

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

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

Marcos Theodoro Müller¹ Clovis Roberto Haselein² Rafael Rodolfo de Melo³
Diego Martins Stangerlin⁴

RESUMO

Investigou-se a influência do posicionamento de lâminas de madeira de *Eucalyptus saligna* e *Pinus taeda* nas camadas de painéis *Laminated Veneer Lumber* (LVL). As composições foram manufaturadas em seis diferentes combinações de cinco lâminas de 3,2 mm de espessura, coladas com adesivo fenol-formaldeído, resultando em tratamentos compostos de madeira de uma mesma espécie e outros com mistura de madeira das duas espécies. A avaliação dos arranjos propostos foi realizada mediante a caracterização de propriedades físicas (teor de umidade e massa específica) e mecânicas (módulo de elasticidade – MOE e módulo de ruptura – MOR), estas verificadas em ensaios de flexão estática *flatwise* e *edgewise*. Os resultados obtidos indicaram que, na maior parte das vezes, as diferentes posições das lâminas de maior massa específica (nas camadas externas, intermediárias e de miolo) influenciaram as propriedades mecânicas dos painéis. A influência constatada mostrou-se variada para MOE e MOR, em especial quando comparados valores para os ensaios *flatwise* e *edgewise*. Em determinadas posições, nas camadas das composições LVL, a presença de lâminas de eucalipto resultou em aumentos de rigidez e resistência. Contudo, os tratamentos constituídos por lâminas intercaladas de eucalipto e pinus mostraram interessantes performances para uso estrutural, tanto em *flatwise* quanto em *edgewise*, por apresentarem valores de MOE e de MOR que permitem distingui-los como de 1ª classe, segundo o documento técnico norte-americano APA/EWS PRL-501 (2001).

Palavras-chave: laminated veneer lumber; painel de lâminas de madeira; fenol-formaldeído.

ABSTRACT

This research aimed to investigate the influence of the positioning of *Eucalyptus saligna* and *Pinus taeda* wood veneers on layers of laminated veneer lumber (LVL) panels. The compositions were manufactured in six different combinations of five veneers of 3.2 mm thickness, glued with phenol-formaldehyde, resulting in treatments composed of wood of the same species or with a combination of two wood types. The evaluation of the proposed arrangements was performed under the characterization of physical properties (moisture content and density) and mechanical properties (modulus of elasticity – MOE and modulus of rupture – MOR) verified in flatwise and edgewise static bending tests. The results obtained indicated that, in most situations, the different positions of the veneers with higher density (in the outer, intermediate

1 Engenheiro Civil, MSc., Professor Assistente do Centro de Engenharias, Universidade Federal de Pelotas (UFPEL), Rua Conde de Porto Alegre, 793, CEP 96010-290, Pelotas (RS). marcosthemuller@msn.com

2 Engenheiro Florestal, PhD., Professor Titular do Departamento de Ciências Florestais, Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Av. Roraima, 1000, CEP 97105-900, Santa Maria (RS), Brasil. clovis.haselein@ufsm.br

3 Engenheiro Florestal, Dr., Professor Adjunto do Instituto de Ciências Agrárias e Ambientais, Universidade Federal de Mato Grosso, Campus de Sinop, Av. Alexandre Ferronato, 1200, CEP 78557-267, Sinop (MT), Brasil. rrmelo2@yahoo.com.br

4 Engenheiro Florestal, Dr., Professor Adjunto do Instituto de Ciências Agrárias e Ambientais, Universidade Federal de Mato Grosso, Campus de Sinop, Av. Alexandre Ferronato, 1200, CEP 78557-267, Sinop (MT), Brasil. diego_stangerlin@yahoo.com.br

and inner layers) influenced the mechanical properties of the panels. The influence detected was varied for MOE and MOR, especially when comparing the flatwise and edgewise test values. In certain positions, on the layers of the LVL compositions, the presence of eucalypt veneers resulted in stiffness and strength increases. However, the treatments formed by interposed veneers of eucalypt and pine demonstrated interesting performances for structural use, in either flatwise or edgewise position, once they present values of MOE and MOR that allow to distinguish them as 1st class, according to the North American standard APA/EWS PRL-501 (2001).

Keywords: laminated veneer lumber; wood veneers panel; phenol-formaldehyde.

INTRODUÇÃO

O material denominado *laminated veneer lumber*, ou LVL, é um produto de madeira engenheirada (*engineered wood*) utilizado como componente estrutural de edificações, sobretudo em países onde há tradição no uso de madeira em sistemas construtivos.

Manufaturado com lâminas de pequena espessura obtidas por corte em tornos desenroladores, sobrepostas em camadas e coladas com adesivo para uso estrutural, de modo que todas as faces sejam orientadas com a direção da grã paralela ao comprimento da peça, o LVL é concebido para oferecer resistência à flexão longitudinal, como em vigas, por exemplo (USDA, 1999; ASTM D 5456, 2001).

De acordo com Smulski et al. (1997), o LVL começou a ser produzido por prensagem contínua no final dos anos 60, na América do Norte. Conforme Baldwin (1995), as vigas-I constituídas com alma de compensado estrutural e flanges de LVL tornaram-se, em âmbito mundial, o primeiro produto de madeira engenheirada comercialmente bem-sucedido e produzido em larga escala por uma empresa norte-americana.

