

Avaliação da madeira do híbrido de *Eucalyptus grandis* × *Eucalyptus urophylla* para utilização em madeira lamelada colada

Evaluation of wood from the hybrid *Eucalyptus grandis* × *Eucalyptus urophylla* to be used in glued laminated timber

Pedro Gutemberg de Alcântara Segundinho¹, Rafael Gonçalves Espósito de Oliveira¹, Fabricio Gomes Gonçalves¹, Nayara Franzini Lopes², Rejane Costa Alves¹, Macksuel Soares de Azevedo³

¹ Universidade Federal do Espírito Santo, Departamento de Ciências Florestais e da Madeira, Avenida Governador Lindemberg, 316, Centro, CEP: 29550-000, Jerônimo Monteiro, ES, Brasil

² Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Florestal, Avenida PH Holfs, s/n., CEP: 36570-000, Viçosa, MG, Brasil

³ Universidade Federal do Espírito Santo, Departamento de Engenharia Civil, Avenida Fernando Ferrari, s/n., CEP: 29075-910, Vitória, ES, Brasil

e-mail: pedro.segundinho@ufes.br, rafaeldeoliveira077@gmail.com, fabricio.goncalves@ufes.br, rejanealves.ufes@gmail.com, nayaraflopes@hotmail.com, macksuel.azevedo@gmail.com

RESUMO

A madeira lamelada colada (MLC) possui inúmeras vantagens, podendo ser utilizada em diversos projetos com diferentes dimensões. O objetivo desta pesquisa foi avaliar as propriedades físicas e mecânicas da madeira do híbrido de *E. grandis* × *E. urophylla* visando a produção de elementos de MLC colados com os adesivos resorcinol-formaldeído (RF) e poliuretano de mamona (PUR) separadas em duas classes de densidade. A partir dos ensaios determinou-se a massa específica aparente, o teor de umidade, a retração, o inchamento, a resistência ao cisalhamento da madeira, a resistência ao cisalhamento na linha de cola, a resistência à compressão normal às fibras, o módulo de elasticidade. A partir dos resultados observou-se que a madeira do híbrido de *E. grandis* × *E. urophylla* apresentou resultados satisfatórios para ser utilizada na fabricação de elementos de MLC, sobretudo naquelas em que foram utilizadas tábuas de maior densidade aparente ($\geq 0,587 \text{ g.cm}^{-3}$) e colados com o adesivo resorcinol-formaldeído (RF).

Palavras-chave: elemento estrutural, resorcinol-formaldeído, poliuretano de mamona.

ABSTRACT

Glued laminated timber (glulam) has many advantages and can be used in various projects with different dimensions. The objective of this research was to evaluate the physical and mechanical properties of the timber from the hybrid *E. grandis* × *E. urophylla*, aiming at the production of glulam elements glued with the resorcinol-formaldehyde and castor polyurethane, separated in two density classes. From the tests, it was determined the apparent specific mass, the moisture content, the shrinkage, the swelling, the shear strength of the wood, the shear strength in the glue line, the resistance to normal compression to the fibers, and the modulus of elasticity. From the results it was observed that the wood of the hybrid of *E. grandis* × *E. urophylla* presented satisfactory results to be used in the manufacture of glulam elements, especially in those in which boards of greater apparent density were used ($\geq 0.587 \text{ g.cm}^{-3}$) and bonded with the resorcinol-formaldehyde adhesive.

Keywords: structural element, resorcinol-formaldehyde, castor polyurethane.

1. INTRODUÇÃO

A madeira lamelada colada (MLC) é um dos produtos fabricados a partir da madeira com mais utilização no setor de construção civil, essencialmente devido a suas propriedades mecânicas e processo de fabricação industrializado. Na manufatura as características naturais da madeira, como nós, inclinação da grã, lenhos de tração e porcentagem de lenho juvenil e adulto que estão presentes nas peças de madeira às vezes promovem uma melhoria nas resistências mecânicas [1], tornando-o superior ao da madeira maciça sem defeitos, desde que sejam posicionados adequadamente durante a confecção do produto. No entanto, a presença de defeitos reduz resistências mecânicas na maioria dos casos quando colocados sem critérios de classificação. A produção desse material também necessita de geometrias precisas e teor de umidade controlada [2], evitando-se assim possíveis delaminações.

