Efeito da espécie e formulação do adesivo nas propriedades de painéis
LVL de *Eucalyptus dunnii*, *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus urograndis*Effect of species and adhesive formulation in the laminated veneer lumber
(LVL) OF *Eucalyptus dunnii*, *Eucalyptus saligna* and *Eucalyptus urograndis*Rosilani Trianoski¹, Setsuo Iwakiri², Erick Kuschik Karam Guerra³ e Sandra Kazmierczak⁴**Resumo**

O objetivo deste trabalho foi avaliar as propriedades de painéis de lâminas paralelas produzidos com diferentes espécies de *Eucalyptus* e formulações de adesivo fenol-formaldeído. As espécies utilizadas foram o *Eucalyptus dunnii*, *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus urograndis*, provenientes de plantio florestal localizado em Bituruna-PR, e as formulações do adesivo foram preparadas para teores de sólidos de 47% (A), 45% (B), 36% (C) e 29% (D). O plano experimental consistiu num delineamento inteiramente casualizado em arranjo fatorial (3x4), sendo três espécies e quatro formulações, totalizando 12 tratamentos. Os resultados indicaram que todas as espécies possuem potencial para a produção de painéis de lâminas paralelas, com destaque para o *E. saligna*. Em relação às diferentes formulações, constatou-se que a redução do teor de sólidos das batidas de cola não diminuiu a resistência mecânica acentuadamente, permitindo desta forma, maximizar os custos produtivos com adesivo.

Palavras-chave: Lâminas de madeira, adesivo fenol-formaldeído, qualidade de colagem.

Abstract

The objective of this study was to evaluate the properties of laminated veneer lumber produced with different species of *Eucalyptus* and phenol-formaldehyde adhesive formulations. The species used were *Eucalyptus dunnii*, *Eucalyptus saligna* and *Eucalyptus urograndis*, collected from forest plantation located in Bituruna-PR and the adhesive formulations were prepared at solids contents of 47% (A), 45% (B), 36% (C) and 29% (D). The experimental design consisted of a completely randomized design in a factorial arrangement (3x4), being three species and four formulations, totaling 12 treatments. The results indicated that all species have potential for the production of laminated veneer lumber, especially the *E. saligna*. Regarding the different formulations, it was found that the reduction of the solids content of the glue beats did not decrease the mechanical resistance, thus, allowing to maximize the production costs with adhesive.

Keywords: Wood veneer, phenol formaldehyde adhesive, bonding quality.

INTRODUÇÃO

A área ocupada por florestas plantadas no Brasil é de 7,076 milhões de hectares (FSC, 2017), volume que responde por 91% de toda a madeira produzida para fins industriais no país. As florestas plantadas são constituídas principalmente pelos gêneros *Pinus* e *Eucalyptus*, sendo que as espécies de *Eucalyptus* somam cerca de 5,6 milhões de hectares, o que representa 71,9% do total, e estão localizadas principalmente nos estados de Minas Gerais (24%), São Paulo (17%) e Mato Grosso do Sul (15%) (IBÁ, 2016). Ainda de acordo com IBA (2016), as principais utilizações da madeira proveniente destas florestas são carvão e lenha industrial (46,2%), celulose e papel (43,4%), madeira serrada (4,4%), painéis reconstituídos (4,0%), e outros (2,0%).

Dentre as utilizações citadas, os painéis reconstituídos apresentam elevada importância já que possuem múltiplas aplicações em diferentes setores, como na indústria moveleira, construção civil, decoração, embalagens, entre outros. Entre os diferentes tipos de painéis reconstituídos, destacam-se

¹Professora Adjunta do Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal. UFPR – Universidade Federal do Paraná. Av. Lothário Meissner 632 - Jardim Botânico -80210170 - Curitiba, PR – Brasil. E-mail: rosillani@gmail.com.

²Professor Titular do Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal. UFPR – Universidade Federal do Paraná. Av. Lothário Meissner 632 - Jardim Botânico -80210170 - Curitiba, PR – Brasil. E-mail: setsuo.ufpr@gmail.com.

³Graduando em Engenharia Industrial Madeireira. UFPR – Universidade Federal do Paraná. Av. Lothário Meissner 632 - Jardim Botânico -80210170 - Curitiba, PR – Brasil. E-mail: erickguerra33@gmail.com.

⁴Mestrado em Ciências Florestais. UNICENTRO - R. Salvatore Renna, 875 - Santa Cruz, Guarapuava - PR, 85015-430. E-mail: sandraferencz@yahoo.com.br.

os painéis de fibras de média densidade (MDF), painéis de partículas de média densidade (MDP), painéis de partículas orientadas (OSB), painéis de colagem lateral (EGP), painéis compensados e painéis de lâminas paralelas (LVL).

Os painéis de lâminas paralelas (LVL - *Laminated Veneer Lumber*), foram desenvolvidos nos Estados Unidos no início dos anos 70 (VLOSKY et al., 1994), passando a ser amplamente conhecidos e utilizados a partir dos anos de 1980 na América do Norte, Europa (especialmente na Escandinávia), e no Extremo Oriente (KURT, 2010). Já no Brasil, sua produção e utilização são ainda muito incipientes (IWAKIRI et al., 2016).

É definido como um composto multilaminado estrutural, onde as lâminas são orientadas ou dispostas no sentido longitudinal da peça e coladas entre si com adesivos sintéticos (ASTM 2001; BALDWIN, 1995; BURDURLU et al., 2007; ECKELMAN, 1993; KILIÇ, 2011; KURT, 2010; SULAIMAN et al., 2009). Possui como vantagens a eliminação dos atributos negativos da madeira sólida decorrentes de quaisquer fatores externos ou de estrutura genética (KILIÇ, 2011), gera peças de grandes dimensões com estrutura homogênea, evitando o ponto mais fraco da peça (BAL; BEKTAS, 2012), apresenta propriedades mecânicas superiores quando comparado com a madeira sólida (BAL; BEKTAS, 2012; BURDURLU et al., 2007), é dimensionalmente estável (ÇOLAK et al., 2004; TENÓRIO et al., 2011), pode ser produzido pelo uso de madeira de baixa qualidade a partir do processo de laminação gerando um componente de melhor qualidade (ECKELMAN, 1993; BURDURLU et al., 2007), apresenta melhor distribuição das tensões, baixo consumo de energia no seu processamento, é biodegradável (TENÓRIO et al., 2011), possui previsibilidade de desempenho e maior rendimento quando comparado com a madeira serrada (NELSON, 1997).