O LVL é material que afere maior custo de produção quando comparado à madeira serrada, no entanto, devido à crescente dificuldade para a obtenção de peças naturais próprias para uso estrutural, sobretudo aquelas provenientes de árvores de rápido crescimento, mostra-se cada vez mais utilizado em sistemas construtivos em madeira (TAMMELA, 1998).

Quanto às dimensões, em processos industriais contínuos o LVL pode ser produzido com espessuras variando de 21 mm a 150 mm, larguras de 100 mm a 1800 mm e comprimentos de 2500 mm a 25000 mm, de modo a atender a uma ampla gama de necessidades estruturais (RAUTE ENGINEERED WOOD, 1980; TAMMELA, 1998;

APA/EWS PRL-501, 2001; LARA PALMA e BALLARIN, 2011).

Para eucalipto e pinus, o rendimento de madeira na laminação é superior ao obtido no desdobro em peças serradas, sobretudo em processamentos de toras de pequenos diâmetros (SMULSKI et al., 1997; CARVALHO, 2004). De modo particular, para o gênero eucalipto, outras vantagens podem advir da transformação das toras em finas lâminas, ao invés de serrados, devido à minimização dos efeitos das tensões de crescimento. Defeitos que se manifestam no desdobro e na secagem, decorrentes de elevados tensionamentos, podem inviabilizar o uso da madeira serrada. Entretanto, na forma de lâminas que se moldam, apropriadas para prensagem e colagem, muitas das deformidades decorrentes das tensões de crescimento não se tornam fatores que impossibilitam o aproveitamento do material. Com pouca espessura, igualmente, viabilizam-se menores tempos para a secagem da madeira ao teor requerido.

A produção industrial de LVL otimiza o aproveitamento de lâminas conforme suas características: uso de material mais resistente em camadas que serão mais exigidas mecanicamente e, por outro lado, utilização de madeira de menor qualidade em posições de menor solicitação; deste modo, propicia a manufatura de produtos de alta confiabilidade, condição que agrega valor à madeira de espécies de rápido crescimento. Ainda, o LVL apresenta a vantagem de ser mais uniforme que a madeira serrada, devido à maior dispersão dos defeitos naturais, como nós e rachaduras, nas finas lâminas que compõem o produto. Esses defeitos são distribuídos aleatoriamente em várias camadas, de modo que a influência destes nas propriedades físicas e mecânicas da peça estrutural se torna menor (MATOS, 1997). Como resultado, o LVL apresenta maior confiabilidade quanto à resistência, quando comparado à madeira serrada e à madeira laminada

colada (*glulam*).

No uso do LVL como viga de seção retangular, a posição geométrica das camadas em relação à direção da carga solicitante pode configurar, segundo as normativas, duas situações principais para as análises da rigidez e da resistência. Considerando-se uma viga LVL sob flexão estática, a peça estará em posição *flatwise* se a carga aplicada for ortogonal às faces das lâminas e, em posição *edgewise*, se a força atuante apresentar direção paralela às camadas, ou seja, se essa força for ortogonal ao canto da peça.

De acordo com a teoria clássica dos sistemas em camadas (BODIG; JAYNE, 1982), quando sob flexão em *flatwise*, a posição de determinada lâmina no arranjo do multilaminado é fator importante quanto a sua contribuição individual para a rigidez e resistência da viga. Nesta situação, quanto mais afastadas do plano neutro, mais exigidas mecanicamente se encontram as lâminas, devido aos maiores momentos de inércia relativos às posições espaciais que estas camadas apresentam em relação à linha neutra do conjunto multilaminado. Neste contexto, de uma viga LVL flexionada na posição *flatwise*, as lâminas de capa e contracapa são as mais exigidas quanto à resistência requerida, sendo que uma face da viga se torna maximamente tensionada à compressão e, a face oposta, maximamente tensionada à tração. De outra forma, se a viga LVL é flexionada na posição *edgewise*, todas as camadas do multilaminado apresentam-se espacialmente a uma mesma distância para o cálculo dos momentos de inércia relativos, por estarem todas posicionadas de modo equivalente em relação à linha neutra do conjunto; assim, em teoria, todas as lâminas (de mesma espessura) que compõem a viga são igualmente exigidas à compressão, no bordo superior, e à tração, no bordo inferior da seção transversal da viga.

O Brasil ainda não produz o LVL industrialmente, razão pela qual este produto vem sendo foco de pesquisas acadêmicas em alguns laboratórios e centros de pesquisas no país (LARA PALMA e BALLARIN, 2011).

Diante destas considerações, investigar diferentes combinações de lâminas de *Eucalyptus saligna* e *Pinus taeda* em painéis LVL de cinco camadas, e avaliar, em ensaios de flexão estática (*flatwise* e *edgewise*), a influência do posicionamento das lâminas nas propriedades de rigidez (MOE) e resistência (MOR) dos materiais manufaturados, são os objetivos deste trabalho.

