, Brasil

2009

M958i

Müller, Marcos Theodoro, 1959-

Influência de diferentes combinações de lâminas de *Eucalyptus saligna* e *Pinus taeda* em painéis estruturais LVL / por Marcos Theodoro Müller ; orientador Clovis Roberto Haselein. - Santa Maria, 2009.
f.164; il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, RS, 2009.

1. Engenharia florestal 2. Painel estrutural de madeira 3. Fenol-formaldeído 4. Laminated veneer lumber I. Haselein, Clovis Roberto, orient. II. Título

CDU: 674-419

Ficha catalográfica elaborada por
Luiz Marchiotti Fernandes – CRB 10/1160
Biblioteca Setorial do Centro de Ciências Rurais/UFSM

© 2009

“Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte”. O Autor.

End. Eletr.: marcothemuller@msn.com

Endereço: rua Santos Dumont, 685, Pelotas, RS, 96020-380

Fone: (0xx) 53 32256767

Centro de Ciências Rurais
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Dissertação de Mestrado

INFLUÊNCIA DE DIFERENTES COMBINAÇÕES DE LÂMINAS
DE *Eucalyptus saligna* E *Pinus taeda* EM
PAINÉIS ESTRUTURAIS LVL

elaborada por
Marcos Theodoro Müller

como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Florestal

COMISSÃO EXAMINADORA:

Clovis Roberto Haselein, Dr.
(Presidente/Orientador)

Miguel Antão Durlo, Dr. (UFSM)

Darci Alberto Gatto, Dr. (UFPEl)

Santa Maria, 29 de maio de 2009.

Às minhas filhas, Juliana e Vitória,
dedico este trabalho.

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal da Universidade Federal de Santa Maria (PPGEF-UFSM) pela oportunidade e confiança.

Ao Professor Clovis Roberto Haselein pela oportunidade, orientação, confiança e paciência; também por suas demonstrações de conduta, objetividade e segurança no decorrer de aulas e trabalhos, que levarei como exemplo para a docência.

Ao Professor Elio José Santini pela coorientação, apoio e presteza.

Aos Professores Paulo Renato Schneider, César Augusto Finger, Miguel Antão Durlo e Solon Jonas Longhi, sempre disponíveis e dedicados.

Ao Professor Darci Alberto Gatto da Universidade Federal de Pelotas (UFPel), pela amizade, incentivo e por acreditar em minha capacidade para ingresso no programa de mestrado. À Faculdade de Engenharia Agrícola (FEA) da Universidade Federal de Pelotas (UFPel), em especial aos professores Wolmer Brod Peres (diretor) e José Luiz Rosskoff (chefe do departamento), pelo apoio e compreensão.

À secretária do PPGEF da UFSM, Cerlene Machado (Tita), sempre disponível, compreensiva e eficiente. Aos funcionários da UFSM da área de tecnologia da madeira, Fabiana Ratzlaff, Nelson Castro e, em especial, a Tarso Michelotti, por sua contribuição na colagem dos painéis. Aos colegas de pós-graduação (Daniela Lilge, Dalva Pauleski, Rômulo Trevisan, Rafael Beltrame, Karina Modes e Thiago Cunha) e ao amigo Leandro Calegari (UFV). Ao colega e grande parceiro Dane Block Araldi, atencioso amigo e conselheiro.

De forma muito especial, meu agradecimento fraterno aos colegas Diego Martins Stangerlin e Rafael Rodolfo de Melo; mais que amigos, fiéis escudeiros e companheiros de todos os momentos desta jornada.

À empresa Hexion Química Ind. e Com. Ltda por disponibilizar o adesivo Cascophen HL-2080 gratuitamente para a pesquisa. Às empresas Laminadora Centenário Ltda e Martin Laminados de Madeira Ltda, pela produção das lâminas. Aos amigos Celso Ferreira e Ilmar Jeannes pela disponibilidade de maquinário.

Finalmente, com muito afeto, meu profundo agradecimento a Carla Gonçalves Rodrigues, por seu amor e por ter acreditado ser possível, assim despertando a motivação e a confiança necessárias para meu reingresso à vida acadêmica.

“A alegria está na luta, na tentativa,
no sofrimento envolvido,
não na vitória propriamente dita.”

(Mahatma Gandhi)

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal
Universidade Federal de Santa Maria

INFLUÊNCIA DE DIFERENTES COMBINAÇÕES DE LÂMINAS DE *Eucalyptus saligna* E *Pinus taeda* EM PAINÉIS ESTRUTURAIS LVL

AUTOR: MARCOS THEODORO MÜLLER

ORIENTADOR: CLOVIS ROBERTO HASELEIN

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 29 de maio de 2009.

Investigou-se a influência do posicionamento de lâminas de madeira de *Eucalyptus saligna* e *Pinus taeda* nas camadas componentes de painéis estruturais *Laminated Veneer Lumber* (LVL). Os painéis foram manufacturados em seis diferentes combinações de cinco lâminas de 3,2 mm de espessura, coladas com adesivo fenol-formaldeído, resultando em tratamentos constituídos de madeira de uma mesma espécie e outros com mistura de madeira das duas espécies. A avaliação das combinações propostas foi realizada mediante a caracterização de propriedades físicas (teor de umidade, massa específica, absorção de água, inchamento em espessura e expansão volumétrica) e propriedades mecânicas, verificadas em ensaios de flexão estática *flatwise* e *edgewise* (módulo de elasticidade, tensão no limite proporcional e módulo de ruptura). A qualidade da colagem foi avaliada por meio da resistência ao cisalhamento na linha de cola por ensaio de compressão e do percentual de falha na madeira. Foram testadas colagens de madeira de mesma espécie e entre madeiras das duas espécies estudadas. Os resultados obtidos indicaram que, na maior parte das vezes, os diferentes posicionamentos das lâminas de maior massa específica (nas camadas externas, intermediárias e de miolo) influíram nas propriedades mecânicas dos painéis. A influência constatada mostrou-se variada, em especial para MOE e MOR, quando comparados os valores para as posições de ensaio *flatwise* e *edgewise*. Em determinadas posições, nas camadas das composições LVL, a presença de lâminas de eucalipto resultou em aumentos de rigidez e resistência. Em cisalhamento a seco, as resistências das juntas se mostraram equivalentes; entretanto, após fervura, as juntas entre lâminas de eucalipto apresentaram maior resistência. Os percentuais de falha na madeira foram superiores a 80% (entre lâminas de eucalipto) e a 90% (entre lâminas de pinus e em juntas mistas) e se mantiveram estáveis após a fervura, indicando boa qualidade de adesão para todas as colagens testadas. Entretanto, a colagem entre eucalipto e pinus mostrou-se mais confiável que a colagem entre lâminas de eucalipto. Contudo, os tratamentos formados por lâminas intercaladas de eucalipto e pinus apresentaram uma melhor combinação de performance e confiabilidade para as propriedades de rigidez, resistência e aderência.

Palavras-chave: laminated veneer lumber, painel estrutural de madeira, fenol-formaldeído.

ABSTRACT

Master's Thesis
Master's Degree Program in Forest Engineering
Federal University of Santa Maria

THE INFLUENCE OF DIFFERENT COMBINATIONS OF *Eucalyptus saligna* AND *Pinus taeda* VENEERS IN LVL STRUCTURAL PANELS

AUTHOR: MARCOS THEODORO MÜLLER

ADVISOR: CLOVIS ROBERTO HASELEIN

Date and place of defence: Santa Maria, May 29, 2009.

This research aimed at investigating the influence of the positioning of *Eucalyptus saligna* and *Pinus taeda* wood veneers on the layers composing the Laminated Veneer Lumber (LVL) structural panels. The panels were manufactured in six different combinations of five veneers of 3,2 mm, glued with phenol-formaldehyde, resulting in treatments constituted of wood of the same species or with a composition of the two wood types. The evaluation of the proposed combinations was performed under the characterization of physical properties (moisture content, density, water absorption, thickness swelling and volumetric expansion) and mechanical properties verified in flatwise and edgewise static bending (modulus of elasticity, stress at the proportional limit and modulus of rupture). The quality of the adhesive wood bonding was evaluated through the glue line shear strength by compression loading and the percentage of wood failure. Wood bonding tests were done with wood of the same species and wood of two studied types. The results obtained indicated that, in most situations, the different positionings of the veneers with larger density (in the outer, intermediate and inner layers) influenced the mechanical properties of the panels. The influence detected was varied, especially for MOE and MOR when comparing the flatwise and edgewise experimented positions. In certain positions, in the layers of the LVL compositions, the presence of eucalypt veneers resulted in stiffness and strength increases. In dry shear the resistances of the joints were shown to be equivalent; after boiling, the joints in eucalypt veneers presented larger strength. The percentage of wood failure was above 80% (in eucalypt veneers) and above 90% (in pine and mixed veneers) and maintained stable after boiling, indicating good gluing quality for all the tested wood bondings. However, it was verified that the adhesive wood bonding of eucalypt and pine was shown more reliable than the bonding between eucalypt veneers. Therefore, the treatments formed by interposed veneers of eucalypt and pine presented a better combination of performance and reliability for the properties of stiffness, strength and adherence.

Keywords: laminated veneer lumber, structural wood panel, phenol-formaldehyde.

LISTA DE TABELAS

TABELA 1. Proporção dos ingredientes na composição final do adesivo.....	63
TABELA 2. Parâmetros dos processos de colagem e prensagem.....	65
TABELA 3. Ensaio, normas, quantidade por painel e dimensões dos corpos-de-prova.	67
TABELA 4. Massa específica e massa específica básica das lâminas.	82
TABELA 5. Distribuição de freqüência das lâminas de eucalipto por faixa de classificação em relação à MEe média.	85
TABELA 6. Distribuição de freqüência das lâminas de pinus por faixa de classificação em relação à MEe média.	85
TABELA 7. Distribuição de freqüência das lâminas de eucalipto classificadas visualmente, por faixa de MEe.	86
TABELA 8. Distribuição de freqüência das lâminas de pinus classificadas visualmente, por faixa de MEe.	86
TABELA 9. Composições das camadas do tratamento LVL1 por MEe.....	87
TABELA 10. Composições das camadas do tratamento LVL2 por MEe.....	87
TABELA 11. Composições das camadas do tratamento LVL3 por MEe.....	87
TABELA 12. Composições das camadas do tratamento LVL4 por MEe.....	88
TABELA 13. Composições das camadas do tratamento LVL5 por MEe.....	88
TABELA 14. Composições das camadas do tratamento LVL6 por MEe.....	88
TABELA 15. MEe por tratamento LVL; teórica, anterior à densificação dos painéis.	89
TABELA 16. Teor de umidade e massa específica dos painéis LVL.....	91
TABELA 17. Valores médio, mínimo e máximo de MEe, desvio padrão e comparação das médias dos tratamentos.....	92
TABELA 18. MEe por tratamento LVL, antes e após a densificação dos painéis, e o percentual de aumento dessa propriedade.....	94
TABELA 19. Resultados dos ensaios de flexão estática: módulo de elasticidade (MOE), tensão no limite proporcional (TLP) e módulo de ruptura (MOR); valores das médias na posição <i>flatwise</i>	97
TABELA 20. Valores médio, mínimo e máximo de MOE, desvio padrão e comparação das médias dos tratamentos.....	98

TABELA 21. Valores médio, mínimo e máximo de MOR, desvio padrão e comparação das médias dos tratamentos.....	100
TABELA 22. Valores médio, mínimo e máximo de TLP, desvio padrão e comparação das médias dos tratamentos	102
TABELA 23. Resultados de MEe, MOE, MOR e TLP em seqüência decrescente, para flexão estática na posição <i>flatwise</i>	103
TABELA 24. Resultados dos ensaios de flexão estática: módulo de elasticidade (MOE), tensão no limite proporcional (TLP) e módulo de ruptura (MOR); valores das médias na posição <i>edgewise</i>	109
TABELA 25. Valores médio, mínimo e máximo de MOE, desvio padrão e comparação das médias dos tratamentos.....	110
TABELA 26. Valores médio, mínimo e máximo de MOR, desvio padrão e comparação das médias dos tratamentos.....	113
TABELA 27. Valores médio, mínimo e máximo de TLP, desvio padrão e comparação das médias dos tratamentos	115
TABELA 28. Resultados de MEe, MOE, MOR e TLP em seqüência decrescente, para flexão estática na posição <i>edgewise</i>	117
TABELA 29. Médias de MOE e MOR para as posições <i>flatwise</i> e <i>edgewise</i> , diferenças de valores e percentuais das diferenças (base <i>edgewise</i>).	123
TABELA 30. Absorção de água por tratamento	126
TABELA 31. Inchamento em espessura por tratamento	130
TABELA 32. Expansão volumétrica por tratamento	134
TABELA 33. Resistência ao cisalhamento na linha de cola e falha na madeira, ensaio a seco	137
TABELA 34. Resistência ao cisalhamento na linha de cola e falha na madeira, ensaio após fervura.....	143

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1. Pilha de lâminas de eucalipto no interior da câmara climatizada.....	57
FIGURA 2. Delineamento experimental.	60
FIGURA 3. Vista lateral de corpos-de-prova dos tratamentos LVL	66
FIGURA 4. Corpos-de-prova dos tratamentos LVL.....	68
FIGURA 5. Modelo de corte dos painéis para confecção dos corpos-de-prova.....	68
FIGURA 6. Posição <i>flatwise</i> ; corpo-de-prova em ensaio de flexão estática com carga aplicada no centro do vão e vista em corte transversal ampliada..	70
FIGURA 7. Máquina Universal de Ensaios preparada para ensaio de flexão estática.	72
FIGURA 8. Corpo-de-prova em teste de flexão estática na posição <i>flatwise</i>	72
FIGURA 9. Posição <i>edgewise</i> ; corpo-de-prova em ensaio de flexão estática com carga aplicada no centro do vão e vista em corte transversal ampliada	73
FIGURA 10. Corpos-de-prova armazenados na câmara climatizada.....	74
FIGURA 11. Corpo-de-prova em flexão estática na posição <i>edgewise</i>	75
FIGURA 12. Corpo-de-prova para cisalhamento na linha de cola por ensaio de compressão, proposto pela norma ASTM D 905 – (1998)	78
FIGURA 13. Corpo-de-prova em cisalhamento na linha de cola a seco, por ensaio de compressão.....	80
FIGURA 14. Corpo-de-prova em cisalhamento na linha de cola após fervura, por ensaio de compressão.	81
FIGURA 15. Dispersão de valores de MEe para 114 lâminas de eucalipto.	83
FIGURA 16. Dispersão de valores de MEe para 147 lâminas de pinus.	83
FIGURA 17. Histograma de freqüência das lâminas de eucalipto.....	84
FIGURA 18. Histograma de freqüência das lâminas de pinus.	84
FIGURA 19. Variância dos valores de MEe por tratamento, antes da prensagem....	90
FIGURA 20. Distribuição dos valores de MEe por tratamento, antes da prensagem.	90
FIGURA 21. Distribuição dos valores de MEe por tratamento, depois da prensagem.	92
FIGURA 22. Média de MEe por tratamento, depois da prensagem.	93
FIGURA 23. Médias de MEe por tratamento, antes e depois da prensagem.....	94

FIGURA 24. Percentual de aumento de MEe por tratamento, depois da prensagem	94
FIGURA 25. Distribuição dos valores de MOE por tratamento, na posição <i>flatwise</i> .	98
FIGURA 26. Média de MOE por tratamento; <i>flatwise</i>	99
FIGURA 27. Distribuição dos valores de MOR por tratamento, na posição <i>flatwise</i>	100
FIGURA 28. Média de MOR por tratamento; <i>flatwise</i>	101
FIGURA 29. Distribuição dos valores de TLP por tratamento, na posição <i>flatwise</i> .	101
FIGURA 30. Média de TLP por tratamento; <i>flatwise</i>	102
FIGURA 31. Relação MOE x MEe para 71 cps ensaiados em flexão estática na posição <i>flatwise</i>	106
FIGURA 32. Relação MOR x MEe para 71 cps ensaiados em flexão estática na posição <i>flatwise</i>	107
FIGURA 33. Relação MOR x MOE para 71 cps ensaiados em flexão estática na posição <i>flatwise</i>	108
FIGURA 34. Distribuição dos valores de MOE por tratamento, na posição <i>edgewise</i>	110
FIGURA 35. Média de MOE por tratamento; <i>edgewise</i>	111
FIGURA 36. Distribuição dos valores de MOR por tratamento, na posição <i>edgewise</i>	112
FIGURA 37. Média de MOR por tratamento; <i>edgewise</i>	113
FIGURA 38. Distribuição dos valores de TLP por tratamento, na posição <i>edgewise</i>	115
FIGURA 39. Média de TLP por tratamento; <i>edgewise</i>	116
FIGURA 40. Relação MOE x MEe para 72 cps ensaiados em flexão estática na posição <i>edgewise</i>	120
FIGURA 41. Relação MOR x MEe para 72 cps ensaiados em flexão estática na posição <i>edgewise</i>	121
FIGURA 42. Relação MOR x MOE para 72 cps ensaiados em flexão estática na posição <i>edgewise</i>	122
FIGURA 43. Distribuição dos percentuais de absorção de água em 2 horas (AA2h) por tratamento.....	125
FIGURA 44. Distribuição dos percentuais de absorção de água em 24 horas (AA24h) por tratamento.....	125

FIGURA 45. Médias de absorção de água, em 2 horas (AA2h) e em 24 horas (AA24h), por tratamento.....	126
FIGURA 46. Composição das médias de absorção de água, em 2 horas (AA2h) e no período adicional de 22 horas (AA22h), por tratamento.....	127
FIGURA 47. Distribuição dos percentuais de inchamento em espessura em 2 horas (IE2h) por tratamento.....	129
FIGURA 48. Distribuição dos percentuais de inchamento em espessura em 24 horas (IE24h) por tratamento.....	129
FIGURA 49. Médias de inchamento em espessura, em 2 horas (IE2h) e em 24 horas (IE24h), por tratamento.....	130
FIGURA 50. Composição das médias de inchamento em espessura, em 2 horas (IE2h) e no período adicional de 22 horas (IE22h), por tratamento.....	131
FIGURA 51. Distribuição dos percentuais de expansão volumétrica em 2 horas (EV2h) por tratamento.....	133
FIGURA 52. Distribuição dos percentuais de expansão volumétrica em 24 horas (EV24h) por tratamento.....	133
FIGURA 53. Médias de expansão volumétrica, em 2 horas (EV2h) e em 24 horas (EV24h), por tratamento.....	134
FIGURA 54. Composição das médias de expansão volumétrica, em 2 horas (EV2h) e no período adicional de 22 horas (EV22h), por tratamento.....	135
FIGURA 55. Distribuição dos valores de tensão de ruptura em cisalhamento na linha de cola, ensaio a seco, por tratamento.....	136
FIGURA 56. Média de tensão de ruptura em cisalhamento na linha de cola, ensaio a seco, por tratamento.....	137
FIGURA 57. Percentual médio de falha na madeira em cisalhamento na linha de cola, ensaio a seco, por tratamento.....	141
FIGURA 58. Distribuição dos valores de tensão de ruptura em cisalhamento na linha de cola, ensaio após fervura, por tratamento.....	142
FIGURA 59. Média de tensão de ruptura em cisalhamento na linha de cola, ensaio após fervura, por tratamento.....	143
FIGURA 60. Médias de tensão de ruptura em cisalhamento na linha de cola, a seco e após fervura, por tratamento.....	144
FIGURA 61. Sobreposição das médias de tensão de ruptura em cisalhamento na linha de cola, a seco e após fervura, por tratamento.....	144

FIGURA 62. Percentual médio de falha na madeira em cisalhamento na linha de cola, ensaio após fervura, por tratamento.	146
FIGURA 63. Percentuais médios de falha na madeira em cisalhamento na linha de cola, a seco e após fervura, por tratamento	147

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	18
2 OBJETIVOS	22
2.1 Objetivo geral	22
2.2 Objetivos específicos.....	22
3 REVISÃO DE LITERATURA	23
3.1 A madeira do <i>Pinus taeda</i> L.	23
3.2 A madeira do <i>Eucalyptus saligna</i> Smith	29
3.3 Conceito de LVL; nomenclaturas e comparações	36
3.4 Histórico.....	38
3.5 Processos de produção.....	39
3.6 Laminação.....	41
3.7 Secagem de lâminas	44
3.8 Classificação de lâminas e estratégias de montagem.....	45
3.9 Colagem e prensagem	47
4 MATERIAL E MÉTODOS	56
4.1 Matéria-prima.....	56
4.2 Secagem das lâminas	56
4.3 Teor de umidade e massa específica das lâminas.....	58
4.4 Delineamento experimental.....	59
4.5 Classificação e distribuição das lâminas.....	60
4.6 Preparo e aplicação do adesivo.....	62
4.7 Prensagem a frio	64
4.8 Prensagem a quente	64
4.9 Normas utilizadas e confecção dos corpos-de-prova.....	66
4.10 Teor de umidade dos painéis LVL	69
4.11 Massa específica dos painéis LVL.....	69
4.12 Flexão estática na posição <i>flatwise</i>	70
4.13 Flexão estática na posição <i>edgewise</i>	73
4.14 Absorção de água, inchamento em espessura e expansão volumétrica ...	75
4.15 Cisalhamento na linha de cola.....	77
4.15.1 Cisalhamento na linha de cola a seco.....	79
4.15.2 Cisalhamento na linha de cola após fervura.....	80

4.16 Análise estatística	81
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	82
5.1 Massa específica das lâminas	82
5.2 Teor de umidade e massa específica dos painéis LVL	91
5.3 Flexão estática dos painéis LVL na posição <i>flatwise</i>	97
5.3.1 Módulo de elasticidade (MOE)	98
5.3.2 Módulo de ruptura (MOR).....	99
5.3.3 Tensão no limite proporcional (TLP)	101
5.3.4 Análise dos resultados de flexão estática.....	103
5.3.5 Relacionamento entre MOE e MEe	106
5.3.6 Relacionamento entre MOR e MEe.....	107
5.3.7 Relacionamento entre MOR e MOE.....	108
5.4 Flexão estática dos painéis LVL na posição <i>edgewise</i>	109
5.4.1 Módulo de elasticidade (MOE)	110
5.4.2 Módulo de ruptura (MOR).....	112
5.4.3 Tensão no limite proporcional (TLP)	114
5.4.4 Análise dos resultados de flexão estática.....	116
5.4.5 Relacionamento entre MOE e MEe	120
5.4.6 Relacionamento entre MOR e MEe.....	121
5.4.7 Relacionamento entre MOR e MOE.....	122
5.5 Análise comparativa de MOE e MOR em flexão estática nas posições <i>flatwise</i> e <i>edgewise</i>	123
5.6 Absorção de água dos painéis LVL	125
5.7 Inchamento em espessura dos painéis LVL	129
5.8 Expansão volumétrica dos painéis LVL	132
5.9 Cisalhamento na linha de cola dos painéis LVL	136
5.9.1 Cisalhamento a seco	136
5.9.2 Cisalhamento após fervura.....	142
6 CONCLUSÕES	149
6.1 Conclusões	149
6.2 Considerações finais	152
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	154

1 INTRODUÇÃO

A engenharia pode ser entendida como arte. Arte de criação e de transformação. Para criar ou transformar, fundamental se torna o conhecimento. Ciência e tecnologia são as bases para o exercício da engenharia na prospecção de novos materiais e no desenvolvimento da evolução de produtos já existentes.

A partir de conhecimentos científicos e tecnológicos, torna-se possível converter recursos disponíveis na natureza em formas adequadas ao atendimento de necessidades humanas. Os recursos florestais sempre supriram inúmeras dessas necessidades, desde os primórdios da civilização, sendo a madeira um material indispensável devido à multiplicidade de produtos que origina, por ser natural e renovável, e por poder ser obtida a um relativo baixo custo. Entretanto, esses recursos outrora abundantes e, em muitos países e regiões, próximos de centros urbanos de produção e consumo, no decorrer do século passado tornaram-se cada vez mais afastados e escassos.

O extrativismo indiscriminado resultou em crescentes dificuldades para a obtenção de madeira de boa qualidade e em graves conseqüências ambientais. Ao adquirir consciência sobre esses efeitos, muitos países criaram políticas e legislações para a proteção de seus recursos florestais naturais, visando à preservação destes, o que vem a dificultar ou até mesmo impedir o acesso às madeiras de espécies outrora tradicionalmente utilizadas. Assim, de modo crescente, as florestas plantadas vêm abastecendo as indústrias com madeira e extrativos de espécies florestais de rápido crescimento.

No Sul do Brasil, as essências mais plantadas são dos gêneros *Eucalyptus* e *Pinus*, devido à adaptabilidade ao clima e ao rápido crescimento de suas árvores, com tendência de crescimento da área plantada com *Eucalyptus* spp., em razão da madeira dessas espécies ser atualmente a mais rentável para a produção de celulose. Florestas com outras espécies também são plantadas, porém, na Região Sul, em menores áreas ou para finalidades de uso que não incluem o desdobro da madeira como alternativa rentável para sua comercialização.

Assim, para os estados do Sul do País, o cenário que se anuncia para o mercado de madeira serrada nos próximos anos é o de uma forte dependência da madeira de florestas de eucalipto e pinus. Embora grande parte dessas florestas

tenha sido plantada com o objetivo de suprir as indústrias de celulose e papel, uma porção da madeira produzida deverá alimentar a cadeia produtiva de madeira serrada e de painéis de madeira, como meio de atender às exigências de sustentabilidade social, viabilizando assim a existência dos vultosos empreendimentos florestais. Por outro lado, continuará a crescente restrição ao corte de espécies nativas provenientes de florestas naturais do Norte do País, o que também repercutirá nos preços de comercialização dessas madeiras, tornando-as muito caras.

Parece que não há muitas alternativas às indústrias regionais que utilizam madeira como matéria-prima e à sociedade que requer, como sempre fez, produtos com as qualidades insubstituíveis da madeira natural. No Sul do Brasil, será preciso utilizar as madeiras de eucalipto e pinus, de modo a se obter bons produtos, que satisfaçam as crescentes exigências de qualidade impostas pelos consumidores, bem como oferecer esses produtos a um preço razoável. Mais do que isso, será preciso aprender a utilizar melhor essas madeiras ou adequar as tecnologias existentes às características delas, especialmente com respeito à madeira de eucalipto.

Em vários países com tradição em utilizar madeira ou produtos à base de madeira como material de construção, seja como elemento estrutural ou para a manufatura de elementos de vedação, conforto e decoração para habitações, também para a indústria moveleira, há indicadores do uso crescente de um material denominado *Laminated Veneer Lumber* (LVL).

O LVL é um material manufaturado com lâminas de pequena espessura de madeira natural, obtidas pelo corte em tornos desenroladores (ou faqueadeiras), sobrepostas e coladas com adesivo para uso estrutural, segundo o mesmo alinhamento da grã, também conhecido no Brasil pela designação “painel de lâminas paralelas”. A concepção do LVL atende principalmente a finalidade de obtenção de um material estrutural longitudinal, como vigas, por exemplo. Considerando-se uma peça LVL em solicitação de flexão, conforme a direção da carga aplicada, as normativas específicas estabelecem que ela estará em posição *flatwise* se a carga atuante for ortogonal às faces das lâminas e, em posição *edgewise*, se o carregamento se efetivar paralelo às suas faces. De acordo com a teoria clássica das vigas laminadas (BODIG; JAYNE, 1982), a posição de determinada lâmina na composição do multilaminado é fator importante quanto a sua contribuição para a

rigidez e resistência da peça, de modo fundamental quando essa se encontra solicitada a esforços na posição *flatwise*.

A produção industrial de LVL em locais próximos às florestas de eucalipto e pinus pode ser interessante, por agregar valor às madeiras dessas espécies, assim como já acontece na fabricação de outros tipos de painéis, e por gerar um produto alternativo de alta confiabilidade.

O rendimento na laminação de toras de eucalipto é considerado superior ao obtido na produção de madeira serrada. Além disso, para lâminas, não se verifica grande parte dos defeitos decorrentes da difícil secagem dessa madeira (rachaduras de topo, elevados gradientes de umidade, efeitos das altas tensões de crescimento, colapso). Outra questão: o pequeno diâmetro das toras de árvores de reflorestamento. A partir de 30 cm é possível obter um rendimento razoável na laminação, porém, para madeira serrada, o desdobro de toras de pequeno diâmetro resulta em baixo rendimento.

O LVL pode ser produzido a partir de árvores de pequenos diâmetros e convertido em elementos de grandes comprimentos, conforme Tammela (1998).

Segundo Smulski et al. (1997), citado por Carvalho (2004), o aproveitamento das toras na produção de painéis LVL é, em média, 12 pontos percentuais superior ao aproveitamento médio das toras no desdobro em madeira serrada.

O processo de produção de LVL transforma material de baixa qualidade em produtos de alta qualidade, que podem ter seus valores de resistência pré-estabelecidos e são substitutos da madeira serrada em uma variedade de aplicações estruturais, em que os atributos da madeira sólida são de elevado custo (MATOS, 1997).

Fundamentalmente, o LVL, semelhante à madeira laminada colada (*Glulam*), é o material engenheirado que mais conserva as propriedades naturais da madeira. Ainda, apresenta a vantagem de ser um produto mais uniforme, devido à maior dispersão dos defeitos naturais, como os nós e rachaduras, nas finas lâminas que o constituem. Esses defeitos são distribuídos aleatoriamente em muitas camadas de lâminas, de modo que a influência destes nas propriedades mecânicas do produto se torna menor. Como resultado, o produto LVL apresenta maior estabilidade dimensional e menor variação em resistência, comparado à madeira serrada e à madeira laminada colada.

O material LVL é esteticamente muito semelhante à madeira sólida e, não obstante sua composição simples, apresenta algumas propriedades desejáveis encontradas em painéis compensados e aglomerados, como a estabilidade dimensional. Por esses aspectos, seu uso na produção de móveis e materiais de acabamento tende a crescer onde a madeira serrada seja muito cara ou onde outros materiais não atendam a requisitos estéticos ou de resistência mecânica.

Desenvolvido originalmente na América do Norte (Estados Unidos e Canadá), o LVL se expandiu para outros países com larga tradição em construções de madeira, tais como: Finlândia, Japão, Nova Zelândia, Austrália, entre outros. Nos países da Ásia e Oceania, contudo, a produção de LVL se destina a um mercado diversificado, que contempla uma ampla gama de aplicações não-estruturais, tais como elementos para a fabricação de esquadrias (portas e janelas) e escadas (degraus e corrimãos).

O potencial de mercado dos produtos LVL crescerá à medida que a relação entre o custo da madeira natural serrada e o custo de produção dos painéis LVL atinja índices compatíveis e atrativos, que justifiquem a sua utilização (MATOS, 1997).

O Brasil ainda não apresenta mercado interno para o LVL, entretanto, existe a tendência de aumento de demanda no mercado internacional (ECKELMAN, 1993; GUSS, 1995; TAMMELA, 1998; SELLERS, 2001; SINKO, 2003; CARVALHO, 2004), podendo ser a exportação uma interessante alternativa para motivar a produção e comercialização desse produto, agregando, assim, valor às madeiras de menor qualidade provenientes de árvores de rápido crescimento.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Investigar diferentes combinações de lâminas de *Eucalyptus saligna* e *Pinus taeda* em painéis estruturais LVL, com a intenção de avaliar a influência do posicionamento dessas lâminas em propriedades físicas e mecânicas dos materiais manufaturados.

2.2 Objetivos específicos

Produzir painéis estruturais LVL com lâminas de *Eucalyptus saligna* e *Pinus taeda* em diferentes combinações de camadas, formando material puro de cada uma das espécies e material com mistura das duas espécies.

Determinar e avaliar as propriedades mecânicas de módulo de elasticidade (MOE) e módulo de ruptura (MOR) dos painéis LVL manufaturados, em flexão estática nas posições de ensaio *flatwise* e *edgewise*, e analisar as relações entre essas propriedades.

Determinar e avaliar as propriedades de absorção de água, inchamento em espessura e expansão volumétrica dos painéis LVL manufaturados.

Determinar e avaliar a resistência ao cisalhamento na linha de cola e o percentual de falha na madeira para a colagem de lâminas de mesma espécie e de lâminas das diferentes espécies.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 A madeira do *Pinus taeda* L.

Engler (1954 e 1966) agrupou os vegetais em um sistema filogenético que engloba dezessete divisões. Dentre estas, as divisões *Gymnospermae* e *Angiospermae* são as que compreendem os vegetais que produzem xilema secundário. A divisão *Gymnospermae* está subdividida em 4 classes (*Cycadopsida*, *Coniferopsida*, *Taxopsida* e *Chlamydospermae*). As classes são subdivididas em ordens e famílias. A classe *Coniferopsida*, ordem *Coniferae* é subdividida em 5 famílias (*Pinaceae*, *Taxodiaceae*, *Cupressaceae*, *Podocarpaceae* e *Araucariaceae*). As famílias por sua vez, são subdivididas em gêneros e, por fim, estes em espécies. O gênero *Pinus* pertence à família *Pinaceae*, sendo suas espécies normalmente descritas como árvores coníferas (BURGER; RICHTER, 1991). Dentre as gimnospermas, é um dos gêneros mais numerosos, reunindo cerca de 90 espécies (MARCHIORI, 2005).

As espécies do gênero *Pinus* diferem notavelmente em diversos aspectos morfológicos, exigências ecológicas e distribuição geográfica. As espécies mais comuns no Sul do Brasil são originárias dos Estados Unidos (*Pinus elliottii*, *Pinus taeda*) e Europa (*Pinus sylvestris*, *Pinus pinaster*, *Pinus pinea*), ao passo que no Centro e Norte do país são cultivadas espécies de caráter mais tropical, provenientes da América Central (*Pinus caribaea*, *Pinus oocarpa*) ou sudeste asiático (*Pinus merkusii*, *Pinus kesiya*); (MARCHIORI, 2005).

A espécie *Pinus taeda* é nativa dos Estados Unidos, mais precisamente da Costa Atlântica do Sudeste e Golfo do México (MARCHIORI, 2005). O *Pinus taeda* foi introduzido no Brasil, para fins silviculturais, por volta de 1948, pelo Serviço Florestal do Estado de São Paulo, junto com outras espécies norte-americanas do gênero *Pinus* (SHIMIZU, 2004).

A adaptabilidade e o excelente desenvolvimento dessa espécie determinaram sua escolha para extensas áreas florestadas no Sul do Brasil, principalmente durante o período de incentivos fiscais, na década de 60. No entanto, ao crescimento surpreendente das árvores de *Pinus taeda* foram atribuídos alguns problemas de sua madeira, do ponto de vista tecnológico.

Devido ao rápido crescimento, algumas espécies do gênero *Pinus* alcançam dimensões de comercialização ainda muito jovens, com uma grande porcentagem de lenho juvenil (PEARSON; GILMORE, 1980).

A madeira é produzida em ciclos anuais a partir de uma camada de tecido regenerativo cambial, que se situa interior à casca e envolve completamente o tronco, galhos e raízes da árvore. Dessa forma, durante cada estação de crescimento, uma nova camada de tecido lenhoso é sobreposta à madeira existente (KLOCK et al., 2002).

Quanto à diversidade estrutural, a madeira de coníferas apresenta uma estrutura relativamente simples, sendo composta basicamente por dois tipos de células: traqueóides axiais (90-95%) e células de raio (5-10%). Algumas espécies de coníferas possuem pequenas quantidades de outras células (BROWN; PANSHIN; FORSAITH, 1949; KOLLMANN; CÔTÉ, 1968).

A natureza das células da madeira é fortemente dependente da idade real do tecido cambial, segundo Cown (1974) e, assim, zonas distintas de madeira podem ser distinguidas dentro da árvore, dependendo fortemente da posição da madeira em relação ao centro do tronco e ao topo da árvore.

A madeira juvenil em uma árvore é comumente definida como aquela que se encontra na região compreendida pelos anéis próximos à medula, onde as características das células apresentam progressivas mudanças a cada sucessivo anel de crescimento. Alguns autores indicam que a madeira juvenil é o xilema secundário produzido pelas regiões cambiais, quando essas se encontram sob forte influência dos meristemas apicais (PANSHIN; DE ZEEUW, 1970).

A passagem do lenho juvenil para adulto é gradativa, e muitas características, tais como comprimento dos traqueóides, espessura da parede celular, massa específica, ângulo microfibrilar e resistência vão se modificando até atingirem certa estabilidade no lenho adulto (BENDTSEN, 1978).

Comparado com o lenho adulto, o lenho juvenil caracteriza-se por sua menor massa específica, maior ângulo das microfibrilas, traqueóides mais curtos, contração transversal menor, maior contração longitudinal, maior proporção de lenho de reação, menor porcentagem de lenho tardio, paredes celulares mais finas, maior conteúdo de lignina, menor conteúdo de celulose e menores resistência e rigidez (BENDTSEN, 1978; LARA PALMA; BALLARIN, 2003).

Vários pesquisadores, tais como Hallock (1968), Erickson e Harrison (1974), Barret e Kellogg (1986), Ramsay e Briggs (1986) e Zobel e Van Buijtenen (1989), entre outros, sustentam que a determinação ou a definição da localização da madeira juvenil nas coníferas tem como principal critério o comprimento dos traqueóides, já que estes se associam mais com a qualidade da madeira, e concordam que a madeira juvenil tem seu limite em alguma parte entre o quinto e o vigésimo anel, dependendo principalmente da espécie (LARA PALMA; BALLARIN, 2003).

Os traqueóides axiais são mais curtos quanto mais próximos estiverem da medula, aumentando em comprimento rapidamente através da região juvenil no sentido medula-casca. Mudanças no comprimento dos traqueóides na região adulta são muito pequenas (KRAHMER, 1986; LARA PALMA; BALLARIN, 2003).

Para as coníferas em geral, o comprimento dos traqueóides axiais varia de 2,5 a 5,0 mm, em madeira adulta, sendo o comprimento cerca de 100 vezes ou mais sua largura. Conforme descreve Wheeler (2002), para *Pinus taeda* (madeira adulta) são observados os seguintes valores médios: comprimento do traqueóide axial (4,33 mm) e variação do diâmetro tangencial (de 35 a 45 μm).

Segundo Koch (1972), o comprimento dos traqueóides axiais aumenta no sentido medula-casca até certa idade, a qual pode variar de 20 a 60 anos, sofrendo variações aleatórias após esse período. Geralmente, aumenta a partir da base do tronco à base da copa, até que atinja a dimensão máxima, para então decrescer em direção ao topo. De maneira geral, pode-se dizer que o comprimento máximo dos traqueóides ocorre na parte externa do lenho, em uma faixa compreendida entre 20 e 75% da altura da árvore (COWN, 1975; PANSHIN; DE ZEEUW, 1980).

A espessura da parede dos traqueóides é menor no topo da árvore do que na base desta e tende a aumentar à medida que se afasta da medula. Isso é esperado, uma vez que a massa específica e a porcentagem de lenho tardio diminuem da base para o topo das coníferas e aumentam no sentido medula-casca, sendo que essas variáveis estão diretamente relacionadas com a espessura da parede dos traqueóides (MUÑIZ, 1993; HASSEGAWA, 2003).

Porém, de acordo com Tomaselli (1979), o aumento no diâmetro externo dos traqueóides de *Pinus taeda* no sentido medula-casca é seguido por um pequeno aumento no diâmetro do lumen, resultando em um incremento insignificante na espessura média da parede celular (HASSEGAWA, 2003).

Muñiz (1993), estudando *Pinus taeda*, obteve valores de diâmetro externo de 32,5 a 72,5 μm , diâmetro interno de 15,0 a 60,0 μm e espessura de parede de 5,0 a 13,6 μm .

Lara Palma e Ballarin (2003) estudaram algumas características do lenho de *Pinus taeda* de 37 anos de idade, procedente do estado de São Paulo. Os resultados mostraram que a região de lenho juvenil das árvores estudadas ocorre aproximadamente até o 20º anel de crescimento, sendo mais representativa até o 12º anel; a região de transição ocorre entre o 12º e o 20º anel de crescimento.

Os traqueóides axiais de paredes delgadas provêm de zonas de lenho inicial e sua principal função é a de condução de líquidos. Os de paredes espessas são provenientes do lenho tardio e contribuem principalmente com a resistência da madeira (FINDLAY, 1978; WHEELER, 2002).

Segundo Knigge e Shulz (1966), a quantidade de lenho tardio é de grande importância para as propriedades mecânicas da madeira, sobretudo tratando-se de espécies que possuem pronunciadas diferenças de massa específica entre as zonas de lenho inicial e tardio. Existe uma alta correlação entre a massa específica e a porcentagem de lenho tardio, sendo de se esperar que quanto maior for a porcentagem deste, tanto maior será a massa específica e a resistência da madeira (CHIES, 2005).

Haselein e Pauleski (2004) citam valores médios de massa específica básica em coníferas na América do Norte, em lenho inicial e lenho tardio, nessa ordem, para: *Pinus taeda* (*Loblolly pine*), 0,30 e 0,63 g/cm^3 ; *Pinus elliottii* (*Slash pine*), 0,27 e 0,57 g/cm^3 ; *Pseudotsuga menziesii* (*Douglas fir*), 0,20-0,30 e 0,60-0,80 g/cm^3 . Mencionam que a massa específica varia enormemente dentro de um mesmo anel de crescimento, com percentuais de variação superiores a 300% em alguns casos, e que a proporção de lenho tardio presente em determinada amostra de madeira influi significativamente na sua massa específica, assim como nas demais propriedades e características correlacionadas.

Muñiz (1993), estudando a porcentagem de lenho tardio de *Pinus taeda*, observou que os primeiros anéis formados em árvores de rápido crescimento, no sentido medula-casca, são largos, e a faixa de lenho tardio é estreita. À medida que se aproxima da casca, a porcentagem de lenho tardio aumenta de maneira significativa, sendo mais proeminente na região da base da tora (CHIES, 2005).

Matos (1997) descreve valores de massa específica de *Pinus taeda* em árvores com 18, 21 e 30 anos de idade, provenientes dos estados do Paraná e de Santa Catarina. Segundo Matos, aos 18 anos, foram verificados valores de 0,436 g/cm³ para o lenho juvenil e de 0,545 g/cm³ para o lenho adulto, resultando em uma média de 0,490 g/cm³ (TOMASELLI, 1979). Aos 21 anos, foi verificada somente a média para os dois lenhos, que obteve o valor de 0,413 g/cm³ (LUCAS FILHO, 1997). Aos 30 anos, foram verificados 0,460 g/cm³ para o lenho juvenil e 0,587 g/cm³ para o lenho adulto, resultando em uma média de 0,523 g/cm³ (MUÑIZ, 1993). Nos Estados Unidos, a média da massa específica básica a 12% de umidade do *Pinus taeda* é de 0,510 g/cm³ (USDA, 1999).

As variações na massa específica entre espécies e dentro de uma mesma árvore ocorrem devido a características da madeira, como heterogeneidade, higroscopicidade e porosidade. Fatores como porcentagem de lenho tardio também exercem grande influência na variação dessa propriedade dentro de uma mesma árvore. Porém, seu aumento característico com o distanciamento em relação à medula é determinado não somente pela porcentagem de lenho tardio nos anéis de crescimento, mas principalmente pela espessura da parede e pelo pequeno diâmetro radial dos traqueóides, além da proporção dos diferentes tipos de células presentes na madeira (PANSKIN; DE ZEEUW, 1980; LARSON et al., 2001). Além disso, fatores hereditários, influências fisiológicas e mecânicas e o sítio afetam a estrutura da madeira e, portanto, sua massa específica (KOLLMANN; CÔTÉ, 1968).

Uma vez que a massa específica da parede celular é aproximadamente constante, independente da espécie florestal, a porosidade é que irá determinar em grande parte a massa específica da madeira. Quanto maior o volume de espaços vazios, menor será a massa específica, e vice-versa. Lumens grandes em traqueóides axiais indicam alta porosidade na madeira, com conseqüente redução de massa específica. Também podem indicar uma maior permeabilidade, que reflete a facilidade no transporte de fluidos por seu interior (HASELEIN; PAULESKI, 2004).