Os painéis LVL são extensivamente utilizados como material de construção (OZARSKA, 1999), a partir de elementos ou componentes como vigas, caibros, andaimes e treliças, etc (NELSON, 1997; ÇOLAK et al., 2007) em construções residenciais, construções não residenciais como escolas, restaurantes, lojas e armazéns, de reparação e remodelação de casas (PAHKASALO; GASTON, 2011), e móveis (ECKELMAN, 1993).

Muitos são os fatores que afetam as propriedades dos painéis LVL, podendo-se destacar a espécie, a qualidade da madeira, a espessura das lâminas e do produto final, o tipo de adesivo, entre outros (BURDURLU et al., 2007; KURT, 2010; TENÓRIO et al., 2011).

Em geral, o LVL é produzido a partir de madeiras de baixa a média densidade (0,29 a 0,69 g/cm³), e as espécies mais usadas para esta finalidade são o *Populus tremuloides*, *Populus balsamifera*, *Liriodendron tulipifera*, *Acacia mangium*, *Gmelina arborea*, *Albizia falcata*, algumas espécies de *Eucalyptus* (OZARSKA, 1999), *Pinus sylvestris* (ÇOLAK et al., 2004), Douglas fir, Southern pine, Spruce e Poplar (BAL, 2014).

As toras passam pelo processo de laminação sendo que as lâminas destinadas à produção do LVL não podem exceder 6,4 mm (ASTM 2001), mas normalmente a produção comercial deste painel emprega lâminas com 3,2 mm de espessura (WALKER, 1993) ou espessuras variando de 2,5 a 3,5 mm (LAUFENBERG, 1993). Segundo Daoui et al. (2011), muitas pesquisas avaliando a influência da espessura das lâminas sobre a redução do consumo de adesivo, sem contudo prejudicar a resistência mecânica, foram desenvolvidas na América do Norte no período de ajustes do LVL para produção em escala industrial. Geralmente, o aumento da espessura das lâminas proporciona uma redução da resistência mecânica nos painéis (KILIÇ et al., 2006; YOUNGQUIST et al., 1984). Já a espessura do produto final varia de 19 a 75 mm, a largura de 100 a 1200 mm, e o comprimento pode chegar até 25 m (WALKER, 1993).

Os principais adesivos utilizados na produção dos painéis LVL são a uréia-formaldeído, a melamina-uréia-formaldeído, o fenol-formaldeído e a resorcina-fenol-formaldeído (BAL; BEKTAS, 2012; ÇOLAK et al., 2004; SULAIMAN et al., 2009). Kol et al. (2010) reforçam que os mais empregados são o fenol-formaldeído, consumido em maior escala, e em menor escala, a resorcina-fenol-formaldeído. Estes adesivos se destacam por apresentarem propriedades como elevada resistência à umidade, durabilidade e resistência ao ataque de microrganismos, gerando produtos colados mais duráveis e para aplicação em condições exteriores (SKEIST, 1990).

Além da importância da correta seleção do adesivo para produtos em diferentes condições de usos, é importante avaliar a formulação da batida de cola. Segundo Baldwin (1995), a formulação da batida de cola influencia diretamente na qualidade da colagem e, ao mesmo tempo, no custo de produção. Para este mesmo autor, a densidade da madeira é um importante fator na definição deste

parâmetro, tendo em vista as interações que ocorrem entre a porosidade da madeira e a absorção do adesivo na formação da ligação adesiva entre as lâminas. Em complemento, Marra (1992) relata que madeiras de baixa densidade absorvem maior quantidade de adesivo, devido à sua maior porosidade, de modo que a viscosidade do adesivo deve ser aumentada, para evitar a formação da linha de cola "faminta".

Neste contexto, considerando a importância de estudos relacionados à produção de painéis de lâminas paralelas (LVL) no Brasil, este trabalho tem como objetivo avaliar as propriedades de painéis de lâminas paralelas produzidos com *E. dunnii*, *E. saligna* e *E. urograndis* a partir de quatro formulações do adesivo fenol-formaldeído.

MATERIAL E MÉTODOS

Para a realização desta pesquisa foram utilizadas madeira de *Eucalyptus dunnii*, *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus urograndis*, provenientes de plantios florestais localizados na região Centro-Sul do estado do Paraná, com idades de 20, 19 e 12 anos e diâmetros na altura do peito (DAP) de 17,8 cm, 17,3 cm e 16,4 cm, respectivamente. As árvores amostradas foram abatidas, seccionadas com comprimento de 1,85 m, e transportadas até Bituruna-PR para serem submetidas ao processo de laminação, sendo laminadas 4 toras por espécie. Das extremidades de cada tora foram retirados discos, com 5 cm de espessura, para determinação da massa específica básica da madeira, a qual foi realizada de acordo com a norma NBR 7190:1997.

As toras de *E. dunnii* foram aquecidas pelo processo de vaporização com temperatura de 70-80 °C por 12 horas, para aliviar as tensões de crescimento e facilitar o processo de laminação. Já as toras de *E. urograndis* e *E. saligna* não foram submetidas ao processo de aquecimento, sendo laminadas logo após ao corte e traçamento (1,75 m).

A laminação das toras ocorreu em torno laminador industrial (Thoms Benato), com ângulo de afiação da faca de 21 °, ângulo da faca de 90° e espessura nominal das lâminas de 2,2 mm. As lâminas foram guilhotinadas, secas até 6-8% de umidade (base seca), e posteriormente seccionadas em dimensões de 50 x 50 cm para a produção dos painéis experimentais. Todas as lâminas utilizadas foram pesadas e medidas para a determinação da massa específica aparente (método estereométrico).