MATERIAL E MÉTODOS

Origem das lâminas de madeira

As lâminas de *Eucalyptus saligna* (eucalipto) procederam das toras da base de 3 árvores de 25 anos, com DAP aproximado de 40 cm, oriundas de plantio localizado no município de Barão de Cotegipe, norte do estado do Rio Grande do Sul. As lâminas de *Pinus taeda* (pinus) originaram-se das toras da base de 4 árvores de 27 anos, com DAP aproximado de 36 cm, provenientes de talhão localizado no município de Prudentópolis, estado do Paraná.

Processadas por torno desenrolador em seus municípios de origem, na espessura de 3,2 mm, as lâminas das duas espécies tiveram suas dimensões determinadas pelo comprimento útil das toras (1,15 m no alinhamento das fibras) e por corte de guilhotina (a cada 0,82 m). Após a laminação, o material de eucalipto foi recolhido em estado verde; diferentemente, as lâminas de pinus foram submetidas à secagem artificial na indústria, que lhes conferiu teor de umidade entre 6 e 8%.

Para secagem, as lâminas de eucalipto foram gradeadas em posição horizontal, formando uma pilha no interior da câmara climatizada do Laboratório de Produtos Florestais da Universidade Federal de Santa Maria (LPF – UFSM). As condições ambientais da câmara são controladas para a temperatura de 20°C e umidade relativa do ar de 65%. Após um período de aproximadamente 60 dias, o material alcançou o teor de umidade de equilíbrio higroscópico com o ambiente, em torno de 12%. As lâminas de pinus, por já estarem secas, foram armazenadas diretamente umas sobre as outras, no mesmo local.

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 esquadrejadas nas dimensões 38 x 48 cm (alinhamento das fibras) x 3,2 mm.

Do material de cada espécie foram extraídas amostras para a determinação do teor de umidade e da massa específica das lâminas, segundo as normas ASTM D 4442 e ASTM D 2395, respectivamente. A

massa específica foi determinada ao teor de umidade de equilíbrio (MEe), sendo massa e volume aferidos à mesma umidade.

Tratamentos estudados

Diferentes composições de lâminas de eucalipto e pinus, caracterizando seis tratamentos, foram avaliadas. 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). 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 (direção do alinhamento das fibras) x 16 mm de espessura (aproximadamente).

Os tratamentos avaliados estão apresentados na Figura 1.

Na Figura 2 podem ser visualizadas amostras dos diferentes painéis LVL deste estudo.

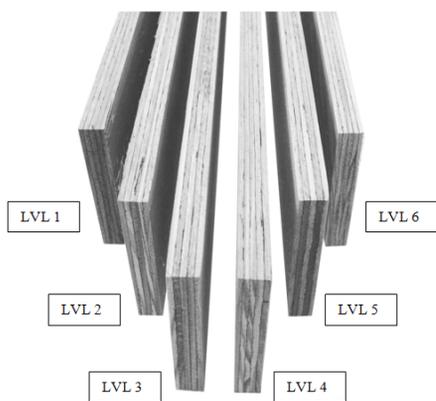


FIGURA 2: Fotografia de amostras dos seis tratamentos LVL.

FIGURE 2: Photography of samples of the six

LVL treatments.

Classificação e distribuição das lâminas

Primeiramente, as lâminas foram classificadas com base em seus valores de MEe.

Para a distribuição nos arranjos dos painéis foram escolhidas lâminas com valores de massa específica, a partir da média, crescentes nas camadas externas e decrescentes nas camadas intermediárias. Para as camadas de miolo foram empregadas aquelas remanescentes da distribuição anterior, segundo um critério que deu prioridade, em relação à MEe individual, para a proximidade ao valor da média.

A distribuição foi realizada a cada conjunto de seis tratamentos, de LVL1 a LVL6, que compunham uma repetição, em sequência ordenada. Iniciou-se nas camadas superiores de LVL1, continuando com a distribuição das lâminas nas partes superiores até LVL6. Seguiu-se a distribuição nas camadas inferiores, de LVL6 até retornar a LVL1. A isto se chamou de distribuição giratória entre os 6 tratamentos. Após concluído um nível, iniciou-se o seguinte, perfazendo ordenadamente os 6 níveis de repetição.

Preparo e aplicação do adesivo

Utilizou-se resina fenólica tipo resol, alcalina, em solução aquosa, à base de fenol-formaldeído, de nome comercial Cascophen HL-2080. 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 empregado, denominado Albex-9, é uma farinha de casca de coco micropulverizada. O preparo da mistura adesiva seguiu as proporções apresentadas na Tabela 1.



FIGURA 1: Tratamentos avaliados.

FIGURE 1: Appraised treatments.

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

TABLE 1: Proportion of the ingredients in the final composition of the adhesive; parts per weight.

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

A umidade das lâminas de eucalipto e pinus foi baixada, por meio de secagem em estufa laboratorial, aos teores recomendados para a colagem. A gramatura de adesivo utilizada foi de 200 g/m², aplicada em linha simples, com o uso de espátula.

Prensagem

Após a aplicação do adesivo e a montagem das camadas, foi realizada a prensagem a frio. Em seguida, procedeu-se a prensagem a quente em prensa hidráulica, com pratos de dimensões 60 x 60 cm, aquecidos por resistências elétricas. Os painéis foram prensados individualmente, em ciclo único. Os parâmetros dos processos de colagem e prensagem encontram-se descritos na Tabela 2.