Outras variações que afetam a permeabilidade da madeira de coníferas, refletindo no tratamento com produtos químicos, na secagem e na colagem, são o número, forma e tamanho das pontoações. Os traqueóides axiais são caracterizados pela presença de pontoações intertraqueoidais, as quais são responsáveis pelo transporte de líquidos entre as células, principalmente no sentido tangencial. A quantidade de pontoações nos traqueóides de lenho inicial é cerca de 200 por

traqueóide, sendo que a maioria delas está localizada nas paredes radiais. Traqueóides de lenho tardio possuem apenas de 10 a 50 pontoações pequenas (SJÖSTRÖM, 1993; HASSEGAWA, 2003).

A característica de permeabilidade de uma madeira está diretamente relacionada às suas estruturas celulares responsáveis pela condução de líquidos e nutrientes na árvore viva. Em coníferas, o transporte de líquidos no sentido axial é feito predominantemente através do interior dos traqueóides de lenho inicial. O transporte de líquidos no sentido radial é feito principalmente através dos raios, os quais compreendem o parênquima radial e, em algumas espécies, os traqueóides radiais. As pontoações de campo de cruzamento conectam o parênquima radial com os traqueóides axiais e podem ser observadas em secção radial. O formato, tamanho e número dessas pontoações variam entre as madeiras de coníferas (BURGER; RICHTER, 1991). Nos campos de cruzamento de *Pinus taeda*, podem ser encontradas até 6 pontoações pinóides (MUÑIZ, 1993).

Outras estruturas que podem ser encontradas na madeira de coníferas são os canais resiníferos axiais e radiais, sendo que, quando radiais, esses canais ocorrem dentro de um raio; são tubos forrados com células epiteliais (células parenquimáticas de paredes finas) e geralmente ocorrem no lenho tardio. O lenho de *Pinus* spp. contém raios que, além de células parenquimáticas comuns e traqueóides radiais, apresentam canais resiníferos delimitados por células epiteliais que produzem resina. Tais raios são denominados fusiformes (BURGER; RICHTER, 1991).

Em *Pinus taeda*, os raios são predominantemente unisseriados, estando muitas vezes localmente bisseriados e fusiformes. Os raios unisseriados, com média de 6 raios por milímetro, possuem de 50 a 350 μm de altura e de 1 a 14 células de altura. Os raios fusiformes possuem 51 μm de largura e de 120 a 300 μm de altura (MUÑIZ, 1993).

A madeira é avaliada por sua qualidade para o uso a que se destina. A qualidade, por sua vez, é determinada por parâmetros tais como massa específica, comprimento das fibras, espessura das paredes celulares, que afetam diretamente as propriedades físicas e mecânicas da madeira, do mesmo modo que por características importantes como permeabilidade, presença de extrativos, entre outras, que são determinantes para a utilização na indústria e se refletem na qualidade dos produtos finais.

3.2 A madeira do *Eucalyptus saligna* Smith

Na taxonomia vegetal, a divisão *Angiospermae* compreende duas classes: *Magnoliatae* (*Dicotyledoneae*) e *Liliatae* (*Monocotyledoneae*), sendo que destas, somente a primeira compreende vegetais que produzem xilema secundário. Cada classe contém diversas subclasses, que abrigam superordens, ordens e famílias. A superordem *Myrtanae*, ordem *Myrtales*, família *Myrtaceae*, abriga o gênero *Eucalyptus* e suas espécies (MARCHIORI, 2004).

As árvores do gênero *Eucalyptus* pertencem à família *Myrtaceae*, sendo conhecidas aproximadamente 700 espécies, diversas variedades, híbridos naturais e artificiais. O gênero *Eucalyptus* compreende desde árvores de grande porte até pequenos arbustos ornamentais (MANGIERI; DIMITRI, 1971).

A espécie *Eucalyptus saligna* ocorre naturalmente na Austrália, na região de Queensland e na região litorânea e vales das cadeias montanhosas próximas ao litoral de New South Wales. No Brasil, essa espécie tem sido plantada intensivamente e se apresenta como a essência de segunda maior área plantada do gênero *Eucalyptus*, após o *Eucalyptus grandis*. No Sul do país, é uma das espécies mais cultivadas, sendo muito utilizada em florestamentos para a indústria de celulose (MARCHIORI, 1997).

A madeira, rosado-clara ou avermelhada, normalmente é dura e de alta resistência mecânica, porém, pode apresentar grande variabilidade em massa específica, o que modifica suas propriedades. É considerada versátil e indicada para uso múltiplo. Como para as demais espécies do gênero, a madeira do *Eucalyptus saligna* é de difícil secagem e de baixa estabilidade dimensional (MARCHIORI, 1997).

Em face aos elevados gradientes de umidade que se formam em sua madeira, decorrentes de sua própria constituição anatômica que dificulta a saída de umidade de seu interior, o gênero *Eucalyptus* é considerado de difícil secagem. Em razão disso, a secagem de sua madeira deve ser feita em condições suaves de temperatura e umidade relativa do ar, de modo que se realize de forma lenta, assim minimizando os gradientes de umidade e as tensões decorrentes do processo, bem como os possíveis defeitos. As perdas significativas em razão de rachaduras de topo e de superfície, associadas às tensões de crescimento características do gênero, e

os defeitos de secagem, inclusive colapso celular, têm sido considerados os principais entraves à utilização da madeira de *Eucalyptus* spp. para a produção de madeira serrada e na forma de lâminas.

A secagem acelerada de espécies refratárias invariavelmente resulta em inaceitáveis níveis de degradação. Para muitas madeiras refratárias, o colapso é um dos principais defeitos associados à secagem, particularmente em processos de secagem acelerada (SANTINI, 1992).

Tensões de crescimento são produzidas por forças encontradas nos troncos lenhosos verdes. Dessa maneira, são distintas das tensões e deformações que ocorrem na madeira como resultado da eliminação de água pela secagem (DINWOODIE, 1966). São características do crescimento natural das árvores e ocorrem igualmente tanto em folhosas como em coníferas (JACOBS, 1945).

Jacobs (1938, 1939 e 1945), estudando o comportamento e a distribuição das tensões de crescimento nos troncos, concluiu que a madeira próxima à periferia da árvore estava sob tração longitudinal e no centro, próximo à medula, estava sob compressão.

Segundo Jacobs (1965) e Boyd (1950a), a distribuição das tensões longitudinais de crescimento varia de uma tração máxima na periferia até um valor zero por volta de $1/3$ do raio, seguindo em compressão crescente até a medula. Como o crescimento em diâmetro das árvores é formado por novas camadas em diferenciação, surge no xilema, imediatamente logo abaixo do câmbio, a tensão de tração longitudinal de crescimento. A magnitude dessa tensão é considerada baixa, quando analisada em nível de camada individual, mas que se torna máxima na periferia das toras pelo acúmulo das camadas de crescimento na direção radial. Em virtude do novo xilema se encontrar em contato com o xilema diferenciado mais antigo (maduro), inicia-se, progressivamente, uma tensão de compressão longitudinal de crescimento no centro da tora, tornando-se máxima na medula (MALAN, 1984).

Em algumas espécies, o aumento do diâmetro e o efeito acumulativo das camadas sucessivas de crescimento em estado de tração induzem a parte central do tronco a uma compressão superior ao seu limite elástico, causando o desenvolvimento de inúmeras fendas de compressão tanto na madeira como nas paredes das células (DINWOODIE, 1966; MALAN, 1984).

Segundo Van Wyk (1978), as tensões de crescimento ocorrem naturalmente nas árvores antes da derrubada, atuando como uma forma de dar estabilidade aos troncos, os quais o autor comparou a colunas pré-tensionadas.

Segundo Barnacle (1971) e Iman e Heikal (1972), citados por Malan (1984), as tensões de secagem interagem com as tensões de crescimento para produzir rachaduras nos topos.

Na caracterização da madeira, a determinação de sua massa específica e principalmente de sua variação dentro da árvore, tanto na direção radial, da medula para a casca, quanto no sentido base-topo, é fundamental como subsídio ao entendimento de sua qualidade.

Madeira mais homogênea, no que diz respeito à sua massa específica no interior do tronco, sem dúvida poderá se comportar melhor nas operações de processamento e refletir maior uniformidade nas demais propriedades tecnológicas. As peças de madeira com menor variação de massa específica são adequadas para utilizações que exigem material homogêneo e com menor variabilidade nas propriedades físicas e mecânicas (OLIVEIRA et al., 2005).

Os elementos de vaso, fibras, parênquima radial e axial compõem a estrutura anatômica da madeira do gênero *Eucalyptus*, com variações dentro e entre diferentes espécies (DADSWELL, 1972).

Nas folhosas, as variações de massa específica dependem fundamentalmente de mudanças na proporção de vasos e das espessuras das paredes celulares das fibras. O crescimento da massa específica pode ser o resultado do aumento da espessura da parede celular das fibras ou de um aumento na proporção das fibras em relação, por exemplo, à proporção de vasos. De maneira inversa, um aumento na proporção de vasos, com ou sem decréscimo na espessura da parede celular, leva à redução da massa específica. Segundo Panshin e De Zeeuw (1980), os efeitos são interativos e difíceis de serem avaliados isoladamente (OLIVEIRA; SILVA, 2003).

Alzate (2004) estudou a estrutura anatômica da madeira de clones de *Eucalyptus saligna* e identificou vasos difusos em arranjo diagonal, solitários (98%) e múltiplos (2%) em grupos de 2, freqüência 10-12/mm², diâmetro tangencial médio do lumen 100,61 µm. Fibras com comprimento médio 950 µm, largura média 18,67 µm, diâmetro do lumen médio 10,14 µm, espessura da parede delgada média 5,01 µm. Fibrotraqueóides presentes. Parênquima axial abundante, vasicêntrico. Parênquima

radial (raios) unisseriados (97%) e bisseriados (3%), altura média 0,16 mm, frequência média 13/mm.

Tomazello Filho (1985) estudou a variação radial da massa específica básica e da estrutura anatômica do *Eucalyptus saligna* em cinco posições (0, 25, 50, 75 e 100% do raio das amostras) na direção medula-casca. Foram utilizadas, nesse estudo, árvores com 10 anos de idade, do estado de São Paulo, oriundas de plantios com sementes da Austrália e de plantios com sementes de uma população local, denominada Mairinque, implantada com sementes da Austrália. Os valores da massa específica básica e do comprimento das fibras aumentaram no sentido medula-casca, não sendo observada tendência de estabilização até o décimo ano. A largura, diâmetro do lumen e espessura da parede das fibras mostraram uma tendência de aumentar. O diâmetro tangencial dos vasos aumentou, enquanto a frequência diminuiu no sentido medula-casca.

Segundo Tomazello Filho (1985), pode-se concluir que, de um modo geral, as fibras próximas à medula apresentam menor comprimento, largura, espessura da parede e diâmetro do lumen. Com o aumento da idade das árvores, as células cambiais passam a produzir elementos com maiores dimensões, detectados por meio da amostragem ao longo do raio das amostras, até atingirem a estabilização em idades mais avançadas. Sob o aspecto tecnológico, a espessura da parede está diretamente relacionada com a resistência da madeira. Fibras de parede delgada são fraturadas mais facilmente do que as de parede espessa; também têm menor resistência ao achatamento (colapso).

Em estudo anterior, Tomazello Filho (1984) analisou oito espécies de eucalipto. Concluiu que o *Eucalyptus grandis* e o *Eucalyptus saligna* (Mairinque) foram as espécies que apresentaram vasos com maiores diâmetros, desde a medula até a região do alburno das amostras. Com respeito à frequência de vasos verificou, no sentido radial, uma diminuição no número/mm², para todas as espécies analisadas. Tomazello Filho (1985) cita que esse modelo de variação foi verificado para inúmeras espécies de eucalipto, segundo a literatura. É importante salientar a importância da dimensão e do número de vasos, considerando sua influência na massa específica, na permeabilidade e na qualidade da superfície da madeira.

Os valores encontrados por Tomazello Filho (1985) para a média da massa específica básica (g/cm³), de acordo com a posição de análise, foram os seguintes: posição 0% (0,395 – 0,364), posição 25% (0,463 – 0,409), posição 50% (0,477 –

0,420), posição 75% (0,575 – 0,483) e posição 100% (0,594 – 0,493) (primeiros valores para *Eucalyptus saligna* – sementes da Austrália; segundos valores para *Eucalyptus saligna* – sementes Mairinque).

Oliveira e Silva (2003) estudaram a variação radial da massa específica básica e da retratibilidade em madeira de *Eucalyptus saligna* de árvores de 16 anos de idade provenientes do estado do Paraná e observaram um perfil crescente da massa específica básica no sentido medula-casca para a madeira em estudo. A retratibilidade variou na direção radial da madeira de *Eucalyptus saligna*, ocorrendo valores menores na região da medula com acréscimo até a região mais periférica do tronco. A massa específica básica, apesar de mostrar tendência de aumento em direção à periferia do tronco, no caso estudado não mostrou sinais efetivos de estabilidade, o que leva a supor uma grande presença de madeira juvenil. A média geral da massa específica básica da amostragem (quatro posições equidistantes, direção medula-casca, região do DAP) obteve o valor de 0,47 g/cm³; na posição mais afastada da medula, a média encontrada foi 0,55 g/cm³.

Para o gênero *Eucalyptus*, as variações da massa específica com a altura não são claras. Alguns autores mostraram uma tendência de diminuição com a altura, e outros, uma diminuição seguida de um novo aumento de forma totalmente irregular (VALE et al., 1992; VALE et al., 1995).

A massa específica da madeira pode ser alterada em função de características da própria espécie, bem como de influências externas, como variações ambientais e intervenções silviculturais (KOLLMANN; CÔTÉ, 1968).

Hillis e Brown (1978) afirmaram que a madeira proveniente de árvores de rápido crescimento do gênero *Eucalyptus* apresenta uma contração excessiva e ocasiona defeitos de secagem, como empenamentos e fendilhamentos, que tendem a ser piores em madeiras de menor massa específica. Relataram ainda que tais defeitos são mais severos na zona ao redor da medula (OLIVEIRA; SILVA, 2003).

Segundo Panshin e De Zeeuw (1980), a capacidade de contração da madeira varia com a sua posição na árvore. Normalmente, as contrações transversais são menores próximo à medula (madeira juvenil), crescendo rapidamente desta para a casca, estando essa mudança relacionada com a rápida redução do ângulo microfibrilar na parede celular, com o aumento do comprimento da célula e do teor de celulose (OLIVEIRA; SILVA, 2003).

Segundo Kollman e Côté (1968), a diferença entre a retratibilidade tangencial e a radial pode ser explicada pela influência restritiva dos raios na direção radial e também pelo arranjo helicoidal diferente das microfibrilas nas paredes tangenciais e radiais. Deste modo, uma das causas das propriedades anisotrópicas da madeira é a orientação das micelas, fibrilas e fibras que formam o tecido lenhoso. Nesse sentido, Masserann e Mariaux (1985) relataram que, em grande parte das folhosas, as maiores diferenças da retratibilidade tangencial em relação à radial são atribuídas às características anatômicas. Segundo estes autores, o volume dos raios, a dimensão radial das fibras e as diferenciações químicas entre as paredes radiais e tangenciais são responsáveis pela anisotropia da madeira (SILVA; OLIVEIRA, 2003).

Serpa et al. (2003) pesquisaram a madeira de *Eucalyptus saligna* proveniente de árvores com idade aproximada de 40 anos, do estado de Minas Gerais. Constataram o crescimento radial da massa específica no sentido medula-casca, e que esse foi mais acentuado na região de lenho juvenil. Na altura do fuste (com amostragem na base, meio e topo), foi observada uma tendência de diminuição da massa específica da tora da base para a tora do meio, voltando a crescer na tora do topo. Constataram ainda que as massas específicas da base, de modo geral, foram inferiores às observadas no topo das árvores. Os autores ajustaram equações para estimar a massa específica básica em função da distância da medula, por posição no fuste (base e meio) e para o fuste em geral. Para uma distância de 10 cm da medula, os seguintes valores aproximados podem ser obtidos: toras da base ($0,718 \text{ g/cm}^3$), toras do meio ($0,650 \text{ g/cm}^3$) e, para o fuste em geral, ($0,678 \text{ g/cm}^3$). Não foi apresentada equação para estimar a massa específica básica na posição topo do fuste.

Em continuação, Serpa et al. (2003) estudaram a contração volumétrica na madeira de *Eucalyptus saligna*, tendo sido observada a tendência dessa propriedade diminuir à medida que se aproxima da casca, o que se deve, segundo os autores, provavelmente, à presença de madeira madura na região periférica, uma vez que, na madeira madura normal, as contrações transversais e volumétricas são afetadas pela massa específica, pelo comprimento das fibras e pelo ângulo microfibrilar das paredes celulares. Apesar da maior massa específica, a madeira madura tende a ser mais estável, porque o ângulo fibrilar diminui com a idade da árvore (PANSHIN; DE ZEEUW, 1980). Na altura do fuste, foi constatada uma tendência crescente no valor da contração volumétrica, da tora da base para a tora do meio, e decrescente dessa

última para a tora do topo. Os autores concluíram que o comportamento decrescente da contração volumétrica no sentido medula-casca indica que, para a obtenção de madeiras dimensionalmente mais estáveis, é necessário fazer-se a seleção de árvores mais velhas, que possuem maior percentual de madeira madura que de juvenil.

No mesmo trabalho, Serpa et al. (2003) testaram a resistência na linha de cola, em corpos-de-prova montados com colagem da madeira de *Eucalyptus saligna*, retirada das diferentes posições e regiões sob análise. Em relação à posição da tora no fuste da árvore, não ocorreram diferenças significativas, tanto para madeira da região da medula como para madeira próxima à casca. Em relação à posição diametral, as comparações da resistência na linha de cola entre madeira próxima à medula e madeira próxima à casca mostraram que, quando houve diferença significativa, a resistência em peças de lenho juvenil foi maior que em peças de lenho adulto. Os autores explicaram que esse fato provavelmente se deve à maior massa específica e a menor permeabilidade da madeira periférica, o que pode ter dificultado a penetração do adesivo. Verificaram, em continuidade, que todos os corpos-de-prova, constituídos de madeira das diferentes posições longitudinais e radiais analisadas, depois de rompidos, apresentaram altos percentuais de falha na madeira, o que indicou uma boa qualidade de adesão para a madeira de todas as regiões do fuste. As menores porcentagens de falha na madeira ocorreram para amostras retiradas das toras do topo.

3.3 Conceito de LVL; nomenclaturas e comparações

O material multilaminado formado por lâminas de madeira natural sobrepostas em camadas e coladas, com todas as faces posicionadas longitudinalmente segundo a orientação axial das fibras, é denominado *Laminated Veneer Lumber* ou LVL. Esse tipo de laminado estrutural, em que a grã das lâminas é alinhada segundo o comprimento do produto acabado, pode ser produzido como painel ou elemento estrutural longitudinal, a partir de lâminas de madeira obtidas por corte em faqueadeiras ou tornos desenroladores.

Segundo Haselein (2008), a concepção de sistemas em camadas pode ser aplicada a alguns tipos de laminados estruturais, dentre os quais se destacam o LVL (*Laminated Veneer Lumber*) e as vigas ou peças de madeira laminada colada – MLC (*Glulam - Glued Laminated Timber*).

O painel compensado, reconhecidamente o clássico dos produtos laminados, também pode ser manufaturado para suprir finalidades estruturais, sendo, nesse caso, chamado de compensado estrutural (*Structural Plywood*).

Assim como os compensados, o LVL é produzido com lâminas de pequena espessura, normalmente variando de 2,5 a 4 mm. Entretanto, o LVL como painel se diferencia fundamentalmente do compensado estrutural pelo princípio de que, para os compensados, a sobreposição das lâminas é “cruzada”, ou seja, a montagem das camadas é feita prioritariamente com a grã de lâminas adjacentes orientadas a um ângulo de 90°, umas em relação às outras. Em um elemento estrutural linear sob solicitação de flexão, as lâminas cruzadas ao alinhamento principal longitudinal constituem camadas de menor resistência mecânica. Os elementos LVL são concebidos para uso estrutural longitudinal, como vigas e caibros, por exemplo.

Em relação ao compensado, as principais diferenças apresentadas pelo LVL dizem respeito à montagem dos painéis (mesma orientação das lâminas), número de lâminas (até mais de 20), espessura das lâminas (de 2,5 a 12,7 mm), forma e dimensões dos painéis (até 70 mm de espessura e comprimentos até maiores que 20 m) e utilização, prioritariamente estrutural (KUNESH, 1978; PEASE, 1994; MATOS, 1997; CARVALHO, 2004).

Como elemento estrutural longitudinal, o LVL se diferencia das vigas de madeira laminada colada, devido as peças MLC serem concebidas com camadas de lâminas mais espessas, como tábuas, obtidas de corte por serras.

Segundo a ASTM D 5456 (*Standard Specification for Evaluation of Structural Composite Lumber Products*), o LVL é definido como um compósito constituído de lâminas de madeira de pequena espessura (folhas ou folheados), com as fibras da madeira orientadas principalmente ao longo do comprimento da peça, sendo que a espessura das lâminas não deve exceder a 6,4 mm (0,25 polegadas).

De acordo com a norma norte-americana acima citada, o LVL (*Laminated Veneer Lumber*) e o PSL (*Parallel Strand Lumber*) formam uma categoria de materiais designada SCL (*Structural Composite Lumber*), em que o produto final é planejado para uso estrutural, o que implica que seus elementos constituintes sejam orientados prioritariamente com a direção de suas fibras (grã da madeira) segundo o comprimento da peça e devam ser colados com adesivo para uso exterior.

Conforme Smulski et al. (1997), *Structural Composite Lumber* (SCL) é um termo genérico que designa a família dos produtos engenheirados de madeira (*Engineered Wood*), que combinam lâminas (folhas – *veneer sheets*), tiras (*strands*) ou outros pequenos elementos de madeira com adesivos para uso exterior, para formar produtos estruturais à base de madeira. Além do LVL e do PSL, também faz parte dessa família o LSL (*Laminated Strand Lumber*), e todos esses produtos SCL têm como característica em comum o alinhamento da grã dos elementos de madeira que os compõem, sendo este prioritariamente paralelo ao comprimento da peça produzida, com o objetivo de otimizar a rigidez e a resistência da peça (SMULSKI et al., 1997).

Materiais engenheirados de madeira (*Engineered Woods*) são aqueles manufaturados por colagem, com adesivos para uso exterior, de elementos de madeira processados em várias formas e dimensões, desde tábuas, lâminas até alguns tipos de partículas, como tiras (*strands*), reorganizados estrategicamente quanto à orientação da grã, para formar produtos com características e performances estruturais. Entre estes, os mais conhecidos são as peças de madeira laminada colada (*Glulam*), os painéis compensados estruturais e os produtos LVL, os painéis OSB e *Wafer Board*, e as vigas-I (*I-Joists*).

Embora diferentes na concepção e projetados para usos distintos, os materiais laminados estruturais mantêm algumas semelhanças entre si. Assim, tal

qual o compensado, o LVL deve ser montado de modo balanceado, para manter a sua estabilidade dimensional e apresentar equilíbrio no desempenho mecânico, quando o teor de umidade variar ou houver a solicitação por forças internas e/ou externas. As camadas de lâminas de madeira devem ser montadas de tal forma que a secção transversal do produto apresente uma linha neutra central, que a divida em duas partes simétricas e balanceadas entre si. Assim, as camadas equidistantes dessa linha neutra devem ter mesma espessura, ser formadas por madeira de uma mesma espécie, com propriedades similares, e possuir mesmo teor de umidade por ocasião da colagem e da prensagem.

Do mesmo modo, como se idealiza para as vigas MLC, para um melhor desempenho estrutural em solicitações de flexão na posição horizontal (*flatwise* – menor momento de inércia), no LVL, procura-se posicionar as lâminas mais resistentes nas camadas mais externas, que serão as mais exigidas mecanicamente.

3.4 Histórico

Schaffer et al. (1972) e Laufenberg (1983), citados por Matos (1997), descrevem que a primeira referência científica ao uso do LVL estaria no trabalho de Luxford (1944), durante a segunda guerra mundial, quando este desenvolveu laminados com elevada resistência mecânica para a produção de hélices e componentes da estrutura de aviões, a partir da colagem a frio de lâminas sobrepostas com o mesmo alinhamento da grã, usando madeira de 3,6 mm de espessura.

Na década de 60, conforme Carvalho (2004), no segmento da construção civil, os empresários Art Troutner e Harold Thomas colocaram no mercado norte-americano elementos estruturais do tipo viga-I (*I-Joist*) compostos de madeira. O formato em I, que concentra a madeira nas partes superior e inferior, onde ela é mais necessária para resistência e apoio, mostrou-se estruturalmente eficiente. Essas vigas-I podiam suportar mais carga, em relação ao seu próprio peso, do que qualquer outro produto disponível até então. Houve grande aceitação em virtude do baixo peso, da alta resistência e da possibilidade de vencer grandes vãos que o

produto oferecia, de forma que se tornou um substituto ideal para as vigas retas de madeira maciça.

Descreve Carvalho (2004), citando Neuvonen et al. (1998), que a produção das vigas-I dependia de um suprimento de madeira serrada de alta resistência, para a confecção das flanges superior e inferior. Entretanto, a obtenção de madeira maciça com propriedades uniformes era bastante problemática. Como solução, os empresários desenvolveram peças manufaturadas com lâminas coladas de 2,54 mm de Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii*), com mesmo alinhamento da grã. O material passou então a ser produzido para a composição de vigas-I e para outras aplicações estruturais, como acontece até hoje.

Até a década de 60, a maioria dos materiais LVL era manufaturada pela utilização da mesma tecnologia empregada na fabricação de compensados, ou seja, de forma descontínua em prensas convencionais.

No início dos anos 60, segundo Smulski et al. (1997), a empresa norte-americana Weyerhaeuser Corporation desenvolveu um produto LVL com nome comercial Lamineer e o produziu por meio de um protótipo de prensa contínua. Essa empresa comercializou uma quantia limitada do produto durante vários anos, mas não obteve sucesso e descontinuou a fabricação experimental do produto.

Na mesma época, nos primeiros anos da década de 60, Art Troutner e Harold Thomas, citados anteriormente, estabeleceram sua empresa, sob o nome Trus Joist Corporation, hoje Trus Joist MacMillan, a qual, segundo Smulski et al. (1997), em 1968 desenvolveu e produziu LVL sob o nome comercial Microllam, usando prensagem contínua. De acordo com Baldwin (1995), as vigas-I produzidas por essa empresa, constituídas com alma de compensado estrutural e flanges de LVL, tornaram-se a primeira madeira engenheirada (*Engineered Wood*) comercialmente bem-sucedida e produzida em larga escala por uma empresa, em âmbito mundial.

3.5 Processos de produção

Existem dois métodos de produção de LVL, os quais se diferenciam basicamente na etapa de prensagem. Em um dos métodos, o LVL é produzido em prensas contínuas de comprimentos maiores que 2,44 m; no outro, em prensas

convencionais utilizadas na manufatura de compensados, com comprimento nominal de 2,44 m (USDA, 1987; MATOS, 1997; BORTOLETTO JÚNIOR, 2006).

Painéis LVL produzidos em prensas contínuas apresentam emendas na junção das lâminas, de forma escalonada entre as camadas, normalmente a cada 2,44 m de intervalo longitudinal, e são montados para formar elementos longos. São viáveis para esse processo as dimensões finais dos painéis com larguras de 100 a 1200 mm, espessuras de 19 a 75 mm e comprimentos de até 25 metros, segundo Walker (1993), citado por Bortoletto Júnior (2006). Depois de consolidados, os longos painéis, chamados *Billets*, podem ser serrados longitudinalmente para a obtenção de vigas ou outros elementos estruturais de dimensões variadas.

O LVL estrutural pode oferecer maiores possibilidades de dimensionamento, com espessuras variando de 21 mm a 75 mm (em casos especiais podendo atingir até 150 mm), larguras de 100 mm a 1800 mm e comprimentos de 2,5 a 25 m (AITIM, 1999; GABRIEL, 2007).

Processos contínuos de produção requerem altos investimentos de capital. Além disso, necessitam volumosos e contínuos suprimentos de matéria-prima, por um lado, e mercado consumidor que viabilize elevadas produções, pelo outro.

Painéis LVL produzidos descontinuamente, em prensas para compensados, ficam limitados às dimensões de trabalho de tais prensas, normalmente projetadas para o comprimento padrão de 2,44 m.

Processos de produção estacionários, que utilizam maquinário convencional, apresentam a vantagem de poderem ser facilmente implantados em fábricas de compensados já instaladas e de menor porte, necessitando para isso de pequenas alterações nas estruturas originais (LAUFENBERG, 1983; MATOS, 1997).

Em teoria, os processos de produção de LVL mantêm a seqüência básica de etapas necessárias para manufatura de painéis compensados, que é resumidamente, a seguinte: laminação de toras, secagem de lâminas, classificação de lâminas, aplicação de adesivo, montagem dos compósitos, prensagem a frio, prensagem a quente, esquadreamento e acabamento.

3.6 Laminação

Para que um processo de laminação tenha alto rendimento e produza lâminas de qualidade adequada, torna-se fundamental a seleção da matéria-prima. A escolha da madeira normalmente é feita com base no uso final que será dado às lâminas. O conhecimento das características e da qualidade do lenho serve para estimar a adequação de uso das lâminas produzidas, bem como permite ajustes nas técnicas de preparação e processamento das toras.

Tanto coníferas como folhosas podem ser usadas para a produção de boas lâminas. Na América do Norte, contudo, as coníferas são as mais usadas para a produção de painéis laminados para a construção. Isso, porém, é mais uma tradição, devida à abundância dessas árvores em povoamentos praticamente homogêneos, do que uma seleção com base científica (HASELEIN; PAULESKI, 2004).

Segundo Lutz (1978), as folhosas são mais facilmente transformadas em lâminas que as coníferas. O principal fator é a maior resistência aos esforços de flexão apresentada pelas folhosas, produzindo lâminas menos danificadas por fendilhamento. A razão está relacionada ao menor conteúdo de lignina nas folhosas e ao fato de serem mais termoplásticas que as coníferas (PIO, 2002).

Nos Estados Unidos, as espécies mais utilizadas são os *Pinus* do Sul e o *Douglas fir*. Segundo o USDA (1999), a denominação *Pinus* do Sul (*Southern pine*), usada no mercado norte-americano, abrange espécies do gênero *Pinus* com características similares em aparência e em classes de qualidade, padronizadas por normas, nas quais se incluem: *Pinus taeda* (*Loblolly pine*), *Pinus elliottii* (*Slash pine*), *Pinus palustris* (*Longleaf pine*) e *Pinus echinata* (*Shortleaf pine*).

Na Austrália, as principais espécies do gênero *Eucalyptus* utilizadas comercialmente para a produção de lâminas são *Eucalyptus regnans*, *Eucalyptus delegatensis*, *Eucalyptus obliqua*, *Eucalyptus marginata* e *Eucalyptus diversicolor*. De acordo com MacMillan (1978), as principais dificuldades na utilização da madeira de *Eucalyptus* spp. são a massa específica relativamente alta e o alto teor de umidade da madeira verde. Outros problemas comuns são as rachaduras de topo, que ocorrem nas toras devido à liberação das tensões de crescimento, e o colapso celular que ocorre durante a secagem das lâminas (HASELEIN; PAULESKI, 2004).

Madeiras de baixa permeabilidade, como normalmente são as de *Eucalyptus* spp., apresentam maior dificuldade no momento da laminação se existir muita água livre no interior de suas células. Devido à pressão exercida pelo cabeçote do torno (ou da faqueadeira), com a barra de compressão pressionando a lâmina por um lado e o gume da faca pelo outro, há uma necessidade imediata de deslocamento da água livre, que pode produzir pressão hidráulica que leva à ruptura das paredes celulares, se não existir permeabilidade suficiente. Normalmente, altas pressões na barra de compressão não podem ser usadas na laminação de toras de *Eucalyptus* spp., devido ao alto teor de umidade da madeira verde desse gênero (HASELEIN; PAULESKI, 2004).

A permeabilidade da madeira é característica de grande influência nas operações de laminação, secagem e colagem. A madeira de boa permeabilidade não impõe maiores dificuldades ao deslocamento da água livre durante a laminação; a permeabilidade facilita a secagem e, na colagem, além de proporcionar uma fácil penetração, permite uma maior evaporação do vapor d'água que se desprende durante a cura do adesivo (LUTZ, 1978).

No Brasil, tendo em vista as dificuldades cada vez maiores na obtenção de matéria-prima proveniente de florestas nativas, extraída de espécies tradicionalmente usadas, como a *Araucaria angustifolia*, surgiu a necessidade da utilização de espécies alternativas para a produção de lâminas (IWAKIRI et al., 2000).

Espécies como *Eucalyptus* spp. e *Pinus* spp. apresentam grande potencial para suprir a demanda, em razão das boas características de suas madeiras, por serem espécies de rápido crescimento, e da disponibilidade de grandes áreas plantadas. Pesquisas sobre o comportamento das madeiras dessas espécies para laminação têm sido realizadas no Brasil, e as lâminas de *Pinus* spp. já vêm sendo utilizadas pelas indústrias desde o início da década de 90 (IWAKIRI et al., 2000).

A resistência mecânica é uma propriedade importante a considerar para a escolha de determinada madeira, quando se visa à produção de lâminas destinadas a elementos estruturais; nesse caso, lâminas com altos MOE e MOR são desejáveis. A massa específica, contudo, é o parâmetro mais empregado para a seleção da matéria-prima, por estar relacionada com praticamente todas as propriedades mecânicas. Madeiras muito leves, com massa específica básica menor que 400 kg/m³, além de não possuírem resistência mecânica suficiente são normalmente

mais difíceis de cortar, produzindo superfícies ásperas devido à fragmentação das paredes celulares. Por outro lado, madeiras pesadas e, portanto, duras, também são difíceis de laminar, devido à tendência de amassamento das paredes celulares na superfície de corte, além de produzirem painéis pesados, de árduo manuseio. Além disso, a colagem dessas madeiras, outro fator indispensável na produção de painéis laminados, normalmente é mais dificultosa. Madeiras de média massa específica (400 a 600 kg/m³) são, por esses motivos, as preferidas (LUTZ, 1978; HASELEIN; PAULESKI, 2004).

Lâminas de madeiras leves, de baixa massa específica, na maior parte das vezes, apresentam a vantagem de uma melhor estabilidade dimensional quando sujeitas a variações de umidade. Ainda, normalmente, são de fácil colagem e, após a adesão, produzem menores tensões nas linhas de cola que as lâminas de madeiras pesadas (HASELEIN; PAULESKI, 2004).

Em estudos iniciais sobre LVL foram utilizadas lâminas faqueadas. Posteriormente, as pesquisas passaram a utilizar lâminas produzidas por torno desenrolador, sendo este, atualmente, o principal processo para obtenção de lâminas destinadas à manufatura de LVL. As espessuras das lâminas obtidas por desenrolamento para essa finalidade se encontram em faixas entre 2,5 mm a 4,0 mm.

Segundo Walker (1993), citado por Bortoletto Júnior (2006), em estudos anteriores sobre LVL eram utilizadas lâminas espessas, de até 13 mm, cuja finalidade era minimizar o número de linhas de colagem, ou seja, economizar adesivo. Entretanto, lâminas espessas normalmente apresentam fendas de laminação profundas e requerem a aplicação de uma quantidade muito alta de adesivo, além de não dispersarem com a mesma eficiência os defeitos da madeira. Por esses motivos, atualmente, a produção comercial de LVL tem dado preferência ao uso de lâminas relativamente finas, com espessura de 3,2 mm.

3.7 Secagem de lâminas

Segundo Kollman (1975), a secagem de lâminas é um processo mais fácil que a secagem de madeira serrada, em razão da menor espessura das lâminas e do efeito de afrouxamento da estrutura da madeira, decorrente do flexionamento durante o processo de laminação (IWAKIRI et al., 2005).

As lâminas, ao deixarem o torno, possuem um alto teor de umidade que pode variar de 40 até mais de 100%. Essa alta umidade, além de ser indesejável para a colagem, diminui a resistência mecânica da madeira e a torna muito suscetível ao ataque de microorganismos. Como a maior parte dos adesivos necessita perder água durante o seu endurecimento, quanto maior o teor de umidade da madeira maior o tempo necessário para a colagem. Madeira com umidade acima de 30% praticamente não adsorve água do adesivo, prejudicando ou mesmo impedindo o umedecimento das superfícies e a colagem. Para que a colagem em prensa a quente seja eficiente, principalmente para adesivo fenólico, é necessário que o teor de umidade da madeira esteja entre 3 a 8% (HASELEIN; PAULESKI, 2004).

Os principais fatores que afetam a secagem são a massa específica, a permeabilidade e o teor de umidade da madeira, assim como a espessura das lâminas. Para um mesmo teor de umidade higroscópico (abaixo do PSF), madeiras pesadas possuem maior quantidade de umidade a ser evaporada. Quanto maior a massa específica, menor a porosidade e, na maioria dos casos, menor a permeabilidade. A massa específica da madeira afeta também a transferência de calor por condução e, então, a velocidade de aquecimento. Apesar de a condutividade aumentar com a massa específica, a difusividade diminui. Do mesmo modo, quanto maior a espessura de uma lâmina, maior o tempo necessário para sua secagem ao teor desejado (HASELEIN; PAULESKI, 2004).

A secagem ao ar livre é um processo demorado, além disso, não é suficiente para reduzir a umidade das lâminas a um teor adequado para uma correta colagem. Sendo assim, as indústrias de compensados e LVL utilizam processos de secagem artificial, ou secadores, em suas linhas de produção. Para controlar a secagem obtida, sensores que determinam a umidade das lâminas são colocados na saída dos secadores. São bastante empregados, para tal finalidade, medidores elétricos tipo capacitância ou dielétricos, que permitem leituras rápidas com razoável

precisão. Lâminas muito úmidas são marcadas com tinta e então separadas para ressecagem (SELLERS, 1985).

Lâminas com altos teores de umidade geralmente resultam em uma colagem fraca. Em certos casos, bolhas de vapor formadas na prensa (colagem a quente) provocam a delaminação do painel. Por outro lado, teores de umidade extremamente baixos também são prejudiciais porque tornam as superfícies inativas, diminuindo as possibilidades de ligações químicas e, conseqüentemente, reduzindo as forças de adesão entre o adesivo e a madeira (TOMASELLI, 1983; PIO, 2002).

3.8 Classificação de lâminas e estratégias de montagem

A maioria dos tipos de classificação comercial de lâminas, utilizados na manufatura de compensados, baseia-se na aparência das suas superfícies (método visual). Embora haja alguma correlação entre lâminas classificadas por aparência e suas propriedades de resistência, essa correlação não é alta o suficiente para indicar sobre a adequação das lâminas para a manufatura de LVL, que requer resistências para uso estrutural (BORTOLETTO JÚNIOR, 2006).

A classificação de lâminas de madeira em classes de resistência, em etapa anterior à de montagem dos compósitos, é uma prática eficiente para assegurar a resistência requerida aos produtos estruturais. Da mesma forma, a partir de um determinado lote de lâminas, a classificação destas permite uma melhor estratégia de montagem dos compósitos, pois, dependendo da exigência requerida ao produto, na montagem do LVL, pode ser admitido o uso de lâminas de menores resistências nas camadas que terão menor solicitação e de lâminas de maiores resistências nas camadas de alta solicitação, aquelas que serão expostas aos maiores esforços, aumentando, assim, o aproveitamento da matéria-prima sem comprometer a confiabilidade do produto final.

Tammela (1998), citado por Bortoletto Júnior (2006), descreve que outra forma de promover um bom aproveitamento da matéria-prima, reduzindo simultaneamente o descarte de lâminas e a manufatura de produtos de baixa qualidade, é o uso da técnica da mistura de lâminas. O objetivo da mistura é

dispersar uniformemente as lâminas de menor qualidade entre as demais, como uma estratégia de montagem. O uso dessa técnica não objetiva produtos LVL de máxima resistência, mas sim a redução da ocorrência de produtos de baixa resistência. Essa estratégia pode ser usada na manufatura de produtos LVL de menor exigência estrutural.

Os métodos de classificação podem ser destrutivos ou não destrutivos. A avaliação não destrutiva de materiais possibilita estimar as propriedades de partes do material, sem alterar sua capacidade de uso final (PIO, 2002).

No caso de lâminas de madeira, a classificação destas exige procedimentos não destrutivos e, ao mesmo tempo, rápidos e práticos, que permitam a estimativa de suas propriedades mecânicas nas linhas de produção das indústrias. Normalmente, nesse contexto, são escolhidos métodos que obtêm resultados por meio de leituras indiretas, como os que medem a velocidade de propagação de ondas acústicas e que possibilitam valores para as classificações pretendidas.

O parâmetro mais utilizado para a classificação por métodos não destrutivos tem sido o módulo de elasticidade, em alguns casos associado à massa específica aparente, como outra variável independente da mesma equação (PIO, 2002).

O método de ondas de tensão e o método de ultra-som são os mais utilizados para estimar as propriedades mecânicas de lâminas de madeira nas indústrias, com o objetivo de classificá-las por classes de resistência. Ambos métodos baseiam-se nos princípios da propagação de ondas acústicas e nas correlações existentes entre as velocidades de transmissão e as propriedades elásticas da madeira.

No Brasil, alguns importantes trabalhos e estudos com LVL estabeleceram critérios de classificação para lâminas optando pelos métodos de propagação de ondas acústicas. Matos (1997), Pio (2002) e Bortoletto Júnior (2006) classificaram lâminas por ondas de tensão (*stress wave*); Carvalho (2004) classificou por ultra-som; e Gabriel (2007) classificou por ambos os métodos.

Em pesquisas, entretanto, a classificação de lâminas de madeira por massa específica aparente ao teor de umidade de equilíbrio, quantificada individualmente, é um critério bastante confiável, devido a essa propriedade física apresentar boa correlação com praticamente todas as propriedades mecânicas.

A montagem de um compósito multilaminado atende ao princípio de balanceamento dos diferentes comportamentos físico-mecânicos das lâminas que o constituem (SUCHSLAND, 1972; BODIG; JAYNE, 1982). Para análise estrutural,

desde que apresente uma montagem equilibrada, o produto LVL pode ser considerado um material ortotrópico e, dessa forma, caracterizado por propriedades direcionais em relação a dois planos perpendiculares entre si (BODIG; JAYNE, 1982).

De acordo com Suchsland (1972), o balanceamento estrutural de um painel laminado em camadas pode ser alcançado mesmo utilizando-se lâminas de espécies e espessuras diferentes, desde que o plano de simetria seja mantido para o equilíbrio dos parâmetros elásticos dessas lâminas.

Em sistemas laminados horizontais (*flatwise*) submetidos à flexão, o posicionamento de lâminas de maior resistência próximo às superfícies torna-as mais eficientes, resultando em maior resistência ao elemento laminado. Na flexão estática, em que o elemento multilaminado dispõe-se apoiado nas extremidades e recebe carga aplicada no centro do vão entre apoios, as lâminas dispostas mais próximas à superfície superior sofrem solicitação de compressão, enquanto as lâminas da superfície inferior são solicitadas à tração, geralmente responsável pelo rompimento final da peça. A linha neutra se localiza próximo à metade da altura da seção transversal da peça, onde é mais acentuada a solicitação de cisalhamento (BODIG; JAYNE, 1982).

3.9 Colagem e prensagem

Segundo Kollmann et al. (1975) e Marra (1992) algumas características intrínsecas da madeira promovem significativas interferências no processo de colagem. A variabilidade que ocorre na massa específica e porosidade entre os lenhos inicial e tardio, cerne e alburno, lenhos juvenil e adulto 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. Essas variações podem afetar a mobilidade do adesivo e influenciar a sua cura. Geralmente, as madeiras de folhosas, devido à grande diversidade de constituição química e maior complexidade estrutural, apresentam maior dificuldade de colagem que as de coníferas (VITAL et al., 2006). Entretanto, comparar coníferas e folhosas quanto à permeabilidade de suas madeiras é questão que envolve muitas variáveis.