Os painéis unidirecionais foram produzidos com espessura nominal de 10 mm (5 lâminas), adesivo fenol formaldeído (teor de sólidos de 51,57%, viscosidade de 503 cP e pH de 12,66), e de acordo com o delineamento experimental apresentado na Tabela 1, totalizando 36 painéis, sendo 3 espécies, 4 formulações de adesivo e 3 painéis por tratamento.

Tabela 1. Delineamento experimental da produção dos painéis de lâminas paralelas (LVL).

Table 1. Experimental design of laminated veneer lumber production (LVL).

Tratamento	Espécie	Formulação	TSbc (%)	Vbc (s)
1	<i>E. dunnii</i>	A (FF=100 pp, CC=10 pp)	47	50
2	<i>E. saligna</i>			
3	<i>E. urograndis</i>			
4	<i>E. dunnii</i>	B (FF=100 pp, A=5 pp, T=5 pp, CC=5 pp)	45	64
5	<i>E. saligna</i>			
6	<i>E. urograndis</i>			
7	<i>E. dunnii</i>	C (FF=100 pp, A=15 pp, T=15 pp, CC=15 pp)	36	67
8	<i>E. saligna</i>			
9	<i>E. urograndis</i>			
10	<i>E. dunnii</i>	D (Ff=100 pp, A=25 pp, T=25 pp, CC=25 pp)	29	187
11	<i>E. saligna</i>			
12	<i>E. urograndis</i>			

TSbc e Vbc: Teor de sólidos e viscosidade da batida de cola; FF: adesivo fenol-formaldeído; A: água; T: trigo; CC: casca de coco.

Após pareamento das lâminas para cada painel/tratamento, as lâminas que apresentavam pequenos defeitos (leves trincas ou rachaduras) foram depositadas nas camadas mais internas (miolo) durante a montagem do painel. A gramatura utilizada em todas as formulações foi de 180 g/m² (linha simples) e o tempo de montagem foi de 40 minutos. Os painéis foram prensados com temperatura de 160 °C, pressão específica de 1 MPa, e tempo de prensagem de 10 minutos. Após a

prensagem, os painéis foram acondicionados em câmara climática com condições ambientais de 20 ± 2 °C e $65 \pm 5\%$ de umidade relativa até a obtenção de umidade de equilíbrio, e seccionados para a confecção dos corpos de prova.

As propriedades avaliadas foram a massa específica aparente (EN 323:2002 – EN, 2002a), flexão estática nos sentidos *Flatwise* e *Edgewise* (EN 310:2002 – EN 2002b), e cisalhamento da linha de cola (EN 314:2002 – EN, 2002c). Os resultados foram analisados por meio dos testes de Grubs, Shapiro Wilks, Bartlett, e Análise de variância em arranjo fatorial (3×4 , sendo 3 espécies e 4 formulações). Quando identificada diferença estatística significativa, foi realizada a comparação de médias por meio do teste de Tukey. Todos os testes foram realizados no pacote estatístico Statgraphics Centurion XV, a 95% de confiabilidade.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Massa específica da madeira

Os valores médios da massa específica básica variaram de $0,490 \text{ g/cm}^3$ a $0,590 \text{ g/cm}^3$, sendo que o *E. dunnii* e o *E. saligna* apresentaram-se estatisticamente iguais entre si e superiores em relação ao *E. urograndis*. Apesar da ocorrência de diferença estatística significativa, tais resultados mostram que as três espécies de *Eucalyptus* são adequadas para a produção de lâminas, tendo em vista as informações de Walker (1993), que relata que as espécies adequadas para esta finalidade possuem massa específica básica entre $0,38 \text{ g/cm}^3$ a $0,70 \text{ g/cm}^3$, com preferência para aquelas com $0,50 \text{ g/cm}^3$.

Os valores médios da massa específica aparente das lâminas variaram de $0,575 \text{ g/cm}^3$ a $0,818 \text{ g/cm}^3$, sendo constatadas diferenças estatísticas significativas entre todas as espécies. O *E. saligna* apresentou o maior valor médio e o *E. urograndis* o menor valor médio de massa específica aparente. Valores similares de massa específica aparente foram encontrados por Iwakiri et al. (2016), a partir de 6 diferentes espécies de *Eucalyptus*.

Tabela 2. Resultados médios da massa específica básica da madeira e da massa específica aparente das lâminas de *Eucalyptus*.

Table 2. Average values of wood density and veneers specific gravity of *Eucalyptus*.

Espécies	Massa específica básica da madeira (g/cm^3)	Massa específica aparente das lâminas (g/cm^3)
<i>Eucalyptus dunnii</i>	0,590 a (2,94)	0,683 b (7,50)
<i>Eucalyptus saligna</i>	0,563 a (2,71)	0,818 a (9,98)
<i>Eucalyptus urograndis</i>	0,490 b (2,04)	0,575 c (11,98)

Médias seguidas de mesma letra na mesma coluna são estatisticamente iguais pelo teste de Tukey a 95% de confiabilidade. Valores entre parênteses referem-se ao coeficiente de variação em percentual.

Massa específica aparente dos painéis LVL

Na Tabela 3 estão apresentados os resultados médios da massa específica aparente dos painéis para diferentes espécies e formulações da batida de cola.

Os painéis produzidos com a espécie *E. saligna* e formulação B apresentaram maior valor médio ($0,891 \text{ g/cm}^3$), sendo estatisticamente superior em relação aos demais tratamentos. Em contrapartida, a menor massa específica média foi encontrada para os painéis produzidos com o *E. urograndis* e formulação A, sendo este, estatisticamente inferior aos demais tratamentos.

Com relação ao efeito da espécie, os painéis de *E. saligna* apresentaram valores médios de massa específica aparente estatisticamente superior em comparação às demais espécies, e os painéis de *E. urograndis* com massa específica estatisticamente inferior às outras duas espécies. Este resultado pode ser explicado pelo reflexo direto da massa específica da madeira e das lâminas, apresentadas na Tabela 2. Observou-se ainda, que os painéis apresentaram massa específica ligeiramente superior quando comparados com a massa específica das lâminas, fato que pode ser justificado pela compressão e densificação da madeira durante a prensagem, e pela inclusão do adesivo.