A MLC pode ser utilizada em coberturas, pilares de estruturas, como elementos estruturais de pontes, torres de transmissão, edifícios, embarcações, bem como partes decorativas, esquadrias e móveis. Isso se deve à sua capacidade de se adaptar a diferentes formas arquitetônicas, bem como a possuir resistência a solicitações mecânicas, uma vez que seu peso é relativamente menor, se comparada a outros elementos construtivos [3, 4].

A utilização de madeiras de reflorestamento pode ser viabilizada, sobretudo aquelas de baixa a média massa específica, na confecção de um produto aumentando a rigidez para uso estrutural. Porém para melhor utilização da madeira para este fim é indispensável o conhecimento de propriedades físicas e mecânicas que possibilita ser utilizada de maneira racional e correta nas edificações [5, 12, 14, 17, 21, 24-28].

O conhecimento das propriedades físicas da madeira por meio de normas específicas possibilita classificá-la em determinada classe de resistência, e com a realização de ensaios específicos laboratoriais, é possível avaliar as propriedades mecânicas do material e atestar a viabilidade de seu emprego em determinado setor industrial madeireiro [5, 6, 12, 14, 17, 21, 24-28].

O objetivo desse trabalho foi avaliar as propriedades físicas e mecânicas de madeira lamelada colada produzida com madeira do híbrido de *E. grandis* × *E. urophylla*.

2. MATERIAL E MÉTODOS

A madeira utilizada foi um híbrido de árvores de *E. grandis* × *E. urophylla* com 11 anos de idade, procedente da empresa *Bahia Produtos de Madeira S/A*, localizada na cidade de Nova Viçosa, no estado da Bahia.

A madeira foi doada na forma de tábuas em um único lote, um total de 40 peças, que foram dispostas em ambiente aberto, porém protegido de intempéries, para a madeira atingir a umidade de equilíbrio local (em torno de 14% de umidade). Na sequência foi realizada uma classificação visual para posterior aplainamento e seccionamento das tábuas nas dimensões desejadas para a caracterização das propriedades tecnológicas da madeira e a produção dos elementos de MLC com as devidas análises, isto é, as tábuas apresentavam variação de comprimento.

2.1 Caracterização das propriedades físicas da madeira

A caracterização das propriedades físicas da madeira foi realizada de acordo com os métodos de ensaios definidos pela Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, Norma Brasileira Regulamentadora – NBR 7190 [6]. Foram determinados o teor de umidade (U), densidade aparente (ρ_{ap}) e estabilidade dimensional utilizando os mesmos corpos de prova para ambos os ensaios.

Para realização dos ensaios, foram retirados 4 corpos de prova de cada tábua, totalizando 160 amostras. Os corpos de prova foram seccionados nas dimensões de 3 cm × 2 cm × 5 cm (espessura × largura × comprimento) respectivamente, que representam as direções radial, tangencial e longitudinal.

2.2 Adesivos empregados na MLC

Na colagem da madeira foram utilizados dois adesivos comerciais, sendo um termofixo, o Cascophen RS-216-M, a base de resorcinol-formaldeído (RF) e um termoplástico, o poliuretano (PUR) bi-componente à base de óleo de mamona (Imperveg® AGT 1315).

A decisão sobre quantidade de adesivo e escolha do catalizador foram feitas de acordo com recomendações dos fabricantes. Para a aplicação do Cascophen RS-216-M foram adicionados 20% de catalisador FM-60-M em peso. Para a aplicação do poliuretano foi utilizada a proporção de 1:1,2 em peso, sendo 1 parte do componente A (um pré-polímero) e 1,2 partes do componente B (um polioliol).

2.3 Confeção da MLC

Para produção dos elementos de madeira lamelada colada (MLC) as tábuas foram divididas em conformidade com sua densidade aparente, formando dois grupos. O primeiro com densidade aparente menor que $0,587 \text{ g.cm}^{-3}$ (Grupo 1), e o segundo com densidade aparente maior ou igual a $0,587 \text{ g.cm}^{-3}$ (Grupo 2). As tábuas foram coladas em função da proximidade da densidade aparente dentro de cada grupo.

Após a divisão dos grupos, foram produzidos 28 elementos de madeira lamelada colada, utilizando 56 lâminas nas dimensões de $21 \text{ cm} \times 21 \text{ cm} \times 2,5 \text{ cm}$ (comprimento \times largura \times espessura). Cada grupo foi composto por um total de 28 tábuas, das quais se produziram 14 elementos de MLC, sendo 7 desses elementos colados com Cascophen RS-216-M e os outros 7 com o adesivo Imperveg® AGT 1315.