A estrutura celular das coníferas é basicamente formada por traqueóides axiais (mais de 90% de seu volume), e essas células, naturalmente responsáveis pela condução de líquidos no interior do lenho, apresentam pontoações areoladas intertraqueoidais que desempenham fundamental influência na permeabilidade da madeira. Os pares de pontoações intertraqueoidais presentes nas faces radiais das paredes celulares proporcionam, quando não aspirados, a circulação ascendente de líquidos na árvore viva. Os traqueóides de lenho inicial, com suas pontoações areoladas de grandes diâmetros em relação às de lenho tardio, são mais suscetíveis à aspiração. Produz-se um aparente paradoxo: o lenho tardio torna-se mais permeável que o lenho inicial porque suas pontoações tendem a ser pouco aspiradas, apesar (e por causa) do reduzido diâmetro de seus traqueóides. A maioria das pontoações de lenho inicial é aspirada quando da transformação do albarno em cerne, fato que ajuda a explicar a menor permeabilidade desse lenho (MARCHIORI, 1992).

Entretanto, alguns autores mencionam que a madeira de lenho inicial de coníferas é constituída por traqueóides com maior número de pontoações intertraqueoidais. Segundo Sjöström (1993), algumas variações que afetam a permeabilidade da madeira de coníferas, refletindo no tratamento com produtos químicos, na secagem e na colagem, são o número, forma e tamanho das pontoações. De acordo com esses autores, a quantidade de pontoações nos traqueóides de lenho inicial é cerca de 200 por traqueóide, sendo que a maioria delas está localizada nas paredes radiais. Traqueóides de lenho tardio possuem apenas de 10 a 50 pontoações pequenas.

Por outro lado, a composição anatômica das folhosas é bem mais especializada e complexa. A estrutura celular do lenho das folhosas geralmente é constituída com a predominância de fibras (até 80% do volume da madeira), células esbeltas com poucas e pequenas pontoações, que desempenham a função de sustentação. A condução ascendente de líquidos é função dos elementos vasculares. As fibras são classificadas em fibrotraqueóides e fibras libriformes, sendo a base da distinção entre elas as pontoações: as fibrotraqueóides possuem pontoações distintamente areoladas e relativamente grandes (4-9 μm), enquanto as fibras libriformes possuem pontoações pequenas (2-4 μm), inconspicuamente areoladas, sendo também normalmente menores em comprimento e diâmetro (BURGER; RICHTER, 1991). Especificamente para o eucalipto, a porcentagem total

de fibras (fibras libríformes + fibrotraqueóides) é de cerca de 65%, a de vasos é de 17%, e a de tecido parenquimatoso é de 18% (FOELKEL; BARRICHELO, 1975; BARRICHELO; BRITO, 1976).

Em folhosas, nas áreas de contato entre fibra e vaso, existe rara ou nenhuma pontoação (BURGER; RICHTER, 1991). Assim, a permeabilidade nas folhosas depende fundamentalmente do número de vasos por unidade de área, do diâmetro dos vasos e da distribuição dos mesmos nos anéis de crescimento. Depende também da presença ou não de tilos ou conteúdos como gomas, resinas ou óleos, no interior desses vasos.

A distribuição dos vasos (em secção transversal, chamados poros) dentro do anel de crescimento é chamada porosidade. Na porosidade difusa, característica do *Eucalyptus saligna* (ALZATE, 2004), o diâmetro dos poros permanece mais ou menos constante dentro dos anéis de crescimento, não havendo distinção entre os lenhos inicial e tardio (MARCHIORI, 1992). A permeabilidade, em consequência, é mais uniforme nessa madeira.

Na direção radial da madeira de folhosas, a permeabilidade depende principalmente das dimensões dos raios e do número de raios por unidade de área. Segundo Marchiori (1992), depende também da composição química dos extrativos que freqüentemente são armazenados nas células parenquimatosas.

As lâminas de madeira que formam um painel LVL podem apresentar alto índice de variação dimensional. Isso faz com que a movimentação da madeira, ou das lâminas do LVL, frente às variações de umidade e temperatura do ambiente, solicite severamente as linhas de colagem. Tal fato ocorre principalmente em madeiras com altos índices de retração e inchamento, como são aquelas obtidas de *Eucalyptus* spp.

Para a seleção da madeira a ser utilizada na manufatura de peças laminadas coladas é necessário observar alguns fatores. É essencial definir o uso final do produto laminado, sua resistência, durabilidade, propriedades de adesão das espécies, teor de umidade e qualidade da superfície preparada para a colagem. Peças (ou lâminas) com defeitos que possam prejudicar a qualidade da colagem e do produto acabado devem ser rejeitadas (MATSUNAGA, 1995).

A heterogeneidade da madeira, combinada com o efeito das fendas de laminação, leva o LVL à tendência de empenamentos. Essa tendência pode ser minimizada ou balanceada por meio de um giro de 180° na lâmina, em relação ao

seu eixo horizontal. Na montagem, a disposição das faces das lâminas deve ser de tal modo que os seus lados abertos (lado das fendas de laminação) sempre fiquem voltados para as linhas de cola. Isso melhora o desempenho do LVL, bem como a sua aparência (TAMMELA, 1998; BORTOLETTO JÚNIOR, 2006).

A tecnologia básica utilizada na colagem de compensados estruturais pode ser utilizada na produção de painéis e elementos LVL, com pequenas alterações (MALONEY, 1996).

No processo de colagem, o adesivo à base de resina fenólica é aplicado por extrusão ou aspersão. As lâminas são montadas na espessura requerida e imediatamente pré-prensadas. Essa assemblagem facilita o escoamento, a transferência e a penetração do adesivo nas interfaces das juntas, principalmente em madeiras pouco permeáveis, e permite um tempo importante para que a água em excesso possa migrar da linha de cola. Também proporciona uma aderência inicial necessária para o transporte subsequente. A pressão e a temperatura necessárias para produzir uma linha de cola durável, no menor tempo possível, são obtidas em prensagem a quente, em prensas de abertura simples ou múltipla, dependendo da capacidade da linha de produção. A temperatura de prensagem é regulada entre 140 e 180 °C (PEASE, 1994; MATOS, 1997).

Segundo Freas e Selbo (1954), a característica esperada do adesivo utilizado em peças laminadas coladas é que proporcione resistência de colagem e durabilidade, possibilitando às peças laminadas atuarem como um único elemento estrutural por todo seu tempo de vida útil. Dessa forma, os adesivos utilizados não devem causar danos ou diminuir a resistência da madeira. Sob outro aspecto, devem permitir as operações de produção sem dificultar ou causar danos aos equipamentos.

O adesivo aplicado nas lâminas de madeira deve possibilitar à peça estrutural a capacidade de resistir às mais rigorosas condições de exposição. A peça deve apresentar resistência a intempéries, variações de temperatura e umidade, ataques de fungos e insetos, e ser inerte à corrosão química. Outra qualidade requerida ao adesivo é que sua resistência seja maior ou igual a da madeira, assim como sua durabilidade (CHUGG, 1964).

A escolha do adesivo é de fundamental importância. Para a colagem de lâminas de madeira, com propósito estrutural, é comum a utilização de resinas fenólicas, mas tecnologias para emprego de isocianatos e poliuretanos também

estão disponíveis, embora pouco utilizadas (MALONEY, 1996; BORTOLETTO JÚNIOR, 2006).

Por se tratar de produto estrutural, o LVL deve ser manufaturado com adesivo sintético termofixo a prova d'água. Os adesivos tipicamente usados para atender às exigências de durabilidade dos produtos estruturais são o fenol-formaldeído e o resorcinol-formaldeído, sendo que o último apresenta um custo muito maior do que o primeiro, não obstante a durabilidade de ambos seja praticamente a mesma (SELLERS, 1985). Resinas com mistura de fenol-formaldeído e resorcinol-formaldeído (em menor proporção) também são comuns na fabricação de LVL, de forma a minimizar o tempo de prensagem.

A resina fenol-formaldeído é largamente utilizada como adesivo termoestável em produtos de madeira, ou à base de madeira, para uso exterior. O peso molecular dessa resina é razoavelmente alto e se estabiliza na superfície da madeira, desenvolvendo uma liga resistente à água, durável, rígida e forte. A cura dessa resina pode ser descrita pela conversão de pequenas moléculas em grandes moléculas, por processos de polimerização, ramificação das cadeias e ligações cruzadas (*crosslinking*), que finalmente resultam em uma rede tridimensional de peso molecular tendendo ao infinito (PROVDER, 1989; PEDROSA, 2003).

Os adesivos fenólicos são completamente a prova d'água, resistem a altas temperaturas, são tóxicos para microorganismos e não liberam formaldeído. Entretanto, possuem coloração escura e só curam a temperaturas maiores que 100°C (HASELEIN; PAULESKI, 2004).

Segundo Ginzel e Peraza (1966), os adesivos à base de fenol-formaldeído exigem maior temperatura de prensagem (135 a 150°C) e maior taxa de compressão. Exigem também maiores cuidados quanto às condições de umidade da madeira.

A resina fenol-formaldeído, além de FF (fenol sintético e formaldeído em razão molecular aproximada de 1:1,9-2,5) e água (base aquosa), possui, normalmente, em sua composição, pequenos percentuais de outras substâncias, como soda cáustica (NaOH), amido, uréia (menos de 4%, nem sempre presente) e metanol. O percentual de teor de sólidos da resina indica a proporção de sólidos não-voláteis presentes em sua formulação. Assim sendo, esse teor não é constituído exclusivamente de sólidos de fenol-formaldeído. Além do teor de sólidos, a viscosidade (a 25°C) e o pH da resina devem ser observados. Para uso na indústria,

normalmente, a resina fenol-formaldeído é misturada com materiais de enchimento e extensão e tem a sua viscosidade acertada por adição de pequena quantidade de água. Dependendo das recomendações do fabricante também ocorre a adição de soda cáustica como catalisador (HASELEIN, 2008).

Extensores são substâncias com propriedades aderentes que são adicionadas à resina adesiva para reduzir a quantidade de adesivo primário necessária. Em muitas situações, no entanto, o extensor também atua de modo a melhorar o desempenho do adesivo. Por exemplo, proporciona pega mais rápida durante a pré-prensagem e melhor adesão em madeiras densas. Proteínas (torta de soja, albumina do sangue) e amiláceos (farinha de trigo) são os extensores mais usados (HASELEIN, 2008).

Material de enchimento refere-se a material sem propriedades aderentes, que é adicionado à resina adesiva para melhorar seu manuseio, performance, resistência ou outras características, como a capacidade de preenchimento de vazios e irregularidades, bem como para reduzir a porosidade da superfície a ser colada. Seu uso é indicado para o preenchimento das fendas de laminação na colagem de painéis estruturais, para complementar o adesivo fenólico que, por si só, não é eficiente como preenchedor de vazios. Materiais lignocelulósicos e inorgânicos são incluídos nessa categoria. Os mais conhecidos são: farinha de casca de noz ou de casca de coco, pó de madeira, lignina (resíduo da indústria de papel e celulose) e pentosanas obtidas a partir do tratamento químico de resíduos de sabugo de milho, bagaço de cana-de-açúcar, casca de aveia, entre outros (HASELEIN, 2008).

Segundo Tammela (1998), a gramatura de adesivo necessária depende do tipo de madeira e da qualidade da superfície da lâmina. Há uma forte correlação entre a gramatura de adesivo e o desempenho do LVL, isso porque o adesivo, além de manter as lâminas unidas, também as reforça por meio do preenchimento das fendas de laminação e de outros vazios normalmente existentes nas suas superfícies (BORTOLETTO JÚNIOR, 2006).

Bohlen (1975), Jung (1982), Youngquist et al. (1984) e Hesterman e Gorman (1992) utilizaram adesivo fenólico na gramatura de 300 g/m², aplicado em linha dupla sobre lâminas de *Douglas fir* (*Pseudotsuga menziesii*). Kretschmann et al. (1993) empregaram adesivo fenólico na gramatura de 430 g/m², aplicado em linha dupla, para lâminas de *Pinus* sp. (MATOS, 1997).

Tamela (1998) descreve valores de referência para a temperatura de prensagem em uma operação industrial que utiliza resina fenólica: estes devem ser inferiores a 180 °C, sendo uma faixa padrão a que varia entre 130 e 150 °C. O tempo de prensagem depende da espessura do painel (CARVALHO, 2004).

Na prensagem a quente, o tempo necessário para que a linha de cola mais profunda de um painel ou elemento multilaminado alcance a temperatura necessária para a consolidação do adesivo depende da espessura do painel. Na prática, normalmente se usa uma relação de tempo de prensagem (em minutos) em função do maior afastamento (em milímetros) existente entre a linha de cola mais interna e as superfícies dos pratos da prensa, segundo a espessura do compósito. Geralmente, os fabricantes de resina informam essa relação, em minutos/milímetros, no boletim técnico do produto.

A temperatura e o tempo de prensagem variam de acordo com a espessura do LVL, tipo de madeira, conteúdo de umidade das lâminas, gramatura de adesivo aplicada e tipo de junta entre as lâminas. Altas temperaturas de prensagem trazem como vantagens melhor escoamento do adesivo e menor tempo para atingir a sua cura, o que repercute em maior produtividade. Em contrapartida, aumentam os riscos de formação de bolhas de vapor (BORTOLETTO JÚNIOR, 2006).

Na prensagem, a pressão promove o íntimo contato entre as superfícies das lâminas e viabiliza a movimentação do adesivo nas interfaces das juntas. A magnitude da pressão depende da qualidade superficial das lâminas, do tipo de madeira, da tolerância em espessura (do produto final), entre outros fatores. Na prensagem a quente, pressões entre 12 e 16 kgf/cm² são comumente empregadas para a produção de LVL nas indústrias; para madeiras leves (*softwoods*), pressões entre 12 a 14 kgf/cm² são usuais e suficientes (TAMMELA, 1998; BORTOLETTO JÚNIOR, 2006).

Jung (1982), Youngquist, Laufenberg e Bryant (1984) e Jokerst (1984) produziram LVL com pressão exercida entre 10 a 12,5 kgf/cm² e temperatura dos pratos da prensa entre 140 a 170 °C (MATOS, 1997).

Matos (1997) produziu painéis LVL com espessura nominal de 28,8 mm – 29,4 mm, com lâminas de *Pinus taeda*, com 9 lâminas de 3,2 mm de espessura e com 7 lâminas de 4,2 mm de espessura, utilizando resina fenol-formaldeído, na gramatura 480 g/m² aplicada em linha dupla; pressão de 10 kgf/cm²; temperatura de 140 °C; tempo de prensagem de 25 minutos.

Pio (2002) produziu painéis LVL com espessura aproximada de 25,4 mm após calibragem, com 13 lâminas de *Eucalyptus grandis* de diferentes espessuras (2,0 e 2,6 mm), utilizando resina fenol-formaldeído, na gramatura 350 g/m² aplicada em linha dupla; pressão de 12 kgf/cm²; temperatura de 150 °C; tempo de prensagem não informado, mas, de acordo com o autor, de 1 min./mm.

Pedrosa (2003) produziu painéis LVL com espessura nominal de 33 mm, com 11 lâminas de 3 mm de espessura, de *Pinus taeda* e *Eucalyptus dunnii*, sem mistura das espécies, utilizando resina fenol-formaldeído, nas gramaturas de 420 g/m² para o pinus e 400 g/m² para o eucalipto, aplicadas em linha dupla; pressão de 9,2 kgf/cm² para ambos os tratamentos; temperaturas de 135 °C para os painéis de pinus e 130 °C para os painéis de eucalipto; tempo de prensagem de 25 minutos para ambos.

Carvalho (2004) produziu painéis LVL com espessura nominal de 54 mm, com 18 lâminas de 3 mm de espessura do híbrido *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, utilizando resina fenol-formaldeído, nas gramaturas de 360 e 380 g/m² aplicadas em linha dupla. Na prensagem a quente, utilizou duas situações: ciclo único e três ciclos. No ciclo único, usou temperatura de prensagem de 145 °C com pressão específica de 1,3 MPa (13,3 kgf/cm²), com um tempo de prensagem de 40 minutos. No tratamento de três ciclos, com 20 minutos cada, usou as mesmas temperatura e pressão aplicadas para o tratamento de ciclo único.

Bortoletto Júnior (2006) produziu painéis LVL com espessura nominal de 54 mm, com 18 lâminas de 3 mm de espessura de *Pinus merkusii*, utilizando resina fenol-formaldeído, na gramatura de 190 g/m² aplicada em linha simples; pressão de 11 kgf/cm²; temperatura de 150 °C; tempo de prensagem de 30 minutos.

Gabriel (2007) produziu painéis LVL com dimensões comerciais, com espessura nominal de 28 mm e 55 mm, com 13 e 25 lâminas de 2,2 mm de espessura respectivamente, de pinus tropicais (*Pinus caribaea* var. *caribaea*, *Pinus caribaea* var. *bahamensis*, *Pinus caribaea* var. *hondurensis* e *Pinus oocarpa*), utilizando resina fenol-formaldeído, na gramatura de 380 g/m² aplicada em linha dupla; pressão de 10 kgf/cm²; temperatura de 135 °C. O tempo de prensagem não foi informado, porém, foi monitorado de acordo com resultados de ensaios laboratoriais preliminares.

O corte dos painéis consiste na última etapa de produção. As dimensões finais são definidas conforme o uso pretendido. Essa etapa possibilita a confecção

de peças em formas e dimensões específicas pré-definidas, o que constitui uma das vantagens do LVL em comparação à madeira serrada. Para a obtenção de peças com dimensões estruturais (longos comprimentos), podem ser feitas emendas, semelhantes àsquelas utilizadas para a madeira maciça (LAUFENBERG, 1983; CARVALHO, 2004).

Na saída da prensa, os painéis LVL são serrados e emendados nos topos, formando peças de tamanho estrutural, podendo competir em preço e desempenho com madeiras de elevada classe estrutural (YOUNGQUIST, 1985).

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Matéria-prima

O material utilizado como matéria-prima foi adquirido de duas indústrias laminadoras, de diferentes regiões. As lâminas de *Eucalyptus saligna* (eucalipto) foram provenientes de árvores de 25 anos, com DAP aproximado de 40 cm, oriundas de plantio com espaçamento 3 x 1,5 m localizado no município de Barão de Cotegipe, norte do estado do Rio Grande do Sul. A laminação foi realizada no mesmo município, pela empresa Martin Ind. e Com. de Laminados de Madeira Ltda. Foram processadas em torno desenrolador as toras da base de 3 árvores, para a obtenção de lâminas com espessura de 3,2 mm, as quais, a seguir, foram guilhotinadas em 75 unidades nas dimensões 0,82 m x 1,15 m (no comprimento das toras) e, ainda verdes, transportadas para o Laboratório de Produtos Florestais da Universidade Federal de Santa Maria (LPF – UFSM).

As lâminas de *Pinus taeda* (pinus) foram procedentes de árvores de 25 anos, com DAP aproximado de 36 cm, oriundas de plantio de reflorestamento com espaçamento inicial 2 x 3 m e apresentando, após 2 desbastes, espaçamento 4 x 6 m na época do corte. O talhão está localizado no município de Prudentópolis, estado do Paraná. A laminação foi realizada pela empresa Laminadora Centenário Ltda., localizada no município de Imbituva, no mesmo estado (PR). Por torno desenrolador, foram processadas as toras da base de 4 árvores, das quais foram obtidas lâminas com espessura de 3,2 mm, sendo estas guilhotinadas em 75 unidades, nas dimensões 0,82 m x 1,15 m (no comprimento das toras). As lâminas foram secadas na indústria por secagem artificial, resultando em um teor de umidade entre 6 e 8%, e transportadas para o mesmo destino (LPF – UFSM) anteriormente citado.

4.2 Secagem das lâminas

As lâminas de eucalipto foram gradeadas na posição horizontal em uma pilha, na câmara climatizada do LPF, assim que foram descarregadas. O espaçamento

entre as lâminas ficou determinado por sarrafos de 2 cm de altura, suficientes para uma boa circulação de ar. A Figura 1 mostra as lâminas de eucalipto em processo de secagem. As condições ambientais da câmara são controladas para a temperatura de 20°C e umidade relativa do ar de 65%. O material permaneceu dessa forma na câmara por um período de aproximadamente 60 dias até alcançar o teor de umidade de equilíbrio higroscópico com o ambiente, em torno de 12%. Depois disso, a pilha foi desfeita, os sarrafos retirados e as lâminas armazenadas umas sobre as outras na câmara climatizada.



Figura 1. Pilha de lâminas de eucalipto no interior da câmara climatizada.

O modo como a pilha foi feita, com três sarrafos em todos os vãos de espaçamento, alinhados verticalmente para a transferência do peso do material, e desse modo, mantendo as lâminas presas nas extremidades e no centro, não foi adequado conforme se constatou. Observou-se que, por terem seu movimento de contração restringido durante a secagem, as lâminas de eucalipto apresentaram elevado número de rachaduras em suas superfícies. Assim, a disposição das lâminas soltas, espaçadas em suportes individuais, teria sido mais adequada.

As lâminas de pinus, por já estarem secas (6 a 8%), foram diretamente armazenadas na câmara climatizada, nas mesmas condições finais das lâminas de eucalipto.

Em experiência anterior, foi testada a secagem de lâminas verdes de *Pinus taeda* de outra procedência, do mesmo modo como se executou com as lâminas verdes de *Eucalyptus saligna*, sendo que, nessa ocasião, houve ataque por fungos e, em consequência disso, o material foi descartado.

4.3 Teor de umidade e massa específica das lâminas

Para os dois lotes de lâminas secas, foi realizada uma primeira seleção, tendo sido escolhidas as lâminas com a ausência ou a menor presença de defeitos, naturais ou decorrentes da secagem. As lâminas com melhor aparência visual de cada espécie foram serradas em serra esquadrejadeira nas dimensões 38 cm x 48 cm (alinhamento das fibras) x 3,2 mm, resultando em 114 lâminas de eucalipto e 147 lâminas de pinus.

Do material excedente, resultante do corte dessas lâminas, foram extraídas aleatoriamente 70 amostras de cada espécie, com dimensões 15 x 15 cm, representativas das lâminas esquadrejadas para a determinação do teor de umidade. Segundo as recomendações da norma ASTM D 4442, as amostras foram pesadas em balança eletrônica e secadas em estufa laboratorial a 103°C até a determinação do peso constante.

As amostras indicaram um teor de umidade médio de 11,7% para as lâminas de eucalipto e de 7,8% para as lâminas de pinus. Esses teores encontrados foram então estabelecidos como valores de equilíbrio para o cálculo da massa específica aparente das lâminas selecionadas.

A massa específica ao teor de umidade de equilíbrio (MEe) é o quociente da massa pelo volume, sendo ambas as grandezas medidas ao mesmo teor de umidade de equilíbrio. Para as 114 lâminas de eucalipto, foi calculada a média de MEe ao teor de umidade de 11,7% e, para as 147 lâminas de pinus, foi calculada a média da mesma propriedade ao teor de umidade de equilíbrio de 7,8%.

Segundo as recomendações da norma ASTM D 2395, as lâminas foram pesadas em balança eletrônica e medidas por régua e paquímetro digital para as determinações de massa e volume nos respectivos teores de umidade, e os

resultados das médias de ME_e indicaram 0,813 g/cm³ para as lâminas de eucalipto e 0,552 g/cm³ para as lâminas de pinus.

Ainda, os valores das médias de massa específica (ME_e), na condição de umidade de equilíbrio, foram corrigidos para valores de massa específica básica (ME_b), na condição de massa seca (teor de umidade = 0%) e volume ao teor de umidade de equilíbrio, através da Equação 1, com o objetivo de obter dados para comparações com resultados citados na literatura.

$$ME_b = ME_e \times \frac{1}{1 + \frac{TU}{100}} \quad (1)$$

Onde:

ME_b = massa específica básica, em g/cm³

ME_e = massa específica ao teor de umidade de equilíbrio, em g/cm³

TU = teor de umidade de equilíbrio das lâminas, em %

Assim, para as lâminas de eucalipto, o valor médio de ME_b (massa ao TU=0% ÷ volume ao TU=11,7%) foi igual a 0,727 g/cm³ e, para as lâminas de pinus, o valor médio de ME_b (massa ao TU=0% ÷ volume ao TU=7,8%) foi igual a 0,512 g/cm³.

4.4 Delineamento experimental

O delineamento experimental está apresentado na Figura 2. Diferentes composições de lâminas de eucalipto e pinus, caracterizando seis tratamentos, foram testadas. Cada composição foi formada por cinco lâminas, da mesma espécie ou com mistura das espécies, e a cada uma delas foi atribuído um símbolo identificador (LVL1, LVL2, LVL3, LVL4, LVL5 ou LVL6), para distinguir os tratamentos. Foram manufaturados seis painéis LVL por tratamento (seis repetições), perfazendo um total de trinta e seis painéis. As dimensões finais pretendidas para os painéis LVL foram 37 cm de largura x 47 cm de comprimento x

16 mm de espessura, aproximadamente. Determinou-se o comprimento dos painéis na direção do alinhamento das fibras das lâminas.

Com base no exposto, foram necessárias, de cada espécie, 36 lâminas para as camadas externas (capas e contracapas), 36 lâminas para as camadas intermediárias e 18 lâminas para as camadas centrais (miolos), totalizando 90 lâminas de eucalipto e 90 lâminas de pinus.

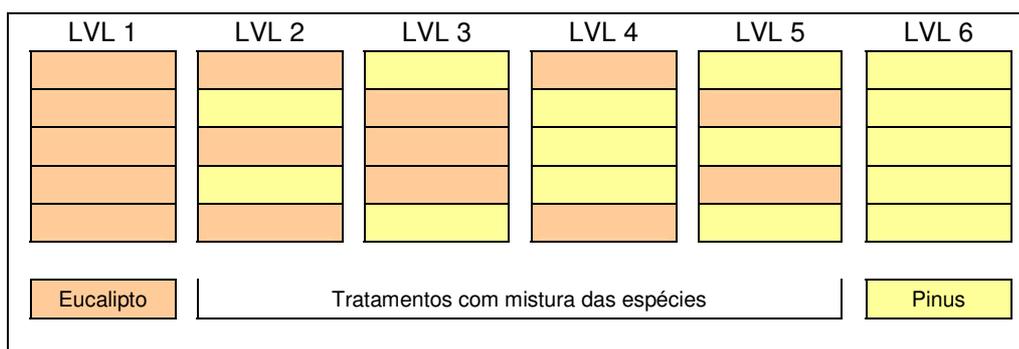


Figura 2. Delineamento experimental.

4.5 Classificação e distribuição das lâminas

A partir da aparência visual e dos valores médios de MEe, foi adotada como meio de classificar as lâminas para as posições de montagem a seguinte metodologia:

a) As lâminas foram organizadas em classes, de acordo com a qualidade visual, em lâminas “A” (praticamente sem defeitos), lâminas “B” (defeitos insignificantes) e lâminas “C” (presença de alguns defeitos, como pequenos nós e/ou fendas). Lâminas com defeitos maiores foram classificadas por “D” e foram descartadas.

b) Os valores individuais obtidos para massa específica das lâminas foram organizados em uma listagem, de maior a menor, identificando-se o valor mais próximo da média obtida, para cada espécie, de forma que os valores acima deste indicavam maior massa específica e os abaixo, menor massa específica.

c) As lâminas foram classificadas em faixas de valores de MEe, conforme seus valores individuais de massa específica. As faixas de valores estabelecidas

demarcaram um percentual de variação em relação à média, para cada espécie. Assim, valores que diferiram em até 5% da média para cima foram identificados como classe “1M” e os que diferiram em até 5% da média para baixo, como classe “1m”. Seguiu-se essa classificação para valores que diferiram na faixa entre 5 e 10% (“2M” e “2m”), na faixa entre 10 e 15% (“3M” e “3m”), na faixa entre 15 e 20% (“4M” e “4m”) e, por último, para os que diferiram na faixa entre 20 e 25% (“5M” e “5m”).

d) Lâminas que não se enquadraram nos requisitos para a classificação descrita no item “c” foram descartadas.

e) Para cada conjunto de tratamentos, ou para cada seis painéis (LVL1, LVL2, LVL3, LVL4, LVL5 e LVL6), a partir da primeira repetição, foi definida a posição de cada lâmina em cada painel, da seguinte forma:

e.1) Primeiramente, procedeu-se à identificação das lâminas para as capas e contracapas, obedecendo-se a um sentido giratório de distribuição (partindo de uma posição de capa de um dos painéis e passando pelos seis tratamentos, de painel em painel, voltando pela posição de contracapa até o painel inicial) e escolhendo-se as lâminas classificadas visualmente por “A” e com valores de massa específica individual crescente a partir da média, “1M”, “2M”, “3M”, “4M” até “5M”, nessa ordem e conforme necessário. Quando a quantidade de lâminas classificadas por “A” e com valores de MEe acima da média não foi suficiente, iniciou-se a distribuição a partir de valores de MEe um pouco abaixo da média, conforme necessário para viabilizar quantidade suficiente de lâminas com a mesma classificação visual.

e.2) Depois disso, iniciou-se a identificação das lâminas para as camadas intermediárias, também segundo um sentido giratório de distribuição, similar ao anterior, mas a partir das lâminas classificadas visualmente por “B” e com valores de massa específica individual decrescente a partir da média, “1m”, “2m”, “3m”, “4m” até “5m”, nessa ordem e conforme necessário. Foram utilizadas ainda as lâminas remanescentes da classificação “A”. Quando a quantidade de lâminas classificadas por “B” e com valores de MEe abaixo da média não foi suficiente (incluída a quantidade remanescente de lâminas “A”), iniciou-se a distribuição a partir de valores de MEe um pouco acima da média, conforme necessário para viabilizar quantidade suficiente de lâminas com a mesma classificação visual.

e.3) Finalmente, a identificação das lâminas para as camadas de miolo procedeu-se em direção linear, com o uso das lâminas remanescentes das classificações visuais “A” e “B” e daquelas classificadas por “C”, segundo um critério

que deu prioridade classificatória, em relação à massa específica individual, para a proximidade ao valor da média, podendo ser escolhidas nesse ordenamento lâminas com valores abaixo ou acima da média.

A escolha de posicionar valores crescentes de massa específica nas camadas externas teve por objetivo proporcionar, a partir da média, incrementos de resistência aos painéis em solicitações de flexão. Por outro lado, posicionar valores decrescentes de M_{Ee} nas camadas intermediárias objetivou proporcionar decréscimos de resistência, como forma de evidenciar, paulatinamente e a partir da média, a diferenciação dessas camadas em relação às externas.

Nessa etapa do experimento, foram registrados os valores de massa específica para cada camada dos painéis, de todos os tratamentos e repetições.

4.6 Preparo e aplicação do adesivo

O adesivo escolhido tem o nome comercial Cascophen HL-2080 e foi produzido e disponibilizado para este experimento pela empresa Hexion Química Ind. e Com. Ltda (Curitiba - PR). Trata-se de uma resina fenólica tipo resol, alcalina, em solução aquosa, à base de fenol-formaldeído. Essa resina apresenta teor de sólidos entre 49 e 51%, viscosidade Brookfield (25 °C) entre 400 e 800 centipoises, pH (25 °C) entre 11,5 e 13 e gel time (121 °C) entre 6 e 9 minutos.

O material de enchimento, também disponibilizado pela Hexion, tem o nome comercial Albex-9 e consiste de uma farinha de casca de coco micro pulverizada.

O teor de umidade das lâminas de madeira, para atender as especificações de uso da resina fenólica, deve-se situar na faixa de 4 a 6% para as camadas internas, podendo chegar até 8% para capas e contracapas.

Para baixar a umidade das lâminas de eucalipto e pinus aos teores recomendados para a colagem, procedeu-se à secagem destas em estufa laboratorial com circulação de ar. O processo foi controlado por amostras de ambas as espécies e baseado em resultados de testes anteriores.

Primeiramente, foram colocadas na estufa, a 35 °C, somente as lâminas de eucalipto por um período de 5 horas. Em continuidade, a temperatura foi aumentada para 40 °C e incluídas as lâminas de pinus, de modo que todo o material

permaneceu sob secagem por mais 12 horas. Ao final do processo, as lâminas de eucalipto indicaram um teor de umidade médio de aproximadamente 7%, e as de pinus, 4%, sendo então encerrada a secagem. O material foi acondicionado em sacos plásticos para a manutenção dos teores alcançados até o momento da colagem.

O preparo da mistura adesiva seguiu as recomendações do fabricante. Além da resina fenólica foram incluídos material de enchimento (Albex-9), extensor (farinha de trigo) e água, conforme as proporções apresentadas na Tabela 1.

Os ingredientes sólidos foram peneirados e misturados lentamente, um de cada vez, com o auxílio de um “mixer” elétrico portátil, para a obtenção de uma mistura homogênea com boa distribuição das substâncias. A água também foi misturada lentamente, com o uso do mesmo equipamento. A temperatura do ambiente foi controlada em aproximadamente 25°C. O recipiente que continha a mistura adesiva, sempre que possível, permaneceu fechado para evitar a perda de umidade. Em intervalos regulares, durante a colagem dos painéis, a mistura foi novamente batida, o que ajudou a manter sua viscosidade.

Tabela 1. Proporção dos ingredientes na composição final do adesivo; partes por peso.

Material	Partes
Resina fenol-formaldeído	100
Farinha de trigo	5
Albex - 9	5
Água	5

O adesivo preparado para uso, segundo a formulação apresentada, teve sua viscosidade controlada por viscosímetro do tipo Copo Ford, utilizando-se o copo nº 8 para os testes. A viscosidade (a 25°C) foi considerada adequada mediante o escoamento do adesivo (fluxo contínuo) em um tempo de 40 a 45 segundos. Caso necessário, pequena quantia de água poderia ser adicionada à mistura para diminuir a viscosidade ou pequena quantidade de farinha de trigo para aumentá-la. Entretanto, o adesivo escoou no tempo indicado, não sendo necessários os ajustes.

A gramatura de adesivo utilizada foi de 200 g/m², aplicada em linha simples. A quantidade de adesivo, em peso, para a cobertura das faces das lâminas foi quantificada diretamente sobre elas, por pesagem em balança eletrônica. O adesivo foi espalhado manualmente com o auxílio de uma espátula plástica e de um pincel.

Conforme os critérios de classificação e distribuição estabelecidos, citados anteriormente, os painéis foram montados individualmente, seguindo a seqüência de um por tratamento até recomençar em novo ciclo de repetição, objetivando, assim, a distribuição de possíveis variáveis de processo.

4.7 Prensagem a frio

Após a aplicação do adesivo e a montagem das camadas, foi realizada a prensagem a frio, por um período mínimo de 60 minutos para cada painel. Esse tempo foi estipulado por ser considerado suficiente, de acordo com observações realizadas em testes preliminares, para a migração da água do adesivo para o interior da madeira. O boletim técnico da Hexion (fabricante da resina) ressalta que períodos de assemblagem menores que 40 minutos podem resultar na formação de bolsas de vapor nas linhas de cola, durante a prensagem a quente. A prensagem a frio, com baixa pressão, foi feita por meio de uma prensa manual e com o auxílio de uma caixa de madeira (sem fundo e sem tampa) colocada sobre uma chapa de aço galvanizado revestida com papel vegetal. As laterais da caixa restringiram o deslocamento horizontal das lâminas durante a aplicação da pressão. Depois de individualmente removidos da prensa a frio, os painéis, já com uma esperada pega inicial, foram encaminhados imediatamente à prensagem a quente.

4.8 Prensagem a quente

A prensagem a quente foi realizada em prensa de laboratório, marca Omeco, acionada por pistão hidráulico e com capacidade para 100 toneladas de aplicação de carga; pratos com dimensões de 60 x 60 cm, aquecidos por resistências elétricas.

A pressão específica utilizada foi de 14 kgf/cm². Com base nessa pressão requerida pelos painéis, foi calculada a pressão de leitura, controlada pelo manômetro do equipamento, em função da área dos painéis e da área da secção transversal do pistão.

A temperatura dos pratos foi fixada em 135°C. O tempo de prensagem a quente, necessário para a cura do adesivo, foi determinado de acordo com as recomendações do fabricante da resina. Esse tempo foi calculado em função da distância entre a linha de cola mais profunda e a superfície dos pratos (ou de um dos pratos) da prensa. Determinada essa distância, para cada milímetro, foram acrescentados 2 minutos. Além desse tempo, em função da distância, acrescentou-se uma parcela de tempo base que, para a temperatura de 135°C, foi de 1 minuto e 30 segundos.

Feito o cálculo para os painéis de 5 lâminas de 3,2 mm de espessura ($T = 1,5$ minutos + 2 minutos x 2 camadas x 3,2 mm), ficou determinado o tempo de 14,3 minutos, valor que foi arredondado para 15 minutos. Os parâmetros dos processos de colagem e prensagem encontram-se descritos na Tabela 2.

Os painéis foram prensados individualmente, com suas superfícies cobertas por papel vegetal, em ciclo único. Após o término da prensagem a quente, os painéis foram limpos de resíduos de papel e colocados na posição vertical para estabilizarem suas temperaturas com o ambiente. Foram produzidos, ao todo, 36 painéis LVL (6 tratamentos com 6 repetições). Por fim, todos os painéis fabricados foram armazenados na câmara climatizada do Laboratório de Produtos Florestais (LPF), colocados horizontalmente em prateleiras e afastados entre si pelo uso de espaçadores.

Tabela 2. Parâmetros dos processos de colagem e prensagem.

Parâmetros	Valor
Gramatura de adesivo (linha simples)	200 g/m ²
Tempo de prensagem a frio	60 minutos
Temperatura de prensagem a quente	135 °C
Pressão específica (prensagem a quente)	14 kgf/cm ²
Tempo de prensagem a quente	15 minutos

4.9 Normas utilizadas e confecção dos corpos-de-prova

Depois de decorridos 30 dias, os painéis LVL foram levados para a oficina do LPF e esquadrejados por serra nas dimensões 37 cm x 47 cm (alinhamento das fibras). Em continuidade, de cada painel, foram cortados os corpos-de-prova na quantidade e nas dimensões previstas para os ensaios, de acordo com as determinações das normas da ASTM (Tabela 3). A partir de então, os corpos-de-prova (cps) foram armazenados e permaneceram na câmara climatizada até a execução dos ensaios.

A Figura 3 mostra vistas laterais parciais de cps dos seis tratamentos LVL em estudo.

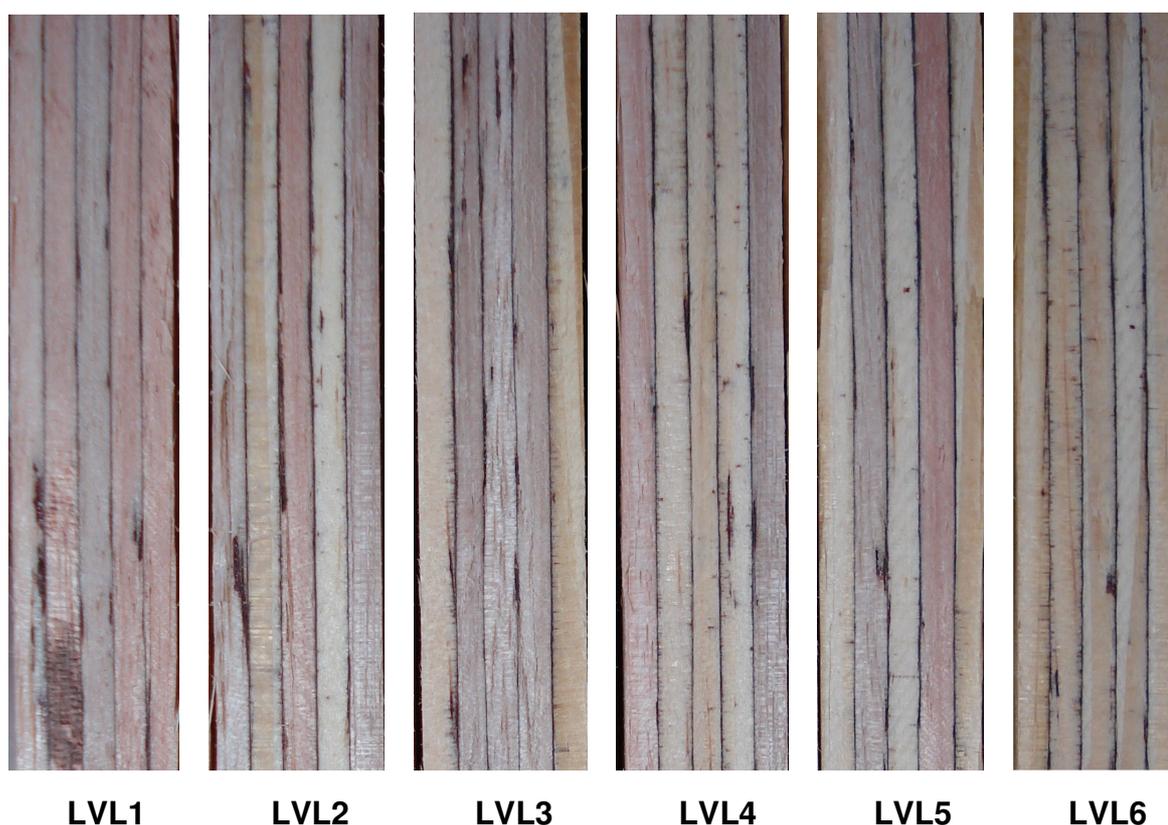


Figura 3. Vista lateral de corpos-de-prova dos tratamentos LVL.

A Tabela 3 mostra as normas utilizadas para os ensaios propostos, com a quantidade de corpos-de-prova por painel e as dimensões em que foram cortados.

Tabela 3. Ensaios, normas, quantidade por painel e dimensões dos corpos-de-prova (cps).

Ensaio	Norma	Cps p/ painel	Dimensões dos cps compr. x larg. x esp.
Teor de umidade	ASTM D 4442	2	47 cm x 8 cm x ESP
Massa específica	ASTM D 2395	2	47 cm x 8 cm x ESP
Flexão estática <i>flatwise</i>	ASTM D 3043 Método D	2	47 cm x 8 cm x ESP
Flexão estática <i>edgewise</i>	ASTM D 3043 Método D adaptada	2	47 cm x ESP x 17 mm
Cisalhamento a seco	ASTM D 905	1	6 cm x 5 cm x (2 x ESP) com colagem do material
Cisalhamento após fervura	ASTM D 905	2	6 cm x 5 cm x (2 x ESP) com colagem do material
Absorção de água	ASTM D 1037		
Inchamento em espessura	Método A	1	13 cm x 13 cm x ESP
Expansão volumétrica	adaptada		

Obs: ESP representa a medida da espessura dos painéis, variável conforme tratamento.

A Figura 4 mostra corpos-de-prova cortados, os quais são representativos dos seis tratamentos em estudo.

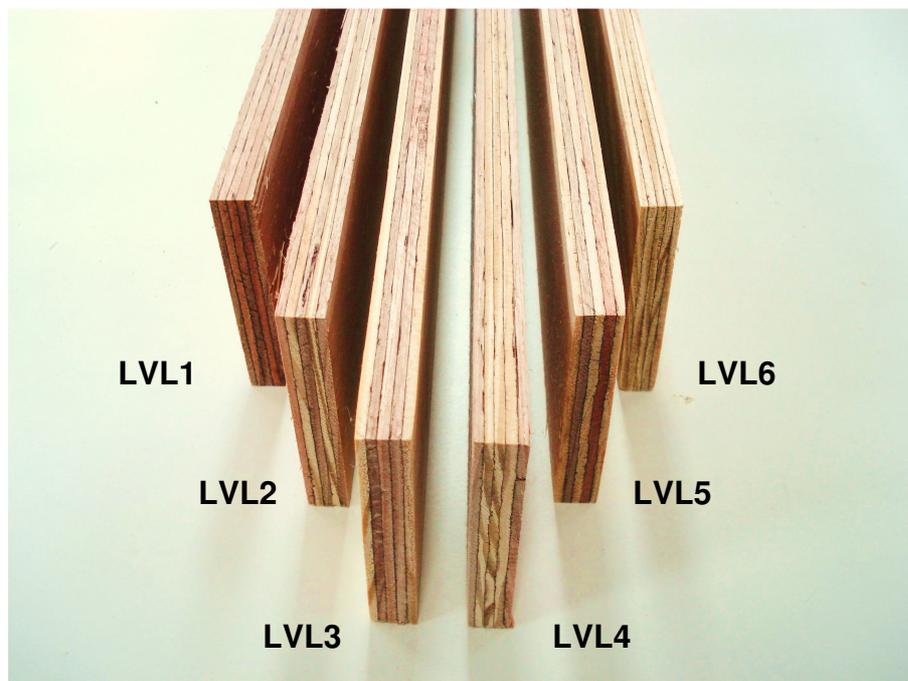


Figura 4. Corpos-de-prova dos tratamentos LVL.