TABELA 2: Parâmetros dos processos de colagem e prensagem.

TABLE 2: Parameters of the bonding and pressing processes.

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

Por fim, após um período de esfriamento, os painéis manufaturados foram armazenados na câmara climatizada, colocados horizontalmente em prateleiras e afastados entre si pelo uso de espaçadores.

Teor de umidade e massa específica dos painéis LVL

De acordo com as normas ASTM D 4442

e ASTM D 2395, o teor de umidade e a massa específica podem ser obtidos por meio das mesmas amostras. Foram utilizados para esses ensaios 72 corpos de prova, sendo 2 de cada painel LVL manufaturado. O material permaneceu na câmara climatizada por aproximadamente 60 dias, com regular controle de peso e, ao final desse período, constatou-se peso constante, indicativo de ter sido alcançada a umidade de equilíbrio. Para o cálculo do teor de umidade (TUE) dos painéis LVL utilizou-se o método gravimétrico. Para a determinação da massa específica (MEe) foram aferidas as massas, em balança eletrônica, e os volumes das amostras, pelo método estereométrico.

Flexão estática na posição *flatwise*

A posição *flatwise* é aquela em que as lâminas que compõem os corpos de prova se encontram dispostas em planos horizontais, perpendiculares à direção da força aplicada (Figura 3).

Os ensaios de flexão estática para os painéis LVL seguiram as determinações da norma ASTM D 3043 – método D, com os corpos de prova definidos nas dimensões: 47 cm (comprimento) x 8 cm (largura) x espessura do painel (aproximadamente 14 mm após a densificação, variável para os tratamentos). Foram retirados 2 corpos de prova de cada um dos 36 painéis LVL produzidos, resultando em 72 no total, sendo 12 por tratamento.

O vão entre apoios foi de 24 vezes a espessura média dos corpos de prova; apesar das diferenças de espessura existentes entre os painéis dos seis tratamentos, para todos os ensaios foram fixados idênticos vão entre apoios (34 cm) e velocidade de ensaio (10 mm/minuto), de acordo com as determinações da norma.

Flexão estática na posição *edgewise*

A posição *edgewise* é aquela em que as lâminas que compõem os corpos de prova se encontram dispostas em planos verticais, paralelos à direção da força aplicada (Figura 4).

Segundo a norma ASTM D 3043 – método D, os corpos de prova foram 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 no total, sendo 12 por tratamento. O vão entre apoios, definido em 24 vezes a altura dos corpos de prova (± 17,1 mm, conferida após o corte), foi

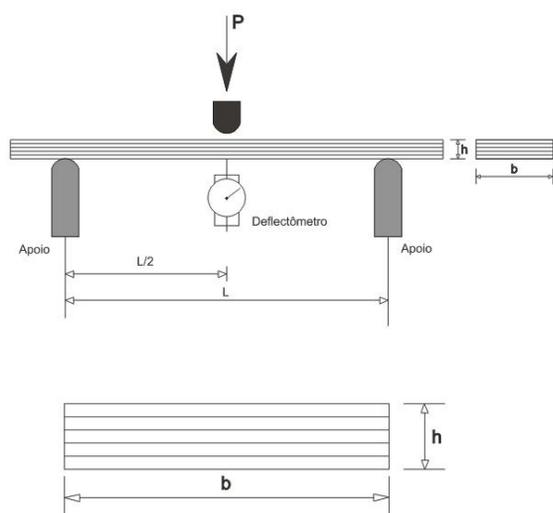


FIGURA 3: Posição *flatwise*; corpo de prova em ensaio de flexão estática com carga aplicada no centro do vão e vista em corte transversal ampliada.

FIGURE 3: Flatwise position; sample in static bending test with applied load in the center of the span and enlarged traverse cut view.

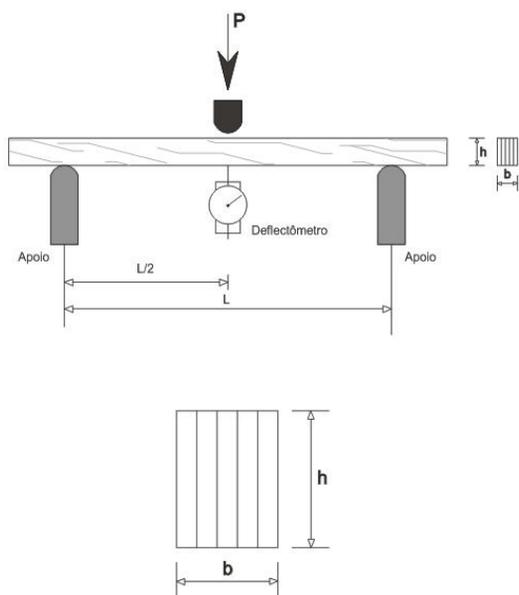


FIGURA 4: Posição *edgewise*; corpo de prova em ensaio de flexão estática com carga aplicada no centro do vão e vista em corte transversal ampliada.

FIGURE 4: Edgewise position; sample in static bending test with applied load in the center of the span and enlarged traverse cut view.

determinado em 41 cm. A velocidade de ensaio foi calculada de acordo com a equação apontada pela norma, obtendo-se o valor de 12 mm/minuto.