Para a variável formulação, foram constatadas diferenças estatísticas significativas apenas entre as formulações A e B, respectivamente com o menor e maior valor. Com base nestes resultados, pode-se afirmar que o fator espécie afetou mais a massa específica dos painéis do que o fator formulação.

De maneira geral, os valores obtidos para a massa específica aparente dos painéis apresentaram resultados compatíveis com a literatura, sendo similares, por exemplo, com os resultados obtidos por Iwakiri et al. (2016), a partir de diferentes espécies de *Eucalyptus*.

Tabela 3. Resultados médios da massa específica aparente dos painéis LVL por tratamento, espécie e formulação.
Table 3. Average results of apparent density of LVL for treatments, species and formulation.

Tratamento	MEap (g/cm3)	Espécie	MEap (g/cm³)	Formulação	MEap (g/cm³)
<i>E. dunnii</i> - A	0,698 de (4,62)	<i>E. dunnii</i>	0,711 b (5,45)	A	0,715 b (12,31)
<i>E. dunnii</i> - B	0,735 d (6,02)				
<i>E. dunnii</i> - C	0,707 d (4,81)				
<i>E. dunnii</i> - D	0,701 de (4,66)			B	0,761 a (12,98)
<i>E. saligna</i> - A	0,804 c (4,66)				
<i>E. saligna</i> - B	0,891 a (5,06)				
<i>E. saligna</i> - C	0,838 b (4,21)				
<i>E. saligna</i> - D	0,837 b (3,41)	<i>E. saligna</i>	0,839 a (5,71)	C	0,745 ab (11,45)
<i>E. urograndis</i> - A	0,621 g (8,55)				
<i>E. urograndis</i> - B	0,672 ef (2,96)				
<i>E. urograndis</i> - C	0,658 f (5,96)			D	0,742 ab (11,00)
<i>E. urograndis</i> - D	0,657 f (2,64)				

MEap: Massa específica aparente média por variável; Médias seguidas de mesma letra na mesma coluna são estatisticamente iguais pelo teste de Tukey a 95% de confiabilidade. Valores entre parênteses referem-se ao coeficiente de variação em percentual.

Flexão estática

Na Tabela 4 são apresentados os valores médios do módulo de ruptura e do módulo de elasticidade à flexão estática nos sentidos *Flatwise* e *Edgewise*.

Tabela 4. Resultados médios de módulos de ruptura e de elasticidade dos painéis LVL nos sentidos *flatwise* e *edgewise*.
Table 4. Average values of modulus of rupture and elasticity of LVL in the *flatwise* and *edgewise* direction.

Tratamento	Módulo de Ruptura (MPa)		Módulo de Elasticidade (MPa)	
	<i>Flatwise</i>	<i>Edgewise</i>	<i>Flatwise</i>	<i>Edgewise</i>
<i>E. dunnii</i> - A	101 d (42,34)	102 cde (14,31)	12.902 cd (22,05)	13.481 def (10,90)
<i>E. dunnii</i> - B	116 d (22,17)	115 bc (11,24)	13.934 cd (11,30)	15.101 c (8,18)
<i>E. dunnii</i> - C	128 cd (11,20)	106 cde (10,41)	14.490 c (10,93)	13.886 cdef (6,82)
<i>E. dunnii</i> - D	111 d (17,80)	94 e (11,39)	13.913 cd (11,16)	12.889 ef (9,16)
<i>E. saligna</i> - A	147 bc (27,70)	124 ab (12,84)	18.606 b (10,66)	17.651 b (6,46)
<i>E. saligna</i> - B	190 a (11,37)	136 a (13,00)	21.892 a (6,45)	19.704 a (6,96)
<i>E. saligna</i> - C	166 ab (22,20)	123 ab (9,74)	19.734 ab (13,74)	18.432 ab (8,37)
<i>E. saligna</i> - D	154 bc (12,71)	123 ab (12,20)	19.628 b (5,54)	17.507 b (10,63)
<i>E. urograndis</i> - A	101 d (31,17)	98 de (12,26)	13.296 cd (15,53)	14.227 cde (10,16)
<i>E. urograndis</i> - B	112 d (12,91)	108 cd (8,23)	13.102 cd (5,74)	14.731 cd (6,49)
<i>E. urograndis</i> - C	121 cd (19,03)	95 de (14,65)	14.722 c (5,96)	13.774 cdef (4,28)
<i>E. urograndis</i> - D	100 d (13,24)	91 e (11,28)	12.152 d (8,07)	12.749 f (5,71)

Médias seguidas de mesma letra na mesma coluna são estatisticamente iguais pelo teste de Tukey a 95% de confiabilidade. Valores entre parênteses referem-se ao coeficiente de variação em percentual.

O tratamento que apresentou o maior módulo de ruptura no sentido *Flatwise* foi produzido com a espécie *E. saligna* e formulação B, sendo este, estatisticamente igual ao tratamento produzido com a mesma espécie e formulação C. Já os menores valores de MOR neste sentido foram observados em todos os tratamentos produzidos com as espécies *E. dunnii* e *E. urograndis*, sendo estes estatisticamente iguais entre si.

Em relação ao sentido *Edgewise*, todos os tratamentos produzidos com a espécie *E. saligna*, independente da formulação utilizada, apresentaram os maiores valores de MOR, sendo estatisticamente iguais entre si. Os tratamentos produzidos com a espécie *E. dunnii* e *E. urograndis* e formulações A, C e D, apresentaram menor desempenho em relação ao MOR, os quais não se diferenciaram estatisticamente.

Para o módulo de elasticidade, os tratamentos produzidos com *E. saligna* e formulações B e C apresentaram maior rigidez, sendo estatisticamente iguais entre si em ambos os sentidos. Já os menores valores, em termos de médias absolutas, para ambos os sentidos de ensaio, foram observados para *E. urograndis* colado com a formulação D.