O modelo de corte utilizado para a confecção dos corpos-de-prova pode ser visualizado na Figura 5.

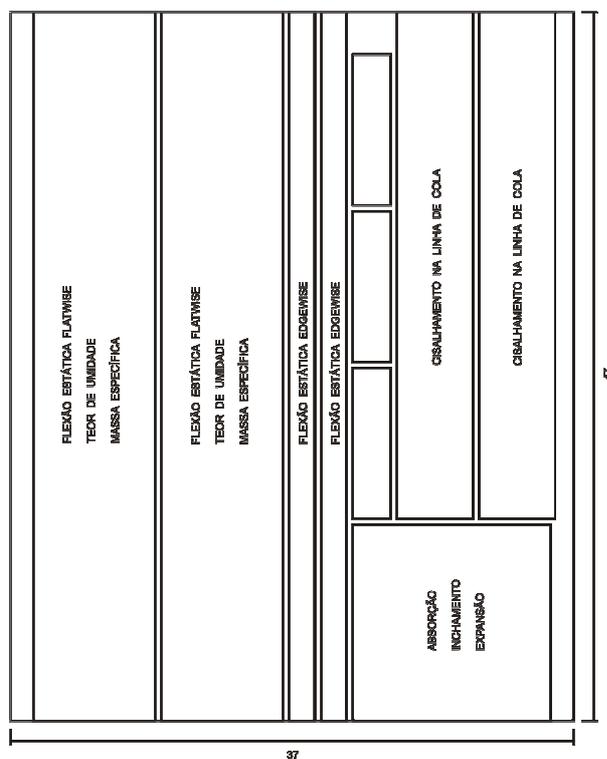


Figura 5. Modelo de corte dos painéis para confecção dos corpos-de-prova.

4.10 Teor de umidade dos painéis LVL

De acordo com as normas ASTM D 4442 e ASTM D 2395, o teor de umidade e a massa específica (MEe) dos painéis podem ser obtidos por meio dos mesmos corpos-de-prova. No presente estudo, foram utilizados para esses ensaios os 72 corpos-de-prova (2 de cada painel manufaturado) testados em flexão estática na posição *flatwise*, com dimensões de 47 cm (comprimento) x 8 cm (largura) x espessura do painel (aproximadamente 14 mm, variável para os tratamentos).

O material para ensaio permaneceu na câmara climatizada por um período de aproximadamente 60 dias, com regular controle de peso e, ao final desse período, constatou-se peso constante para as amostras, indicativo de ter sido alcançado o teor de umidade de equilíbrio (TUE).

Para o cálculo do teor de umidade dos painéis LVL, utilizou-se o método gravimétrico. Conforme as recomendações da ASTM D 4442, os corpos-de-prova foram pesados em balança eletrônica antes dos ensaios de flexão estática e, depois deles, secados em estufa laboratorial a 103°C até peso constante. Para cada corpo-de-prova, foi obtido o teor de umidade na condição de equilíbrio com o ambiente da câmara climatizada, sendo, posteriormente, calculado o teor de umidade médio para os tratamentos.

4.11 Massa específica dos painéis LVL

A massa específica ao teor de umidade de equilíbrio (MEe) foi determinada para os mesmos corpos-de-prova ensaiados em flexão estática *flatwise*, e os procedimentos atenderam as recomendações da norma ASTM D 2395. As amostras (ou cps) foram medidas por régua e paquímetro digital para o cálculo dos volumes e pesadas em balança eletrônica para a determinação das massas, ao teor de umidade de equilíbrio, antes dos ensaios de flexão estática.

A massa específica básica (MEb) desses cps foi determinada, na condição de massa seca (teor de umidade = 0%) e volume ao teor de umidade de equilíbrio, depois dos ensaios de flexão estática e após a secagem do material em estufa laboratorial a 103°C até peso constante.

4.12 Flexão estática na posição *flatwise*

A posição *flatwise* é aquela em que as lâminas que compõem os corpos-de-prova se encontram dispostas no plano horizontal e, devido às dimensões da secção transversal destes, para ensaio de flexão estática, pode ser dito que é a posição de menor momento de inércia (Figura 6).

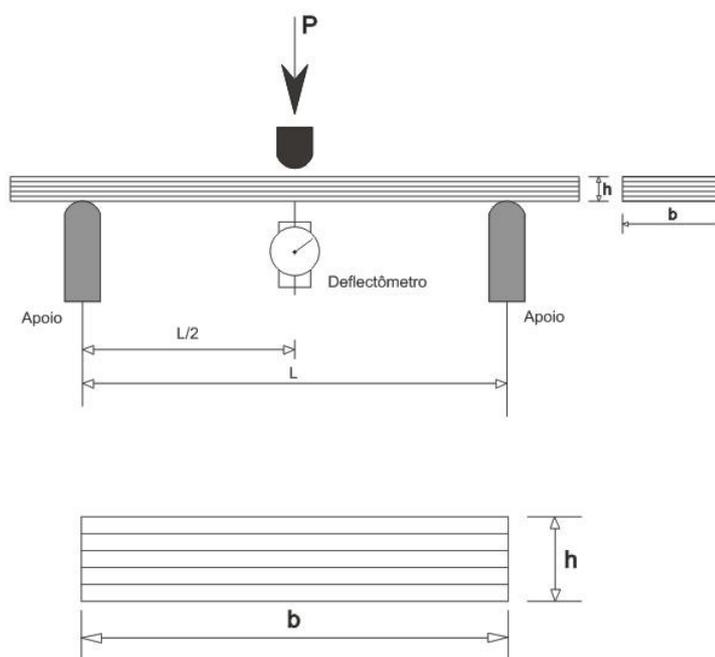


Figura 6. Posição *flatwise*; corpo-de-prova em ensaio de flexão estática com carga aplicada no centro do vão e vista em corte transversal ampliada.

Os ensaios de flexão estática para os painéis LVL seguiram as determinações da norma ASTM D 3043 – método D. Segundo as normativas, os corpos-de-prova devem ter secção retangular, a altura deve ser a espessura do painel, a largura entre 7,6 e 11,4 cm e o comprimento $24 \times$ a espessura + 5,1 cm. Os cps foram definidos e cortados nas dimensões: 47 cm (comprimento) x 8 cm (largura) x espessura do painel (aproximadamente 14 mm, variável para os tratamentos). Foram retirados 2 corpos-de-prova de cada um dos 36 painéis LVL produzidos, resultando em 72 cps no total, sendo 12 cps por tratamento.

Os ensaios de flexão estática foram realizados na Máquina Universal de Ensaio, hidráulica, marca Amsler, com capacidade de 20 toneladas, pertencente ao Laboratório de Produtos Florestais da UFSM. Os pares de dados de carga e

deformação foram alimentados automaticamente a uma placa de aquisição de dados, inserida em um computador IBM PC.

O vão entre apoios foi de 24 X a espessura média dos corpos-de-prova (± 14 mm após a densificação). A velocidade de aplicação de carga foi calculada de acordo com a equação indicada pela norma, obtendo-se um valor de aproximadamente 10 mm/minuto. Apesar das mínimas diferenças de espessura existentes entre os painéis dos seis tratamentos, para todos os ensaios foram fixados o mesmo vão entre apoios (34 cm) e a mesma velocidade de aplicação de carga (10 mm/minuto). Os ensaios foram realizados com velocidade de deformação constante. A carga aumentou progressivamente de modo a produzir, na velocidade proposta para o ensaio, uma taxa de deformação constante. Os dados de cada teste foram transferidos para o computador. Um software desenvolvido para os ensaios de flexão estática possibilitou a construção dos gráficos carga x deformação e realizou o ajuste de regressão para a parte linear desses gráficos.

O ponto de limite proporcional (LP) e a carga no limite proporcional (PLP) foram obtidos a partir da interpretação do gráfico carga x deformação de cada ensaio, e possibilitaram o cálculo da tensão no limite proporcional (TLP).

O módulo de elasticidade aparente longitudinal em flexão estática (MOE) e o módulo de ruptura (MOR) foram calculados pelo programa computacional por meio das seguintes equações:

$$MOE = \frac{b_1 \times L^3}{4 \times b \times h^3} \quad (2)$$

$$MOR = \frac{3 \times P_{m\acute{a}x} \times \frac{L}{2}}{b \times h^2} \quad (3)$$

Onde:

$P_{m\acute{a}x}$ = carga máxima aplicada (kgf)

b_1 = coeficiente de inclinação da reta de regressão (kgf/cm)

L = vão entre os pontos de reação (cm)

b = largura do corpo-de-prova (cm)

h = altura do corpo-de-prova (cm)

As Figuras 7 e 8 mostram, respectivamente, o equipamento utilizado para os ensaios de flexão estática e um corpo-de-prova em teste na posição *flatwise*.



Figura 7. Máquina Universal de Ensaios preparada para ensaio de flexão estática.

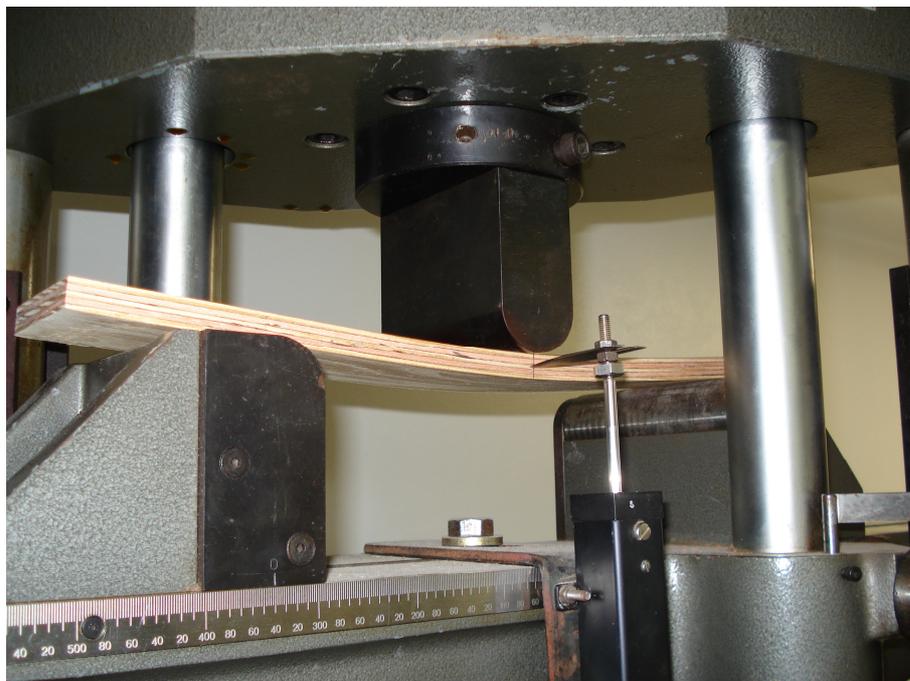


Figura 8. Corpo-de-prova em teste de flexão estática na posição *flatwise*.

4.13 Flexão estática na posição *edgewise*

A posição *edgewise* é aquela em que as lâminas que compõem os corpos-de-prova se encontram dispostas no plano vertical e, devido às dimensões da secção transversal destes, para ensaio de flexão estática, pode ser dito que é a posição de maior momento de inércia (Figura 9).

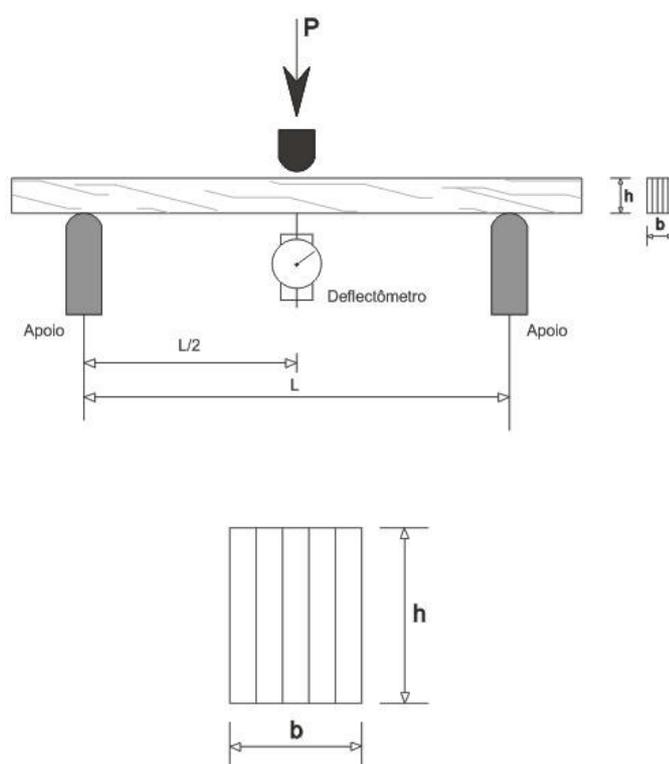


Figura 9. Posição *edgewise*; corpo-de-prova em ensaio de flexão estática com carga aplicada no centro do vão e vista em corte transversal ampliada.

Segundo a norma ASTM D 3043 – método D, os corpos-de-prova devem atender à seguinte relação: comprimento igual a $24 \times$ a altura + 5,1 cm. Para os ensaios de flexão estática na posição *edgewise*, devido às limitações decorrentes da espessura e do comprimento dos painéis produzidos, foram feitas adaptações à norma quanto ao dimensionamento dos cps. A medida da base foi definida pela espessura dos painéis. A medida da altura foi determinada por meio da relação exigida pela norma, anteriormente descrita. A partir do maior comprimento possível para o material, foi calculada a altura necessária e, em função desta, a distância entre apoios. Sob esse critério, os corpos-de-prova foram marcados e cortados nas

dimensões: 47 cm (comprimento) x ± 14 mm (base) x 17 mm (altura). Foram retirados 2 corpos-de-prova de cada um dos 36 painéis LVL produzidos, resultando em 72 cps no total, sendo 12 cps por tratamento.

Os ensaios de flexão estática foram realizados no Laboratório de Produtos Florestais da UFSM, com o uso dos mesmos equipamentos e software anteriormente descritos para a posição *flatwise*. O vão entre apoios, definido pela norma em $24 \times$ a altura dos cps ($\pm 17,1$ mm, conferida após o corte), foi determinado em 41 cm. A velocidade de aplicação de carga foi calculada de acordo com a equação indicada pela norma, obtendo-se um valor aproximado de 12 mm/minuto. Os ensaios foram realizados com velocidade de deformação constante. Os dados de cada teste foram transferidos para o computador, e os gráficos e resultados foram obtidos da mesma forma que para a posição anterior (*flatwise*), pelo uso dos mesmos procedimentos de interpretação gráfica e equações anteriormente aplicadas para os cálculos de MOE e de MOR.

A Figura 10 mostra corpos-de-prova armazenados na câmara climatizada; à esquerda cps para ensaio de flexão estática na posição *edgewise* e, à direita, cps para ensaios de absorção de água, inchamento em espessura e expansão volumétrica.



Figura 10. Corpos-de-prova armazenados na câmara climatizada.

A Figura 11 mostra um corpo-de-prova flexionado na posição *edgewise*, em ensaio de flexão estática.



Figura 11. Corpo-de-prova em flexão estática na posição *edgewise*.

4.14 Absorção de água, inchamento em espessura e expansão volumétrica

O inchamento em espessura e a expansão volumétrica são a expressão percentual do valor expandido, espessura ou volume, quando uma amostra, depois de condicionada por um determinado tempo a 20°C e 65% de umidade relativa, de modo a estabilizar seu peso e suas dimensões a um teor de umidade de equilíbrio (em torno de 12%), é imersa em água por certo período, podendo ser 2 ou 24 horas. A absorção de água é a expressão percentual do aumento de peso da amostra, sob as mesmas condições anteriores.

Os procedimentos de ensaio foram adaptados da norma ASTM D 1037 – método A, que prescreve a submersão em água por período de 2 horas + 22 horas. Portanto, os valores obtidos para as variáveis em estudo nestes ensaios foram para 2 horas e 24 horas de imersão em água.

De cada painel produzido, foi extraído um corpo-de-prova nas dimensões 13 cm x 13 cm x espessura (variável; ± 14 mm), resultando em 36 cps para ensaio, 6 para cada tratamento.

Os corpos-de-prova armazenados na câmara climatizada do Laboratório de Produtos Florestais se apresentavam em equilíbrio higroscópico com o ambiente (20°C e 65% de umidade relativa). O teor de umidade médio no qual se estabilizaram os pesos dos cps foi igual a 9,55%, base seca.

Para as medições das espessuras, foram marcados em uma das faces dos corpos-de-prova, com o auxílio de um gabarito, 4 pontos em 4 linhas distantes 25 mm das bordas, cada linha correspondente e paralela a um dos lados e cada ponto posicionado ao centro de uma das linhas. As medições das larguras e comprimentos dos cps foram tomadas em 3 alinhamentos (nas extremidades e no centro), sendo que linhas centrais foram riscadas nas faces com o auxílio de um esquadro. Nos procedimentos de cálculo subseqüentes, adotou-se a média dos valores para cada variável dimensional em estudo.

Os corpos-de-prova, em pequenas quantidades e em períodos espaçados, foram submersos em água à temperatura de ± 20 °C. O material foi disposto horizontalmente e mantido submerso à mesma profundidade (25 mm) por meio de pesos em forma de grade e, devido ao uso de espaçadores, afastado minimamente do fundo dos recipientes.

Depois de 2 horas submersos os corpos-de-prova foram retirados da água e colocados sobre um escoador no ambiente laboratorial (25°C) por 10 minutos; após esse curto período foi removido o excesso de água nas superfícies e imediatamente procederam-se as pesagens e medições de espessura, largura e comprimento.

Após as leituras, o material, em pequenos lotes e com escalonamento de horário, foi submerso por um período adicional de 22 horas, ao final do qual os procedimentos anteriores (escoamento, pesagem e medições) foram repetidos.

Os pesos foram obtidos por balança eletrônica. Para as medições de espessura foi utilizado um instrumento medidor especialmente montado para tal finalidade, com precisão de centésimos de milímetros, chamado “relógio apalpador”. As medições de comprimento e largura foram feitas com paquímetro digital. Todas as medições realizadas, anteriores à imersão, após 2 horas e após 24 horas, foram tomadas nos mesmos pontos e alinhamentos marcados nas faces dos cps.

A partir dos valores iniciais (na condição de equilíbrio) de peso, espessura média, largura média, comprimento médio e volume de cada um dos 36 corpos-de-prova, após 2 horas e 24 horas de imersão em água, foram calculadas as seguintes variáveis: absorção de água em peso 2 horas (AA_2) e 24 horas (AA_{24}); inchamento em espessura 2 horas (IE_2) e 24 horas (IE_{24}); expansão volumétrica 2 horas (EV_2) e 24 horas (EV_{24}). Os cálculos dessas variáveis obedeceram às seguintes equações:

$$AA (\%) = \frac{\text{Peso final} - \text{Peso inicial}}{\text{Peso inicial}} \times 100 \quad (4)$$

$$IE (\%) = \frac{\text{Esp. média final} - \text{Esp. média inicial}}{\text{Esp. média inicial}} \times 100 \quad (5)$$

$$EV (\%) = \frac{\text{Vol. médio final} - \text{Vol. médio inicial}}{\text{Vol. médio inicial}} \times 100 \quad (6)$$

Onde:

AA = absorção de água em peso

IE = inchamento em espessura

EV = expansão volumétrica

Esp. = espessura

Vol. = volume

4.15 Cisalhamento na linha de cola

Os ensaios realizados para a determinação da resistência ao cisalhamento na linha de cola por compressão seguiram as recomendações da ASTM D 905, com algumas adaptações nas dimensões dos corpos-de-prova.

Para as avaliações da resistência ao cisalhamento interessavam ser testadas três situações de colagem, ou tratamentos independentes, que são as linhas de cola estabelecidas entre: eucalipto x eucalipto, pinus x pinus e eucalipto x pinus (ou vice-versa).

Em testes anteriores, usando corpos-de-prova com a mesma espessura dos painéis manufacturados (± 14 mm), houve dificuldades nos ensaios mecânicos devido às insuficientes bases de apoio. Assim, foi necessário confeccionar cps com colagem do material para a obtenção de maiores espessuras, o que é permitido pela norma. Procedeu-se a colagem do material cortado dos painéis, de modo a formar espessura dupla ($14 + 14$ mm), resultando em uma espessura total de 28 mm, aproximadamente. A colagem foi realizada com adesivo resorcinol-formaldeído, a frio e com pouca pressão. Foram feitos rebaixamentos superiores e inferiores, conforme determina a norma.

De cada painel fabricado foram extraídas duas tiras com 33 cm de comprimento e 5 cm de largura. A colagem dessas tiras, conforme descrito anteriormente, resultou em material do qual foram confeccionados três corpos-de-prova por painel. Assim, dos 36 painéis produzidos, foram obtidos 108 cps no total. Destes, 36 foram marcados para ensaio a seco, e os 72 restantes, para ensaio após fervura. Dessas duas quantidades (36 e 72), terça parte de cada uma delas foi rebaixada na junta eucalipto x eucalipto, terça parte na junta pinus x pinus e a outra terça parte na junta entre as duas madeiras, constituindo os três tratamentos em estudo.

Na Figura 12 pode-se observar o desenho de corpo-de-prova proposto pela norma ASTM D 905 – (1998), para cisalhamento na linha de cola em madeira sólida, por ensaio de compressão.

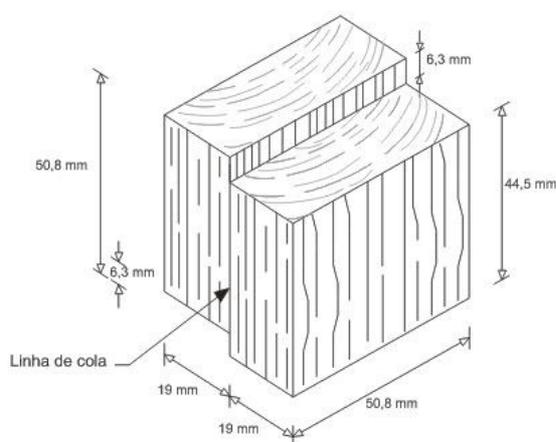


Figura 12. Corpo-de-prova para cisalhamento na linha de cola por ensaio de compressão, proposto pela norma ASTM D 905 – (1998).

Os corpos-de-prova foram condicionados na câmara climatizada à temperatura de 20°C e umidade relativa de 65% até atingirem a umidade de equilíbrio com o ambiente, verificada por meio da estabilização de seus pesos. O teor de umidade médio dos cps apontou 9,55%, base seca.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Produtos Florestais da UFSM, na Máquina Universal de Ensaio, e as leituras foram feitas diretamente na escala do seu registrador frontal. A máquina operou com capacidade de força de 4 toneladas. A velocidade de aplicação de carga, determinada pela norma, foi de 0,6 mm/minuto.

A resistência ao cisalhamento (em kgf/cm²) foi calculada por meio do quociente da carga máxima suportada (carga de ruptura, em kgf) pela área de madeira colada submetida ao cisalhamento (em cm²).

4.15.1 Cisalhamento na linha de cola a seco

Foram testados 36 corpos-de-prova (cps); 12 cps com linha de cola na junta eucalipto x eucalipto, 12 cps com linha de cola na junta pinus x pinus e 12 cps com linha de cola na junta entre as duas madeiras.

A porcentagem de falha na madeira foi determinada visualmente após a delaminação forçada dos cps, com o auxílio de uma película transparente quadriculada especialmente projetada para cobrir a área colada submetida ao cisalhamento. O uso dessa película possibilitou dividir visualmente a área colada em 10 linhas x 10 colunas, de tal forma que cada quadrícula cobria 1% de sua superfície durante a avaliação.

A Figura 13 mostra um corpo-de-prova posicionado na máquina para cisalhamento na linha de cola a seco, por ensaio de compressão.



Figura 13. Corpo-de-prova em cisalhamento na linha de cola a seco, por ensaio de compressão.

4.15.2 Cisalhamento na linha de cola após fervura

Foram avaliados 65 corpos-de-prova (cps): 21 cps com linha de cola na junta eucalipto x eucalipto, 22 cps com linha de cola na junta pinus x pinus e 22 cps com linha de cola na junta entre as duas madeiras. Dos 72 cps confeccionados e testados neste ensaio, 7 cps foram descartados.

Os corpos-de-prova foram fervidos em água por 4 horas e depois secados em estufa laboratorial por 20 horas à temperatura de 63°C, com circulação de ar suficiente para baixar seus teores de umidade para um máximo de 8% (base seca). Em seguida, os cps foram fervidos por um período adicional de 4 horas, esfriados em água e testados úmidos para determinação das resistências ao cisalhamento por compressão. A porcentagem de falha na madeira foi determinada visualmente com os corpos-de-prova secos, da mesma forma como realizado para o ensaio a seco.

A Figura 14 mostra um corpo-de-prova posicionado na máquina para cisalhamento na linha de cola após fervura, por ensaio de compressão.

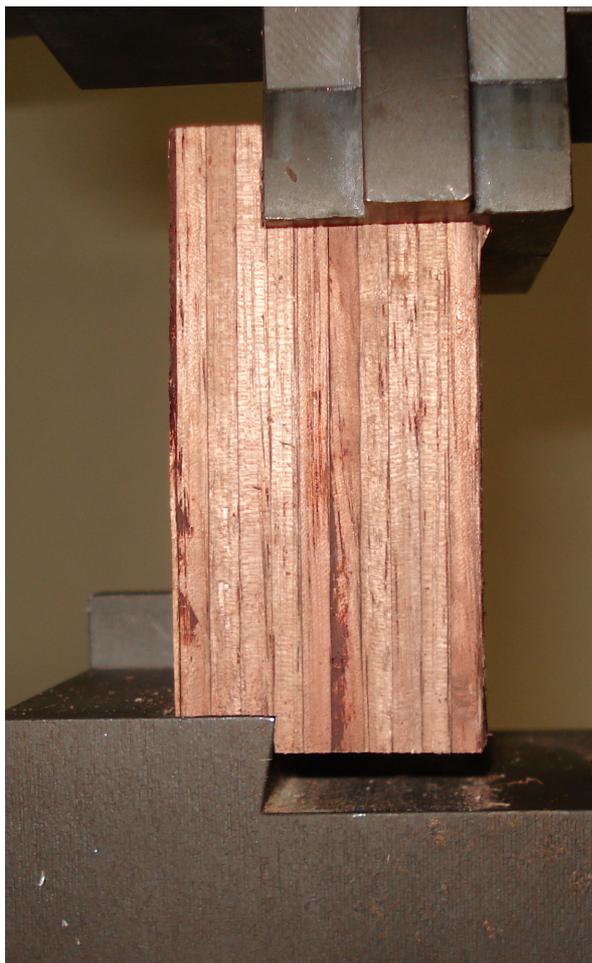


Figura 14. Corpo-de-prova em cisalhamento na linha de cola após fervura, por ensaio de compressão.

4.16 Análise estatística

Os resultados foram interpretados com o auxílio de recursos estatísticos do software STATGRAPHICS plus, relacionando os dados obtidos nos ensaios com os tratamentos em estudo.

As análises estatísticas dos resultados foram realizadas por análise de variância (ANOVA), a 5% de probabilidade de erro, como meio de constatar a existência ou não de diferenças significativas entre os valores das médias.

Os testes de médias, para as comparações entre as médias obtidas para os tratamentos, foram realizados pelo método LSD (*Fisher's least significant difference*), ao nível de 5% de probabilidade de erro.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Massa específica das lâminas

Os valores de massa específica ao teor de umidade de equilíbrio (MEe) foram determinados para as 114 lâminas de *Eucalyptus saligna* (eucalipto) e para as 147 lâminas de *Pinus taeda* (pinus) inicialmente selecionadas por método visual e esquadrejadas (38 x 48 cm) para a manufatura dos painéis. A Tabela 4 mostra os valores das médias obtidas para essa propriedade e também valores correspondentes corrigidos para massa específica básica (MEb).

Tabela 4. Massa específica e massa específica básica das lâminas.

Lâminas	Nº de lâminas	Teor de umidade equilíbrio (TUE) (%)	Massa específica ao TUE (MEe) (g/cm ³)	Massa específica básica (MEb) (g/cm ³)
Eucalipto	114	11,7	0,813	0,728
Pinus	147	7,8	0,552	0,512

MEe = (massa ao TUE) ÷ (volume ao TUE); MEb = (massa ao TU = 0%) ÷ (volume ao TUE). Valores das médias aritméticas dos dados obtidos, para as quantidades de lâminas de cada espécie. TUE (teor de umidade de equilíbrio) alcançado a temperatura de 20°C e umidade relativa de 65%.

As dispersões dos valores obtidos para MEe podem ser observadas nas Figuras 15 e 16, para eucalipto e pinus respectivamente.

Os dois lotes de lâminas, de eucalipto e de pinus, foram classificados em faixas de valores de MEe. As faixas de valores estabelecidas demarcam o percentual de variação em relação à média, para cada espécie. Valores que diferem em até 5% da média para cima são identificados como classe “1M” e os que diferem em até 5% da média para baixo como classe “1m”; seguindo-se a classificação para valores que diferem na faixa entre 5 e 10% (“2M” e “2m”), na faixa entre 10 e 15% (“3M” e “3m”), na faixa entre 15 e 20% (“4M” e “4m”) e, por último, para os que diferem na faixa entre 20 e 25% (“5M” e “5m”).

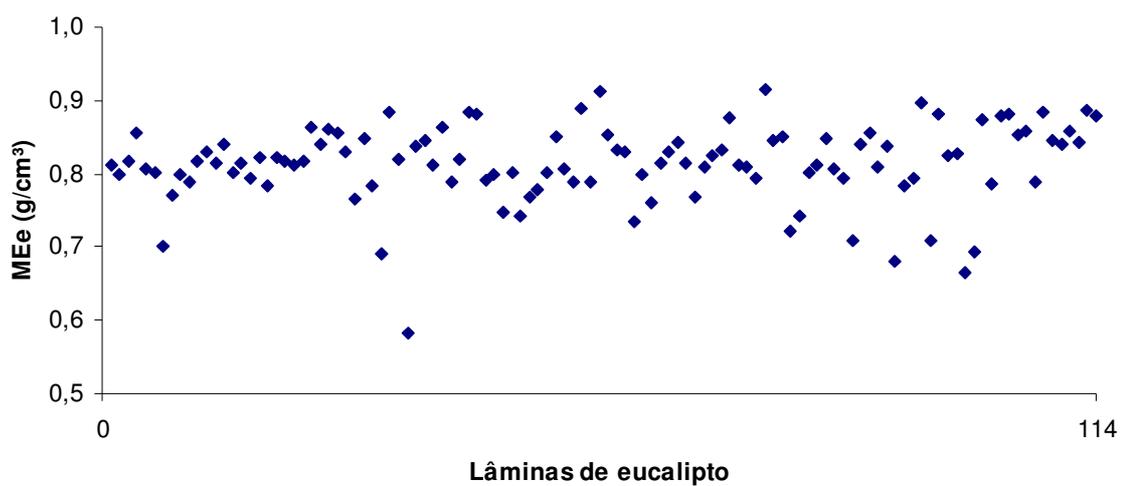


Figura 15. Dispersão de valores de MEE para 114 lâminas de eucalipto.

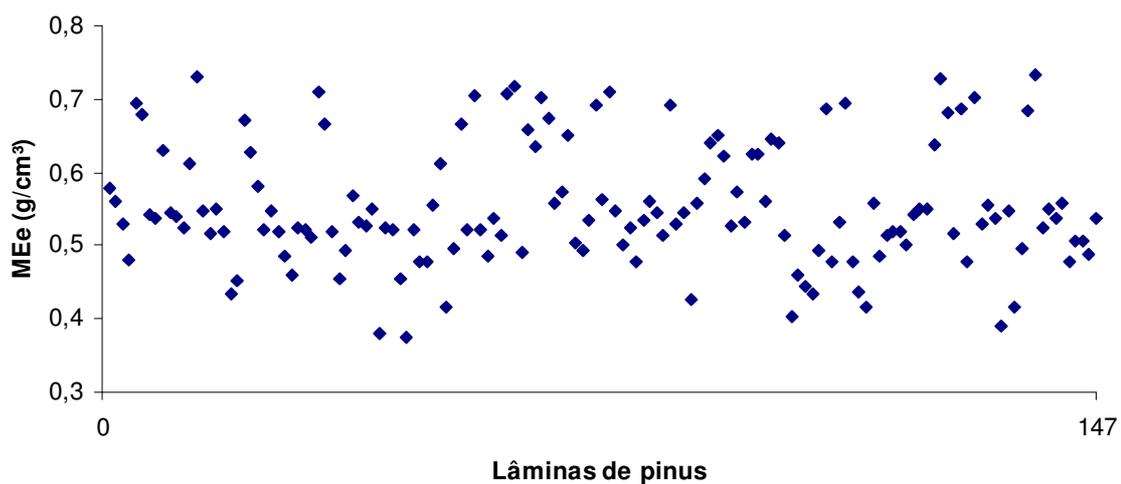


Figura 16. Dispersão de valores de MEE para 147 lâminas de pinus.

Os histogramas de freqüência das lâminas de eucalipto e pinus por faixas de valores de MEE estão apresentados nas Figuras 17 e 18, respectivamente.

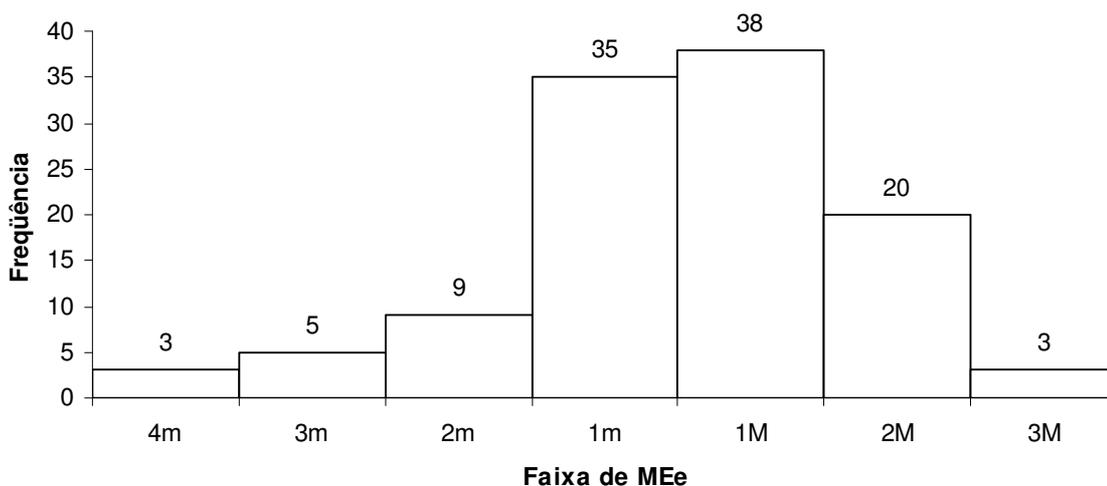


Figura 17. Histograma de frequência das lâminas de eucalipto.

Em seqüência, da esquerda para a direita, as faixas de MEe (4m, 3m, 2m, 1m, 1M, 2M e 3M) nas quais se enquadraram as lâminas. MEe média das lâminas de eucalipto = $0,813 \text{ g/cm}^3$.

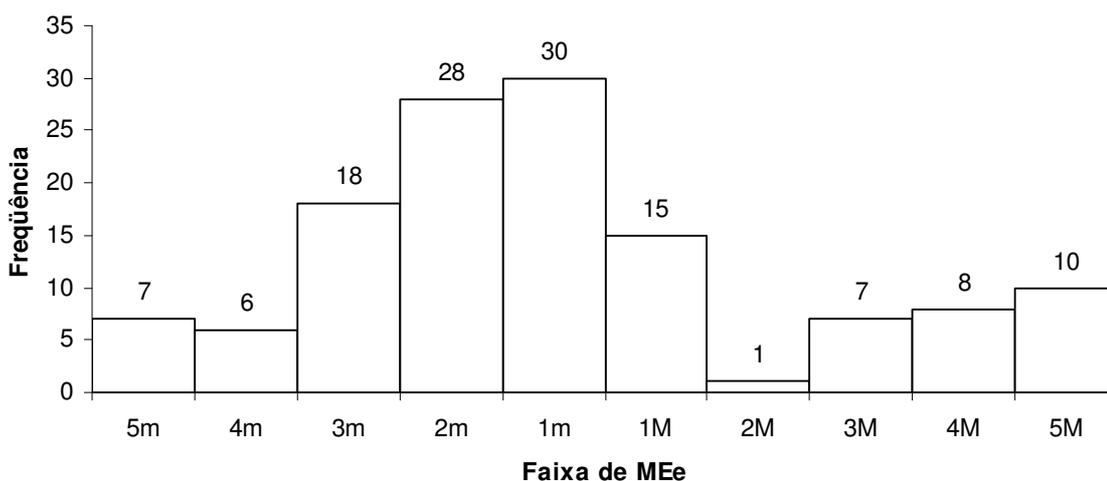


Figura 18. Histograma de frequência das lâminas de pinus.

Em seqüência, da esquerda para a direita, as faixas de MEe (5m, 4m, 3m, 2m, 1m, 1M, 2M, 3M, 4M e 5M) nas quais se enquadraram as lâminas. MEe média das lâminas de pinus = $0,552 \text{ g/cm}^3$.

As distribuições de frequência das lâminas por faixa de classificação em relação à MEe média estão apresentadas nas Tabelas 5 e 6, para eucalipto e pinus respectivamente.

Os dois lotes de lâminas, de eucalipto e de pinus, foram classificados também por qualidade visual, em lâminas "A" (praticamente sem defeitos), lâminas "B" (defeitos insignificantes) e lâminas "C" (presença de alguns defeitos, como pequenos nós e/ou fendas). Lâminas com defeitos maiores foram classificadas por "D" (lâminas descartadas).

Tabela 5. Distribuição de frequência das lâminas de eucalipto por faixa de classificação em relação à MEe média.

Limite inferior (MEe) (g/cm³)	Limite superior (MEe) (g/cm³)	Diferença da média (%)	Classe de MEe	Nº de lâminas	Valor percentual
0,976	1,016	+25	5M	0	-
0,935	0,976	+20	4M	0	-
0,894	0,935	+15	3M	3	2,66
0,854	0,894	+10	2M	20	17,70
0,813	0,854	+5	1M	38	33,63
0,772	0,813	-5	1m	35	30,97
0,732	0,772	-10	2m	9	7,96
0,691	0,732	-15	3m	5	4,42
0,650	0,691	-20	4m	3	2,66
0,610	0,650	-25	5m	0	-
Total				113	100

MEe média das lâminas de eucalipto = 0,813 g/cm³.

Obs: 1 lâmina ficou fora da classificação, por não se enquadrar em nenhuma faixa.

Tabela 6. Distribuição de frequência das lâminas de pinus por faixa de classificação em relação à MEe média.

Limite inferior (MEe) (g/cm³)	Limite superior (MEe) (g/cm³)	Diferença da média (%)	Classe de MEe	Nº de lâminas	Valor percentual
0,663	0,691	+25	5M	10	7,70
0,635	0,663	+20	4M	8	6,15
0,608	0,635	+15	3M	7	5,38
0,580	0,608	+10	2M	1	0,77
0,552	0,580	+5	1M	15	11,54
0,525	0,552	-5	1m	30	23,08
0,497	0,525	-10	2m	28	21,54
0,470	0,497	-15	3m	18	13,85
0,442	0,470	-20	4m	6	4,61
0,414	0,442	-25	5m	7	5,38
Total				130	100

MEe média das lâminas de pinus = 0,552 g/cm³.

Obs: 17 lâminas ficaram fora da classificação, por não se enquadrarem em nenhuma faixa.

As distribuições de frequência das lâminas classificadas pelo método visual, por faixa de MEe, estão apresentadas nas Tabelas 7 e 8 para eucalipto e pinus respectivamente.

Tabela 7. Distribuição de freqüência das lâminas de eucalipto classificadas visualmente, por faixa de MEe.

Faixa de MEe	Nº de lâminas	Classe visual			
		“A”	“B”	“C”	“D”
5M	0	0	0	0	0
4M	0	0	0	0	0
3M	3	2	0	0	1
2M	20	8	7	4	1
1M	38	14	14	6	4
1m	35	16	10	6	3
2m	9	2	5	2	0
3m	5	2	1	2	0
4m	3	0	1	2	0
5m	0	0	0	0	0
Total	113	44	38	22	9
(%)	100%	38,94%	33,63%	19,47%	7,96%

Tabela 8. Distribuição de freqüência das lâminas de pinus classificadas visualmente, por faixa de MEe.

Faixa de MEe	Nº de lâminas	Classe visual			
		“A”	“B”	“C”	“D”
5M	10	9	0	1	0
4M	8	6	2	0	0
3M	7	3	3	0	1
2M	1	0	1	0	0
1M	15	9	5	1	0
1m	30	16	9	5	0
2m	28	5	13	10	0
3m	18	4	8	5	1
4m	6	1	4	0	1
5m	7	1	3	0	3
Total	130	54	48	22	6
(%)	100%	41,54%	36,92%	16,92%	4,62%

As composições das camadas dos painéis LVL por MEe para os seis tratamentos (LVL1, LVL2, LVL3, LVL4, LVL5 e LVL6) e para as seis repetições (R1, R2, R3, R4, R5 e R6), de acordo com a metodologia adotada, podem ser observadas nas Tabelas 9, 10, 11, 12, 13 e 14. A numeração das camadas (de 1 a 5) foi estabelecida de cima para baixo, considerando-se as lâminas dispostas horizontalmente.

Tabela 9. Composições das camadas do tratamento LVL1 por MEe.

Nº da camada	Tipo de madeira	Repetição					
		1	2	3	4	5	6
		(g/cm ³)					
1	E	0,7878	0,8017	0,8133	0,8219	0,8476	0,8739
2	E	0,8375	0,8102	0,7977	0,7826	0,7484	0,6661
3	E	0,8526	0,8555	0,8309	0,8145	0,7897	0,7780
4	E	0,8444	0,8322	0,8079	0,7940	0,7825	0,7421
5	E	0,8016	0,8130	0,8215	0,8400	0,8635	0,9139
Média		0,8248	0,8225	0,8143	0,8106	0,8063	0,7948
MEe média total = 0,8122							

E = lâmina de eucalipto.

Tabela 10. Composições das camadas do tratamento LVL2 por MEe.

Nº da camada	Tipo de madeira	Repetição					
		1	2	3	4	5	6
		(g/cm ³)					
1	E	0,7911	0,8072	0,8140	0,8274	0,8501	0,8768
2	P	0,5428	0,5347	0,5277	0,5215	0,5150	0,5016
3	E	0,8457	0,8540	0,8290	0,8128	0,7891	0,7605
4	P	0,5446	0,5379	0,5296	0,5225	0,5151	0,5046
5	E	0,7997	0,8109	0,8176	0,8390	0,8605	0,9135
Média		0,7048	0,7089	0,7036	0,7047	0,7060	0,7114
MEe média total = 0,7066							

E = lâmina de eucalipto, P = lâmina de pinus.

Tabela 11. Composições das camadas do tratamento LVL3 por MEe.

Nº da camada	Tipo de madeira	Repetição					
		1	2	3	4	5	6
		(g/cm ³)					
1	P	0,5451	0,5507	0,5612	0,6243	0,6512	0,6853
2	E	0,8380	0,8168	0,7980	0,7843	0,7658	0,6999
3	E	0,8448	0,8473	0,8253	0,7992	0,7880	0,7334
4	E	0,8439	0,8194	0,8057	0,7939	0,7709	0,7417
5	P	0,5463	0,5551	0,5693	0,6360	0,6648	0,6859
Média		0,7236	0,7179	0,7119	0,7276	0,7281	0,7092
MEe média total = 0,7197							

E = lâmina de eucalipto, P = lâmina de pinus.

Tabela 12. Composições das camadas do tratamento LVL4 por MEe.