Análise estatística

As análises estatísticas dos resultados foram efetuadas por análise de variância, 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 foram realizados pelo método LSD (*Fisher's least significant difference*), a 5% de probabilidade de erro.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Teor de umidade e massa específica das lâminas e dos painéis LVL

As amostras indicaram um teor de umidade médio de 11,7% para as lâminas de eucalipto, e de 7,8% para as de pinus. Esses teores foram estabelecidos como valores de equilíbrio para o cálculo das massas específicas aparentes das lâminas deste estudo. Dessa forma, os resultados das médias de MEe indicaram 813 kg/m³ para as lâminas de eucalipto e 552 kg/m³ para as de pinus.

A norma brasileira NBR 7190 (1997) indica valores médios de massa específica aparente a 12% de umidade, sendo 731 kg/m³ para *Eucalyptus saligna* e 645 kg/m³ para *Pinus taeda*. Verifica-se que as lâminas utilizadas neste experimento apresentaram densidades compatíveis a esses referenciais.

Para os painéis, o teor de umidade médio do total de amostras dos seis tratamentos LVL foi igual a 9,55%, base seca. Esse foi o teor médio no qual se estabilizaram os corpos de prova dos painéis consolidados. Os valores das médias de massa específica (MEe) dos painéis LVL, ao teor de umidade de equilíbrio, estão apresentados nas Tabelas 3 e 4, juntamente com os resultados de flexão estática, de modo a facilitar as análises e as interpretações.

Flexão estática na posição *flatwise*

É importante fundamentar as análises sob dois critérios que potencializam a mesma propriedade física, a massa específica. Para a posição *flatwise*, primeiramente, observa-se a influência das posições

das lâminas nas formações dos arranjos, sendo que a presença de material de maior MEe (eucalipto, neste experimento) em regiões mais exigidas deve, em teoria, proporcionar aumentos de rigidez e de resistência (BODIG; JAYNE, 1982). Entretanto, não pode ser esquecida a influência dos valores médios de MEe dos diversos tratamentos, devido às conhecidas correlações entre as propriedades ME, MOE e MOR; para madeira sólida sem defeitos, o aumento de ME tende a resultar em maiores valores de MOE e de MOR. Em geral, quanto maior for a massa específica da madeira, maiores serão suas propriedades mecânicas (MORESCHI, 2012).

Na Tabela 3 estão listados os valores médios das propriedades estudadas para os seis tratamentos LVL.

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 MEe nas lâminas de miolo não exercem relevante influência nos resultados, por estas se situarem na região de tensão mínima, da linha neutra. Entretanto, conforme esperado, LVL4 e LVL2 apresentam maior rigidez que LVL5 e LVL3, devido à forte influência do posicionamento das lâminas de eucalipto (mais densas) nas capas e contracapas. Por outro lado, para o MOE observa-se uma menor influência das diferenças de

massa específica entre os tratamentos, visto que, comparadas suas médias para LVL3, LVL5 e LVL6, as três se diferenciam significativamente entre si, o que não repercute nos resultados obtidos para a rigidez. Para este caso, sob o ponto de vista do posicionamento, a razão da não diferenciação para o MOE pode estar associada à pequena distância das camadas intermediárias em relação à linha neutra (as lâminas são muito finas), o que implica em pequenos momentos de inércia para essas posições.

Para o MOR observa-se que o tratamento LVL4 se equivale estatisticamente a LVL3, sendo que sua média de massa específica é menor. Contudo, a influência de lâminas mais densas nas camadas externas, que são as mais exigidas em flexão na posição *flatwise*, explica a boa resistência para LVL4. Em outras palavras, menor massa específica no conjunto multilaminado, porém, mais eficaz localização dessa propriedade nas regiões mais solicitadas. A igualdade estatística para os valores de MOR de LVL2, LVL4 e LVL3, bem como a equivalência de LVL5 e LVL3, indicam a fraca influência das diferenças de MEe média entre os tratamentos, neste experimento. A pequena espessura das lâminas e a proposta de apenas cinco camadas para os painéis tornaram os resultados minimamente diferenciados em suas médias, dificultando a análise para as camadas intermediárias e, em alguns casos, também não

TABELA 3: Resultados de MEe, MOE e MOR em sequência decrescente, para flexão estática na posição *flatwise*.

TABLE 3: Results of MEe, MOE and MOR in decreasing sequence, for static bending in flatwise position.

Flatwise					
Massa Específica (MEe) (kg/m ³)					
LVL1 _A	LVL3 _B	LVL2 _B	LVL5 _C	LVL4 _C	LVL6 _D
898 _{2,74}	793 _{2,71}	778 _{2,33}	739 _{2,92}	726 _{3,10}	639 _{2,97}
Módulo de Elasticidade (MOE) (MPa)					
LVL1 _A	LVL4 _B	LVL2 _B	LVL5 _C	LVL3 _C	LVL6 _C
22.385 _{6,44}	20.804 _{5,88}	20.367 _{4,14}	16.489 _{9,22}	16.384 _{13,5}	15.270 _{10,0}
Módulo de Ruptura (MOR) (MPa)					
LVL1 _A	LVL2 _B	LVL4 _B	LVL3 _{BC}	LVL5 _C	LVL6 _D
168 _{10,4}	151 _{5,85}	146 _{9,23}	139 _{11,8}	131 _{9,05}	100 _{18,8}

Em que: 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 em nível de 5% de probabilidade de erro. O número em maior destaque é o valor médio, abaixo e à direita, em itálico, tem-se o coeficiente de variação (CV).

contribuíram como esperado para a observação da influência das camadas externas nas propriedades mecânicas. Talvez esses detalhes ajudem a explicar a igualdade estatística entre LVL2, LVL4 e LVL3 para o MOR; todavia, para estes, esperava-se LVL3 em menor grandeza, e diferente estatisticamente dos demais.