De maneira geral, o tratamento que apresentou o melhor desempenho quanto ao MOR e MOE foi o tratamento produzido com o *E. saligna* e formulação B, resultado decorrente das características da própria espécie, como por exemplo a massa específica das lâminas, bem como da formulação, que possui o segundo maior teor de sólidos entre as formulações estudadas.

Os resultados de MOR e MOE obtidos nesta pesquisa são compatíveis aos de Burdurlu et al. (2007), que avaliando diferentes composições do LVL com laminas das espécies *Fagus orientalis* e *Populus nigra* obtiveram valores para os módulos de ruptura e elasticidade de 65 a 152 MPa, e de 5.750 a 13.235 MPa, respectivamente, e aos de Iwakiri et al. (2016), que avaliando 6 espécies de *Eucalyptus* obtiveram MOR na faixa de 86 a 177 MPa e MOE entre 13.193 a 24.148 MPa. Os resultados assemelham-se também aos estudos de Wang e Dai (2005) que estudando a produção de LVL a partir de *Populus tremuloides* encontraram MOR entre 66 a 90 MPa e MOE entre 12.621 a 16.621 MPa, bem como maiores resultados para estas propriedades no sentido *Flatwise*.

Na Tabela 5 podem ser visualizados os efeitos da espécie e da formulação sobre os módulos de ruptura e elasticidade à flexão estática.

Tabela 5. Efeitos da espécie e formulação do adesivo sobre os módulos de ruptura e de elasticidade dos painéis LVL.
Table 5. Effects of the species and adhesive formulation on the modulus of rupture and elasticity of LVL.

Fator	Módulo de Ruptura (MPa)		Módulo de Elasticidade (MPa)	
	<i>Flatwise</i>	<i>Edgewise</i>	<i>Flatwise</i>	<i>Edgewise</i>
Espécie				
<i>E. dunnii</i>	114 b (25,19)	104 b (13,82)	13.826 b (14,28)	13.814 b (10,62)
<i>E. saligna</i>	162 a (21,88)	126 a (12,65)	19.772 a (11,16)	18.282 a (9,31)
<i>E. urograndis</i>	108 b (21,70)	99 b (12,85)	13.272 b (11,50)	14.010 b (8,84)
Formulação				
A	121 b (36,78)	108 b (16,96)	15.416 a (22,95)	15.235 b (15,03)
B	137 ab (29,69)	119 a (15,00)	15.964 a (25,61)	16.483 a (15,53)
C	142 a (24,00)	110 b (15,34)	16.623 a (19,31)	15.628 ab (16,26)
D	125 ab (24,01)	105 b (18,24)	15.566 a (22,15)	14.619 b (18,31)

Médias seguidas de mesma letra na mesma coluna são estatisticamente iguais pelo teste de Tukey a 95% de confiabilidade. Valores entre parênteses referem-se ao coeficiente de variação em percentual.

A análise do fator espécie demonstrou que o *E. saligna* apresentou os maiores valores médios de MOR e MOE, tanto no sentido de ensaio *Flatwise*, quanto no *Edgewise*, sendo estatisticamente superiores às demais espécies. Entre o *E. dunnii* e o *E. urograndis* não foram constatadas diferenças estatísticas significativas.

Os melhores resultados nos ensaios de flexão estática obtidos para os painéis LVL de *E. saligna* pode ser atribuído a sua massa específica, que é superior em relação à massa específica das outras duas espécies.

Em relação ao fator formulação, os valores médios de MOR no sentido *Flatwise* obtidos para os painéis produzidos com as formulações B, C e D mostraram-se estatisticamente iguais entre si, e a formulação A, mostrou-se estatisticamente inferior apenas em relação à formulação C. Já para o sentido *Edgewise*, a formulação B apresentou resistência superior às demais. Os valores médios do MOE demonstraram que a formulação não afetou significativamente a rigidez dos painéis no sentido *Flatwise*. Já no sentido *Edgewise*, a formulação B destacou-se, juntamente com a formulação C. Não foi constatada diferença estatística significativa entre as formulações A, C e D para este último sentido mencionado.

Mesmo com a expectativa de que a formulação com maior teor de sólidos apresente os melhores resultados, este fato não foi observado no ensaio de flexão estática do presente experimento, já que a formulação A com maior teor de sólidos (47%) não contribuiu para o aumento nos valores de MOR e MOE dos painéis testados. No entanto, este resultado pode ser aceito sem maiores problemas, já que no ensaio de flexão estática a qualidade das lâminas normalmente exerce mais efeito que variações na formulação do adesivo.

Resultado similar foi encontrado por Iwakiri et al. (2016), que avaliando duas diferentes formulações de adesivo em painéis LVL, também não constataram tendências de aumento dos MOR e MOE com o aumento do teor de sólidos. Portanto, estes resultados indicam que o aumento no teor de sólidos da batida de cola não exerceu grandes efeitos sobre a resistência e a rigidez neste estudo, sendo um indicativo da possibilidade de redução no custo do adesivo sem afetar a qualidade dos painéis.

Na Tabela 6 podem ser visualizados os efeitos do sentido de ensaios nos resultados dos módulos de ruptura e elasticidade à flexão estática.

Tabela 6. Influência da direção de ensaios nos resultados de módulos de ruptura e elasticidade dos painéis LVL.
Table 6. Influence of testing direction in the results of modulus of rupture and elasticity of LVL.

Sentido	Massa específica (g/cm ³)	Módulo de ruptura (MPa)	Módulo de elasticidade (MPa)
<i>Flatwise</i>	0,738 a (12,83)	130 a (19,75)	15.954 a (22,00)
<i>Edgewise</i>	0,741 a (11,63)	111 b (16,99)	15.502 a (16,68)

Médias seguidas de mesma letra na mesma coluna são estatisticamente iguais pelo teste de Tukey a 95% de confiabilidade. Valores entre parênteses referem-se ao coeficiente de variação em percentual.