Nº da camada	Tipo de madeira	Repetição					
		1	2	3	4	5	6
		(g/cm ³)					
1	E	0,7928	0,8081	0,8156	0,8292	0,8557	0,8810
2	P	0,5396	0,5330	0,5247	0,5210	0,5147	0,4960
3	P	0,4933	0,4854	0,4778	0,4601	0,4433	0,4164
4	P	0,5489	0,5380	0,5299	0,5235	0,5165	0,5053
5	E	0,7929	0,8102	0,8176	0,8304	0,8573	0,8818
Média		0,6335	0,6349	0,6331	0,6328	0,6375	0,6361
MEe média total = 0,6347							

E = lâmina de eucalipto, P = lâmina de pinus.

Tabela 13. Composições das camadas do tratamento LVL5 por MEe.

Nº da camada	Tipo de madeira	Repetição					
		1	2	3	4	5	6
		(g/cm ³)					
1	P	0,5441	0,5494	0,5611	0,6235	0,6459	0,6806
2	E	0,8410	0,8171	0,8022	0,7859	0,7673	0,7078
3	P	0,4937	0,4858	0,4787	0,4605	0,4542	0,4266
4	E	0,8415	0,8188	0,8022	0,7877	0,7676	0,7217
5	P	0,5467	0,5573	0,5735	0,6382	0,6653	0,6874
Média		0,6534	0,6457	0,6435	0,6591	0,6600	0,6448
MEe média total = 0,6511							

E = lâmina de eucalipto, P = lâmina de pinus.

Tabela 14. Composições das camadas do tratamento LVL6 por MEe.

Nº da camada	Tipo de madeira	Repetição					
		1	2	3	4	5	6
		(g/cm ³)					
1	P	0,5416	0,5481	0,5600	0,6109	0,6402	0,6797
2	P	0,5383	0,5314	0,5243	0,5180	0,5119	0,4954
3	P	0,4945	0,4905	0,4814	0,4770	0,4553	0,4345
4	P	0,5492	0,5381	0,5306	0,5237	0,5169	0,5054
5	P	0,5469	0,5590	0,5787	0,6394	0,6743	0,6909
Média		0,5341	0,5334	0,5350	0,5538	0,5597	0,5612
MEe média total = 0,5462							

P = lâmina de pinus.

Os valores das médias de MEe obtidas para as composições de lâminas dos tratamentos LVL1, LVL2, LVL3, LVL4, LVL5 e LVL6, antes da prensagem e da conseqüente densificação, podem ser observados na Tabela 15. Esses valores médios obtidos são teóricos e aproximados. Teóricos porque as médias são consideradas para um modelo abstrato, que é o da junção das lâminas sem a densificação resultante da prensagem e, ainda, sem a presença e a influência do adesivo. Aproximados porque, na realidade, são diferentes os teores de umidade de equilíbrio alcançados pelas lâminas de eucalipto e pinus e, em relação a isso, todos os tratamentos diferem entre si, inclusive, nas composições LVL2, LVL3, LVL4 e LVL5 as camadas diferem entre si dentro de um mesmo tratamento, por apresentarem mistura das duas madeiras, conseqüentemente as bases para cálculo das massas específicas são diferentes. Mesmo assim, esses valores teóricos se tornam interessantes para comparações com valores reais, obtidos após a consolidação dos painéis.

Tabela 15. MEe por tratamento LVL; teórica, anterior à densificação dos painéis.

	LVL1	LVL2	LVL3	LVL4	LVL5	LVL6
MEe média (g/cm ³)	0,8122 A	0,7066 BC	0,7197 B	0,6347 D	0,6511 CD	0,5462 E

Letras maiúsculas comparam as grandezas entre tratamentos, sendo que médias com pelo menos uma letra igual não diferem estatisticamente ao nível de 5% de probabilidade de erro.

A análise estatística dos valores de MEe das lâminas, distribuídos conforme as composições dos tratamentos, foi realizada por meio de análise de variância, a qual indicou diferença significativa para os valores das médias, ao nível de 5% de probabilidade de erro.

A variância e a distribuição dos resultados para os tratamentos LVL podem ser observadas nas Figuras 19 e 20. A comparação das médias foi realizada pelo método LSD (*Fisher's least significant difference*), ao nível de 5% de probabilidade de erro.

Os resultados demonstram que as médias de MEe para os tratamentos LVL se enquadram em cinco grupos distintos e homogêneos de valores: A, B, C, D e E. O tratamento LVL1 apresenta o maior valor, seguido dos tratamentos LVL3 e LVL2

(equivalentes estatisticamente entre si), do tratamento LVL5, o qual não difere do LVL2, e do tratamento LVL4 (equivalente ao LVL5); por último, apresentando o menor valor, está o tratamento LVL6.

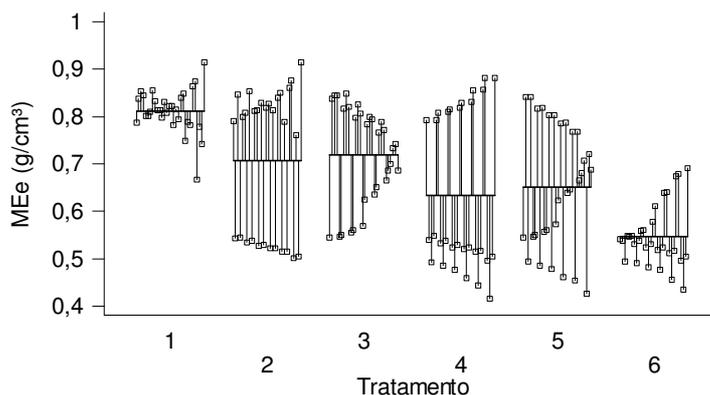


Figura 19. Variância dos valores de MEe por tratamento, antes da prensagem.

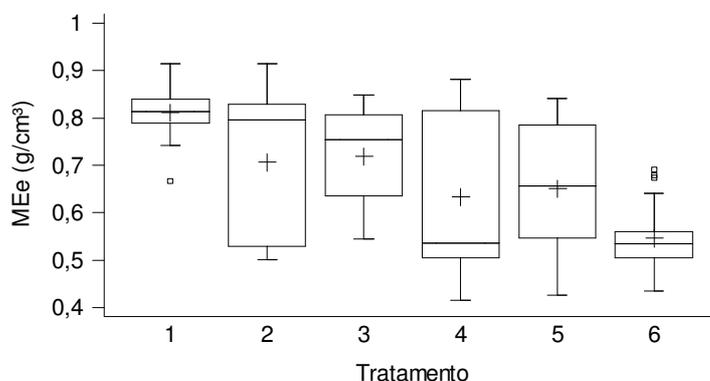


Figura 20. Distribuição dos valores de MEe por tratamento, antes da prensagem.

Os tratamentos intermediários, LVL2, LVL3, LVL4 e LVL5, por apresentarem mistura de eucalipto e pinus, demonstram os maiores coeficientes de variação para as médias de MEe de suas composições de lâminas, sendo eles: LVL4 (26,23%), LVL2 (21,75%), LVL5 (20,41%) e LVL3 (14,64%).

5.2 Teor de umidade e massa específica dos painéis LVL

Os valores de teor de umidade de equilíbrio (TUE) e massa específica ao teor de umidade de equilíbrio (MEe) foram determinados para os painéis LVL, depois de consolidados, por meio dos corpos-de-prova confeccionados para ensaio de flexão estática na posição *flatwise*, conforme descrito na metodologia. A Tabela 16 mostra os valores das médias obtidas para essas propriedades.

Tabela 16. Teor de umidade e massa específica dos painéis LVL.

Tratamento	Nº de observações	Teor de umidade de equilíbrio (TUE) (%)	Massa específica ao TUE (MEe) (g/cm ³)
LVL1	12	9,58	0,8978 A ^{2,74}
LVL2	12	9,43	0,7778 B ^{2,33}
LVL3	12	9,47	0,7934 B ^{2,71}
LVL4	12	9,46	0,7265 C ^{3,10}
LVL5	12	9,61	0,7391 C ^{2,92}
LVL6	12	9,76	0,6392 D ^{2,97}
Média		9,55	

Na coluna da direita, letras maiúsculas comparam as grandezas entre tratamentos, sendo que médias com pelo menos uma letra igual não diferem estatisticamente ao nível de 5% de probabilidade de erro; o número central é o valor médio, acima e à direita tem-se o coeficiente de variação (CV).

Considerados os resultados apresentados na Tabela 16, o valor da média de TUE das amostras dos seis tratamentos é igual a 9,55%, base seca. Esse é o teor de umidade médio no qual se estabilizaram os corpos-de-prova utilizados para os diversos ensaios mecânicos, os quais alcançaram equilíbrio higroscópico com o ambiente da câmara climatizada (20°C – 65% UR), local onde permaneceram armazenados. O desvio padrão para o teor de umidade médio é 0,13; o coeficiente de variação é 1,31%.

A análise estatística dos valores de MEe dos painéis LVL consolidados foi realizada por meio de análise de variância, a qual constatou a existência de diferença significativa para os valores das médias dos tratamentos, ao nível de 5% de probabilidade de erro.

A distribuição dos resultados para os seis tratamentos LVL pode ser observada na Figura 21.

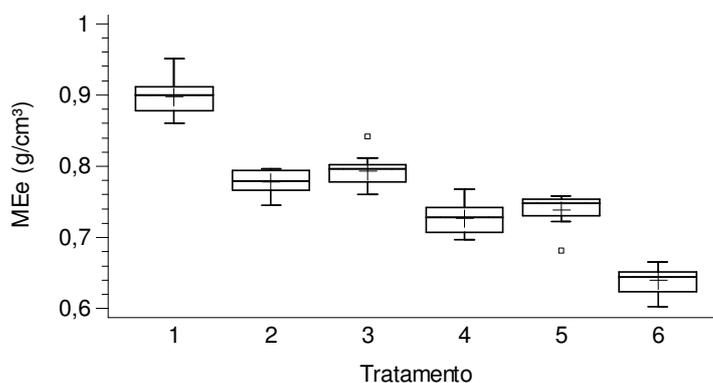


Figura 21. Distribuição dos valores de MEE por tratamento, depois da prensagem.

Os valores médio, mínimo, máximo, desvio padrão e a comparação entre as médias dos tratamentos pelo método LSD (*Fisher's least significant difference*), ao nível de 5% de probabilidade de erro, estão apresentados na Tabela 17.

Tabela 17. Valores médio, mínimo e máximo de MEE, desvio padrão e comparação das médias dos tratamentos.

MEE dos painéis LVL					
(g/cm³)					
	Média	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão	Grupos
LVL1	0,898	0,860	0,951	0,025	A
LVL2	0,778	0,746	0,797	0,018	B
LVL3	0,793	0,760	0,842	0,022	B
LVL4	0,726	0,697	0,768	0,022	C
LVL5	0,739	0,681	0,758	0,022	C
LVL6	0,639	0,603	0,665	0,019	D

Letras maiúsculas comparam as médias, sendo que pelo menos uma letra igual indica a não existência de diferença significativa estatisticamente ao nível de 5% de probabilidade de erro.

Os resultados demonstram que as médias de MEe para os tratamentos se enquadram em quatro grupos distintos e homogêneos de valores: A, B, C e D. O tratamento LVL1 apresenta o maior valor, seguido dos tratamentos LVL3 e LVL2 (equivalentes estatisticamente entre si), e dos tratamentos LVL5 e LVL4, os quais se equivalem; por último, apresentando o menor valor, está o tratamento LVL6.

A representação gráfica em colunas das médias de MEe dos tratamentos pode ser observada na Figura 22.

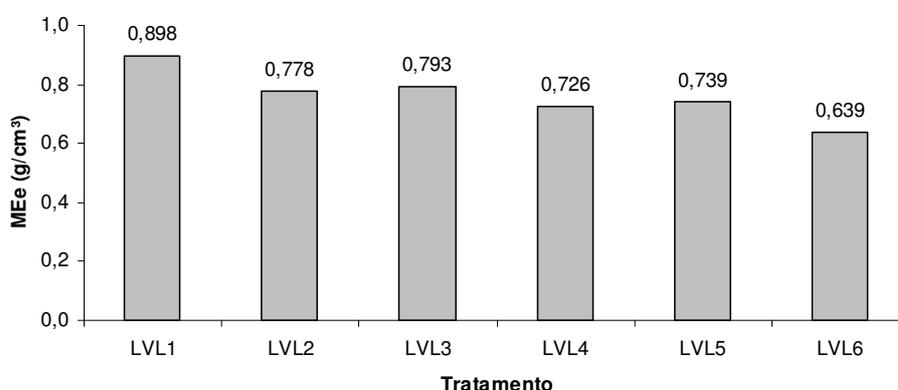


Figura 22. Média de MEe por tratamento, depois da prensagem.

A densificação dos painéis depois de manufaturados pode ser observada por meio da comparação dos valores teóricos de MEe, obtidos antes da prensagem (Tabela 15), com os valores efetivos encontrados após a prensagem (Tabela 16).

A Tabela 18 mostra os valores das médias de MEe por tratamento para essas duas situações e o percentual de aumento de massa específica em relação ao valor teórico, após a prensagem.

A comparação gráfica em colunas das médias de MEe dos tratamentos, antes e depois da densificação, pode ser observada na Figura 23.

Tabela 18. MEe por tratamento LVL, antes e após a densificação dos painéis, e o percentual de aumento dessa propriedade

Tratamento	Massa específica anterior (g/cm ³)	Massa específica posterior (g/cm ³)	Aumento de massa específica (%)
LVL1	0,8122	0,8978	10,54
LVL2	0,7066	0,7778	10,08
LVL3	0,7197	0,7934	10,24
LVL4	0,6347	0,7265	14,46
LVL5	0,6511	0,7391	13,52
LVL6	0,5462	0,6392	17,03

Percentual de aumento de massa específica calculado em relação ao valor teórico de MEe, determinado antes da prensagem.

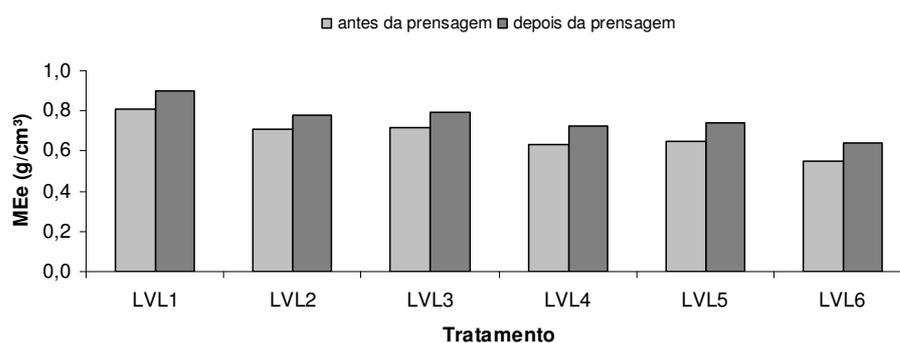


Figura 23. Médias de MEe por tratamento, antes e depois da prensagem.

A representação gráfica em colunas dos percentuais de aumento de MEe dos painéis LVL após a prensagem pode ser observada na Figura 24.

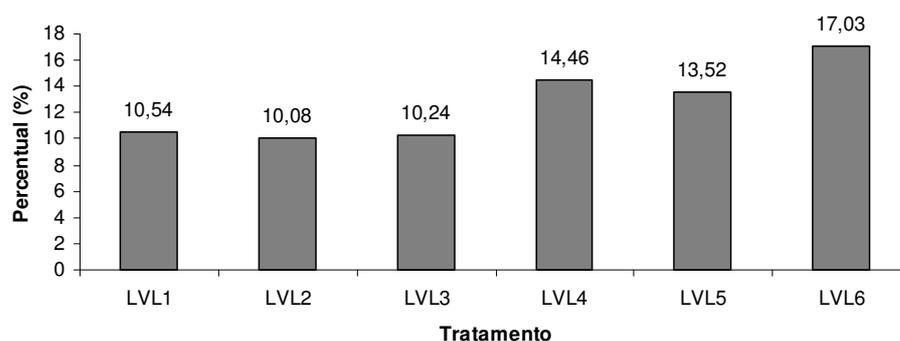


Figura 24. Percentual de aumento de MEe por tratamento, depois da prensagem.

Conforme proposto e apresentado, o percentual de aumento de MEe após a prensagem pode ser considerado uma taxa de densificação teórica, para uma conjuntura que não considera a presença do adesivo. Estima-se, por cálculos efetuados (não apresentados), um percentual de aumento de massa de 3 a 5 % (menor para LVL1 e maior para LVL6), devido ao acréscimo de sólidos agregados pela resina fenólica, para a quantidade de linhas de cola e gramatura utilizada nos painéis deste experimento. Assim, uma parte dos percentuais apresentados é conseqüência do adesivo, e avaliações mais precisas para a obtenção de valores de densificação específicos para a madeira resultariam em percentuais menores. Entretanto, essas taxas de densificação teórica são utilizadas como parâmetro comparativo, na análise apresentada a seguir, por proporcionarem boa aproximação com a densificação real das composições propostas neste trabalho.

Para os painéis dos tratamentos LVL1, LVL2 e LVL3, a taxa de densificação teórica é similar, em torno de 10%. Cabe salientar que a substituição de duas camadas de lâminas de eucalipto por lâminas de pinus praticamente não gerou diferenciação, o que contrapõe o esperado. Entretanto, quando é analisado o aumento de massa específica para os tratamentos LVL4, LVL5 e LVL6, nota-se que os percentuais aumentam, sendo maior para o tratamento LVL6 e similares para LVL4 e LVL5. Isso provavelmente se deve à presença de maior número de lâminas de pinus (três para LVL4 e LVL5 e cinco para LVL6). A madeira de pinus das lâminas deste experimento apresenta menor massa específica em relação à de eucalipto. Nessa condição, normalmente a madeira de pinus apresenta menor resistência à compressão perpendicular às fibras.

É de estranhar o percentual de densificação verificado para LVL4 em relação ao verificado para LVL5. Era esperado o contrário, um percentual levemente superior para LVL5, uma vez que esse último apresenta nas camadas externas madeira de pinus. Sabe-se que as camadas externas são mais suscetíveis à compactação por receberem contato direto dos pratos da prensa e, conseqüentemente, maior calor; altas temperaturas reduzem a resistência da estrutura celular da madeira. Assim, posicionadas nas camadas externas, as lâminas de pinus (naturalmente menos resistentes à compressão) tenderiam a uma compactação ainda maior. Com base nos argumentos expostos, também surpreende não ocorrer um percentual de densificação inferior para LVL1 em relação à LVL2 e LVL3. Os resultados indicam o contrário do esperado, o que não se

consegue explicar com base nos argumentos anteriores. De todos os modos, as composições LVL com três ou mais camadas de pinus resultam em densificações mais expressivas, conforme previsto.

Em geral, a densificação de um painel de lâminas depende do tipo e da qualidade da madeira que o constitui, dos percentuais de distintos lenhos (juvenil-adulto, inicial-tardio, cerne-alburno) presentes nas lâminas, do teor de umidade e dos parâmetros de prensagem (pressão e temperatura) utilizados em sua manufatura. Depende fundamentalmente da resistência à compressão perpendicular às fibras que o material apresenta; no caso de lâminas torneadas, uma compressão na direção radial da madeira. As faixas de pressão e temperatura geralmente utilizadas nas indústrias produzem, dependendo da madeira, retrações de espessura de 5% a 10%, aproximadamente, para teores de umidade de até 10%. Por essa razão, normalmente, a densidade de um painel multilaminado é maior que a da madeira sólida (KOLLMANN et al., 1975).

Decorrente da prensagem, a redução volumétrica ocorre principalmente em função da redução na espessura dos painéis. Parte da redução em espessura pode ter origem na fratura de paredes celulares mais frágeis, com efeito localizado e irreversível. Outra parte, que se efetiva pela compressão da estrutura celular como um todo, pode armazenar tensões que, se liberadas, tendem a promover certa expansão na espessura dos painéis (*springback*).

5.3 Flexão estática dos painéis LVL na posição *flatwise*

Os ensaios de flexão estática com carga aplicada no centro do vão entre apoios, com força perpendicular aos planos de cola, indicaram os resultados apresentados na Tabela 19.

Tabela 19. Resultados dos ensaios de flexão estática: módulo de elasticidade (MOE), tensão no limite proporcional (TLP) e módulo de ruptura (MOR); valores das médias na posição *flatwise*.

Tratamento	MOE (kgf/cm ²)	TLP (kgf/cm ²)	MOR (kgf/cm ²)
LVL1	228.266 A ^{6,44}	1.231,82 A ^{10,9}	1.717,94 A ^{10,4}
LVL2	207.688 B ^{4,14}	997,38 B ^{6,19}	1.535,43 B ^{5,85}
LVL3	167.067 C ^{13,5}	915,12 C ^{15,3}	1.417,13 BC ^{11,8}
LVL4	212.137 B ^{5,88}	1.004,39 B ^{6,29}	1.490,59 B ^{9,23}
LVL5	168.143 C ^{9,22}	946,90 BC ^{9,11}	1.336,48 C ^{9,05}
LVL6	155.715 C ^{10,0}	798,75 D ^{9,58}	1.015,23 D ^{18,8}

Em uma mesma coluna, letras maiúsculas comparam as grandezas entre tratamentos, sendo que médias com pelo menos uma letra igual não diferem estatisticamente ao nível de 5% de probabilidade de erro; o número central é o valor médio, acima e à direita tem-se o coeficiente de variação (CV).

5.3.1 Módulo de elasticidade (MOE) na posição *flatwise*

A distribuição dos resultados para os tratamentos LVL pode ser observada na Figura 25. Os valores médio, mínimo, máximo, desvio padrão e a comparação das médias dos tratamentos pelo método LSD (*Fisher's least significant difference*), ao nível de 5% de probabilidade de erro, estão apresentados na Tabela 20.

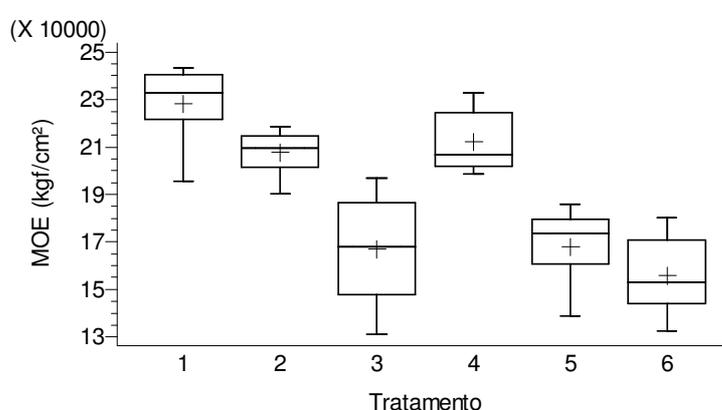


Figura 25. Distribuição dos valores de MOE por tratamento, na posição *flatwise*.

Tabela 20. Valores médio, mínimo e máximo de MOE, desvio padrão e comparação das médias dos tratamentos.

Módulo de Elasticidade (MOE) <i>flatwise</i> (kgf/cm ²)					
	Média	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão	Grupos
LVL1	228.266	195.530	243.165	14.711	A
LVL2	207.688	190.425	218.482	8.607	B
LVL3	167.067	131.059	196.877	22.632	C
LVL4	212.137	198.856	232.748	12.471	B
LVL5	168.143	138.620	185.661	15.494	C
LVL6	155.715	132.453	180.206	15.565	C

Letras maiúsculas comparam as médias, sendo que pelo menos uma letra igual indica a não existência de diferença significativa estatisticamente ao nível de 5% de probabilidade de erro.

Observa-se pelos resultados que as médias de MOE se enquadram em três grupos distintos e homogêneos de valores: A, B e C. O tratamento LVL1 apresenta o maior valor, seguido pelos tratamentos LVL4 e LVL2 (equivalentes estatisticamente) e, por último, apresentando os menores valores, estão os tratamentos LVL5, LVL3 e LVL6, os quais não diferem estatisticamente entre si.

A representação gráfica em colunas das médias de MOE dos tratamentos LVL está apresentada na Figura 26.

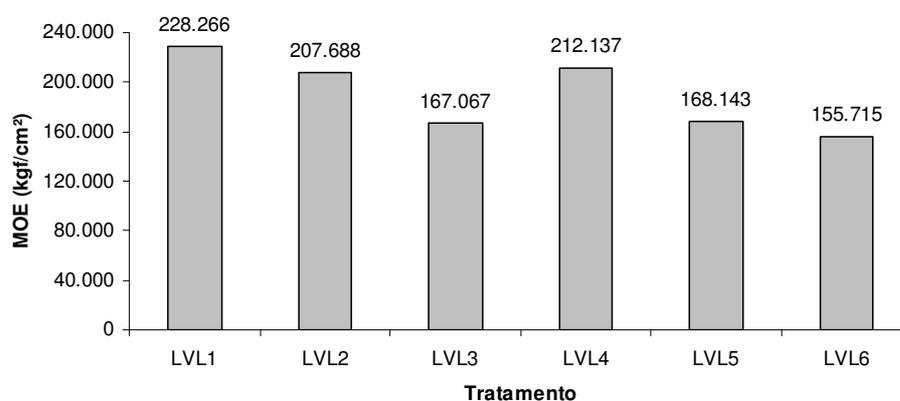


Figura 26. Média de MOE por tratamento; *flatwise*.

5.3.2 Módulo de ruptura (MOR) na posição *flatwise*

A distribuição dos resultados para os tratamentos LVL pode ser observada na Figura 27. Os valores médio, mínimo, máximo, desvio padrão e a comparação das médias dos tratamentos pelo método LSD (*Fisher's least significant difference*), ao nível de 5% de probabilidade de erro, estão apresentados na Tabela 21.

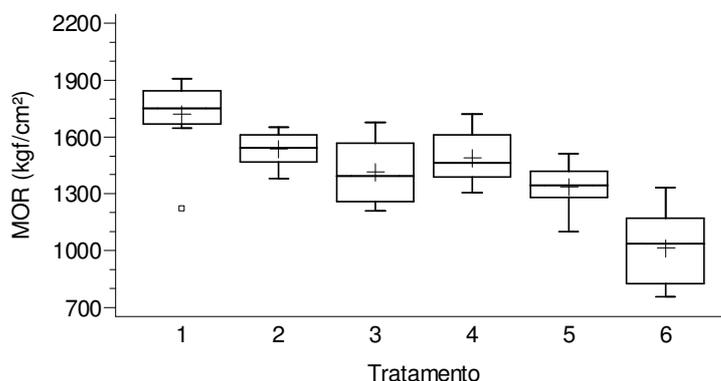


Figura 27. Distribuição dos valores de MOR por tratamento, na posição *flatwise*.

Tabela 21. Valores médio, mínimo e máximo de MOR, desvio padrão e comparação das médias dos tratamentos.

Módulo de Ruptura (MOR)					
<i>flatwise</i>					
(kgf/cm ²)					
	Média	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão	Grupos
LVL1	1.717,94	1.223,18	1.909,44	178,74	A
LVL2	1.535,43	1.381,88	1.651,53	89,81	B
LVL3	1.417,13	1.210,92	1.676,27	167,81	B C
LVL4	1.490,59	1.306,14	1.720,91	137,56	B
LVL5	1.336,48	1.102,70	1.509,76	120,93	C
LVL6	1.015,23	756,76	1.330,95	190,67	D

Letras maiúsculas comparam as médias, sendo que pelo menos uma letra igual indica a não existência de diferença significativa estatisticamente ao nível de 5% de probabilidade de erro.

Os resultados demonstram que as médias de MOR se enquadram em quatro grupos distintos e homogêneos de valores: A, B, C e D. O tratamento LVL1 apresenta o maior valor, seguido dos tratamentos LVL2, LVL4 e LVL3 (equivalentes estatisticamente entre si), e do tratamento LVL5 (equivalente ao LVL3); por último, apresentando o menor valor, está o tratamento LVL6.

A representação gráfica em colunas das médias de MOR dos tratamentos LVL está apresentada na Figura 28.

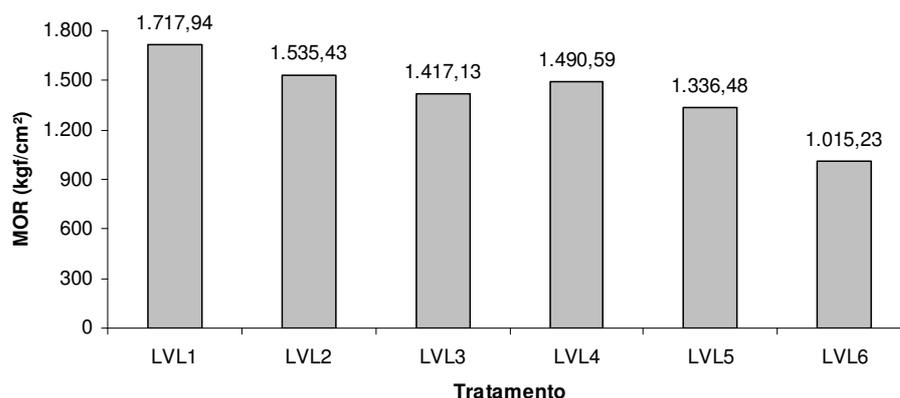


Figura 28. Média de MOR por tratamento; *flatwise*.

5.3.3 Tensão no limite proporcional (TLP) na posição *flatwise*

A distribuição dos resultados para os tratamentos LVL pode ser observada na Figura 29. Os valores médio, mínimo, máximo, desvio padrão e a comparação das médias dos tratamentos pelo método LSD (*Fisher's least significant difference*), ao nível de 5% de probabilidade de erro, estão apresentados na Tabela 22.

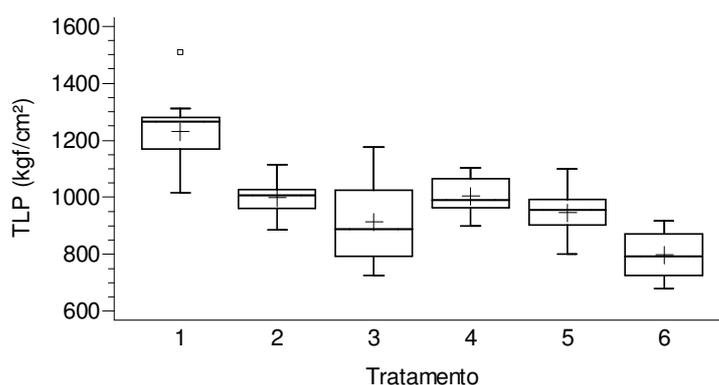


Figura 29. Distribuição dos valores de TLP por tratamento, na posição *flatwise*.

Tabela 22. Valores médio, mínimo e máximo de TLP, desvio padrão e comparação das médias dos tratamentos.

Tensão no Limite Proporcional (TLP)					
<i>flatwise</i>					
(kgf/cm ²)					
	Média	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão	Grupos
LVL1	1.231,82	1.015,24	1.507,94	134,41	A
LVL2	997,38	885,22	1.114,46	61,73	B
LVL3	915,12	726,00	1.174,71	140,07	C
LVL4	1.004,39	899,83	1.102,80	63,13	B
LVL5	946,90	801,33	1.100,17	86,28	B C
LVL6	798,75	679,65	918,27	76,48	D

Letras maiúsculas comparam as médias, sendo que pelo menos uma letra igual indica a não existência de diferença significativa estatisticamente ao nível de 5% de probabilidade de erro.

Observa-se pelos resultados que as médias de TLP se enquadram em quatro grupos distintos e homogêneos de valores: A, B, C e D. O tratamento LVL1 apresenta o maior valor, seguido dos tratamentos LVL4, LVL2 e LVL5 (equivalentes estatisticamente entre si), e do tratamento LVL3 (equivalente ao LVL5); por último, apresentando o menor valor, está o tratamento LVL6.

A representação gráfica em colunas das médias de TLP dos tratamentos LVL está apresentada na Figura 30.

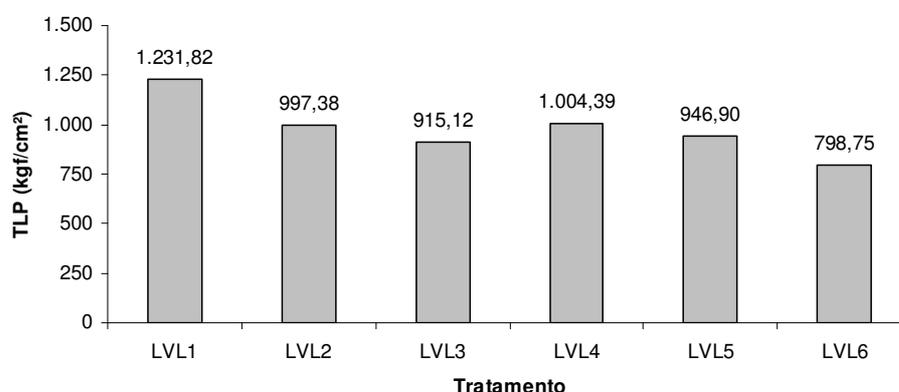


Figura 30. Média de TLP por tratamento; *flatwise*.

5.3.4 Análise dos resultados de flexão estática para a posição *flatwise*

Contraopondo-se ao esperado, a rigidez (MOE), a resistência na ruptura (MOR) e a resistência no limite elástico (TLP) do material LVL, em solicitação de flexão estática na posição *flatwise*, não indicam exatamente a mesma ordem seqüencial de resultados para os seis tratamentos.

Para facilitar as comparações, abaixo estão listadas, na Tabela 23, as propriedades e a seqüência de maior a menor, da esquerda para a direita, dos seis tratamentos LVL, com seus respectivos valores médios.

Tabela 23. Resultados de MEe, MOE, MOR e TLP em seqüência decrescente, para flexão estática na posição *flatwise*.

Massa Específica (MEe)					
(g/cm ³)					
LVL1 A	LVL3 B	LVL2 B	LVL5 C	LVL4 C	LVL6 D
0,898	0,793	0,778	0,739	0,726	0,639
Módulo de Elasticidade (MOE)					
(kgf/cm ²)					
LVL1 A	LVL4 B	LVL2 B	LVL5 C	LVL3 C	LVL6 C
228.266	212.137	207.688	168.143	167.067	155.715
Módulo de Ruptura (MOR)					
(kgf/cm ²)					
LVL1 A	LVL2 B	LVL4 B	LVL3 BC	LVL5 C	LVL6 D
1.717,94	1.535,43	1.490,59	1.417,13	1.336,48	1.015,23
Tensão no Limite Proporcional (TLP)					
(kgf/cm ²)					
LVL1 A	LVL4 B	LVL2 B	LVL5 BC	LVL3 C	LVL6 D
1.231,82	1.004,39	997,38	946,90	915,12	798,75

Em uma mesma linha, os valores das propriedades decrescem da esquerda para a direita. Letras maiúsculas comparam as médias, sendo que pelo menos uma letra igual indica a não existência de diferença significativa estatisticamente ao nível de 5% de probabilidade de erro.

Para a análise dos ordenamentos (de maior a menor) dos tratamentos segundo seus respectivos valores de médias obtidos para as propriedades em estudo, torna-se interessante a comparação com previsões ou expectativas de resultados fundamentadas sob dois critérios, que potencializam a mesma propriedade física, a massa específica. O primeiro critério, o qual para a posição *flatwise* se previa mais efetivo, é o que prioriza a influência das posições das lâminas nas formações dos painéis, sendo o segundo critério aquele que enaltece a influência do valor de massa específica média das composições.

Esperava-se, em função das diferentes posições das lâminas de eucalipto nas camadas de cinco dos tratamentos, da influência de se alocar nessas posições maior massa específica (em comparação às camadas com pinus) e devido à quantidade de lâminas de eucalipto presente em cada um desses tratamentos, que os resultados para as propriedades mecânicas sob análise (MOE, MOR e TLP) apresentassem a seguinte ordem seqüencial:

“LVL1 – LVL2 e LVL4 (equivalentes) – LVL3 e LVL5 (equivalentes) – LVL6”.

Para o MOE, a constatação de que os tratamentos LVL4 e LVL2 não diferem estatisticamente, assim como são equivalentes entre si LVL5 e LVL3, confirma que, na posição *flatwise*, as diferenças de M_{Ee} nas lâminas de miolo não exercem forte influência nos resultados por estas se situarem na região de tensão mínima, da linha neutra. Porém, surpreende a equivalência estatística de LVL6 com LVL5 e LVL3. A razão da não diferenciação pode estar associada à pequena distância das camadas intermediárias em relação à linha neutra, o que implica em pequeno momento de inércia para essas posições. Entretanto, LVL3 (3 lâminas de eucalipto) e LVL5 (2 lâminas de eucalipto) apresentam valores médios de massa específica significativamente superiores a LVL6, e isso deveria confluir em diferenciação nos resultados, o que não se constata. Essa aproximação de valores pode indicar, para o MOE, uma fraca influência das diferenças de massa específica média entre os tratamentos, visto que, comparadas essas médias para LVL3, LVL5 e LVL6, as três se diferenciam significativamente entre si, o que não repercute nos resultados para avaliar a rigidez.

A seqüência de valores de TLP é a mesma constatada para o MOE, porém, diferem as relações estatísticas. Em TLP, o tratamento LVL5 apresenta equivalência aos anteriores (LVL4 e LVL2), o que não era esperado, e o tratamento LVL6 se diferencia dos anteriores (LVL5 e LVL3), o que era previsto. Explica-se a

equivalência inesperada de forma similar ao exposto para o MOE: as camadas intermediárias se diferenciam também minimamente das camadas externas quanto às distâncias que apresentam da linha neutra, e esse pode ser o motivo de oscilações nos resultados. Porém, pelo critério da influência da massa específica média, o tratamento que deveria apresentar resultados mais próximos de LVL4 e LVL2 seria o LVL3 que, em sua constituição, contém uma lâmina a mais de eucalipto em relação ao LVL5, e isso não se confirma.

Os resultados de MOR mostram a seqüência esperada, apenas não era prevista a igualdade estatística do tratamento LVL3 com seus vizinhos (LVL2 e LVL4). Observa-se que, embora equivalentes estatisticamente, o tratamento LVL4 apresenta média de resistência um pouco superior à do tratamento LVL3, sendo que sua média de massa específica é menor. Contudo, a influência das lâminas de eucalipto nas camadas externas, que são as mais exigidas em flexão na posição *flatwise*, explicam o maior resultado para LVL4. Em outras palavras, menor massa específica no conjunto de lâminas, porém mais eficaz localização da massa específica em regiões mais tensionadas. A igualdade estatística para o MOR dos tratamentos LVL2, LVL4 e LVL3, bem como a equivalência de LVL5 e LVL3, indicam a fraca influência das diferenças de MEe existentes entre os mesmos.

A pequena espessura das lâminas e a proposta de apenas cinco camadas para a composição dos painéis LVL deste experimento tornam os resultados minimamente diferenciados em suas médias, dificultando a análise para as camadas intermediárias, todavia, são suficientes para observar a forte influência das camadas externas de capa e contracapa nas propriedades mecânicas.

Ainda, faz-se notar para MOE, MOR e TLP, na posição *flatwise*, o menor coeficiente de variação apresentado por LVL2, que pode ser um indicador da boa aderência formada entre as lâminas de eucalipto e pinus intercaladas, conforme as posições estabelecidas para esse tratamento (eucalipto na capa, contracapa e miolo e pinus nas camadas intermediárias). A menor variância dos resultados obtidos para essa composição de lâminas aponta também para a possibilidade de uma mais equilibrada distribuição das tensões internas geradas, quando essa composição se encontra sob solicitação de flexão. Para os elementos LVL assim manufaturados, essa suposta capacidade de estabelecer um equilíbrio mais estável para a interação de forças internas de reação, tornar-se-ia interessante para determinadas aplicações estruturais, devido à maior previsibilidade para a resistência desses elementos.

5.3.5 Relacionamento entre MOE e MEe para a posição *flatwise*

A Figura 31 mostra graficamente a relação de MOE x MEe para as amostras ensaiadas em flexão estática na posição *flatwise*.

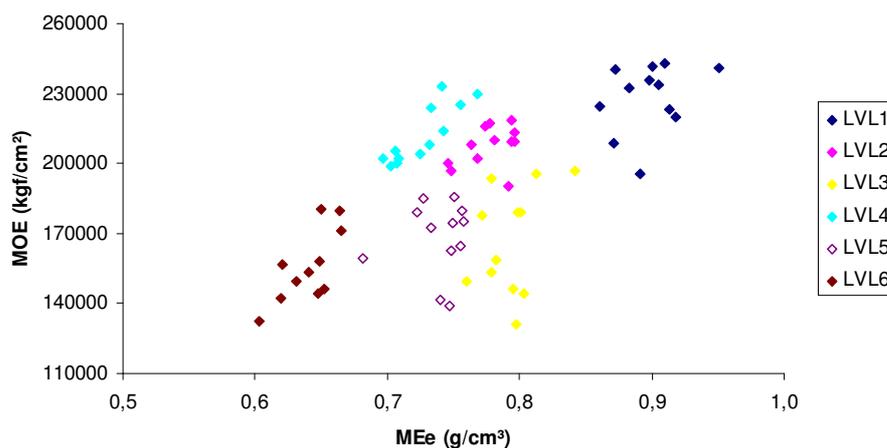


Figura 31. Relação MOE x MEe para 71 cps ensaiados em flexão estática na posição *flatwise*.

Para os tratamentos com cinco lâminas de madeira da mesma espécie (LVL1 e LVL6), observa-se a tendência esperada de aumento do MOE com certa proporcionalidade em relação ao aumento da MEe. Para os tratamentos com mistura das duas madeiras (eucalipto e pinus), a análise do gráfico mostra que valores de MEe próximos (equivalentes estatisticamente) apontam valores correspondentes de MOE que se diferenciam nitidamente, devido à influência das posições das lâminas. Para esses tratamentos, quando as camadas externas dos painéis são constituídas por lâminas de eucalipto, verificam-se maiores valores de MOE. Nota-se também que, para os tratamentos da parte inferior do gráfico (grupo LVL6, LVL5 e LVL3), assim como para o grupo LVL4 e LVL2, as diferenças de MEe entre os tratamentos dentro de cada um desses grupos não repercutem em diferenciações expressivas de MOE. Para esses dois grupos, dentro deles, tratamentos diferentes estatisticamente quanto à MEe apresentam valores de MOE equivalentes, conforme comprovado pelo teste de médias.

Pelo que está exposto, evidencia-se na relação MOE x MEe a forte influência da posição das lâminas de eucalipto e a fraca influência das diferenças de MEe (exceto para LVL1) para este experimento.

5.3.6 Relacionamento entre MOR e MEe para a posição *flatwise*

A Figura 32 mostra graficamente a relação de MOR x MEe para as amostras ensaiadas em flexão estática na posição *flatwise*.

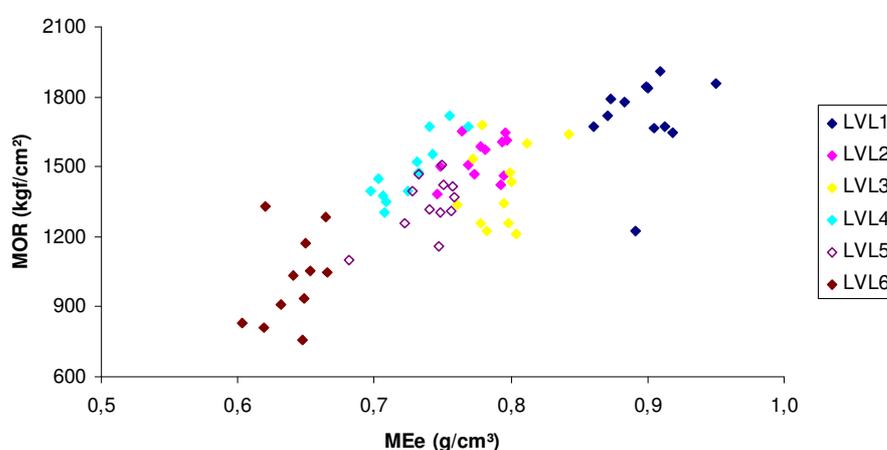


Figura 32. Relação MOR x MEe para 71 cps ensaiados em flexão estática na posição *flatwise*.