Ainda, na posição *flatwise*, observam-se para LVL2 altas performances e baixos coeficientes de variação, tanto para MOE como para MOR, que podem ser indicadores da boa aderência formada entre as lâminas de eucalipto e pinus entremeadas, ou intercaladas, conforme as posições estabelecidas nesse arranjo (eucalipto na capa, contracapa e miolo, e pinus nas camadas intermediárias).

Flexão estática na posição *edgewise*

Na posição *edgewise* projeta-se simplesmente a relação de menores valores para MOE e MOR conforme a redução das médias de MEe dos tratamentos. Em outras palavras, nessa posição seria importante para comparações entre tratamentos apenas a MEe média dos painéis LVL, não importando as posições das lâminas nas camadas das diversas composições.

Esperava-se, para MOE e MOR, a mesma ordem sequencial obtida para as médias de MEe

dos tratamentos. Na Tabela 4 estão listados os valores médios das propriedades estudadas.

Para o MOE, os resultados mostram sequência 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, contrariando o esperado. Aparentemente, os resultados fazem supor que as lâminas de eucalipto contribuíram diferentemente para a rigidez das amostras, conforme as posições que ocuparam. 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 em todas as posições das camadas de montagem, na solicitação de flexão estática. Ao que parece, as lâminas de eucalipto proporcionaram maiores valores médios de MOE quando posicionadas nas camadas intermediárias dos painéis. Esta influência de posicionamento não encontra sustentação na teoria dos sistemas em camadas, e sua ocorrência neste experimento deve-se a fatores que não foram suficientemente detectados.

Os resultados de MOR mostram sequência de valores que difere, em relação ao esperado, na ordem e nas equivalências das grandezas. Era

TABELA 4: Resultados de MEe, MOE e MOR em sequência decrescente, para flexão estática na posição *edgewise*.

TABLE 4: Results of MEe, MOE and MOR in decreasing sequence, for static bending in *edgewise* position.

Edgewise					
Massa Específica (MEe) (kg/m ³)					
LVL1 _A	LVL3 _B	LVL2 _B	LVL5 _C	LVL4 _C	LVL6 _D
898 _{2,74}	793 _{2,71}	778 _{2,33}	739 _{2,92}	726 _{3,10}	639 _{2,97}
Módulo de Elasticidade (MOE) (MPa)					
LVL1 _A	LVL3 _B	LVL2 _C	LVL5 _C	LVL4 _D	LVL6 _E
20.014 _{6,68}	17.340 _{8,03}	15.950 _{6,04}	15.784 _{7,33}	14.260 _{6,96}	12.310 _{11,0}
Módulo de Ruptura (MOR) (MPa)					
LVL1 _A	LVL3 _B	LVL5 _{BC}	LVL2 _{CD}	LVL4 _{DE}	LVL6 _E
132 _{9,66}	121 _{10,3}	117 _{5,72}	111 _{9,92}	103 _{14,0}	94 _{13,9}

Em que: 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 em nível de 5% de probabilidade de erro. O número em maior destaque é o valor médio, abaixo e à direita, em itálico, tem-se o coeficiente de variação (CV).

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 resultado inferior aos dos tratamentos com três lâminas da referida espécie. Neste sentido, LVL4 deveria apresentar resistência superior à LVL6, porém, o teste de médias indica equivalência estatística entre os resultados desses tratamentos.

De todo modo, a composição LVL5, com madeira intercalada das duas espécies, surpreende pelos altos valores de rigidez e resistência alcançados, comparativamente aos resultados dos demais arranjos.

Assim como para o MOE, para o MOR também se percebe que as lâminas de eucalipto parecem ter contribuído diferentemente para a resistência das amostras conforme as posições que ocuparam. Pelo que se nota, as lâminas de eucalipto proporcionaram maiores valores médios de MOR quando posicionadas nas camadas intermediárias dos painéis. Para corroborar essa tendência observada, a equivalência estatística para LVL4 e LVL6 indica, para o MOR, a insignificante influência de lâminas mais densas (eucalipto) constituírem as camadas externas dos corpos de prova de LVL4. É importante salientar que estas observações são suposições, que surgem em razão da análise dos resultados deste experimento, e que não encontram sustentação na teoria dos sistemas em camadas (BODIG; JAYNE, 1982). Contudo, neste estudo, pelos resultados, quando comparadas composições com mesma quantidade de lâminas de eucalipto, demonstraram maiores valores médios de MOE e de MOR aquelas que continham essas lâminas nas camadas intermediárias.