O valor médio do MOR no sentido de ensaios *Flatwise* foi estatisticamente superior em comparação ao valor obtido para o sentido *Edgewise*. Já para o MOE, não foi constatada diferença significativa entre os dois sentidos de ensaios.

Estes resultados possivelmente estão associados à inserção das lâminas de melhor qualidade na capa e contra-capas e das lâminas com pequenas rachaduras ou trincas no miolo do painel durante a sua montagem, os quais são corroborados pelos relatos de Lara Palma e Ballarin (2011), que mencionam que o desempenho em flexão estática na posição *Flatwise* é mais sensível à qualidade das lâminas quando comparado ao *Edgewise*.

Resistência ao Cisalhamento da linha de cola

Na Tabela 7 estão apresentados os resultados médios da qualidade de colagem dos painéis LVL produzidos com as diferentes espécies de *Eucalyptus* e formulações da batida de cola.

O melhor resultado da resistência da linha de cola no ensaio a seco foi evidenciado a partir do tratamento produzido com a espécie *E. saligna* e formulações C, sendo este, estatisticamente igual aos painéis produzidos com a mesma espécie e formulações A e B. Exceto estes três tratamentos, todos os demais formaram um grupo inferior de resistência.

Após os pré-tratamentos de ciclo de fervura e fervura por 72 h, novamente foi observada a tendência dos tratamentos produzidos com a espécie *E. saligna* e formulações A, B e C apresentarem os melhores resultados. Por outro lado, o resultado menos expressivo no ensaio de ciclo de fervura foi observado para o tratamento produzido com *E. dunnii* e formulação C, este estatisticamente igual aos tratamentos produzidos com esta mesma espécie e formulações A e D, e com a espécie *E. urugrandis* e formulações C e D. Já no pré-tratamento de fervura, o menor desempenho foi observado para os painéis produzidos com o *E. dunnii* e formulações C, o qual não diferiu dos painéis produzidos com esta mesma espécie e formulação D.

Tabela 7. Resultados médios da resistência ao cisalhamento dos painéis LVL.

Table 7. Average results of shear strength of LVL.

Tratamento	Resistência ao Cisalhamento					
	Seco (MPa)	Falha (%)	Ciclo (MPa)	Falha (%)	Fervura (MPa)	Falha (%)
<i>E. dunnii</i> - A	2,19 d (24,17)	13	1,45 def (31,63)	5	1,60 cd (16,95)	10
<i>E. dunnii</i> - B	2,85 bcd (27,84)	43	1,89 cd (27,28)	18	1,73 bcd (29,30)	36
<i>E. dunnii</i> - C	2,60 cd (27,32)	53	1,17 f (26,54)	23	1,17 e (19,95)	29
<i>E. dunnii</i> - D	2,63 cd (27,32)	35	1,30 ef (48,55)	15	1,29 de (27,57)	38
<i>E. saligna</i> - A	3,33 abc (19,86)	51	2,48 ab (18,79)	46	2,34 a (21,51)	47
<i>E. saligna</i> - B	3,64 ab (18,61)	30	2,35 abc (16,99)	22	2,21 abc (17,55)	31
<i>E. saligna</i> - C	3,82 a (22,57)	75	2,74 a (21,29)	46	2,28 ab (25,47)	52
<i>E. saligna</i> - D	2,91 bcd (21,91)	55	1,84 cde (27,67)	34	1,81 bcd (30,94)	43
<i>E. urograndis</i> - A	2,40 d (18,75)	55	1,88 cd (14,57)	47	1,90 bc (20,66)	69
<i>E. urograndis</i> - B	2,81 bcd (9,94)	61	2,04 bcd (13,95)	44	1,89 bc (17,03)	79
<i>E. urograndis</i> - C	2,63 cd (19,33)	63	1,74 cdef (18,86)	65	1,74 bcd (15,77)	73
<i>E. urograndis</i> - D	2,85 bcd (24,93)	61	1,47 def (18,86)	42	1,70 bcd (17,59)	52

Ciclo: Ciclo de fervura; Fervura: 72h; Falha: Falha da madeira; Médias seguidas de mesma letra na mesma coluna são estatisticamente iguais pelo teste de Tukey a 95% de confiabilidade. Valores entre parênteses referem-se ao coeficiente de variação em percentual.

Embora tenha sido constatada diferença estatística significativa entre os diferentes tratamentos nas diferentes condições de ensaio, verificou-se que todos atenderam o requisito mínimo sugerido pela norma EN 314 (1 MPa) (EN, 2004), indicando com isso, que é possível maximizar a produção e minimizar os custos com adesivo, sem contudo, gerar produtos não conformes.

Em comparação com a literatura, os resultados assemelham-se aos valores encontrados por Iwakiri et al. (2016), que obtiveram resistência ao cisalhamento de 2,45 a 3,77 MPa, e de 0,97 a 1,92 MPa, respectivamente para ensaios seco e fervura 72h em espécies de *Eucalyptus*, e inferiores aos de Lima et al. (2013), que encontraram a partir de diferentes espécies de madeiras tropicais valores de 4,04 a 5,17 MPa no ensaio seco, e de 3,04 a 3,54 MPa após fervura, resultado este que pode ser explicado pela utilização do adesivo resorcinol-formaldeído pelos últimos autores citados. Na Tabela 8 pode ser visualizada a influência dos fatores espécie e formulação sobre a qualidade de colagem dos painéis LVL.

A espécie *E. saligna* apresentou os maiores valores médios de resistência ao cisalhamento, sendo estatisticamente superior às outras duas espécies em todas as condições de ensaio. O *E. dunnii* mostrou-se, de maneira geral, a espécie com menor qualidade de colagem, sendo estatisticamente inferior ao *E. urograndis* nos ensaios de ciclo de fervura e fervura 72h.