Assim como observado para o MOE, para os tratamentos com madeira de uma única espécie (LVL1 e LVL6), constata-se um aumento do MOR com certa proporcionalidade em relação ao aumento da MEe. Para os tratamentos com mistura das duas madeiras (eucalipto e pinus), a análise do gráfico mostra que valores de MEe próximos (equivalentes estatisticamente) apontam valores correspondentes de MOR com menor diferenciação gráfica, em relação ao que é observado para o MOE, no gráfico MOE x MEe. As diferenças de MEe entre os tratamentos do grupo formado por LVL2, LVL3, LVL4 e LVL5 não repercutem em expressivas diferenciações de MOR, exceto para LVL5, que se diferencia estatisticamente dos demais, não obstante seja equivalente a LVL3. Para esse grupo de tratamentos constata-se, na relação de MOR x MEe, que a influência da posição das lâminas de eucalipto é menor do que fora na relação de MOE x MEe e que a influência das diferenças de MEe se mantém fraca para este experimento.

5.3.7 Relacionamento entre MOR e MOE para a posição *flatwise*

A Figura 33 mostra graficamente a relação de MOR x MOE para as amostras ensaiadas em flexão estática na posição *flatwise*.

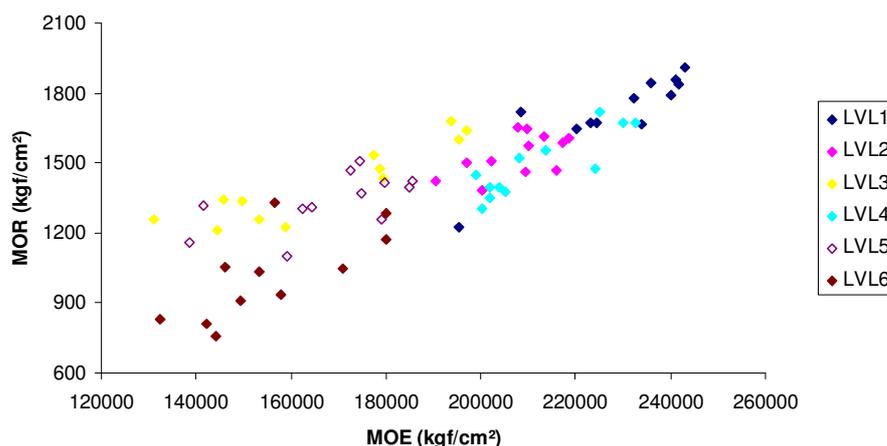


Figura 33. Relação MOR x MOE para 71 cps ensaiados em flexão estática na posição *flatwise*.

Normalmente, espera-se para essa relação que ocorra certa proporcionalidade: quanto maior o MOE, conseqüentemente maior o MOR. No gráfico, observa-se a desproporcionalidade entre dois grupos de tratamentos: grupo 1 (LVL3 e LVL5) e grupo 2 (LVL2 e LVL4), que abrangem os tratamentos com mistura das madeiras. Entre esses dois grupos, para uma maior variação do MOE, ocorre uma menor variação do MOR. Aparentemente, os painéis com as camadas externas constituídas de lâminas de eucalipto (grupo 2) apresentam um aumento de rigidez desproporcional ao aumento de resistência, em relação aos painéis nos quais as camadas externas são de pinus (grupo 1). Assim, os tratamentos do grupo 2 apresentam considerável ganho em rigidez e praticamente não há ganho em resistência, conforme as equivalências estatísticas dos resultados.

A análise do relacionamento entre MOR x MOE indica uma relação fraca para essas propriedades na posição *flatwise*, na qual tratamentos mistos que apresentam equivalência estatística em MOR demonstram considerável diferenciação em MOE.

5.4 Flexão estática dos painéis LVL na posição *edgewise*

Os ensaios de flexão estática com carga aplicada no centro do vão entre apoios, com força paralela aos planos de cola, indicaram os resultados apresentados na Tabela 24.

Tabela 24. Resultados dos ensaios de flexão estática: módulo de elasticidade (MOE), tensão no limite proporcional (TLP) e módulo de ruptura (MOR); valores das médias na posição *edgewise*.

Tratamento	MOE (kgf/cm ²)	TLP (kgf/cm ²)	MOR (kgf /cm ²)
LVL1	204.082 A ^{6,68}	1.020,93 A ^{10,6}	1.342,18 A ^{9,66}
LVL2	162.646 C ^{6,04}	844,14 CD ^{10,7}	1.128,00 CD ^{9,92}
LVL3	176.822 B ^{8,03}	934,89 B ^{9,11}	1.236,00 B ^{10,3}
LVL4	145.414 D ^{6,96}	795,11 D ^{14,3}	1.051,25 DE ^{14,0}
LVL5	160.948 C ^{7,33}	871,98 BC ^{5,42}	1.194,90 BC ^{5,72}
LVL6	125.527 E ^{11,0}	699,45 E ^{13,8}	960,38 E ^{13,9}

Em uma mesma coluna, letras maiúsculas comparam as grandezas entre tratamentos, sendo que médias com pelo menos uma letra igual não diferem estatisticamente ao nível de 5% de probabilidade de erro; o número central é o valor médio, acima e à direita tem-se o coeficiente de variação (CV).

5.4.1 Módulo de elasticidade (MOE) na posição *edgewise*

A distribuição dos resultados para os tratamentos LVL pode ser observada na Figura 34. Os valores médio, mínimo, máximo, desvio padrão e a comparação das médias dos tratamentos pelo método LSD (*Fisher's least significant difference*), ao nível de 5% de probabilidade de erro, estão apresentados na Tabela 25.

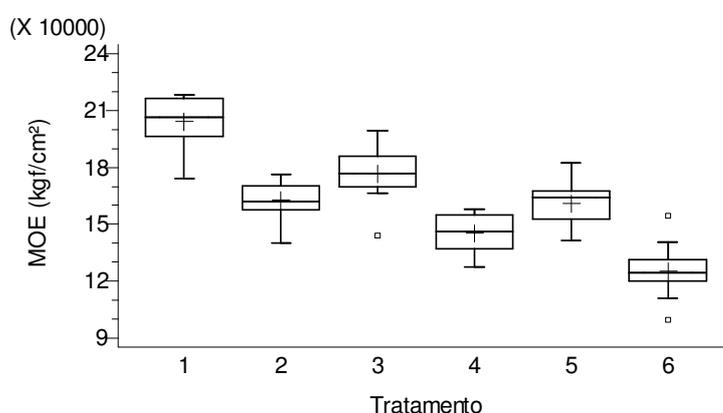


Figura 34. Distribuição dos valores de MOE por tratamento, na posição *edgewise*.

Tabela 25. Valores médio, mínimo e máximo de MOE, desvio padrão e comparação das médias dos tratamentos.

Módulo de Elasticidade (MOE) <i>edgewise</i> (kgf/cm ²)					
	Média	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão	Grupos
LVL1	204.082	174.078	218.342	13.628	A
LVL2	162.646	140.064	176.422	9.816	C
LVL3	176.822	144.147	199.390	14.190	B
LVL4	145.414	127.683	158.083	10.119	D
LVL5	160.948	141.422	182.558	11.800	C
LVL6	125.527	99.702	154.719	13.813	E

Letras maiúsculas comparam as médias, sendo que pelo menos uma letra igual indica a não existência de diferença significativa estatisticamente ao nível de 5% de probabilidade de erro.

Observa-se pelos resultados que as médias de MOE se enquadram em cinco grupos distintos e homogêneos de valores: A, B, C, D e E. O tratamento LVL1 apresenta o maior valor, seguido do tratamento LVL3; em seguida estão, não apresentando diferença significativa entre si, os tratamentos LVL2 e LVL5. Depois, o tratamento LVL4 e, por último, apresentando o menor valor, está o tratamento LVL6.

A representação gráfica em colunas das médias de MOE dos tratamentos LVL está assinalada na Figura 35.

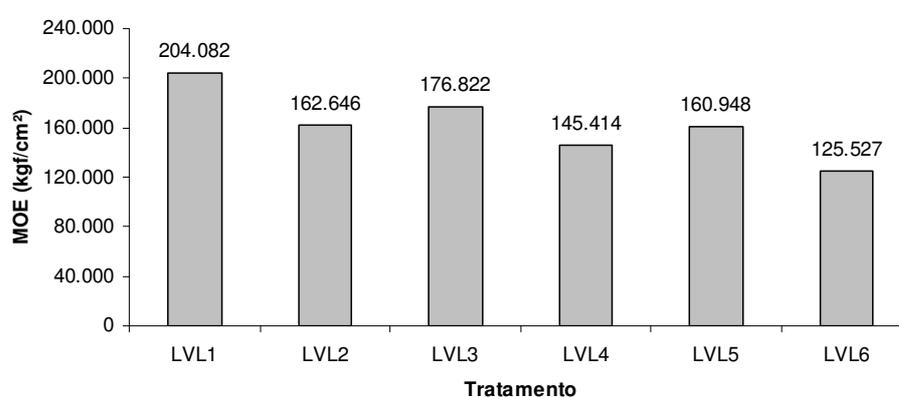


Figura 35. Média de MOE por tratamento; *edgewise*.

O resultado de MOE na posição *edgewise* para o tratamento LVL6, constituído por cinco lâminas de pinus, é muito próximo do apresentado pelo USDA (1999) para a madeira maciça de *Pinus taeda* (*Loblolly pine*) – (125.425 kgf/cm²). Para o tratamento LVL1 (cinco lâminas de eucalipto), o MOE verificado é 11,8% superior ao apresentado para *Eucalyptus diversicolor* (*Karri*) – (182.529 kgf/cm²). Isso com ambas as madeiras a 12% de teor de umidade. Para esses valores, o USDA (1999) aponta massa específica básica, sendo 0,82 g/cm³ para o eucalipto e 0,47 g/cm³ para o pinus. No mesmo capítulo, em outra tabela, encontram-se valores médios de coeficiente de variação para algumas propriedades mecânicas de madeiras livres de defeito, sendo que para o MOE (flexão estática) o percentual apresentado é de 22%.

O USDA (1999), seção 4-28, apresenta também funções matemáticas que relacionam de forma aproximada a massa específica básica da madeira (livre de defeitos, volume a TU = 12%) com suas propriedades mecânicas, para *softwoods* e *hardwoods*. Por meio da aplicação dessas relações aos devidos valores de MEe dos

tratamentos (convertidos para MEb a 12% de umidade), o cálculo do MOE em flexão estática para o tratamento LVL1 indica o valor de 146.343 kgf/cm² e, para o tratamento LVL6, o valor de 132.745 kgf/cm². Em relação aos valores de MOE calculados, os valores verificados nos ensaios destrutivos indicam as seguintes diferenças: 39,45% superior para LVL1 e 5,44% inferior para LVL6. Esses valores calculados para MOE em flexão estática são próximos dos valores apresentados pela NBR 7190 (1997) para MOE em compressão paralela, que são os seguintes: 14.933 MPa (152.274 kgf/cm²) para *Eucalyptus saligna* e 13.304 MPa (135.663 kgf/cm²) para *Pinus taeda*.

5.4.2 Módulo de ruptura (MOR) na posição *edgewise*

A distribuição dos resultados para os tratamentos LVL pode ser observada na Figura 36. Os valores médio, mínimo, máximo, desvio padrão e a comparação das médias dos tratamentos pelo método LSD (*Fisher's least significant difference*), ao nível de 5% de probabilidade de erro, estão apresentados na Tabela 26.

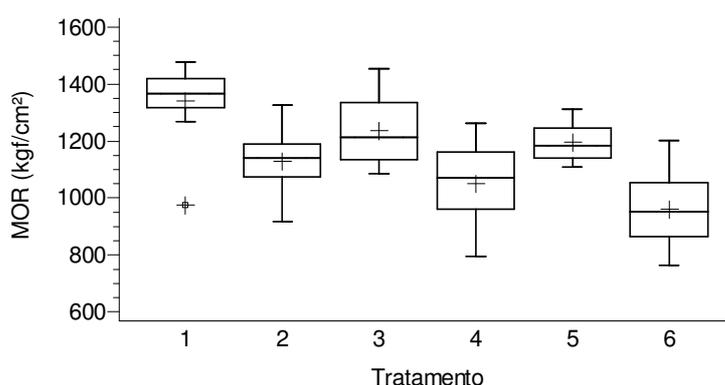


Figura 36. Distribuição dos valores de MOR por tratamento, na posição *edgewise*.

Tabela 26. Valores médio, mínimo e máximo de MOR, desvio padrão e comparação das médias dos tratamentos.

Módulo de Ruptura (MOR) <i>edgewise</i> (kgf/cm²)					
	Média	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão	Grupos
LVL1	1.342,18	975,97	1.478,52	129,70	A
LVL2	1.128,00	917,70	1.325,57	111,93	C D
LVL3	1.236,00	1.085,22	1.453,65	127,88	B
LVL4	1.051,25	795,31	1.262,77	147,53	D E
LVL5	1.194,90	1.107,64	1.313,03	68,34	B C
LVL6	960,38	762,43	1.200,75	133,49	E

Letras maiúsculas comparam as médias, sendo que pelo menos uma letra igual indica a não existência de diferença significativa estatisticamente ao nível de 5% de probabilidade de erro.

Os resultados demonstram que as médias de MOR se enquadram em cinco grupos distintos e homogêneos de valores: A, B, C, D e E. O tratamento LVL1 apresenta o maior valor, seguido dos tratamentos LVL3 e LVL5 (equivalentes estatisticamente entre si), e do tratamento LVL2, o qual não difere do LVL5. Depois, o tratamento LVL4 (equivalente ao LVL2) e, por último, apresentando o menor valor, está o tratamento LVL6, o qual não difere do LVL4.

A representação gráfica em colunas das médias de MOR dos tratamentos LVL está apresentada na Figura 37.

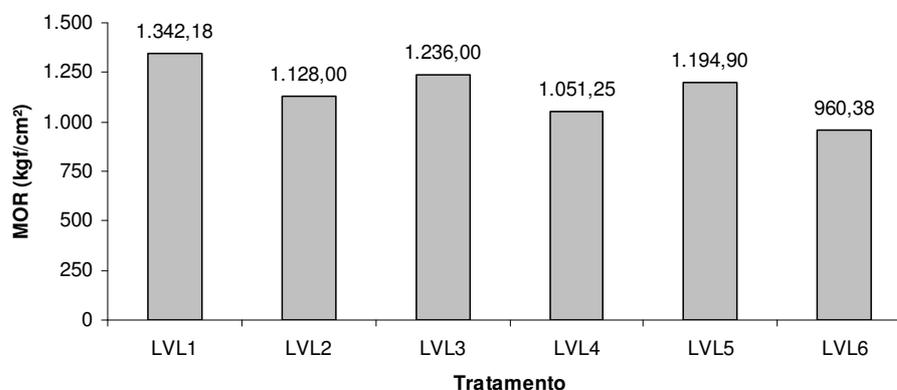


Figura 37. Média de MOR por tratamento; *edgewise*.

Os resultados de MOR na posição *edgewise* para os tratamentos puros (LVL1 e LVL6), sem mistura de eucalipto e pinus, são próximos dos apresentados pelo USDA (1999) para as madeiras maciças de *Eucalyptus diversicolor* (Karri) – (1.417,40 kgf/cm²) e *Pinus taeda* (Loblolly pine) – (897,35 kgf/cm²), ambas a 12% de teor de umidade. Conforme já descrito anteriormente, para esses valores o USDA (1999) aponta massa específica básica, sendo 0,82 g/cm³ para o eucalipto e 0,47 g/cm³ para o pinus. No mesmo capítulo, encontram-se valores médios de coeficiente de variação para algumas propriedades mecânicas de madeiras livres de defeito, sendo que para o MOR o percentual é de 16%.

Por meio da aplicação de funções matemáticas apresentadas pelo USDA (1999), seção 4-28, que relacionam de forma aproximada a massa específica básica às propriedades mecânicas da madeira, baseadas em valores médios obtidos em ensaios com 43 *softwoods* e 66 *hardwoods*, o cálculo do MOR em flexão estática para o tratamento LVL1 indica o valor de 1.394,53 kgf/cm² e, para o tratamento LVL6, o valor de 1.008,29 kgf/cm². Os valores de MOR verificados nos ensaios destrutivos são próximos dos valores calculados, diferindo destes em percentuais inferiores a 5%.

5.4.3 Tensão no limite proporcional (TLP) na posição *edgewise*

A distribuição dos resultados para os tratamentos LVL pode ser observada na Figura 38. Os valores médio, mínimo, máximo, desvio padrão e a comparação das médias dos tratamentos pelo método LSD (*Fisher's least significant difference*), ao nível de 5% de probabilidade de erro, estão apresentados na Tabela 27.

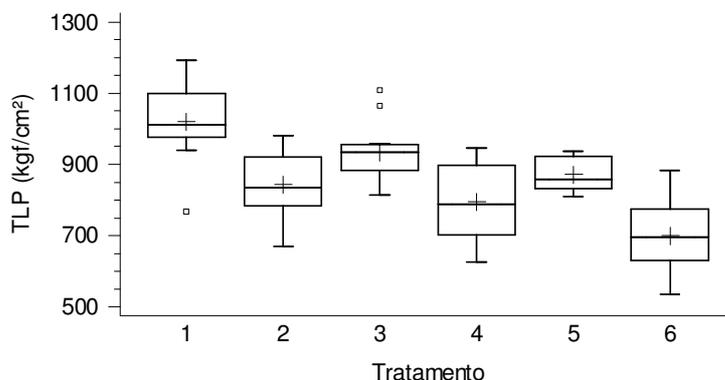


Figura 38. Distribuição dos valores de TLP por tratamento, na posição *edgewise*.

Tabela 27. Valores médio, mínimo e máximo de TLP, desvio padrão e comparação das médias dos tratamentos.

Tensão no Limite Proporcional (TLP) <i>edgewise</i> (kgf/cm ²)					
	Média	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão	Grupos
LVL1	1.020,93	767,76	1.192,68	108,47	A
LVL2	844,14	669,92	982,31	90,28	C D
LVL3	934,89	813,91	1.108,44	85,16	B
LVL4	795,11	625,65	947,08	114,06	D
LVL5	871,98	808,65	936,64	47,30	B C
LVL6	699,45	534,78	884,55	96,56	E

Letras maiúsculas comparam as médias, sendo que pelo menos uma letra igual indica a não existência de diferença significativa estatisticamente ao nível de 5% de probabilidade de erro.

Observa-se, com base nos resultados, que as médias de TLP se enquadram em cinco grupos distintos e homogêneos de valores: A, B, C, D e E. O tratamento LVL1 apresenta o maior valor, seguido dos tratamentos LVL3 e LVL5 (equivalentes estatisticamente entre si), e do tratamento LVL2, o qual não difere do LVL5. Depois, o tratamento LVL4 (equivalente ao LVL2) e, por último, apresentando o menor valor, está o tratamento LVL6.

A representação gráfica em colunas das médias de TLP dos tratamentos LVL está apresentada na Figura 39.

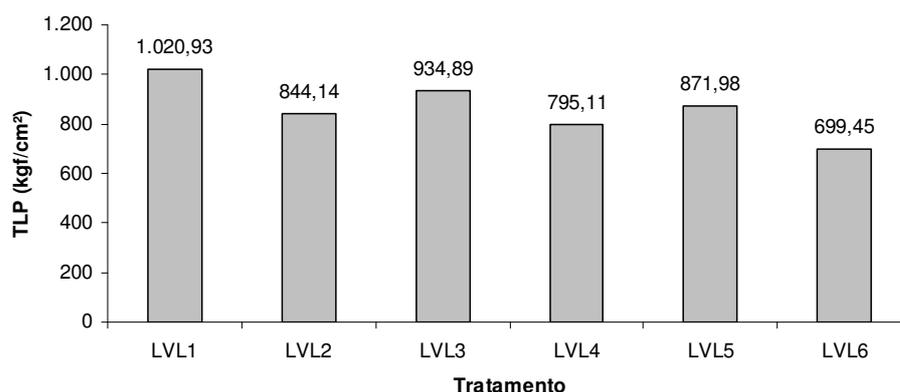


Figura 39. Média de TLP por tratamento; *edgewise*.

Os resultados de TLP na posição *edgewise* indicam que os valores obtidos situam-se em uma estreita faixa percentual, em relação aos valores correspondentes de MOR, que varia de 76,06% (LVL1) a 72,83% (LVL6), evidenciando uma alta proporcionalidade entre essas propriedades para os seis tratamentos.

5.4.4 Análise dos resultados de flexão estática para a posição *edgewise*

Contraoando-se ao esperado, a rigidez (MOE), a resistência na ruptura (MOR) e a resistência no limite elástico (TLP) do material LVL, em solicitação de flexão estática na posição *edgewise*, não indicam exatamente a mesma ordem seqüencial de resultados para os seis tratamentos.

Para facilitar as comparações, abaixo estão listadas, na Tabela 28, as propriedades e a seqüência de maior a menor, da esquerda para a direita, dos seis tratamentos LVL, com seus respectivos valores médios.

Tabela 28. Resultados de MEe, MOE, MOR e TLP em seqüência decrescente, para flexão estática na posição *edgewise*.

Massa Específica (MEe)					
(g/cm³)					
LVL1 A	LVL3 B	LVL2 B	LVL5 C	LVL4 C	LVL6 D
0,898	0,793	0,778	0,739	0,726	0,639
Módulo de Elasticidade (MOE)					
(kgf/cm²)					
LVL1 A	LVL3 B	LVL2 C	LVL5 C	LVL4 D	LVL6 E
204.082	176.822	162.646	160.948	145.414	125.527
Módulo de Ruptura (MOR)					
(kgf/cm²)					
LVL1 A	LVL3 B	LVL5 BC	LVL2 CD	LVL4 DE	LVL6 E
1.342,18	1.236,00	1.194,90	1.128,00	1.051,25	960,38
Tensão no Limite Proporcional (TLP)					
(kgf/cm²)					
LVL1 A	LVL3 B	LVL5 BC	LVL2 CD	LVL4 D	LVL6 E
1.020,93	934,89	871,98	844,14	795,11	699,45

Em uma mesma linha, os valores das propriedades decrescem da esquerda para a direita. Letras maiúsculas comparam as médias, sendo que pelo menos uma letra igual indica a não existência de diferença significativa estatisticamente ao nível de 5% de probabilidade de erro.

Na posição *edgewise*, em que as lâminas se dispõem verticalmente, projeta-se simplesmente a relação de menores valores para as propriedades sob análise conforme a redução da massa específica média para os tratamentos. Em outras palavras, nessa posição seria importante, para comparações entre tratamentos, apenas a MEe dos painéis LVL de cinco lâminas, não importando as posições das lâminas nas camadas das diversas composições. Entretanto, os resultados obtidos para os tratamentos com mistura de eucalipto e pinus (LVL2, LVL3, LVL4 e LVL5) mostram algumas alterações em relação às expectativas, na ordem e na equivalência das grandezas analisadas.

Esperava-se, para as propriedades mecânicas sob análise (MOE, MOR e TLP), a mesma ordem de seqüência obtida para as médias de MEe dos tratamentos,

na qual aqueles constituídos por três lâminas de eucalipto não se diferenciam estatisticamente entre si (LVL3 e LVL2), o mesmo acontecendo para os constituídos por duas lâminas de eucalipto (LVL5 e LVL4); a seguir:

“**LVL1 – LVL3 e LVL2** (equivalentes) – **LVL5 e LVL4** (equivalentes) – **LVL6**”.

Para o MOE, os resultados mostram a seqüência de valores na ordem esperada, porém, as equivalências estatísticas (ou a falta dessas) diferem do previsto. Surpreendem tanto a diferenciação de LVL2 em relação à LVL3 como a não diferenciação de LVL5 em relação à LVL2. Da mesma forma, LVL4 não equivale a LVL5, o que também não era esperado. Aparentemente, devido aos resultados, percebe-se que as lâminas de eucalipto contribuem diferentemente para a rigidez das amostras conforme as posições que ocupam. Isso não está alinhado com a teoria clássica das vigas laminadas (BODIG; JAYNE, 1982), que atribui para composições com lâminas verticais simétricas ortotrópicas igual influência para todas as posições das camadas de montagem na solicitação de flexão estática. Ao que parece, as lâminas de eucalipto proporcionam maiores MOEs quando posicionadas nas camadas intermediárias dos painéis. A influência do posicionamento dessas lâminas não encontra sustentação na teoria dos sistemas em camadas, e sua ocorrência neste experimento deve-se a fatores que não foram suficientemente detectados.

Em teoria, na análise de um determinado corpo-de-prova na posição *edgewise*, em flexão estática com carga aplicada no centro do vão, observa-se que a porção situada abaixo da linha neutra está sob tensão de tração, predominantemente, sendo que esta é tanto maior quanto maior for a distância da referida linha, para qualquer ponto dessa região tracionada. Como na posição *edgewise*, para uma determinada faixa ortogonal às camadas, todas as porções das cinco lâminas do multilaminado (inclusas na faixa) apresentam igual distância da linha neutra, independentemente das posições que essas lâminas ocupam, todas elas estão submetidas a uma mesma tensão de tração, conforme a teoria. A resistência à tração do conjunto, na referida faixa ortogonal, é então determinada por meio da somatória das resistências das lâminas componentes do multilaminado (relativas às áreas de secção transversal dessas lâminas e à distância dessa faixa em relação à linha neutra). Nos ensaios de flexão, normalmente, os corpos-de-prova rompem por tração, quando o material deixa de resistir à tensão imposta pela carga atuante.

Os resultados de MOR e TLP mostram seqüências, de maior a menor, praticamente idênticas, apenas se diferenciando entre si devido à equivalência estatística dos valores apresentados pelos tratamentos LVL4 e LVL6 para MOR, o que não se verifica para TLP. Porém, essas seqüências não eram as esperadas, pois diferem na ordem e nas equivalências para os tratamentos com mistura de eucalipto e pinus. Era esperada a equivalência entre os tratamentos LVL2 e LVL3, mas estes se diferenciam nos resultados. Surpreende mais o fato de LVL5 apresentar resistência equivalente à de LVL3 e, também, à de LVL2. O tratamento LVL5, com duas lâminas de eucalipto em sua composição, deveria apresentar resultados inferiores aos dos tratamentos com três lâminas da referida espécie. Por esse mesmo motivo, LVL4 (duas lâminas de eucalipto) deveria apresentar resistência superior à LVL6, que é o tratamento com todas as lâminas de pinus, porém, o teste de médias indica equivalência estatística entre os resultados desses tratamentos. Entretanto, até o limite proporcional, verifica-se a esperada diferenciação entre LVL4 e LVL6.

Assim como para o MOE, para MOR e TLP, também se percebe que as lâminas de eucalipto parecem contribuir diferentemente para a resistência das amostras conforme as posições que ocupam. Ao que parece, as lâminas de eucalipto proporcionam maiores MORs e TLPs quando posicionadas nas camadas intermediárias dos painéis. Para o MOR, inclusive, a equivalência estatística para LVL4 e LVL6 indica a insignificante influência do fato de lâminas mais densas (eucalipto) constituírem as camadas externas dos corpos-de-prova de LVL4. Novamente, os resultados parecem não se alinhar à teoria.

5.4.5 Relacionamento entre MOE e MEe para a posição *edgewise*

A Figura 40 mostra graficamente a relação de MOE x MEe para as amostras ensaiadas em flexão estática na posição *edgewise*.

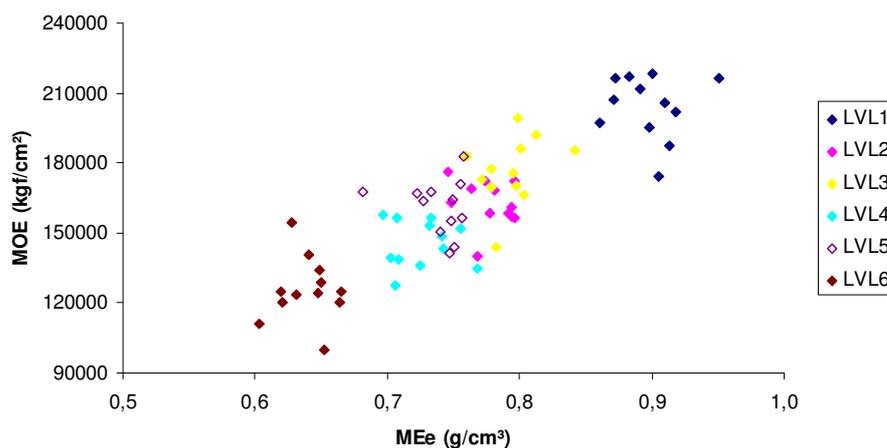


Figura 40. Relação MOE x MEe para 72 cps ensaiados em flexão estática na posição *edgewise*.

Os tratamentos com mistura das duas madeiras (eucalipto e pinus) formam, no gráfico, dois grupos próximos, mas com diferenciação estatística de massa específica entre eles. Dentro de cada um desses grupos, os dois tratamentos que os compõem são equivalentes em valores de MEe, mas aqueles em que as lâminas de eucalipto se posicionam nas camadas intermediárias dos painéis demonstram maior rigidez. Entre os grupos, nota-se a equivalência de MOE para os tratamentos LVL5 e LVL2, que não era esperada e é de difícil explicação.

A comparação dos gráficos MOE x MEe para as posições *flatwise* e *edgewise* permite observar que os tratamentos mistos com as camadas externas de eucalipto (LVL2 e LVL4) acusam relevante diferenciação de MOE na posição *flatwise*, com valores maiores em relação a seus pares (LVL3 e LVL5) e, na posição *edgewise*, demonstram menor diferenciação de MOE, porém, com valores menores em relação a seus pares. Aparentemente, para o MOE, percebe-se uma alternância da influência das posições das lâminas de eucalipto conforme as posições dos corpos-de-prova nos ensaios de flexão. Em *flatwise*, constata-se a forte influência do posicionamento das lâminas de eucalipto nas camadas externas, e a fraca influência do posicionamento dessas lâminas nas camadas intermediárias. Em *edgewise*, o

contrário. Há, contudo, em *edgewise*, uma clara relação linear do MOE com a MEe, que não estava presente nos painéis testados em *flatwise*.

5.4.6 Relacionamento entre MOR e MEe para a posição *edgewise*

A Figura 41 mostra graficamente a relação de MOR x MEe para as amostras ensaiadas em flexão estática na posição *edgewise*.

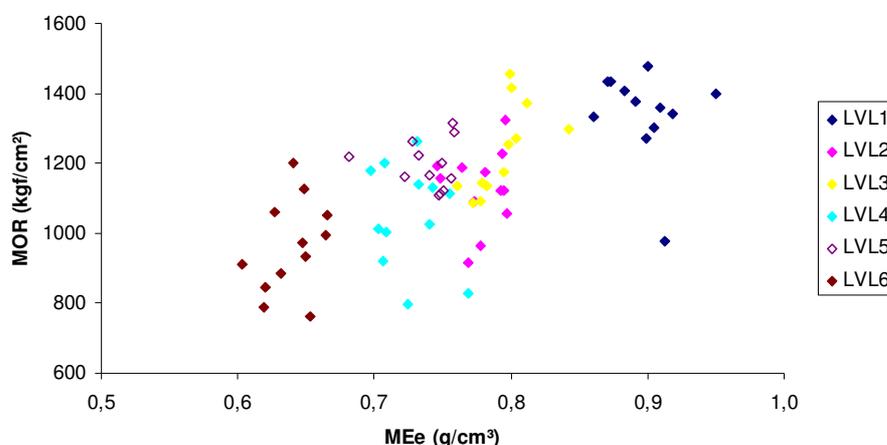


Figura 41. Relação MOR x MEe para 72 cps ensaiados em flexão estática na posição *edgewise*.

A análise dos gráficos MOR x MEe segue o mesmo raciocínio já exposto para MOE x MEe, em que aquilo que se tentou desenvolver para a rigidez pode aqui ser aplicado à resistência à ruptura do material. A distribuição gráfica de valores aqui observada potencializa o que foi exposto anteriormente. Para o MOR, observa-se que o tratamento LVL5 alcança, na comparação com os demais tratamentos mistos, resistência ainda mais surpreendente, registrando a equivalência estatística com LVL3.

A comparação dos gráficos MOR x MEe para as posições *flatwise* e *edgewise* mostra, para os tratamentos mistos, tendência similar ao que foi apresentado anteriormente em MOE x MEe, exceto no fato de que as diferenciações de MOR são semelhantes entre os pares para os dois ensaios. Aparentemente, para o MOR, também se percebe uma alternância da influência das posições das lâminas de

eucalipto conforme as posições dos corpos-de-prova nos ensaios de flexão (*flatwise* e *edgewise*) em estudo.

5.4.7 Relacionamento entre MOR e MOE para a posição *edgewise*

A Figura 42 mostra graficamente a relação de MOR x MOE para as amostras ensaiadas em flexão estática na posição *edgewise*.

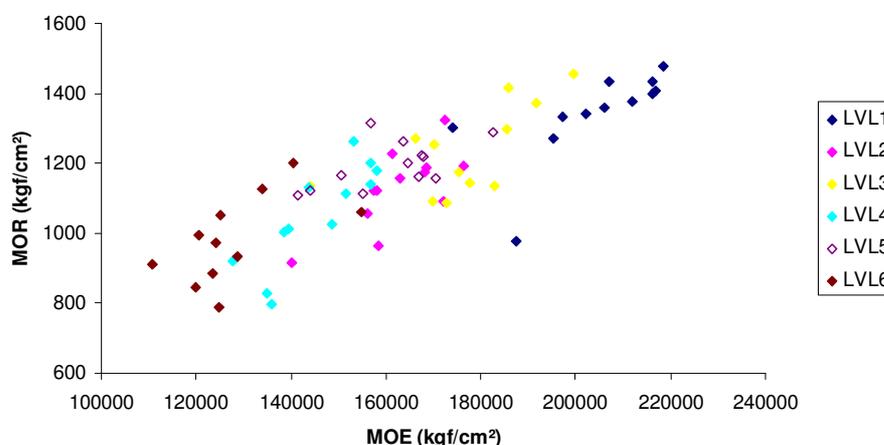


Figura 42. Relação MOR x MOE para 72 cps ensaiados em flexão estática na posição *edgewise*.

Dentro do que está exposto na análise dos resultados para a posição *edgewise*, a observação dos gráficos MOR x MOE evidencia o surpreendente desempenho do tratamento LVL5: seus valores de MOE e MOR são maiores do que o esperado, comparativamente. Apresentando apenas duas lâminas de eucalipto, LVL5 alcança resultados equivalentes, em MOE com LVL2 e em MOR com LVL3, sendo que esses dois últimos tratamentos apresentam três lâminas da madeira de maior rigidez e resistência. Os coeficientes de variação para MOE e MOR de LVL5 apontam pequenos percentuais, indicando pequena variância nos resultados obtidos para as repetições.

No entanto, a análise do relacionamento de MOR x MOE indica, para a posição *edgewise*, uma relação com razoável proporcionalidade para essas propriedades; diferenciações de MOR apontam diferenciações proporcionais de MOE.

5.5 Análise comparativa de MOE e MOR em flexão estática nas posições *flatwise* e *edgewise*

As médias dos valores de MOE e MOR em flexão estática, verificadas para os tratamentos em estudo, estão comparadas na Tabela 29, para as duas posições de ensaio: *flatwise* e *edgewise*.

Tabela 29. Médias de MOE e MOR para as posições *flatwise* e *edgewise*, diferenças de valores e percentuais das diferenças (base *edgewise*).

	Flexão Estática							
	MOE (kgf/cm ²)				MOR (kgf/cm ²)			
	<i>flatwise</i> (A)	<i>edgewise</i> (B)	diferença (A-B)	(%) ((A-B)/B)	<i>flatwise</i> (A)	<i>edgewise</i> (B)	diferença (A-B)	(%) ((A-B)/B)
LVL1	228.266	204.082	24.184	11,85	1.717,94	1.342,18	375,76	28,00
LVL2	207.688	162.646	45.042	27,69	1.535,43	1.128,00	407,43	36,12
LVL3	167.067	176.822	-9.755	-5,52	1.417,13	1.236,00	181,13	14,65
LVL4	212.137	145.414	66.723	45,88	1.490,59	1.051,25	439,34	41,79
LVL5	168.143	160.948	7.195	4,47	1.336,48	1.194,90	141,58	11,85
LVL6	155.715	125.527	30.188	24,05	1.015,23	960,38	54,85	5,71

Observa-se que os valores de MOE e MOR são superiores para a posição *flatwise*, exceto para o MOE do tratamento LVL3, que é maior em *edgewise*. Entre os tratamentos mistos, as diferenças constatadas são maiores para LVL4 e LVL2, devido à influência do posicionamento das lâminas de eucalipto nas camadas externas que, em *flatwise*, aumentam consideravelmente as propriedades testadas.

Carvalho (2004) pesquisou as propriedades de painéis LVL manufacturados com 18 lâminas do híbrido *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e encontrou médias de MOE e MOR superiores na posição *flatwise* para dois processos de fabricação. Para o processo I (prensagem ciclo único – gramatura adesivo 360 g/m²), a comparação das médias indicou percentual de 11,88% para MOE e 6,98% para MOR; para o processo II (prensagem 3 ciclos – gramatura adesivo 380 g/m²),

percentual de 1,71% para MOE e 1,17% para MOR; maiores em relação às médias da posição *edgewise*.

Bortoletto Júnior (2006) testou, nas duas posições de ensaio, composições LVL com 18 lâminas de *Pinus merkusii* e encontrou médias de MOE e MOR superiores na posição *flatwise*, sendo 9,86% para MOE e 4,42% para MOR, em relação à posição *edgewise*. Em específico, para o tratamento em que posicionou lâminas de maior MOEd nas seis camadas mais externas (capa e contracapa) e de menor MOEd nas seis camadas de centro (miolo), encontrou as maiores diferenças, sendo 19,89% para MOE e 12,84% para MOR; médias superiores em *flatwise*.

Segundo Carvalho (2004), ainda não há na bibliografia um padrão definido para o desempenho em flexão estática de painéis LVL, quanto ao melhor ou pior comportamento de acordo com as posições *flatwise* ou *edgewise*. Os trabalhos de Moody e Peters (1972), Kunesh (1978) e Hoover et al. (1987) apresentam médias de MOE e MOR superiores para a posição *flatwise*. Shupe et al. (1997) apresentam em seu trabalho resultados em que, na maioria das repetições e também nas médias finais dos tratamentos avaliados, o MOE e o MOR são superiores para a posição *edgewise*.

A norma APA/EWS PRL-501 2001 (*Performance Standard for APA EWS Laminated Veneer Lumber*) apresenta classes de rigidez e resistência para LVL estrutural. A classe mais alta indica valores, de MOE igual a $2,1 \times 10^6$ psi (147.645 kgf/cm²), tanto para *flatwise* como para *edgewise*, e de MOR igual a 7.594 psi (534 kgf/cm²) para *edgewise* e igual a 6.510 psi (457,70 kgf/cm²) para *flatwise*, como limites inferiores, conforme publicado no trabalho de Bortoletto Júnior (2006).

Os valores de MOR verificados para os seis tratamentos LVL do presente estudo, tanto em *flatwise* como em *edgewise*, são superiores aos apresentados como limites inferiores para a 1ª classe (mais alta) da APA/EWS. Os valores de MOE na posição *flatwise* para todos os tratamentos também são superiores, assim como são na posição *edgewise* para LVL1, LVL2, LVL3 e LVL5. Entretanto, os valores de MOE na posição *edgewise* para LVL4 e LVL6 são inferiores ao limite e, por esse critério de rigidez, LVL4 se enquadra na 2ª classe e LVL6 na 5ª classe.

Por fim, cabe ressaltar que as comparações efetuadas devem ser analisadas com cautela, uma vez que os métodos de ensaio empregados nas determinações de propriedades de painéis LVL em outros estudos não são exatamente os mesmos utilizados neste trabalho.

5.6 Absorção de água dos painéis LVL

Os ensaios de absorção de água (AA) foram realizados para os períodos de 2 e 24 horas de imersão. As distribuições dos resultados para os tratamentos LVL podem ser observadas nas Figuras 43 e 44, para 2 horas (AA2h) e 24 horas (AA24h) de imersão, respectivamente.

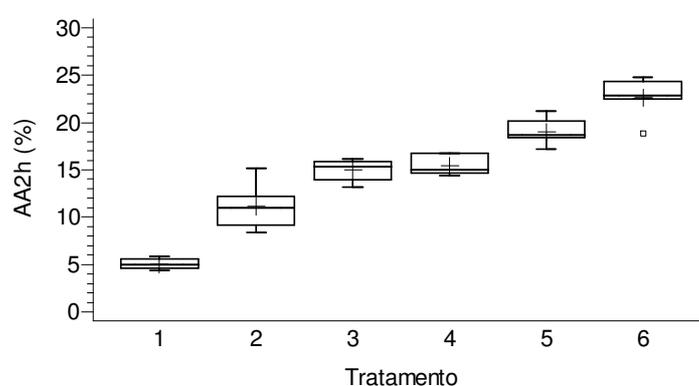


Figura 43. Distribuição dos percentuais de absorção de água em 2 horas (AA2h) por tratamento.

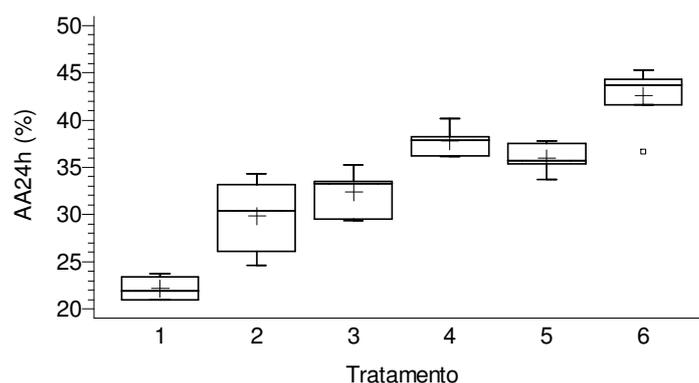


Figura 44. Distribuição dos percentuais de absorção de água em 24 horas (AA24h) por tratamento.

Os valores dos percentuais médios, coeficiente de variação (CV) e a comparação das médias dos tratamentos pelo método LSD (*Fisher's least significant difference*), ao nível de 5% de probabilidade de erro, estão apresentados na Tabela 30.

Tabela 30. Absorção de água por tratamento.

AA						
	LVL1	LVL2	LVL3	LVL4	LVL5	LVL6
AA2h (%)	5,07 _E ^{11,4}	11,13 _D ^{21,8}	14,98 _C ^{7,7}	15,43 _C ^{6,9}	19,05 _B ^{7,5}	22,68 _A ^{9,2}
AA24h (%)	22,19 _D ^{5,6}	29,86 _C ^{12,8}	32,35 _C ^{7,4}	37,75 _B ^{3,9}	35,95 _B ^{4,2}	42,55 _A ^{7,3}

Absorção de água em 2 horas (AA2h) e em 24 horas (AA24h). Em uma mesma linha, letras maiúsculas comparam as grandezas entre tratamentos, sendo que médias com pelo menos uma letra igual não diferem estatisticamente ao nível de 5% de probabilidade de erro; o número central é o valor médio, acima e à direita tem-se o coeficiente de variação (CV).

A representação gráfica em colunas das médias de absorção de água dos tratamentos LVL está apresentada na Figura 45. As composições dos períodos de imersão (2 horas + 22 horas), com seus respectivos percentuais de absorção, podem ser observadas na Figura 46.

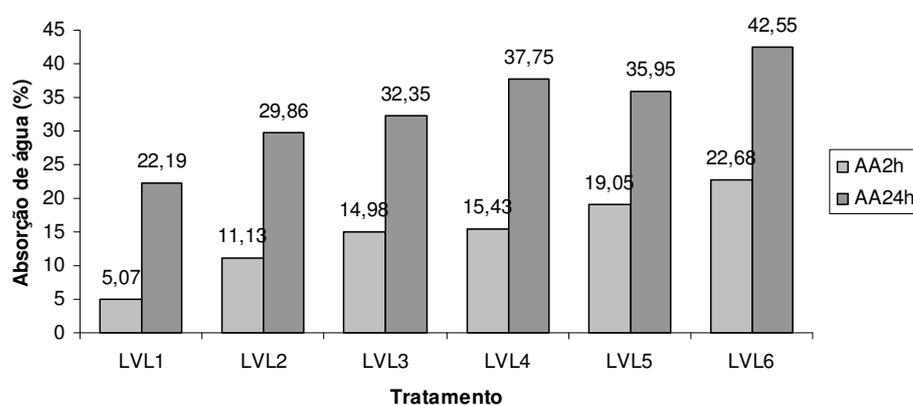


Figura 45. Médias de absorção de água, em 2 horas (AA2h) e em 24 horas (AA24h), por tratamento.