O resultado do MOE médio na posição *edgewise* para o tratamento LVL6 é muito próximo do apresentado pelo USDA (1999) para a madeira maciça de *Pinus taeda* (*Loblolly pine* – 12.300 MPa). Para o tratamento LVL1, o MOE médio verificado é 11,8% superior ao apresentado para *Eucalyptus diversicolor* (*Karri* – 17.900 MPa). Conforme o USDA (1999), os testes foram realizados com madeiras a 12% de umidade e os valores relatados de massa específica básica são: 820 kg/m³ para o *Karri* (eucalipto) e 470 kg/m³ para o *Loblolly pine* (pinus). No mesmo capítulo encontram-se valores médios de coeficiente de variação para algumas propriedades mecânicas de madeiras livres de

defeitos, sendo que, para o MOE (flexão estática), o percentual apresentado é de 22%.

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* – 139 MPa) e *Pinus taeda* (*Loblolly pine* – 88 MPa), ambas a 12% de teor de umidade e com os valores de massa específica básica anteriormente citados. O valor médio do coeficiente de variação para o MOR, segundo o USDA (1999), para madeiras livres de defeitos, é de 16%.

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

Comparar valores de MOE e MOR nas duas posições de ensaio é assunto de interesse para uso estrutural, visto que, conforme observou Carvalho (2004), não há na bibliografia um padrão definido para o desempenho de painéis LVL ensaiados à flexão estática. Autores como Moody e Peters (1972), Kunesh (1978) e Hoover et al. (1987) apresentaram resultados em que a resistência e a rigidez foram superiores para a posição *flatwise*, embora essa tendência não tenha sido observada em todas as repetições. Já autores como Kretschmann et al. (1993) e Shupe et al. (1997) encontraram resultados superiores para a posição *edgewise*, na maioria das repetições e também nas médias finais dos tratamentos avaliados (CARVALHO, 2004; BORTOLETTO JÚNIOR, 2006). Lara Palma e Ballarin (2011) testaram LVL de *Eucalyptus grandis* e encontraram valores médios de resistência à flexão muito próximos nas duas posições estudadas (*flatwise* e *edgewise*).

As médias dos valores de MOE e MOR em flexão estática, verificadas para os tratamentos em estudo, estão comparadas na Tabela 5, para as duas posições de ensaio.

A comparação dos resultados para as duas posições de ensaio permite observar a tendência de valores de MOE e MOR mais elevados na posição *flatwise*; apenas o MOE do tratamento LVL3 apresentou valor mais alto na posição *edgewise*.

Entre os tratamentos mistos, as diferenças constatadas (Tabela 5) são maiores para LVL4 e LVL2, devido à forte influência do posicionamento das lâminas de eucalipto nas camadas externas que, em *flatwise*, proporcionaram ganho em rigidez e resistência. Em um processo “racionalizado”, a

TABELA 5: Médias de MOE e MOR em flexão estática nas posições *flatwise* e *edgewise*, diferenças de valores e percentuais das diferenças (base *edgewise*).

TABLE 5: Average values of MOE and MOR in static bending through *flatwise* and *edgewise* tests, differences of values and percentuals of differences (edgewise based).

	Flexão Estática							
	MOE (MPa)				MOR (MPa)			
	<i>Flatwise</i> (A)	<i>Edgewise</i> (B)	Diferença (A-B)	(%) [(A-B)/B]*100	<i>Flatwise</i> (A)	<i>Edgewise</i> (B)	Diferença (A-B)	(%) [(A-B)/B]*100
LVL1	22.385	20.014	2.371	11,85	168	132	36	27,27
LVL2	20.367	15.950	4.417	27,69	151	111	40	36,04
LVL3	16.384	17.340	- 956	- 5,51	139	121	18	14,88
LVL4	20.804	14.260	6.544	45,89	146	103	43	41,75
LVL5	16.489	15.784	705	4,47	131	117	14	11,97
LVL6	15.270	12.310	2.960	24,05	100	94	6	6,38

disposição de lâminas de melhor desempenho na capa e contracapa pode promover ganho significativo de resistência na flexão *flatwise* em relação à flexão *edgewise* (LARA PALMA e BALLARIN, 2011).

Para classificar os resultados alcançados pelos painéis LVL deste experimento, optou-se pela comparação dos valores obtidos com aqueles apresentados pela associação norte-americana “*APA – The Engineered Wood Association*”, relativos a sistemas de madeira engenheirada (*Engineered Wood Systems – EWS*), próprios para classificar LVL por desempenho (*Performance Rated LVL – PRL*), em específico, as classes de exigência do documento técnico APA/EWS PRL-501 (2001), que apresentam valores médios de rigidez e característicos de resistência. Cabe salientar que o uso deste documento já havia sido adotado por Bortoletto Júnior (2006) e Lara Palma e Ballarin (2011).

Segundo as exigências de desempenho do APA/EWS PRL-501 (2001), para rigidez e resistência, a classe mais alta indica valores médios de MOE acima de 14.479 MPa, tanto para *flatwise* como para *edgewise*, e valores característicos de MOR acima de 44,89 MPa para *flatwise* e, para *edgewise*, acima de 52,36 MPa; valores para peças LVL com altura menor que 3,5” e com teor de umidade menor que 16%.