Os menores resultados apresentados pela espécie *E. dunnii* podem estar associados a qualidade de sua madeira. De acordo com Braz (2014) e Rocha (2000), esta espécie apresenta elevada anisotropia de contração, uma das maiores em espécies de *Eucalyptus*, sendo considerada uma madeira muito instável. Smith e Henson (2007) corroboram com a elevada instabilidade do *E. dunnii* e relatam que esta característica se deve, provavelmente, aos altos níveis de tensões de crescimento. Já, Matos et al. (2003) estimaram que um terço da madeira serrada, provenientes dos plantios de *E. dunnii*, tem seu aproveitamento comprometido, devido às altas tensões de crescimento. Desta forma, a elevada instabilidade desta espécie, associada às condições drásticas de variação de umidade e temperatura encontradas nos pré tratamentos de ciclo de fervura e fervura 72h fizeram com que as tensões na linha de cola dos painéis desta espécie fossem maiores, resultando assim, em menores valores de resistência ao cisalhamento.

Tabela 8. Efeitos da espécie e formulação do adesivo sobre resistência ao cisalhamento de painéis LVL.**Table 8.** Effects of species and adhesive formulation on the shear strength of LVL.

Tratamento	Resistência ao Cisalhamento					
	Seco (MPa)	Falha (%)	Ciclo (MPa)	Falha (%)	Fervura (MPa)	Falha (%)
Espécie						
<i>E. dunnii</i>	2,58 b (25,96)	38	1,40 c (40,10)	16	1,42 c (34,29)	29
<i>E. saligna</i>	3,40 a (22,67)	56	2,35 a (24,38)	38	2,18 a (24,78)	45
<i>E. urograndis</i>	2,65 b (18,82)	60	1,82 b (219,92)	50	1,79 b (17,10)	72
Formulação						
A	2,74 a (27,39)	44	2,08 a (28,44)	38	1,98 a (25,95)	47
B	3,04 a (22,04)	47	2,10 a (19,91)	29	1,98 a (22,63)	50
C	3,00 a (30,15)	51	1,88 a (43,11)	42	1,73 ab (36,74)	48
D	2,79 a (22,18)	64	1,49 b (38,02)	29	1,59 b (35,58)	43

Ciclo: Ciclo de fervura; Fervura: 72h; Falha: Falha da madeira; Médias seguidas de mesma letra na mesma coluna são estatisticamente iguais pelo teste de Tukey a 95% de confiabilidade. Valores entre parênteses referem-se ao coeficiente de variação em percentual.

Em relação ao fator formulação do adesivo, as diferenças estatísticas foram constatadas somente nos ensaios de ciclo de fervura e fervura 72h. Os resultados indicaram que no ensaio de ciclo de fervura as formulações A, B e C são estatisticamente iguais entre si e superiores em relação à formulação D. Já o ensaio dos corpos de prova após 72 h de fervura mostrou que a formulação D difere apenas das formulações A e B.

Estes resultados indicam que a aumento do teor de sólidos da batida de cola de 36% (Formulação C) para 47% (Formulação A) não implicaram em aumento significativo da resistência ao cisalhamento, e ainda, a formulação D, com teor de sólidos da batida de cola de 29% não apresentou resistência ao cisalhamento muito menor que as outras três, além de todas as formulações atenderem o requisito mínimo de 1 MPa exigido pela norma EN 314. Desta forma, pode-se afirmar que é possível produzir painéis conformes com a norma europeia a partir da formulação com menor teor de sólidos (D), gerando ainda, uma economia de adesivo que pode variar de 19% a 38%, o que se caracteriza como um ótimo custo-benefício.

Ressalta-se ainda, que a formulação D, apesar de apresentar uma batida de cola com viscosidade muito alta, conforme a Tabela 1 (Copo Ford 8 = 187 segundos), aparentemente não implicou em problemas relativos à mobilidade do adesivo na superfície da lâmina, e consequentemente numa umectação inadequada ou ineficiente, ou ainda, numa linha de cola não ancorada ou pré-endurecida, que refletisse em baixa qualidade de colagem.

CONCLUSÕES

- Entre as espécies de *Eucalyptus* estudadas, o *E. saligna* apresentou o melhor desempenho para produção dos painéis de lâminas paralelas.
- Todas as formulações mostraram-se adequadas para a colagem de lâminas das espécies estudadas, atendendo o requisito mínimo de 1 MPa recomendado pela norma EN 314.
- A redução do teor de sólidos de 47% (Formulação A) para 29% (Formulação D) não implicou em redução acentuada da qualidade de colagem, sendo que esta diferença poderia ser compensada com um pequeno aumento na gramatura.
- Todas as espécies apresentaram potencial para produção de painéis de lâminas paralelas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D 5456. Standard specification for evaluation of structural composite lumber products. Philadelphia, 2001. 14 p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190**: Projeto de Estruturas de Madeiras. São Paulo, 1997. 107 p.

BAL, B. C. Some physical and mechanical properties of reinforced laminated veneer lumber. **Construction and Building Materials**, n. 68, p.120–126, 2014.

BAL, B. C.; BEKTAS, I.; The effects of some factors on the impact bending strength of laminated veneer lumber. **Bioresources**, v.7, n. 4, p. 5855-5863, 2012.

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

BRAZ, R. L. **Influência das tensões de crescimento e da poda sobre a qualidade da madeira de *Eucalyptus dunnii*, *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna***. 2014. 253 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

BURDURLU, E.; KILIC, M.; ILCE, A.C.; UZUNKAVAK, O. The effects of ply organization and loading direction on bending strength and modulus of elasticity in laminated veneer lumber (LVL) obtained from beech (*Fagus orientalis* L) and lombardy poplar (*Populus nigra* L). **Construction Building Materials**, v. 21, n. 8, p.1720-1725, 2007.

ÇOLAK, S.; COLAKOGLU, G.; AYDIN, I. Effects of logs steaming, veneer drying and aging on the mechanical properties of laminated veneer lumber (LVL). **Building and Environment**, v. 42, n. 1, p. 93-98, 2007.

ÇOLAK, S.; AYDIN, Ü.; DEMÜRKIR, C.; OLAKOĞLU, G. Some technological properties of laminated veneer lumber manufactured from pine (*Pinus sylvestris* L.) veneers with melamine added - UF resins. **Turkish Journal of Agriculture and Forestry**, Ankara, v. 28, p.109-113, 2004.