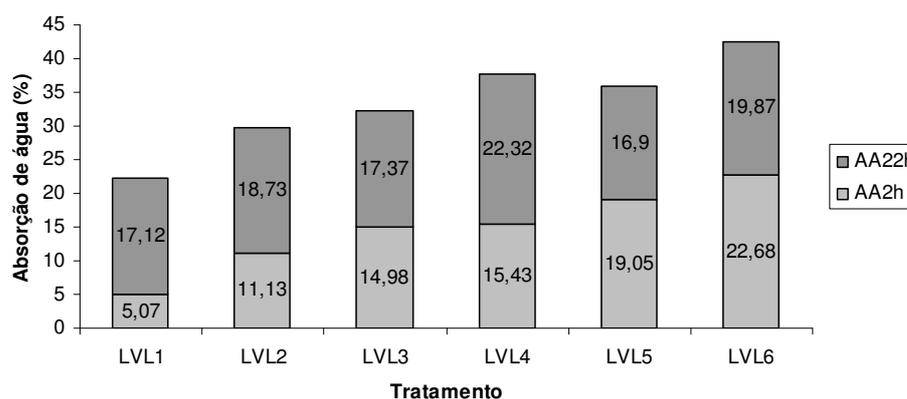


Figura 46. Composição das médias de absorção de água, em 2 horas (AA2h) e no período adicional de 22 horas (AA22h), por tratamento.

Os resultados demonstram maior absorção de água para os tratamentos com maior número de lâminas de pinus para AA24h. As lâminas de pinus utilizadas neste trabalho apresentam menores valores de massa específica aparente, portanto, maior volume de vazios em relação às lâminas de eucalipto utilizadas. Assim, quanto maior o volume de madeira de pinus nas amostras, maior volume de água pode ser absorvido por elas, o que é constatado pelo peso adquirido após a imersão no período mais longo (24 horas). Tsoumis (1991) afirma que quanto maior a massa específica menor é o teor de umidade que a madeira poderá conter na saturação.

Para AA2h, os resultados mostram que os tratamentos com maior número de lâminas de pinus apresentam a tendência de uma absorção mais rápida, o que indicaria uma maior permeabilidade das lâminas de pinus em relação às de eucalipto utilizadas neste trabalho. Essa tendência acima mencionada não se confirma totalmente devido aos resultados de AA2h para os tratamentos LVL3 e LVL4, os quais se equivalem estatisticamente. Porém, cabe ressaltar que o tratamento LVL4 pode não ter alcançado valor maior justamente por apresentar lâminas de eucalipto em suas camadas externas, o que talvez tenha dificultado a absorção no curto período, devido à provável menor permeabilidade dessa madeira.

Ainda, pode-se observar que os tratamentos com mistura na mesma proporção de madeira das duas espécies (eucalipto e pinus) apresentam equivalência estatística para AA24h. Os tratamentos LVL2 e LVL4, constituídos por capa e contracapa de eucalipto, apresentam absorção um pouco menor que seus pares, LVL3 e LVL5, no período de 2 horas. No entanto, com o período adicional de 22 horas, essa tendência se modifica e percebe-se, para os primeiros, uma

absorção um pouco maior. Isso corrobora a tendência de maior permeabilidade apresentada pelas lâminas de pinus utilizadas neste trabalho em relação às de eucalipto.

As camadas externas, por constituírem a maior área da superfície do material em contato direto com a água, quando compostas por lâminas de menor permeabilidade, podem determinar uma menor absorção aos elementos LVL para períodos curtos. Isso pode ser interessante, como meio de melhorar a estabilidade dimensional, o desempenho mecânico e a durabilidade de elementos estruturais LVL para uso exterior.

Além da massa específica de um painel e da permeabilidade característica da madeira que o constitui, vários outros fatores podem influir na capacidade de absorção d'água do painel. De acordo com Kollmann e Schneider (1963), citados por Kollmann et al. (1975), a utilização de altas temperaturas na secagem de lâminas e na prensagem a quente de painéis laminados reduz sua capacidade de sorção. Com base no que afirmam esses autores, é provável que o tempo de prensagem a quente seja fator influente no efeito de redução da sorção, bem como se torna claro que as lâminas de capa e contracapa são as mais suscetíveis ao referido efeito (ALMEIDA et al., 2004). Segundo Bortoletto Júnior (2003), o uso de adesivo fenólico, que não é higroscópico após a cura, e de farinha de casca de coco, que possui a mesma característica, pode proporcionar linhas de cola (ou planos) que atuam como “barreiras” à penetração d'água nas camadas de lâminas internas, contribuindo para a redução da absorção d'água. Com base nesses argumentos, pressupõe-se, para painéis multilaminados colados com resina fenólica, uma menor absorção de água em relação à madeira maciça natural, o que representa uma vantagem para os elementos estruturais LVL assim manufaturados.

5.7 Inchamento em espessura dos painéis LVL

Os ensaios de inchamento em espessura (IE) foram realizados para os períodos de 2 e 24 horas de imersão. As distribuições dos resultados para os tratamentos LVL podem ser observadas nas Figuras 47 e 48 para 2 horas (IE2h) e 24 horas (IE24h) de imersão, respectivamente.

Os valores dos percentuais médios, coeficiente de variação (CV) e a comparação das médias dos tratamentos pelo método LSD (*Fisher's least significant difference*), ao nível de 5% de probabilidade de erro, estão apresentados na Tabela 31.

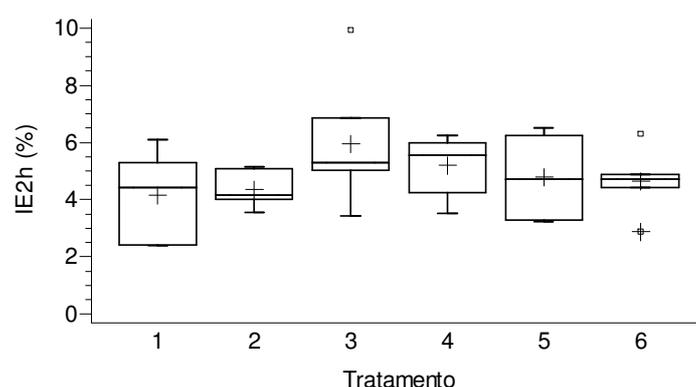


Figura 47. Distribuição dos percentuais de inchamento em espessura em 2 horas (IE2h) por tratamento.

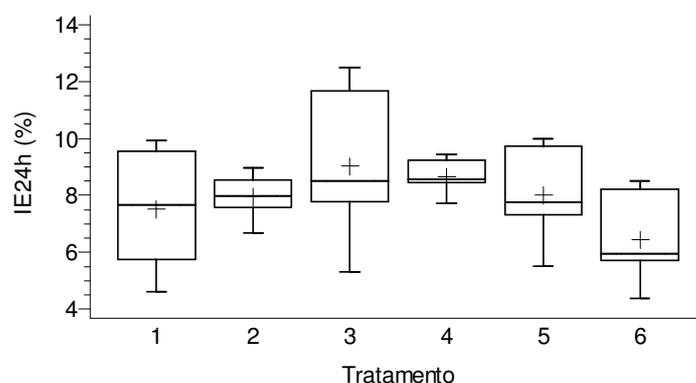


Figura 48. Distribuição dos percentuais de inchamento em espessura em 24 horas (IE24h) por tratamento.

Tabela 31. Inchamento em espessura por tratamento.

		IE					
		LVL1	LVL2	LVL3	LVL4	LVL5	LVL6
IE2h (%)		4,17 _B ^{38,4}	4,35 _{AB} ^{14,4}	5,97 _A ^{37,4}	5,19 _{AB} ^{20,7}	4,78 _{AB} ^{29,7}	4,65 _{AB} ^{23,6}
IE24h (%)		7,53 _{AB} ^{27,8}	7,96 _{AB} ^{10,3}	9,04 _A ^{29,3}	8,66 _A ^{7,1}	8,01 _{AB} ^{20,7}	6,45 _B ^{24,8}

Inchamento em espessura em 2 horas (IE2h) e em 24 horas (IE24h). Em uma mesma linha, letras maiúsculas comparam as grandezas entre tratamentos, sendo que médias com pelo menos uma letra igual não diferem estatisticamente ao nível de 5% de probabilidade de erro; o número central é o valor médio, acima e à direita tem-se o coeficiente de variação (CV).

A representação gráfica em colunas das médias de inchamento em espessura dos tratamentos LVL está apresentada na Figura 49. As composições dos períodos de imersão (2 horas + 22 horas), com seus respectivos percentuais de inchamento, podem ser observadas na Figura 50.

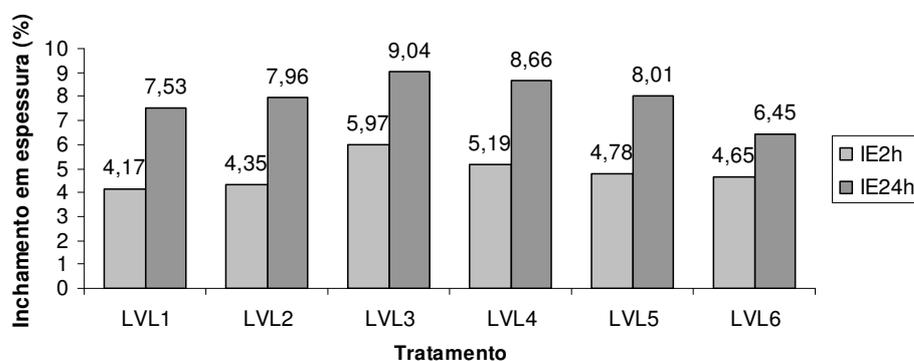


Figura 49. Médias de inchamento em espessura, em 2 horas (IE2h) e em 24 horas (IE24h), por tratamento.

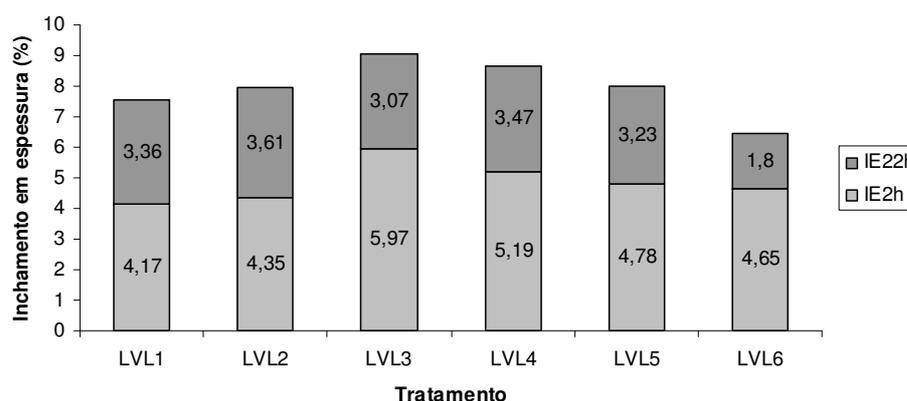


Figura 50. Composição das médias de inchaço em espessura, em 2 horas (IE2h) e no período adicional de 22 horas (IE22h), por tratamento.

Era esperado para inchaço em espessura dos painéis LVL, devido à maior capacidade de adsorção de água, resultados maiores na proporção de maior número de lâminas de eucalipto para os tratamentos, principalmente para o período de 24 horas de imersão. Isso porque, neste experimento, foi verificado um valor de MEe maior para as lâminas de eucalipto, em relação às de pinus. Para a adsorção, importa a quantidade de material lenhoso, mais especificamente de paredes de células, onde as moléculas de água se aderem nas regiões amorfas das cadeias de microfibrilas que as constituem, provocando o inchaço dessas paredes. Entretanto, segundo Marchiori (1992), a presença de extrativos não polares infiltrados nas paredes celulares e ocupando espaços disponíveis pode exercer efeito redutor na higroscopicidade da madeira.

A quantidade de material lenhoso em massa, relativa ao volume ocupado, é a massa específica aparente. Para o ensaio desenvolvido neste estudo, a relação esperada entre MEe e IE somente pode ser constatada mais claramente para o tratamento LVL6 após 24 horas de imersão: por ser o tratamento de menor MEe, apresenta menor IE. Provavelmente, o período de imersão (24 horas) não foi suficiente para a madeira de eucalipto adsorver em sua região submicroscópica a quantidade de água que, com maior tempo, poderia ter adsorvido. Como pode ser constatado no ensaio de AA2h, as lâminas de eucalipto utilizadas neste trabalho parecem apresentar menor permeabilidade que as de pinus, o que seria um indicativo da necessidade de maior tempo de imersão.

O percentual de densificação teórica, observado após a prensagem dos painéis, por si só não é suficiente como parâmetro para indicar um maior inchaço

em espessura. O tratamento LVL6 apresenta o maior percentual de densificação (17,03%). Mesmo assim, tendo sua relação de material lenhoso por volume aumentada em percentual maior, é aquele que mostra menor inchamento em espessura após 24 horas de imersão (6,45%). As amostras desse tratamento tiveram seus volumes de vazios diminuídos em maior proporção após a prensagem, porém, essas mesmas amostras continuaram contendo, no interior de suas estruturas, maiores volumes de vazios que as demais.

As lâminas utilizadas neste trabalho foram produzidas em torno, de modo que a espessura delas tem a direção radial da madeira. O USDA (1999) apresenta um percentual médio de contração total, na direção radial, de 4,8% para a madeira de *Pinus taeda*. Como o percentual de IE24h obtido para o tratamento LVL6 foi de 6,45%, pode-se supor que parte desse inchamento deve ser atribuída à liberação de tensões de prensagem (*springback*). O inchamento em espessura de um painel de lâminas de madeira é formado por dois componentes: inchamento por adsorção d'água e, por conseqüência deste, recuperação em espessura devido à liberação de tensões de compressão originadas na prensagem (ALMEIDA et al., 2004). O USDA (1999) não fornece relação de contração específica para *Eucalyptus saligna*, entretanto, apresenta percentuais para *Eucalyptus marginata* (7,7%) e *Eucalyptus diversicolor* (7,8%) na direção radial. Esses valores estão próximos do resultado de IE24h verificado para o tratamento LVL1, que foi de 7,53%.

5.8 Expansão volumétrica dos painéis LVL

Os ensaios de expansão volumétrica (EV) foram realizados para os períodos de 2 e 24 horas de imersão. As distribuições dos resultados para os tratamentos LVL podem ser observadas nas Figuras 51 e 52, para 2 horas (EV2h) e 24 horas (EV24h) de imersão, respectivamente.

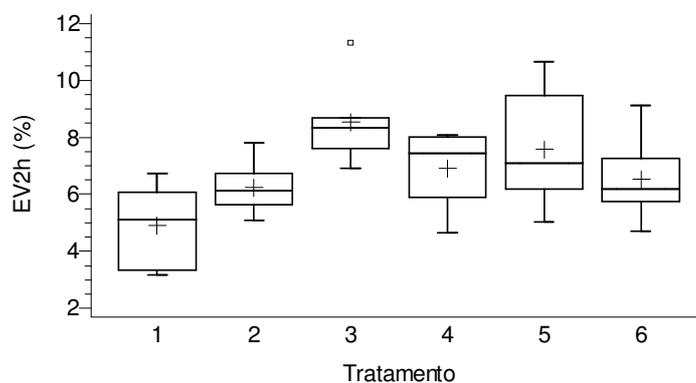


Figura 51. Distribuição dos percentuais de expansão volumétrica em 2 horas (EV2h) por tratamento.

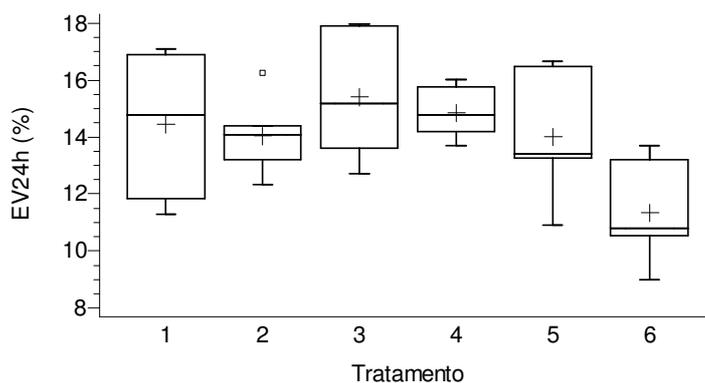


Figura 52. Distribuição dos percentuais de expansão volumétrica em 24 horas (EV24h) por tratamento.

Os valores dos percentuais médios, coeficiente de variação (CV) e a comparação das médias dos tratamentos pelo método LSD (*Fisher's least significant difference*), ao nível de 5% de probabilidade de erro, estão apresentados na Tabela 32.

Tabela 32. Expansão volumétrica por tratamento.

EV						
	LVL1	LVL2	LVL3	LVL4	LVL5	LVL6
EV2h (%)	4,92 ^C 31,3	6,25 ^{BC} 15,7	8,54 ^A 17,8	6,92 ^{AB} 19,8	7,59 ^{AB} 28,0	6,54 ^{BC} 23,2
EV24h (%)	14,44 ^A 17,0	14,05 ^A 9,3	15,42 ^A 14,1	14,86 ^A 6,3	14,02 ^A 15,6	11,34 ^B 15,7

Expansão volumétrica em 2 horas (EV2h) e em 24 horas (EV24h). Em uma mesma linha, letras maiúsculas comparam as grandezas entre tratamentos, sendo que médias com pelo menos uma letra igual não diferem estatisticamente ao nível de 5% de probabilidade de erro; o número central é o valor médio, acima e à direita tem-se o coeficiente de variação (CV).

A representação gráfica em colunas das médias de expansão volumétrica dos tratamentos LVL está apresentada na Figura 53. As composições dos períodos de imersão (2 horas + 22 horas), com seus respectivos percentuais de expansão, podem ser observadas na Figura 54.

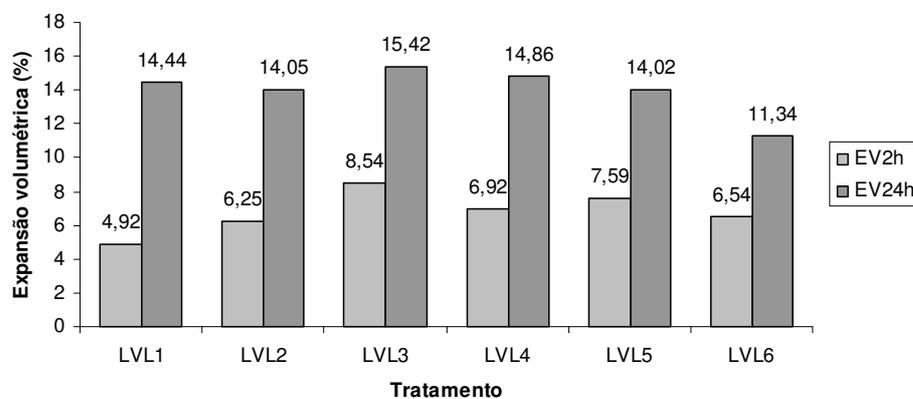


Figura 53. Médias de expansão volumétrica, em 2 horas (EV2h) e em 24 horas (EV24h), por tratamento.

O tratamento LVL1 apresenta o maior percentual de expansão volumétrica (9,52%) no período adicional de 22 horas, conforme apresentado na Figura 54. Isso se encontra de acordo com o que foi exposto anteriormente na análise de inchamento em espessura. Provavelmente, esse percentual seria ainda maior, em relação aos verificados para os demais tratamentos, caso o período adicional de imersão em água tivesse sido maior.

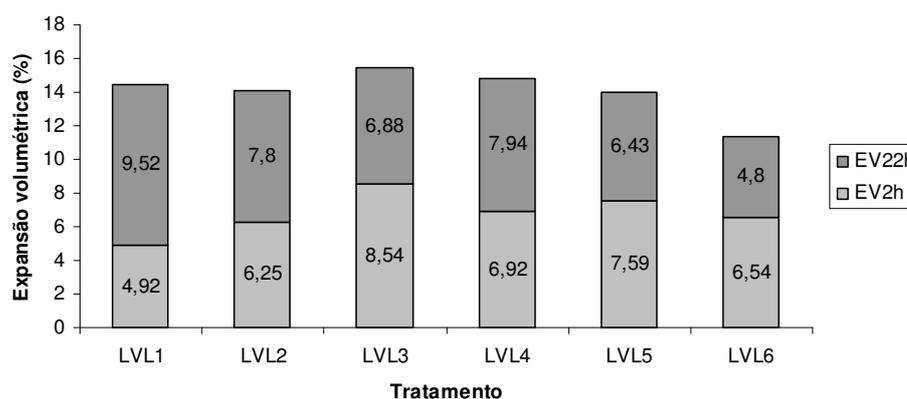


Figura 54. Composição das médias de expansão volumétrica, em 2 horas (EV2h) e no período adicional de 22 horas (EV22h), por tratamento.

Para a expansão volumétrica, são válidos os mesmos argumentos anteriormente citados na análise do inchamento em espessura. A expansão e o inchamento têm as mesmas causas e conseqüências.

De encontro ao esperado, o tratamento LVL6, de menor MEe, apresenta o menor inchamento em espessura e a menor expansão volumétrica no período de 24 horas, o qual permite maior adsorção.

A equivalência estatística dos resultados para EV24h de todos os tratamentos que apresentam eucalipto em suas formações, com duas, três ou cinco lâminas, indica que as diferentes composições apresentam expansões volumétricas similares para essa condição. Isso não era esperado, devido às diferenças de MEe existentes entre esses tratamentos. Um maior número de lâminas de eucalipto implica maior MEe, conseqüentemente, maior capacidade de adsorção de água e, portanto, maior potencial de expansão volumétrica. Possivelmente, como comentado para o ensaio de IE, o período de imersão (24 horas) não foi suficiente para a madeira de eucalipto adsorver em sua região submicroscópica a quantidade de água que, com maior tempo, poderia ter adsorvido.

5.9 Cisalhamento na linha de cola dos painéis LVL

5.9.1 Cisalhamento a seco

Os valores de resistência máxima, ou tensão de ruptura, para a solicitação de cisalhamento na linha de cola por compressão em ensaio a seco, registrados para as três composições de colagem de lâminas (eucalipto x eucalipto, pinus x pinus e eucalipto x pinus), conforme descrito na metodologia, estão representados na Figura 55, que demonstra graficamente a distribuição dos resultados obtidos.

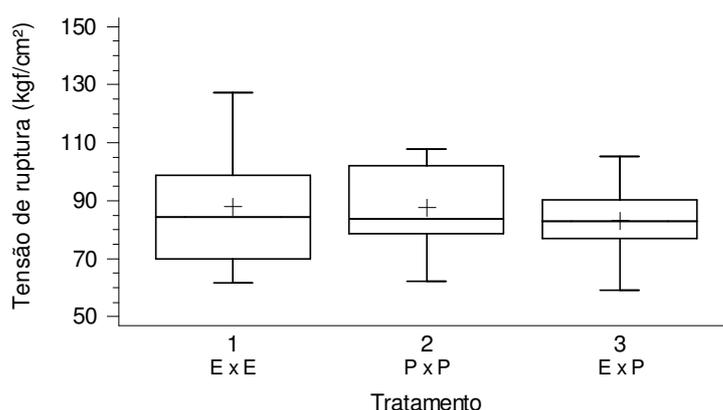


Figura 55. Distribuição dos valores de tensão de ruptura em cisalhamento na linha de cola, ensaio a seco, por tratamento.

Tratamentos: eucalipto x eucalipto (1), pinus x pinus (2) e eucalipto x pinus (3).

Os valores das médias de tensão de ruptura, percentual médio de falha na madeira, coeficiente de variação (CV) e a comparação das médias dos tratamentos pelo método LSD (*Fisher's least significant difference*), ao nível de 5% de probabilidade de erro, estão apresentados na Tabela 33.

A representação gráfica em colunas das médias de tensão de ruptura em cisalhamento, dos três tratamentos, está apresentada na Figura 56.

Tabela 33. Resistência ao cisalhamento na linha de cola e falha na madeira.

Cisalhamento na Linha de Cola Ensaio a Seco			
	E x E (eucalipto x eucalipto)	P x P (pinus x pinus)	E x P (eucalipto x pinus)
Tensão de ruptura (kgf/cm ²)	87,89 A ^{23,7}	87,58 A ^{16,2}	83,23 A ^{16,5}
Falha na madeira (%)	83,17 B ^{18,9}	93,75 A ^{6,4}	93,58 A ^{7,0}

Em uma mesma linha, letras maiúsculas comparam as grandezas entre tratamentos, sendo que médias com pelo menos uma letra igual não diferem estatisticamente ao nível de 5% de probabilidade de erro; o número central é o valor médio, acima e à direita tem-se o coeficiente de variação (CV).

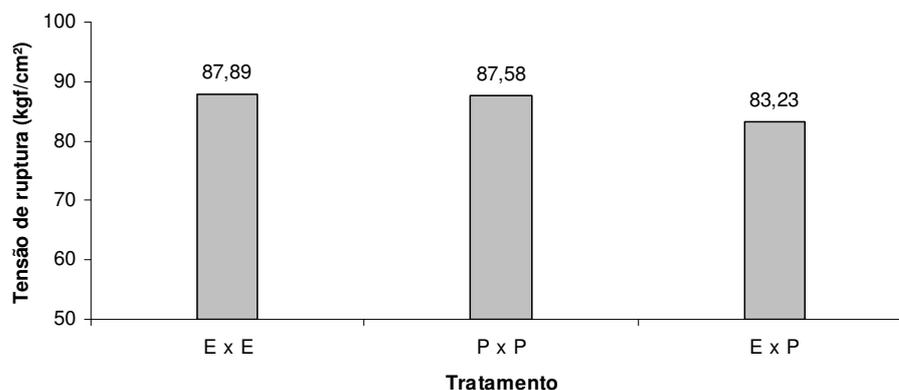


Figura 56. Média de tensão de ruptura em cisalhamento na linha de cola, ensaio a seco, por tratamento.

Os resultados indicam que as colagens de lâminas de *Eucalyptus saligna* e *Pinus taeda*, com mesma orientação da grã, são equivalentes estatisticamente para qualquer arranjo entre os tipos de madeira, em relação à resistência ao cisalhamento na linha de cola a seco. Entretanto, o tratamento E x E apresenta coeficiente de variação mais alto que os demais, como consequência da maior variância de seus resultados.

A esperada eficaz colagem da madeira com adesivo sintético termofixo à prova d'água, próprio para uso estrutural, como a resina fenólica utilizada neste trabalho, faz pressupor que nem as interfaces, nem o adesivo sejam os elos mais fracos, por causa da penetração seguida da solidificação do adesivo nas porosidades da madeira. As interfaces, teoricamente, seriam as regiões com maiores resistências, já que à resistência da madeira poder-se-ia somar àquela do

adesivo (HASELEIN; PAULESKI, 2004). O conceito de representar o conjunto de ligações como uma série de elos de uma corrente foi proposto por Kollmann et al. (1975) e é largamente utilizado para explicar a adesão.

A resistência de uma colagem é mais comumente testada em cisalhamento paralelo à grã. Devido à resistência da maioria dos adesivos para madeira exceder a resistência ao cisalhamento da madeira nessa direção, o potencial máximo de resistência do adesivo não é alcançado, particularmente para espécies de baixa e média massa específica. Assim, espera-se para as colagens em painéis estruturais que a resistência do adesivo exceda a resistência da madeira, de modo que a resistência do adesivo possa ser ignorada. Adesivos menos resistentes que a madeira simplesmente não devem ser usados (USDA, 1999).

Presume-se, pelos argumentos acima citados e considerando-se que a colagem foi bem realizada, que a resistência verificada para cisalhamento na linha de cola foi determinada fundamentalmente pela resistência da madeira das lâminas adjacentes ao plano de colagem. Por esse motivo, era esperado resultado superior para o tratamento E x E, em relação aos demais, por ser a resistência ao cisalhamento da madeira de eucalipto normalmente superior a da madeira de pinus, porém, estatisticamente não se constata tal diferenciação. Possivelmente, o menor percentual de falha na madeira verificado para esse tratamento (Tabela 33) é o indicativo de que à maior resistência intrínseca da madeira de eucalipto se opôs, influenciando o resultado, sua aparente maior dificuldade na adesão em relação à madeira de pinus.

Em relação aos valores apresentados pelo USDA (1999) para resistência ao cisalhamento paralelo à grã em madeira maciça, o resultado obtido para o tratamento E x E no ensaio a seco mostra-se distante quando comparado a *Eucalyptus diversicolor* (Karri) – (170,29 kgf/cm²), e o resultado obtido para o tratamento P x P mostra-se próximo quando comparado a *Pinus taeda* (Loblolly pine) – (97,89 kgf/cm²); ambas a 12% de teor de umidade. Para esses valores, o USDA (1999) aponta massa específica básica, sendo 0,82 g/cm³ para o eucalipto e 0,47 g/cm³ para o pinus. No mesmo capítulo, encontra-se o coeficiente de variação médio para a resistência ao cisalhamento paralelo à grã (madeira livre de defeitos), sendo seu valor igual a 14%.

Seria de se esperar que a resistência ao cisalhamento na linha de cola para o tratamento E x E fosse mais próxima do valor apresentado pelo USDA (1999) para a

resistência ao cisalhamento da madeira maciça de *Eucalyptus diversicolor*. É possível que as fendas de laminação das lâminas de eucalipto tenham influenciado nos resultados, reduzindo a resistência da madeira ao cisalhamento.

Todavia, a NBR 7190 (1997) apresenta valores para a resistência ao cisalhamento paralelo à grã da madeira maciça de várias espécies florestais, sendo para *Eucalyptus saligna* estimado o valor de 8,2 MPa (83,62 kgf/cm²) e para *Pinus taeda* o valor de 7,7 MPa (78,52 kgf/cm²).

A norma APA/EWS PRL-501 (2001) apresenta classes de rigidez e resistência para LVL estrutural e, para cada classe, indica valores característicos de resistência ao cisalhamento paralelo à grã (BORTOLETTO JÚNIOR, 2006). A classe mais alta indica resistência ao cisalhamento igual a 900 psi (63 kgf/cm²) como limite inferior. Assim, os valores verificados para as três combinações de colagem do presente estudo são superiores ao valor apresentado como limite inferior para a 1ª classe da APA/EWS.

Há certa preocupação no meio industrial em relação à qualidade da colagem de lâminas de *Eucalyptus* spp. com resina fenólica. Isso foi relatado por fabricantes de compensado, como informação pessoal, durante as tratativas para a aquisição das lâminas para o experimento. Entre possíveis dificuldades decorrentes do uso da madeira de eucalipto foi mencionada a formação de “bolsas de vapor” nas linhas de cola durante a prensagem a quente, com a conseqüente ocorrência de áreas delaminadas. Houve também referências à reduzida permeabilidade e ao fraco umedecimento de áreas da superfície de lâminas de algumas espécies.

Por outro lado, segundo informações obtidas, a colagem entre madeiras de *Eucalyptus* spp. e *Pinus* spp. poderia gerar uma má distribuição do adesivo na direção ortogonal ao plano de cola, com penetração muito diferenciada nos dois sentidos, o que seria prejudicial para a resistência da colagem.

No meio científico, há informações que indicam que as questões inerentes à permeabilidade de uma madeira e à capacidade desta de estabelecer uma boa interação química (adesão) com determinado adesivo são complexas. Segundo alguns autores, a madeira de *Eucalyptus* spp. tende a ser de difícil colagem. Della Lucia e Vital (1981) afirmam que a madeira de árvores maduras de muitas espécies de eucalipto, entre elas *Eucalyptus saligna*, são relativamente difíceis de colar. Ozarska (1999) relata que vários estudos revelaram significativos problemas na colagem com fenol-formaldeído de lâminas de eucalipto de espécies australianas de

elevada massa específica (acima de $0,700 \text{ g/cm}^3$) e que estes foram causados pela presença de extrativos na superfície da madeira. Segundo Vermaas (1998), muitas espécies de eucalipto têm permeabilidade reduzida. A baixa permeabilidade de uma madeira é característica que pode pressupor dificuldade para a sua colagem. A restrição à penetração do adesivo pode gerar a alta concentração deste na linha de cola. Por idêntico motivo, podem ser formadas interfaces de colagem pouco resistentes, com menor presença dos componentes aderentes (FRIHART, 2005). Para uma boa colagem, segundo Karchezy (1989), citado por Haselein e Pauleski (2004), é necessária a penetração do adesivo a uma profundidade que alcance de duas a três células da madeira.

A madeira de alburno de *Pinus* spp. normalmente é bastante permeável (USDA, 1999). Madeiras de maior permeabilidade podem proporcionar uma penetração excessiva do adesivo, gerando uma linha de cola faminta, com baixa concentração do aderente (FRIHART, 2005). Para muitas espécies de coníferas, entretanto, as pontoações areoladas de lenho inicial são aspiradas, em sua maioria, quando da transformação do alburno em cerne, bloqueando a passagem de líquidos, fato que reduz a permeabilidade do lenho (MARCHIORI, 1992). Por outro lado, madeiras de espécies resinosas como *Pinus taeda* (BURGER; RICHTER, 1991), podem apresentar superfícies contaminadas com resina ou outros extrativos (no caso de madeira de cerne). Esse problema se acentua com a secagem a altas temperaturas, devido à migração dessas substâncias para as superfícies (HASELEIN; PAULESKI, 2004).

Geralmente, madeiras densas e, por conseqüência disso, menos porosas, são mais difíceis de colar. Contudo, uma madeira pode ser porosa e leve, mas com pouca permeabilidade, se não houver comunicação entre os vazios, se os caminhos que o fluido deve percorrer estiverem obstruídos (HASELEIN, 2008). Segundo o USDA (1999), algumas madeiras de alta densidade, como a de *Hymenaea courbaril* (jatobá), por exemplo, colam melhor que outras de densidade média, como as de *Pinus* spp. Assim, a massa específica de uma madeira não é um parâmetro absolutamente confiável para estimar a capacidade de aderência da madeira.

A representação gráfica em colunas dos percentuais médios de falha na madeira para cisalhamento a seco, dos três tratamentos, está apresentada na Figura 57.

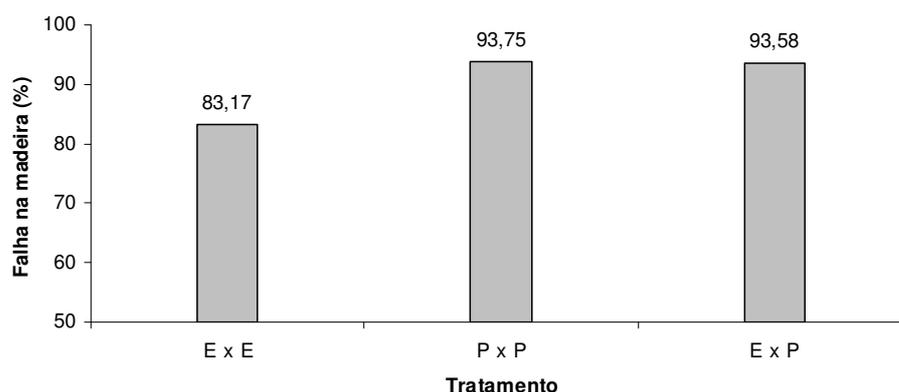


Figura 57. Percentual médio de falha na madeira em cisalhamento na linha de cola, ensaio a seco, por tratamento.

O tratamento E x E apresenta menor percentual de falha na madeira e se diferencia estatisticamente dos demais, que se equivalem entre si. Além disso, o coeficiente de variação para falha na madeira desse tratamento é consideravelmente mais alto que os apresentados para os demais (mais que o dobro), revelando a maior variância de seus resultados. Em outras palavras, menor confiabilidade para a aderência em colagens entre lâminas de eucalipto. Todavia, o percentual médio de falha na madeira para o tratamento E x E revela uma boa adesão, quando comparado a resultados publicados na literatura. Por outro lado, os tratamentos P x P e E x P apresentam excelentes resultados para falha na madeira, assim como baixos coeficientes de variação. A presença da madeira de pinus parece ser a causa determinante da melhor adesão formada entre as lâminas desses tratamentos.

Os resultados obtidos para falha na madeira no ensaio de cisalhamento na linha de cola a seco são interessantes por demonstrar experimentalmente uma forte adesão proporcionada pela resina fenólica mediante os parâmetros de processo utilizados para as madeiras das duas espécies em estudo, inclusive entre as madeiras dessas diferentes espécies.

Com base no que foi apresentado, torna-se interessante propor que, ao serem escolhidas lâminas de espécies do gênero *Eucalyptus* para a manufatura de painéis LVL em escala industrial, deve-se considerar a possibilidade da inclusão de lâminas de *Pinus* spp., preferencialmente intercaladas entre as primeiras, como forma de promover maior confiabilidade na colagem, desde que essa inclusão não determine redução de resistência mecânica que comprometa o uso final do produto.

5.9.2 Cisalhamento após fervura

Os valores de resistência máxima ou tensão de ruptura para a solicitação de cisalhamento na linha de cola por compressão em ensaio após fervura, registrados para três composições de colagem de lâminas (eucalipto x eucalipto, pinus x pinus e eucalipto x pinus), estão representados na Figura 58, que demonstra graficamente a distribuição dos resultados obtidos.

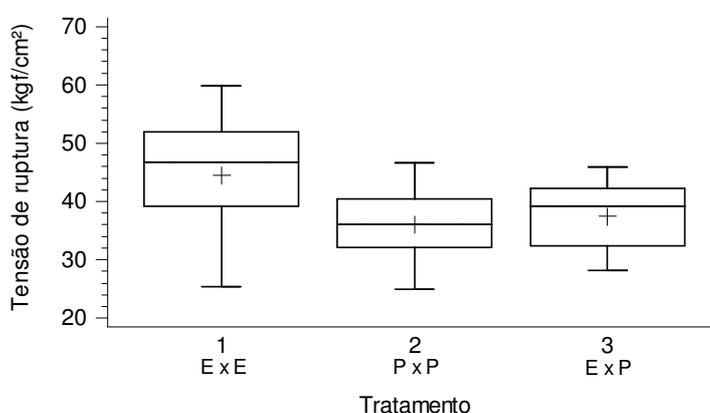


Figura 58. Distribuição dos valores de tensão de ruptura em cisalhamento na linha de cola, ensaio após fervura, por tratamento.

Tratamentos: eucalipto x eucalipto (1), pinus x pinus (2) e eucalipto x pinus (3).

Os valores das médias de tensão de ruptura, percentual médio de falha na madeira, coeficiente de variação (CV) e a comparação das médias dos tratamentos pelo método LSD (*Fisher's least significant difference*), ao nível de 5% de probabilidade de erro, estão apresentados na Tabela 34.

A representação gráfica em colunas das médias de tensão de ruptura em cisalhamento, dos três tratamentos, está apresentada na Figura 59.

Tabela 34. Resistência ao cisalhamento na linha de cola e falha na madeira.

Cisalhamento na Linha de Cola Ensaio Após Fervura			
	E x E (eucalipto x eucalipto)	P x P (pinus x pinus)	E x P (eucalipto x pinus)
Tensão de ruptura (kgf/cm ²)	44,46 A ^{23,0}	36,03 B ^{16,5}	37,47 B ^{16,4}
Falha na madeira (%)	82,67 B ^{19,1}	97,09 A ^{5,0}	94,91 A ^{9,2}

Em uma mesma linha, letras maiúsculas comparam as grandezas entre tratamentos, sendo que médias com pelo menos uma letra igual não diferem estatisticamente ao nível de 5% de probabilidade de erro; o número central é o valor médio, acima e à direita tem-se o coeficiente de variação (CV).

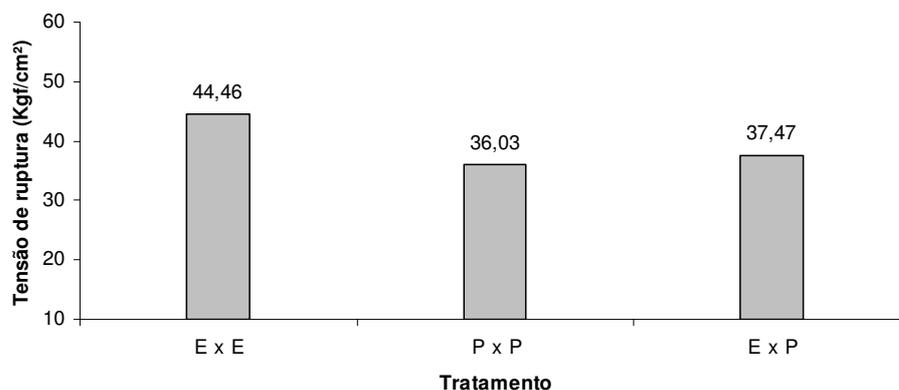


Figura 59. Média de tensão de ruptura em cisalhamento na linha de cola, ensaio após fervura, por tratamento.

Os resultados indicam que, após a fervura, as colagens realizadas entre lâminas de *Eucalyptus saligna* apresentam resistência ao cisalhamento na linha de cola um pouco superior às dos demais arranjos. Colagens entre lâminas de *Pinus taeda* e entre lâminas das duas diferentes espécies se equivalem estatisticamente.

A representação gráfica em colunas das médias de tensão de ruptura dos três tratamentos, comparando os ensaios a seco e após fervura, está apresentada na Figura 60, e o decréscimo da resistência ao cisalhamento na linha de cola após a fervura pode ser observado conforme a sobreposição realizada na Figura 61.

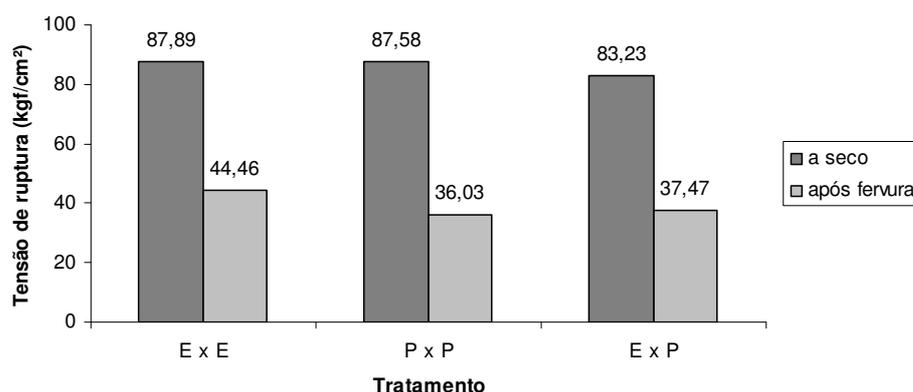


Figura 60. Médias de tensão de ruptura em cisalhamento na linha de cola, a seco e após fervura, por tratamento.

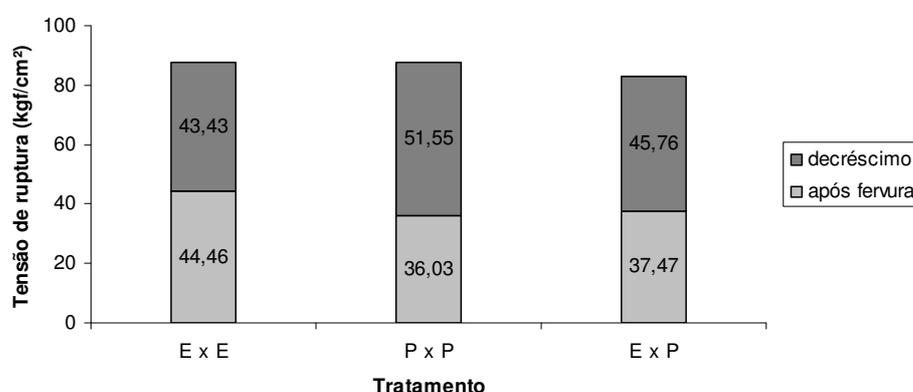


Figura 61. Sobreposição das médias de tensão de ruptura em cisalhamento na linha de cola, a seco e após fervura, por tratamento.

Observa-se a diminuição da resistência ao cisalhamento após a fervura dos corpos-de-prova, para todos os tratamentos, em comparação com o ensaio a seco.

Normalmente, espera-se que o adesivo fenólico resista à água, conservando seu estado físico e as fortes ligações químicas estabelecidas durante sua solidificação. Além de resistir à água, a resina fenólica depois de solidificada resiste à temperatura de fervura da água, podendo suportar temperaturas de até 200 °C, segundo Haselein e Pauleski (2004).