Os valores médios de MOE na posição *flatwise* para todos os tratamentos, assim como na posição *edgewise* para LVL1, LVL2, LVL3 e LVL5, são admitidos na 1ª classe conforme o APA/EWS PRL-501 (2001). Entretanto, os valores médios de MOE na posição *edgewise* para LVL4 e LVL6 são

inferiores ao mínimo exigido para a 1ª classe e, por esse critério, LVL4 se enquadra na 2ª classe e LVL6 na 5ª classe do referido documento técnico.

Os valores característicos da resistência à flexão dos painéis LVL, para as duas posições de ensaio, foram estimados pelo uso das expressões preconizadas no item 6.4.7 da NBR 7190 (1997). Dessa forma, na condição-padrão de referência (umidade 12%), foram calculados os seguintes valores característicos de MOR: 109 MPa (LVL1), 98 MPa (LVL2), 90 MPa (LVL3), 95 MPa (LVL4), 85 MPa (LVL5) e 65 MPa (LVL6), em *flatwise*; e, 86 MPa (LVL1), 72 MPa (LVL2), 78 MPa (LVL3), 67 MPa (LVL4), 76 MPa (LVL5) e 61 MPa (LVL6), em *edgewise*. Constata-se que os valores característicos de MOR para os seis tratamentos LVL, tanto em *flatwise* como em *edgewise*, são admitidos na 1ª classe (de maior exigência) do APA/EWS PRL-501 (2001).

CONCLUSÕES

Na posição *flatwise*, todas as composições LVL testadas apresentaram valores de MOE e MOR que se enquadram na 1ª classe do documento técnico APA/EWS PRL-501 (2001). Para MOE e MOR, de modo geral, demonstraram maiores valores os painéis com lâminas de maior massa específica (eucalipto) nas camadas externas; o posicionamento dessas lâminas nas camadas intermediárias e de miolo não mostrou influência relevante nas composições mistas.

Na posição *edgewise*, apenas as composições LVL4 e LVL6 apresentaram valores

de MOE que não se incluem na 1ª classe do APA/EWS PRL-501 (2001). Com respeito ao MOR, todas as composições se enquadram na 1ª classe do referido documento. Para MOE e MOR, quando comparadas composições com mesma quantidade de lâminas de eucalipto, demonstraram maiores valores aquelas que continham essas lâminas nas camadas intermediárias.

Os arranjos com os dois tipos de madeira entremeados mostraram-se promissores e confiáveis. As composições LVL2 e LVL5, com lâminas intercaladas de eucalipto e pinus, demonstraram altos desempenhos (de 1ª classe) e baixos coeficientes de variação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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.
- APA/EWS. The Engineered Wood Association/Engineered Wood Systems. **PRL-501**: Performance standard for APA/EWS Laminated Veneer Lumber. Engineered Wood Systems, Tacoma, 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.
- BODIG, J.; JAYNE, B. A. **Mechanics of wood and composites**. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1982. 712 p.
- BORTOLETTO JÚNIOR, G. **Produção de lâminas, compensado e laminated veneer lumber – LVL a partir da madeira de *Pinus merkusii***. 2006, 97 f. Tese (Livre-Docência em Ciências Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.
- 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, 2004.
- HEXION. **Boletim Técnico CASCOPHEN HL-2080**. Resina fenólica líquida para colagens à prova d’água. DOC 55, Emissão B, Rev. 5, 2006. 4 p.
- 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.
- KRETSCHMANN, D. E. et al. Effect of various proportions of juvenile wood on laminated veneer lumber. **USDA. Forest Service. Research Paper, FPL-521**. Forest Products Laboratory, Madison, p.1-31. 1993.
- KUNESH, R. H. Micro-lam structural laminated veneer lumber. **Forest Products Journal**, Madison, v. 28, n. 7, p. 41-44, 1978.
- LARA PALMA, H. A.; BALLARIN, A. W. Propriedades físicas e mecânicas de painéis LVL de *Eucalyptus grandis*. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 21, n. 3, p. 559-566, 2011.
- 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, 1997.
- MOODY, R. C.; PETERS, C. C. Strength properties of rotary knife-cut laminated southern pine. **USDA. Forest Service. Research Paper, FPL-178**. Forest Products Laboratory, Madison, 1972.
- MORESCHI, J. C. **Propriedades Tecnológicas da Madeira**. 4. ed. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2012. 192 p.
- MÜLLER, M. T. **Influência de diferentes combinações de lâminas de *Eucalyptus saligna* e *Pinus taeda* em painéis estruturais LVL**. 2009, 164 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.
- RAUTE ENGINEERED WOOD. **Tecnologia de LVL**: vigas de chapas laminadas. Santiago: Raute

Wood, 1980. não paginado.

SMULSKY, S. (ed.). **Engineered Wood Products:** a guide for specifiers, designers and users. Forest Products Society, FPS Research Foundation, Madison, 1997.

SHUPE, T. F. et al. 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.

TAMMELA, I. Laminated veneer lumber

(LVL) manufacturing. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL SOBRE PRODUTOS SÓLIDOS DE MADEIRA DE ALTA TECNOLOGIA, 1., 1998, Belo Horizonte. **Anais...** Viçosa: SIF/UFV/DEF, 1998, p. 162-168.

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.