DAOUI, A.; DESCAMPS, C.; MARCHAL, R.; ZERIZER. Influence of veneer quality on beech LVL mechanical properties. **Maderas: Ciencia y Tecnologia**, Concepcion, v.13, n.1, p. 69-83, 2011.

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

EN - EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 314:1** - Plywood - Bonding-quality - Part 1: Test methods. Brussels, 2004.

EN - EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 323**. Wood based panels – Determination of density. English version. 2002a.

EN - EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 310**. Determination of modulus of elasticity in bending and of bending strength, 2002b.

EN - EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 314-2** - Plywood - Bonding quality - Part 2: Requirements. Brussels, 2002c.

FSC – FOREST STEWARDSHIP COUNCIL. **Facts & Figures**. 2017. Disponível em: < <https://ic.fsc.org/en/facts-and-figures> > Acesso em: 15 maio 2017.

IBÁ – INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório IBÁ 2016**. Brasília: IBÁ, 2016. 97 p.

IWAKIRI, S.; TRIANOSKI, R.; MULLER, B.V.; CARVALHO, D. E.; FREITAS, J. A.; ROSA, T.S. Avaliação do potencial de uso de seis espécies do gênero *Eucalyptus* na produção de painéis de lâminas paralelas – LVL. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 44, n. 110, p. 351-359, 2016.

- KILIÇ, M. The effects of the force loading direction on bending strength and modulus of elasticity in laminated veneer lumber (LVL). **Bioresources**, v. 6, n. 3, p. 2805-2817, 2011.
- KILIÇ, Y.; ÇOLAK, N.; BAYSAL, E.; BURDURLU, E. An investigation of some physical and mechanical properties of laminated veneer lumber manufactured from black alder (*Alnus glutinosa*) glued with polyvinyl acetate and polyurethane adhesives. **Forest Products Journal**, Peachtree Corner, v. 56, n. 9, p. 56-59, 2006.
- KOL, H. S.; OZBAY, G.; KÖSE, L.; KURT, S. Effects of some impregnation chemicals on combustion characteristics of laminated veneer lumber (LVL) produced with oak and poplar veneers. **Bioresources**, v. 5, n. 1, p. 70-80, 2010.
- KURT, R. Suitability of three hybrid poplar clones for laminated veneer lumber manufacturing using melamine urea formaldehyde adhesive. **Bioresources**, v. 5, n. 3, p. 1868 -1878, 2010.
- LARA PALMA, H. A.; BALLARIN, A. W. Propriedades físicas e mecânicas de painéis LVL de *Eucalyptus grandis*. **Ciência Florestal**, v. 21, p. 559 - 566, 2011.
- LAUFENBERG, T. Parallel-laminated veneer: processing and performance research review. **Forest Products Journal**, Madison, v. 33, n. 9, p. 21-28, 1983.
- LIMA, N. N.; MENDES, L. M. M.; SÁ, V. A.; BUFALINO, L. Propriedades físico-mecânicas de painéis LVL produzidos com três espécies amazônicas. **Cerne**, Lavras, v. 19, n. 3, p. 407- 413, 2013.
- MARRA, A. A.; **Technology of wood bonding**: Principles in practice. New York: Van Nostrand Reinhold, 1992. 453 p.
- MATOS, J. L. M.; IWAKIRI, S.; ROCHA, M. P.; PAIM, R. M.; ANDRADE, L. O. Redução do efeito das tensões de crescimento em toras de *Eucalyptus dunnii*. **Scientia Florestalis**, Piracicaba, n. 64, p. 128-135, 2003.
- NELSON, S. Structural composite lumber, In: Smulski, S. (Ed.). **Engineered Wood Products**: A guide for specifiers, designers, and users. Madison: PFS Research Foundation, 1997. p. 147-152.
- OZARSKA, B. A review of the utilization of hardwoods for LVL. **Wood Science and Technology**, New York, n. 33, n. 4, p. 341 - 351, 1999.
- PAHKASALO, T.; GASTON, C. Value-added wood products markets. In: CLARK, D. **Forest Products Annual Market Review, 2010-2011**. Geneva: UNECE/FAO Forest Products Annual Market Review, 2011, 155 p.
- ROCHA, M. P. *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden e *Eucalyptus dunnii* Maiden como fontes de matéria prima para serrarias. 185 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2000.
- SKEIST, I. **Handbook of adhesives**. New Jersey: Chapman e Hall, 1980. 779 p.
- SMITH, H. J., HENSON, M. Achievements in forest tree genetic improvement in Australia and New Zealand: Tree improvement of *Eucalyptus dunnii* Maiden. **Australian Forestry**, Melbourne, v. 70, n. 1, p. 17-22, 2007.
- SULAIMAN, O.; SALIM, N.; R. HASHIM, R.; YUSOF, L.H.M.; RAZAK, W.; YUNUS, N.Y.M.; HASHIM, W.S.; AZMY, M.H. Evaluation on the suitability of some adhesives for laminated veneer lumber from oil palm trunks. **Materials and Design**, n. 30, p. 3572 – 3580, 2009.
- TENÓRIO, C.; MOYA, R.; MONOZ, F. Comparative study on physical and mechanical properties of laminated veneer lumber and plywood panels made of wood from fast-growing *Gmelina arborea* trees. **Journal of Wood Science**, Amsterdam, v. 57, n. 2, p. 134 -139, 2011.

VLOSKY, R.P.; SMITH, P.M.; BLANKENHORN, P.R.; HAAS, M. P. Laminated veneer lumber: A Unites States Market overview. **Wood and fiber Science**, Madison, v. 26, n. 4, p. 456 - 466, 1994.

WALKER, J. C. F. **Primary wood processing**: principles and practice. London: Chapman e Hall, 1993. 595 p. WANG, B. J.; DAI, C. Hot-pressing stress graded aspen veneer for laminated **Holzforschung**, Berlin, n. 59, p. 10-17, 2005.

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.

Recebido em 26/09/2016

Aceito em 02/08/2017