A exposição a diversas temperaturas, à água e a variações em teor de umidade é usada para simular (de forma acelerada) o envelhecimento do material, com o objetivo de estimar a degradação da resistência da colagem. A durabilidade de uma colagem normalmente é associada ao percentual de falha na madeira e à resistência ao cisalhamento na linha de cola; a durabilidade também é associada ao percentual de delaminação (SELLERS, 1985).

Segundo o USDA (1999), geralmente, estima-se a performance de uma colagem na madeira por meio das medições da resistência ao cisalhamento na linha de cola e do percentual de falha na madeira. As melhores performances são indicadas por valores de resistência na linha de cola superiores à resistência da madeira e por percentuais de falha na madeira superiores a 75% da área cisalhada (em algumas normas), sob severas condições de ensaio. Para outras normas, é utilizado o percentual de 85%, como referência. O percentual de falha na madeira é um importante indicador da resistência da colagem, freqüentemente, mais importante que a resistência medida em cisalhamento na linha de cola. Quanto maior for o percentual de falha na madeira e mais profundas forem as falhas no interior de sua grã, mais forte e mais durável a colagem, particularmente com o uso de adesivos de alta durabilidade.

Considerando-se que a colagem foi bem realizada, assim como no ensaio a seco, supõe-se que a ruptura tende a ocorrer em um dos dois lados do plano de colagem, nas regiões de madeira localizadas logo após as interfaces. Sob esse ponto de vista, provavelmente, a causa determinante para a maior resistência ao cisalhamento após a fervura, apresentada pelo tratamento E x E em relação aos demais é a maior resistência natural da madeira de eucalipto em relação à de pinus.

A madeira apresenta perda de resistência mecânica com o acréscimo do teor de água de impregnação até o ponto de saturação das fibras. A água associada às altas temperaturas enfraquece a resistência total das ligações químicas naturais da madeira, no seu conjunto e, em razão disso, também a resistência física do material. Ao ser esfriada, a madeira recupera parte da resistência perdida por decorrência do aquecimento, mais especificamente devido à recomposição da lignina.

No ensaio de cisalhamento após fervura, os corpos-de-prova são testados úmidos, depois de esfriados. Embora toda e qualquer madeira apresente redução de resistência sob essas condições, normalmente madeiras mais densas, como é a de eucalipto neste experimento, mantêm-se mais resistentes do que madeiras menos densas, como a de pinus utilizada no presente trabalho.

A representação gráfica em colunas dos percentuais médios de falha na madeira para cisalhamento após fervura, dos três tratamentos, está apresentada na Figura 62.

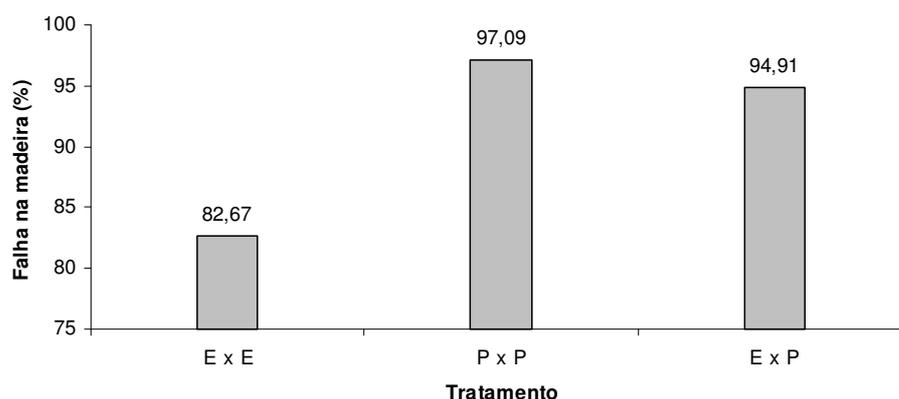


Figura 62. Percentual médio de falha na madeira em cisalhamento na linha de cola, ensaio após fervura, por tratamento.

Assim como observado para o ensaio a seco (Tabela 33), o tratamento E x E após fervura apresenta menor percentual de falha na madeira e se diferencia estatisticamente dos demais, que por sua vez se equivalem (Tabela 34). O coeficiente de variação para falha na madeira verificado para esse tratamento também é consideravelmente mais alto do que os apresentados para os demais, o que indica a menor regularidade na aderência em colagens entre lâminas de eucalipto, provavelmente devido à maior complexidade anatômica e química dessa madeira. Contudo, o tratamento E x E é o que apresenta a maior média de resistência ao cisalhamento após fervura. Segundo Sellers (1985), madeiras mais densas podem ser usadas em painéis estruturais de lâminas mesmo apresentando um menor percentual de falha na madeira, desde que a resistência ao cisalhamento nas juntas formadas seja alta. Sob esse aspecto, a norma europeia EN 314-2 (1993) relaciona o valor médio da resistência da linha de colagem (ensaio seco e úmido) ao valor médio da porcentagem de falha na madeira. À medida que aumenta o valor da resistência, a exigência em termos de falha na madeira diminui (ALMEIDA et al., 2004). Entretanto, assim como constatado no ensaio a seco, o percentual de falha na madeira verificado revela uma forte aderência (USDA, 1999). Os tratamentos P x P e E x P repetem, para ensaio após fervura, excelentes resultados para falha na madeira, assim como baixos coeficientes de variação. A presença da madeira de pinus parece ser a causa determinante para a melhor adesão formada entre as lâminas desses tratamentos.

É possível que a presença da madeira de pinus em pelo menos um dos lados da junta colada submetida ao cisalhamento ou, por suposição, a presença de

madeira com maior permeabilidade em pelo menos uma das interfaces da colagem tenha importância fundamental durante o curto período de prensagem a quente, por facilitar a migração da água excedente da linha de cola para outras regiões. E esse efeito seria tão mais importante quanto mais internas fossem as camadas dos painéis. Nesse contexto, uma eficaz drenagem proporcionada pela madeira de pinus no momento oportuno teria restringido a concentração de água, ou vapor d'água, no plano de colagem, o que explicaria a excelente adesão verificada para os tratamentos P x P e E x P. Porém, esta é uma hipótese que, no presente trabalho, carece de comprovação.

A representação gráfica em colunas dos percentuais médios de falha na madeira dos três tratamentos, comparando os ensaios a seco e após fervura, está apresentada na Figura 63.

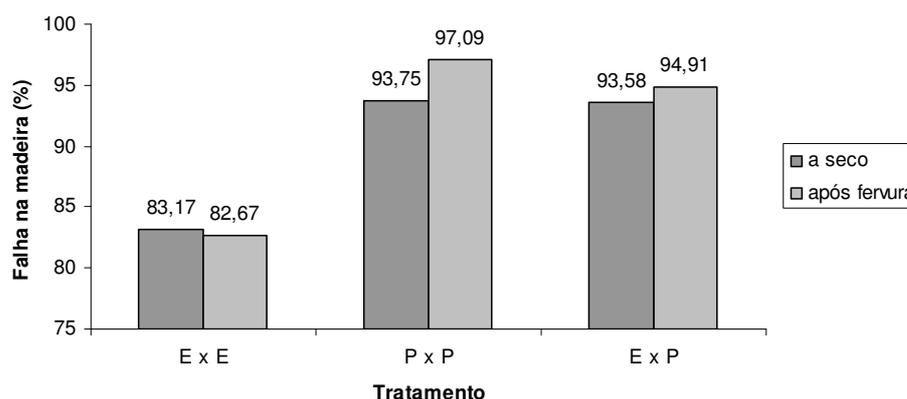


Figura 63. Percentuais médios de falha na madeira em cisalhamento na linha de cola, a seco e após fervura, por tratamento.

Observando-se os resultados de cisalhamento na linha de cola, dos dois ensaios em estudo (a seco e após fervura), constata-se que, no ensaio após fervura, ocorre a diminuição da resistência mecânica do material (Figura 60), enquanto praticamente se mantêm os percentuais de falha na madeira para os três tratamentos (Figura 63). É interessante ressaltar que os percentuais de falha na madeira obtidos, por serem semelhantes, indicam que o adesivo utilizado desempenhou após a fervura praticamente a mesma aderência que apresentara a seco, o que confirma a altíssima resistência do fenol-formaldeído à água e à temperatura de fervura da mesma. Como os percentuais de falha na madeira foram acima de 75% e as falhas na madeira mostraram-se profundas em sua maioria e,

ainda, como não houve ocorrência de delaminação nos corpos-de-prova ensaiados, pelos critérios citados no USDA (1999) pode-se considerar que as adesões estabelecidas nos três arranjos de colagem apresentaram forte aderência e boa durabilidade.

Diante da constatação de que o adesivo e a adesão estabelecida se mantiveram estáveis, pode-se concluir que a redução da resistência ao cisalhamento após a fervura foi determinada fundamentalmente pela diminuição da resistência da porção madeira que, de um lado ou de outro da junta formada, limita a linha de cola cisalhada. Assim, as perdas de resistência das madeiras de eucalipto e pinus, resultantes do aumento do teor de umidade das amostras após ensaio de fervura, explicam a redução da resistência ao cisalhamento na linha de cola para os tratamentos em estudo.

6 CONCLUSÕES

6.1 Conclusões

Com base nos resultados obtidos e discutidos no presente estudo, são possíveis as seguintes conclusões:

As lâminas de *Eucalyptus saligna* e *Pinus taeda*, a resina fenólica, e o processo de manufatura utilizados viabilizaram a produção dos painéis LVL de modo satisfatório. Não foram observadas quaisquer dificuldades decorrentes da colagem e da prensagem a quente.

As propriedades mecânicas de MOE e MOR dos painéis LVL em flexão estática na posição *flatwise* indicam que:

- Para o MOE, constatam-se maiores valores mediante o posicionamento de lâminas de maior MEe (eucalipto) nas camadas externas; o posicionamento dessas lâminas nas camadas intermediárias e de miolo não se mostra influente nas composições mistas. Comparativamente, a influência do posicionamento de lâminas de maior MEe nas camadas externas é maior que a influência das diferenças de MEe entre as composições.
- Para o MOR, são observados maiores valores para as composições que apresentam lâminas de eucalipto nas camadas externas, seguidas daquelas que apresentam essas lâminas nas camadas intermediárias. Ao comparar-se com o observado para MOE, constata-se que diminui a influência do posicionamento das lâminas de maior MEe nas camadas externas e passa a ser influente o posicionamento dessas lâminas nas camadas intermediárias. Aumenta a influência das diferenças de MEe entre as composições.
- Todas as composições LVL estudadas apresentam valores de MOE e MOR que se enquadram na 1ª classe (mais alta) da norma APA/EWS (2001).

As propriedades mecânicas de MOE e MOR dos painéis LVL em flexão estática na posição *edgewise* indicam que:

- Para o MOE, de forma geral, constatam-se maiores valores mediante mais elevadas MEe verificadas para as composições, exceto para LVL5, que surpreende pela alta rigidez alcançada. Os resultados de MOE sugerem que as lâminas de maior MEe se tornam mais influentes quando posicionadas nas camadas intermediárias dos painéis.
- Para o MOR, quando comparadas composições com mesma quantidade de lâminas de eucalipto, demonstram maiores valores de resistência aquelas que apresentam essas lâminas nas camadas intermediárias. A composição LVL5 apresenta resistência surpreendente. Ao comparar-se com o observado para MOE, constata-se que diminui a influência das diferenças de MEe entre as composições e aumenta a suposta influência do posicionamento de lâminas de maior MEe nas camadas intermediárias.
- Das composições estudadas, apenas LVL6 e LVL4 apresentam valores de MOE que não se enquadram na 1ª classe da norma APA/EWS (2001). Com respeito ao MOR, todas as composições apresentam valores que se enquadram na 1ª classe da referida norma.

A comparação dos resultados de MOE e MOR em flexão estática para as duas posições de ensaio indica que os valores das médias dessas propriedades são superiores para a posição *flatwise*, exceto para o MOE da composição LVL3, que apresenta maior média em *edgewise*.

Os painéis com maior quantidade de lâminas de pinus apresentam maior absorção de água (AA) em 24 horas de imersão. Painéis com mistura na mesma proporção de madeira das duas espécies (eucalipto e pinus) apresentam percentuais equivalentes para AA24h.

Os resultados de inchamento em espessura (IE) e expansão volumétrica (EV) não permitem conclusões para o conjunto das seis composições estudadas. Possivelmente, o período de imersão (24 horas) utilizado não foi suficiente para a madeira de eucalipto adsorver a quantidade de água que, com maior tempo, poderia ter adsorvido.

As resistências ao cisalhamento na linha de cola a seco das colagens de lâminas de *Eucalyptus saligna* e *Pinus taeda*, com mesma orientação da grã, indicam valores equivalentes para qualquer combinação entre os tipos de madeira. Os valores das médias das resistências obtidas, para as três combinações de colagem estudadas, enquadram-se na 1ª classe da norma APA/EWS (2001).

As resistências ao cisalhamento na linha de cola após fervura indicam valores maiores para as colagens “eucalipto x eucalipto”. As colagens “pinus x pinus” e “eucalipto x pinus” se equivalem em resistência.

O percentual de falha na madeira para cisalhamento na linha de cola, constatado para os ensaios a seco e após fervura, é superior a 80% para a colagem “eucalipto x eucalipto” e é superior a 90% para as colagens “pinus x pinus” e “eucalipto x pinus”. Esses valores, segundo o USDA (1999), indicam uma boa performance na adesão para qualquer combinação entre os tipos de madeira em estudo.

6.2 Considerações finais

Ao final deste trabalho cabe sugerir, dentre as composições testadas, quais as mais apropriadas para a produção de LVL em escala industrial.

Em primeiro lugar convém ressaltar a relevante influência da madeira de eucalipto nas propriedades mecânicas dos painéis manufacturados.

Ao serem comparadas as combinações de lâminas de somente um tipo de madeira, LVL1 (cinco lâminas de eucalipto) e LVL6 (cinco lâminas de pinus), a primeira apresenta valores maiores em relação a segunda na seguinte proporção: 46,59% (MOE – *flatwise*), 62,58% (MOE – *edgewise*), 69,22% (MOR – *flatwise*) e 39,76% (MOR – *edgewise*). Com base no evidente ganho em rigidez e resistência, e também por demonstrar boa aderência na colagem, torna-se interessante o uso da madeira de eucalipto na composição de painéis estruturais LVL.

Sob os aspectos da classificação do produto em classes de resistência e da confiabilidade na colagem, algumas questões são relevantes e podem determinar a escolha de algumas combinações em detrimento de outras.

Analisando-se as combinações estudadas, LVL6 e LVL4 não atendem as exigências para enquadramento na primeira classe da norma norte-americana APA/EWS (baixo MOE em *edgewise*) e, por isso, podem não ser as mais indicadas para a produção industrial de LVL. A princípio, sugere-se a não utilização dessas combinações, como forma de evitar a desvalorização do produto ou o mal uso do material (na posição incorreta).

Atentando-se para o percentual de falha na madeira e para os coeficientes de variação verificados nas resistências ao cisalhamento na linha de cola, constata-se que a colagem de lâminas de eucalipto e pinus de forma intercalada mostrou-se mais previsível que a colagem entre lâminas de eucalipto, e isso pode ser fator importante para reduzir perdas decorrentes de acelerados processos industriais, bem como para promover uma maior confiabilidade aos produtos. Assim, por apresentarem colagem direta entre lâminas de eucalipto, sugere-se não priorizar as combinações LVL1 e LVL3 para a produção em larga escala.

Sob o ponto de vista estético, os painéis com capa e contracapa de pinus tendem a apresentar melhor aparência visual, devido às lâminas dessa madeira serem naturalmente mais homogêneas e de mais fácil usinabilidade para o

acabamento de suas superfícies. Em razão disso, a composição LVL5 torna-se interessante para a produção industrial, por agregar ao produto um bom aspecto, importante fator de mercado, qualidade que se soma aos excelentes desempenhos em rigidez e resistência que a combinação apresenta para uso na posição *edgewise*.

Por fim, sob o ponto de vista estrutural e, principalmente, para uso na posição *flatwise*, recomenda-se a combinação LVL2 como mais adequada para a produção industrial, por esta apresentar, no conjunto das propriedades analisadas neste trabalho, uma performance que atende a todos os quesitos de rigidez, resistência e aderência.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, O. J. R.; JANKOWSKY, I. P. Prevenção e controle das rachaduras de topo em tora de *Eucalyptus grandis* Hill ex-Maiden. **IPEF**, Piracicaba, n. 33, p. 39-46, 1986.

AITIM. LVL: producto estructural basado em chapas de madeira. **Boletín de Información Técnica (AITIM)**. Madrid, n. 198, p. 15-18, 1999.

ALMEIDA, R. R; BORTOLETTO JÚNIOR, G; JANKOWSKY, I. P. Produção de lâminas a partir da madeira de clones do híbrido *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 65, 2004.

ALZATE, S. B. A. **Caracterização da madeira de árvores de clones de *Eucalyptus grandis*, *E. saligna* e *E. grandis* x *urophylla***. 2004, 133 f. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM D 1037. Standard test methods for evaluating properties of wood-base fiber and particle panel materials. **Annual Book of ASTM Standards**, Philadelphia, Section 4 Construction, Volume 04.09 - Wood, 2001.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM D 2395. Standard test methods for specific gravity of wood and wood-based materials. **Annual Book of ASTM Standards**, Philadelphia, Section 4 Construction, Volume 04.09 - Wood, 2001.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM D 3043. Standard test methods for structural panels in flexure. **Annual Book of ASTM Standards**, Philadelphia, Section 4 Construction, Volume 04.09 - Wood, 2001.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM D 4442. Standard test methods for direct moisture content measurement of wood and wood-base materials. **Annual Book of ASTM Standards**, Philadelphia, Section 4 Construction, Volume 04.09 - Wood, 2001.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM D 5456. Standard specification for evaluation of structural composite lumber products. **Annual Book of ASTM Standards**, Philadelphia, Section 4 Construction, Volume 04.09 - Wood, 2001.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM D 905. Standard test method for strength properties of adhesive bonds in shear by compression loading. **Annual Book of ASTM Standards**, Philadelphia, Section 15 General Products, Chemical Specialties, And End Use Products, Volume 15.06 - Adhesives, 1999.

APA/EWS. The Engineered Wood Association/Engineered Wood System. PRL- 501: Performance Standard for APA EWS Laminated Veneer Lumber. Engineered Wood System, Form EWS B310, 2001. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190** : Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997, 107 p.

BALDWIN, R. F. **Plywood and veneer-based products: manufacturing practices**. São Francisco: Miller Freeman, 1995. 388 p.

BALLARIN, A. W.; LARA PALMA, H. A. Propriedades de resistência e rigidez da madeira juvenil e adulta de *Pinus taeda* L. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 27, n. 3, p. 371-380, 2003.

BARRET, J. D.; KELLOGG, R. M. Lumber quality from second growth managed forest. In: A TECHNICAL WORKSHOP: JUVENILE WOOD – WHAT DOES IT MEAN TO FOREST MANAGEMENT AND FOREST PRODUCTS, 1985, Washington. **Proceedings...** Madison: Forest Products Research Society, 1986. p.12-16.

BARRICHELO, L. E. G.; BRITO, J. O. **Química da madeira**. Piracicaba: ESALQ, 1985. 125 p.

BENDTSEN, B. A. Properties of wood from improved and intensively managed trees. In: THE ECONOMICS & FINANCIAL MANAGEMENT AND TIMBER PRODUCTION, 1978, Atlanta. **Proceedings...** Atlanta: Technical Committees of the Forest Products Research Society, 1978. 78 p.

BENDTSEN, B. Properties of wood from improved and intensively managed trees. **Forest Products Journal**, Madison, v. 28, n. 10, p. 61-72, 1978.

BODIG, J.; JAYNE, B. A. **Mechanics of wood and composites**. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1982. 712 p.

BOHLEN, J. C. LVL laminated veneer lumber: development and economics. **Forest Products Journal**, Madison, v. 22, n. 1, p. 18-26, 1972.

BOHLEN, J. C. Shear strength of Douglas-fir laminated veneer lumber. **Forest Products Journal**, Madison, v. 25, n. 2, p. 16-23, 1975.

BORTOLETTO JÚNIOR, G. Produção de compensados com 11 espécies do gênero *Eucalyptus*, avaliação das suas propriedades físico-mecânicas e indicações para utilização. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 63, p. 65-78, 2003.

BORTOLETTO JÚNIOR, G. **Produção de lâminas, compensado e laminated veneer lumber – LVL a partir da madeira de *Pinus merkusii***. 2006, 97 f. Tese (Livro-Docência em Ciências Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

BOYD, J. D. The growth stresses: 1 – Growth stresses evaluation. **Australian Journal of Scientific Research**. Série B – Biological Sciences, Melbourne, n. 3, p. 270-93, 1950a.

BROWN, H. P.; PANSHIN, A. J.; FORSAITH, C. C. **Textbook of wood technology**. New York: McGraw-Hill, 1952. v. 2, 783 p.

BURGER, L. M.; RICHTER, H. G. **Anatomia da madeira**. São Paulo: Nobel, 1991. 154 p.

CARVALHO, A. M. **Caracterização de painéis LVL obtidos da madeira do híbrido de eucalipto *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* do Estado de São Paulo**. 2004, 80 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade de São Paulo, São Carlos.

CARVALHO, A. M.; ROCCO LAHR, F. A.; BORTOLETTO JÚNIOR, G. Use of Brazilian eucalyptus to produce LVL panels. **Forest Products Journal**, Madison, v. 54, n. 11, p. 61-4, 2004.

CHIES, D. **Influência do espaçamento sobre a qualidade e o rendimento da madeira serrada de *Pinus taeda* L.** 2005, 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

CHUGG, W. A. **Glulam: theory and practice of the manufacture of glued-laminated timber structure**. London: Ernest Benn, 1964. 423 p.

COWN, D. J. Variation in tracheid dimensions in the stem of a 26-year-old radiata pine tree. **APPITA**, Carlton, v. 28, n. 4, p. 237-245, 1975.

COWN, D. J. Wood density of radiata pine: its variation and manipulation. **New Zealand Journal of Forestry Science**, v. 19, p. 84-94, 1974.

DADSWELL, H. E. - The anatomy of eucalypt woods. **Division of applied chemistry technological paper**, Melbourne, n. 66, p. 1-34, 1972.

DELLA LUCIA, R. M.; VITAL, B. R. Avaliação da qualidade de juntas coladas de madeira de 3 espécies de *Eucalyptus*. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 5, n. 2, p. 172-180, 1981.

DINWOODIE, J. M. Growth stresses in timber: a review of literature. **Forestry**, London, v. 39, n. 2, p. 162-170, 1966.

DURLO, M. A. Relação água-madeira. In: SEMINÁRIO SOBRE SECAGEM DE MADEIRA, 1, 1992, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria: UFSM/CEPEF/FATEC, 1992. 100 p.

ECKELMAN, C. A. Potential uses of laminated veneer lumber in furniture. **Forest Products Journal**, Madison, v. 43, n. 4, p. 19-24, 1993.

ECKELMAN, C. A.; PICADO, F. Usos potenciales de la madera laminada en la fabricación de muebles. **Tecnología en Marcha**, Cartago, v. 11, n. 4, p. 3-14, 1993.

EN – EUROPEAN STANDARD. Plywood – Bonding Quality. Part 1: test methods. **EN 314-1**, 1993. CEN members, 1993.

EN – EUROPEAN STANDARD. Plywood – Bonding Quality. Part 2: requirements. **EN 314-2**, 1993. CEN members, 1993.

ENGLER, A. **Syllabus der Pflanzenfamilien (bacteriophyta at gymnospermae)**. Berlim: Gebrüder Borntraeger, 1954. v. 1, 367 p.

ENGLER, A. **Syllabus der Pflanzenfamilien (angiospermae)**. Berlim: Gebrüder Borntraeger, 1964. v. 2, 666 p.

ERICKSON, H. D.; HARRINSON, A. T. Douglas-fir wood quality studies. Part 1 – Effects of age and stimulate growth on wood density and anatomy. **Wood Science Technology**, v. 8, p. 225-265, 1974.

FINDLAY, W. P. K. **Timber**: properties and uses. London: Granada, 1978. 224 p.

FOELKEL, C. E. B.; BARRICHELO, L. E. G. Avaliação das madeiras para produção de celulose através de suas características estruturais: uma referência especial para o gênero *Eucalyptus*. In: SEMINÁRIO DE INTEGRAÇÃO FLORESTA – INDÚSTRIA, 1975, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: IPEF, 1975. p. 5-33.

FREAS, A. D.; SELBO, M. L. Fabrication and design principles of glued laminated wood structural members. **Technical bulletin. USDA**: Forest Service: FPL, Washington, n. 1069, 1954. p.1-220.

FRIHART, C. R. Wood adhesion and adhesives. In: ROWELL, R. M. (Ed). **Handbook of wood chemistry and wood composites**. Florida: CRC Press, 2005. cap. 9.

GABRIEL, M. S. C. **Desempenho físico-mecânico de painéis LVL de pinus tropicais da região de São Paulo**. 2007, 125 f. Tese (Doutorado em Agronomia – Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas da Universidade Estadual Paulista – UNESP, Botucatu.

GINZEL, W.; PERAZA, C. **Tecnología de tableros de particulas**. Madrid: Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias, 1966. 187 p.

GUSS, L. M. Engineered wood products: the future is bright. **Forest Products Journal**, Madison, v. 45, n. 7/8, p. 17-24, 1995.

HALLOCK, H. Observations on forms of juvenile core in loblolly pine. **Research note. USDA**: Forest Service: FPL, Madison, n. 0188, 1968.

HASELEIN, C. R. Anotações de aula. Santa Maria, RS, UFSM, 2008.

HASELEIN, C. R.; PAULESKI, D. T. **Caderno didático da disciplina de Tecnologia da Madeira II – Parte I**. Santa Maria: Imprensa Universitária – UFSM, 2004. 73 p.

HASELEIN, C. R.; PAULESKI, D. T. **Caderno didático da disciplina de Tecnologia da Madeira II – Parte II**. Santa Maria: Imprensa Universitária – UFSM, 2004. 53 p.

HASSEGAWA, M. **Qualidade da madeira de *Pinus taeda* L. de procedência da África do Sul**. 2003, 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

HERSTERMAN, N. D.; GORMAN, T. M. Mechanical properties of laminated veneer lumber made from interior Douglas-fir and Lodgepole Pine. **Forest Products Journal**, Madison, v. 42, n. 11/12, p. 69-173, 1992.

HEXION. **Boletim Técnico CASCOPHEN HL-2080**. Resina fenólica líquida para colagens à prova d'água. DOC 55, Emissão B, Rev. 5, 2006. 4 p.

HILLIS, W. E.; BROWN, A. G. **Eucalyptus for wood production**. Adelaide: CSIRO, 1978. 434 p.

HILLIS, W. E. Wood quality and utilization. In: HILLIS, W. E.; BROWN, A. G., (Eds). **Eucalyptus for wood production**. Melbourne: CSIRO, 1978. cap.12.

HOOVER, W. L. et al. Material design factors for hardwood laminated veneer lumber. **Forest Products Journal**, Madison, v. 37, n. 9, p.15-23, 1987.

HUNT, G. M.; GARRAT, G. A. **Preservacion de la madera**. Barcelona: Salvat, 1962.

IWAKIRI, S. A. **Influência de variáveis de processamento sobre propriedades de chapas de partículas de diferentes espécies de *Pinus***. 1989, 124 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

IWAKIRI, S. et al. Utilização de resíduos de serraria na produção de chapas de madeira aglomerada de *Eucalyptus saligna*, *Eucalyptus citriodora* e *Eucalyptus pilularis*. **Floresta e Ambiente**, Rio de Janeiro, v. 7, n. 1, p. 251-256, 2000.

IWAKIRI, S. **Painéis de madeira reconstituída**. Curitiba: FUPEF, 2005.

IWAKIRI, S. **Painéis de madeira**. Curitiba: FUPEF – Série didática, 1998. 128 p.

IWAKIRI, S.; NIELSEN, I. R.; ALBERTI, R. A. R. Avaliação da influência de diferentes composições de lâminas em compensados estruturais de *Pinus elliottii* e *Eucalyptus saligna*. **Revista Cerne**, Lavras, v. 6, n. 2, p. 19-24, 1999.

JACOBS, M. R. Further studies on fibre tension. **Bulletin. Commonwealth Forestry Bureau**, Canberra, n. 24, p. 7-34, 1939.

JACOBS, M. R. Stresses and strains in tree trunks as they growth in length and width. **Leaflet. Commonwealth of Australian Department of National Development. Forestry and Timber Bureau**, Canberra, n. 96, p. 1-15, 1965.

JACOBS, M. R. The fibre tension of wood stems, with special reference to the genus *Eucalyptus*. **Bulletin. Commonwealth Forestry Bureau**, Canberra, n. 22, p. 7-37, 1938.

JACOBS, M. R. The growth stresses of wood stems. **Bulletin. Commonwealth Forestry Bureau**, Canberra, n. 28, p. 1-67, 1945.

JOKERST, R. W. Preheating veneer reduces press time in phenolic-bonded PLV. **Forest Products Journal**, Madison, v. 34, n. 2, p. 47-50, 1984.

JUNG, J. Properties of parallel laminated veneer from stress-wave tested veneers. **Forest Products Journal**, Madison, v. 32, n. 7, p. 30-35, 1982.

KELLY, M. W. Critical literature review of relationships between processing parameters and physical properties of particleboard. **Technical bulletin. USDA: Forest Service: FPL**, Madison, n. 10, 1977. 66 p.

KLOCK, U.; MUÑIZ, G. I. B.; NISGOSKI, S.; BITTENCOURT, E. Características dos traqueóides da madeira juvenil de *Pinus maximinoi* H.E. Moore e de *Pinus taeda* L. In: CONGRESSO IBEROAMERICANO DE INVESTIGACIÓN EM CELULOSA Y PAPEL, 2002. **Anais...CIADICYP**, 2002. 17 p.

KLOCK, U.; MUÑIZ, G. I. B.; BITTENCOURT, E.; ANDRADE, A. S. Densidade básica da madeira ao longo do fuste e entre classes diamétricas de *Pinus taeda*. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E ESTRUTURAS DE MADEIRA, 8, 2002, Uberlândia. **Anais...Uberlândia**, 2002. p.10-20.

KNIGGE, W.; SCHULTZ, H. **Grundriss der Forstbenutzung**. Hamburg and Berlin: Verlag Paul Parey, 1966. 91 p.

KOCH, P. **Utilization of the southern pines**. USDA: Madison, v. 1, 1972. 734 p.

KOLLMANN, F. F. P.; KUENZI, E. W.; STAMM, A. J. **Principles of wood science and technology – II**. Wood based materials. New York: Springer-Verlag, 1975. 703 p.

KOLLMANN, F. P. K.; CÔTÉ Jr., W. A. **Principles of wood science and technology – I**. Solid wood. New York: Springer-Velag, 1968. 592 p.

KRAHMER, R. Fundamental anatomy of juvenile and mature wood. In: A TECHNICAL WORKSHOP: JUVENILE WOOD - WHAT DOES IT MEAN TO FOREST MANAGEMENT AND FOREST PRODUCTS, 1985, Washington. **Proceedings...** Madison: Forest Products Research Society, 1986. p. 12-16.

KUNESH, R. H. Micro-lam structural laminated veneer lumber. **Forest Products Journal**, Madison, v. 28, n. 7, p. 41-44, 1978.

LARA PALMA, A. H.; BALLARIN, A. W. Propriedades de contração na madeira juvenil e adulta de *Pinus taeda* L. **Revista Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 64, p. 13-22, 2003.

LARA PALMA, H. A. **Determinação de parâmetros elásticos e de resistência e a influência da madeira nas propriedades de compensados de *Pinus elliottii* Engelm. e *Pinus taeda* L.** 1994, 167 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

LARSON, P. R. et al. Formation and properties of juvenile wood in southern pines: a synopsis. **FPL Reporter. USDA: Forest Service: FPL, Madison, 2001.** 42 p.

LAUFENBERG, T. L. Parallel-laminated veneer: processing and performance research review. **Forest Products Journal**, Madison, v. 33, n. 9, p. 21-28, 1983.

LUCAS FILHO, F. C. **Estudo da influência do teor de umidade e da massa específica aparente sobre a resistência das madeiras de *Pinus elliottii* Engelm. e *Pinus taeda* L.** 1997, 101 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

LUTZ, J. F. Techniques for peeling, slicing and drying veneer. **Forest research paper. USDA: Forest Service: FPL, Madison, n. 228, p. 1-64, 1974.**

LUTZ, J. F. Wood Veneer: log selection, cutting and drying. **Technical bulletin. USDA: Forest Service: FPL, Madison, n. 1577, 1978.**

LUXFORD, R. F. Strength of glue-laminated Sitka spruce made of rotary-cut veneers. **FPL-Rep-1512. USDA: Forest Service: FPL, Madison, n. 1512, 1944.**

MACMILLAN, W. P. Reconstituted wood products, In: HILLS, W. E.; BROWN, A. G. **Eucalyptus for wood production.** Adelaide: CSIRO, 1978.

MALAN, F. S. **Studies on the phenotypic variation in growth stress intensity and its association with tree and wood properties of South African Grow *Eucalyptus grandis* Hill ex-Maiden.** 1984, 272 f. Tese (Doutoramento) – US/SA, Stellenbosch.

MALONEY, T. M. The family of wood composite materials. **Forest Products Journal**, Madison, v. 46, n. 2, p. 19-26, 1996.

MANGIERI, H. R.; DIMITRI, M. J. **Los eucaliptos en la silvicultura.** Buenos Aires: Acme, 1971. 226 p.

MARCHIORI, J. N. C. **Dendrologia das angiospermas: myrtales.** Santa Maria: Editora da UFSM, 1997. 304 p.

MARCHIORI, J. N. C. **Dendrologia das gimnospermas.** Santa Maria: Editora da UFSM, 2005. 161 p.

MARCHIORI, J. N. C. **Elementos de dendrologia.** Santa Maria: Editora da UFSM, 2004. 176 p.

MARCHIORI, J. N. C. Influência da estrutura anatômica na secagem da madeira. In: SEMINÁRIO SOBRE SECAGEM DE MADEIRA, 1, 1992, Santa Maria. **Anais...**Santa Maria: UFSM/CEPEF/FATEC, 1992. 100 p.

MARRA, G. G. **Technology of wood bonding**: principles in practice. New York: Van Nostrand Reinhold, 1992. 454 p.

MARRA, G. G. The role of adhesion and adhesives in products industry. In: WOOD ADHESIVES RESEARCH, APPLICATION AND NEEDS. Washington: USDA-FPL, 1980. p. 1-8.

MASSERANN, C.; MARIAUX, A. Anisotropic de retrait et structure du bois. Recherche de l'influence des caracteres morphologiques transverses des fibres. **Bois et Forêts des Tropiques**, n. 209, p. 35-47, 1985.

MATOS, J. L. M. **Estudos sobre a produção de painéis estruturais de lâminas paralelas de *Pinus taeda* L.** 1997, 117 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

MATSUNAGA, D. K. **Avaliação da utilização de madeira comercial de *Pinus taeda* L. e da adequabilidade da Norma Européia Unificada (CEN) à construção de vigas laminadas coladas.** 1995, 155 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

MOODY, R. C.; PETERS, C. C. Strength properties of rotary knife-cut laminated southern pine. **Research Paper, FPL-178. USDA**: Forest Service: FPL, Madison, 1972.

MOSLEMI, A. A. **Particleboard**. Illinois: Southern Illinois University Press, 1974. v. 2, 245 p.

MUÑIZ, G. I. B. **Caracterização e desenvolvimento de modelos para estimar as propriedades e o comportamento na secagem da madeira de *Pinus elliottii* Engelm e *Pinus taeda* L.** 1993, 235 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

NEUVONEN, E. et al. Laminated veneer lumber: overview of the product, manufacturing and market situation. **Kymenlaakson Ammattikorkeakoulu**, Department of Forest Products Marketing, Wood-Based Panels Technology, 1998. 16 p.

OLIVEIRA, J. T. S.; HELLMEISTER, J. C.; TOMAZELLO FILHO, M. Variação do teor de umidade e da densidade básica na madeira de sete espécies de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 29, n. 1, p. 115-127, 2005.

OLIVEIRA, J. T. S.; SILVA, J. C. Variação radial da retratibilidade e densidade básica da madeira de *Eucalyptus saligna* Sm. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 27, n. 3, p. 381-385, 2003.

OZARZKA, B. A review of the utilization of hardwoods for LVL. **Wood Science and Technology**, v. 33, p. 341-351, 1999.

PANSHIN, A. J.; DE ZEEUW, C. **Textbook of wood technology**. New York: McGraw-Hill, 1980. 722 p.

PEARSON, N. C.; GILMORE, R. C. Effect of fast growth rate on the mechanical properties of loblolly pine. **Forest Product Journal**, Madison, v. 30, n. 5, p. 47-54, 1980.

PEASE, D. A. Panels: products, applications and production trends. A Special Report From: **Wood Technology**. Miller Freeman, 1994. 254 p.

PEDROSA, A. L. **Desempenho estrutural de vigas “I” constituídas por PLP e compensado de *Pinus taeda* L. e *Eucalyptus dunnii* Maiden e OSB de *Pinus* spp.** 2003, 104 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.

PIO, N. S. **Produção de painéis estruturais de lâminas paralelas (PLP) de *Eucalyptus grandis* Hill ex-Maiden.** 2002, 168 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.

RAMSAY, W.; BRIGGS, D. Juvenile wood: has it come of age? In: A TECHNICAL WORKSHOP: JUVENILE WOOD – WHAT DOES IT MEAN TO FOREST MANAGEMENT AND FOREST PRODUCTS, 1985, Washington. **Proceedings...** Madison: Forest Products Research Society, 1986. p. 5-11.

SANTINI, E. J. Métodos de secagem de madeira. In: SEMINÁRIO SOBRE SECAGEM DE MADEIRA, 1, 1992, Santa Maria. **Anais...**Santa Maria: UFSM/CEPEF/FATEC, 1992. 100 p.

SCHAFFER, E. L. et al. Feasibility of producing a high-yield laminated structural product. **Research Paper, FPL-482. USDA:** Forest Service: FPL, Madison, 1972. 20 p.

SELLERS, T. **Plywood and adhesive technology**. New York: Marcel Dekker, 1985. 661 p.

SELLERS, T. Wood adhesive innovations and applications in North America. **Forest Products Journal**, Madison, v. 51, n. 6, p. 12-22, 2001.

SERPA, P. N.; VITAL, B. R.; DELLA LUCIA, R. M.; PIMENTA, A. S. Avaliação de algumas propriedades da madeira de *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus saligna* e *Pinus elliottii*. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 27, n. 5, p. 723-733, 2003.

SHIMIZU, J. Y. Pinus na silvicultura brasileira. **Revista da Madeira**, Curitiba, n. 83, ano 14, 2004.

SHUPE, T .F.; HSE, C. Y; GROOM, L. H.; CHOONG, E. T. Effect of silvicultural practice and veneer grade layup on some mechanical properties of loblolly pine LVL. **Forest Products Journal**, Madison, v. 47, n. 9, p. 63-69, 1997.

SILVA, J. C.; OLIVEIRA, J. T. S.; Avaliação das propriedades higroscópicas da madeira de *Eucalyptus saligna* Sm., em diferentes condições de umidade relativa do ar. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 27, n. 2, p. 233-239, 2003.

SINKO, H. Aumenta presença de painéis LVL no mercado. **Revista da Madeira**, Edição Especial Painéis, Curitiba, 2003.

SJÖSTRÖM, E. **Wood chemistry**: fundamentals and applications. San Diego: Academic press, 1993. 293 p.

SMULSKY, S. (editor chefe). **Engineered Wood Products**: a guide for specifiers, designers and users. Forest Products Society, FPS Research Foundation, Madison, 1997.

SOBRAL FILHO, M. **Adesão e adesivos para madeira**: teorias de adesão e a natureza das colagens com madeira. Brasília: Ministério da Agricultura, Série Técnica - 5, 1982. 22 p.

SUCHSLAND, O. Warping of furniture panels. **Extension Bulletin E-745. Agric. Exp. Station**, Michigan, 1972.

TAMMELA, K. Laminated veneer lumber (LVL) manufacturing. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL SOBRE PRODUTOS SÓLIDOS DE MADEIRA DE ALTA TECNOLOGIA, 1, 1998, Belo Horizonte. **Anais...Viçosa**: SIF/UFV, 1998. p. 162-168.

TOMASELLI, I. Estudos da densidade básica e dimensões de traqueóides de povoamentos de *Pinus elliottii*, *Pinus taeda* e *Araucaria angustifolia*. **FUPEF**, Curitiba, 1979. 70 f.

TOMASELLI, I. Secagem das lâminas para indústria de painéis. **Madeira/Móveis**, Bento Gonçalves, v. 1, n. 1, p. 27-33, 1983.

TOMAZELLO FILHO, M. Estrutura anatômica da madeira de oito espécies de eucalipto cultivadas no Brasil. **IPEF**, Piracicaba, v. 29, p. 25-36, 1985.

TOMAZELLO FILHO, M. Radial variation of basic density and anatomical constituents of *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus grandis*. **Bulletin IAWA International Association Of Wood Anatomists**, v. 5, n. 4, p. 347, 1984.

TOMAZELLO FILHO, M. Variação radial da densidade básica e da estrutura anatômica da madeira de *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus grandis*. **IPEF**, Piracicaba, v. 29, p. 37-45, 1985.

TSOUMIS, G. **Science and technology of wood**: structure, properties, utilization. New York: Van Nostrand Reinhold, 1991. 494 p.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE (USDA). **Wood Handbook:** wood as an engineering material. Madison, WI: United States Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1999. 463 p.

VALE, A. T.; MARTINS, I. S.; ARAÚJO, W. L. O. Estudo da densidade básica de três espécies do cerrado. **Revista árvore**, Viçosa, v. 16, p. 202-208, 1992.

VALE, A. T.; MOURA, V. P. G.; MARTINS, I. S. Densidade básica média em função da profundidade de penetração do pino do Pilodyn e da classe diamétrica e variação axial da densidade básica em *Eucalyptus grandis* Hill ex-Maiden. **Revista árvore**, Viçosa, v. 19, p. 80-91, 1995.

VAN WYK, J. L. Hardwood sawmilling can have a bright future in South Africa. **South African Forestry Journal**, Pretoria, p. 47-53, 1978.

VERMAAS, H. F. Drying of eucalypts with special reference to young, fast-grown plantation material. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL SOBRE PRODUTOS SÓLIDOS DE MADEIRA DE ALTA TECNOLOGIA E ENCONTRO SOBRE TECNOLOGIAS APROPRIADAS DE DESDOBRO, SECAGEM E UTILIZAÇÃO DA MADEIRA DE EUCALIPTO, 1, 1998, Belo Horizonte. **Anais...Viçosa: SIF/UFV**, 1998. p. 106-118.

VERWEST, A. M. Effect of manufacturing temperature of laminated veneer lumber on duration of load behavior. 2002, 561 f. Thesis (Department of Civil & Environmental Engineering) – Washington State University.

VITAL, B. R.; MACIEL, A. S.; DELLA LUCIA, R. M. Qualidade de juntas coladas com lâminas de madeira oriundas de três regiões do tronco de *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus saligna* e *Pinus elliottii*. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 30, n. 4, p. 637-644, 2006.

WALKER, J. C. F. **Primary wood processing:** principles and practice. London: Chapman & Hall, 1993. Chapter 11, p. 377-418.

YOUNGQUIST, J. A. Laminated veneer lumber – A high-quality structural lumber substitute. In: SYMPOSIUM OF FOREST PRODUCTS RESEARCH INTERNATIONAL ACHIEVEMENTS AND THE FUTURE. **Proceedings...Pretoria:** 1985. V.6, 13 p.

YOUNGQUIST, J. A.; LAUFENBERG, T. L.; BRYANT, B. S. End jointing of laminated veneer lumber for structural use. **Forest Products Journal**, Madison, v. 34, n. 11/12, p. 25-32, 1984.

ZOBEL, B. J.; VAN BUIJTENEN, J. P. **Wood variation**. Berlin: Springer, 1989. 290 p.