Na superfície da madeira foram aplicados 250 g.m^{-2} de gramatura de adesivo em linha de cola simples com uma espátula para ambos, conforme recomendação os fabricantes. As tábuas foram aplainadas antes da colagem e a colagem das tábuas dos elementos de MLC foi feita de maneira aleatória em relação à direção da madeira, não sendo consideradas as direções radial ou tangencial. As peças foram unidas e prensadas em uma prensa hidráulica manual (Bovenau, P15000), durante 48 horas a uma pressão de 1 MPa à temperatura ambiente. Após o término da prensagem os elementos de MLC foram dispostos em local coberto e mantidos em equilíbrio higroscópico com o ambiente para a cura dos adesivos, por um período não inferior a 15 dias.

2.4 Caracterização das propriedades mecânicas da MLC

Após a produção dos elementos de madeira lamelada colada, estes foram aplainados nas faces laterais para remoção do excesso de adesivo gerado devido à pressão aplicada sobre eles. Na sequência, foram produzidos os corpos de prova para os ensaios de compressão normal às fibras e cisalhamento paralelo às fibras seguindo as recomendações da norma *American Society for Testing and Materials* – ASTM D-143 [7] e cisalhamento na linha de cola seguindo as recomendações da norma ASTM D-905 [8]. O ensaio de cisalhamento na linha de cola foi quantificado por meio da porcentagem de falhas na madeira mediante utilização de uma lâmina quadriculada transparente, com precisão de 1% ($38,1 \text{ mm} \times 50,8 \text{ mm}$). As avaliações da porcentagem de falhas na madeira foram realizadas conforme a norma ASTM D-5266 [9].

Os ensaios não destrutivos de vibração longitudinal e vibração transversal para obtenção dos módulos de elasticidade foram realizados pela norma ASTM E-1876 [10], o módulo de elasticidade foi obtido pelo *stress wave* [11] e o módulo de elasticidade obtido pela flexão estática utilizando a norma NBR 7190 [6]. As dimensões dos corpos de prova utilizados nesses ensaios foram $57,5 \text{ cm} \times 2,5 \text{ cm} \times 2,5 \text{ cm}$ (comprimento \times largura \times espessura).

No total, foram produzidos 168 corpos de prova, sendo 56 para cada ensaio (Resistência à compressão normal às fibras, Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras e Resistência ao cisalhamento na linha de cola). Em cada uma das classes de densidade aparente foram preparados 84 corpos de prova, sendo 42 colados com o adesivo resorcinol-formaldeído e 42 colados com o adesivo poliuretano de mamona. Dos 42 corpos de prova de cada adesivo, 21 foram ensaiados na condição seca, e 21 na condição saturada (até massa constante em momento ótimo sem absorção de água). No Quadro 1 tem-se a rotina experimental relativa à caracterização das propriedades mecânicas da MLC.

Quadro 1: Rotina experimental. D1: Densidade aparente da madeira $< 0,587 \text{ g.cm}^{-3}$; D2: Densidade aparente da madeira $\geq 0,587 \text{ g.cm}^{-3}$; PUR: Adesivo poliuretano de mamona; RF: Adesivo resorcinol-formaldeído; C1: corpo de prova na condição seca; C2: corpo de prova na condição saturada; r: repetições.

Ensaio mecânico	Densidade	Adesivo	Condição de ensaio	r
Resistência à compressão normal às fibras (MPa)	$D1 < 0,587 \text{ g.cm}^{-3}$	PUR	C1	7
			C2	7
		RF	C1	7
			C2	7
	$D2 \geq 0,587 \text{ g.cm}^{-3}$	PUR	C1	7
			C2	7
		RF	C1	7
			C2	7
Resistência ao cisalhamento	$D1 < 0,587 \text{ g.cm}^{-3}$	PUR	C1	7

paralelo às fibras (MPa)		RF	C2	7
			C1	7
		C2	7	
	$D2 \geq 0,587 \text{ g.cm}^{-3}$	PUR	C1	7
			C2	7
		RF	C1	7
		C2	7	
Resistência ao cisalhamento na linha de cola (MPa)	$D1 < 0,587 \text{ g.cm}^{-3}$	PUR	C1	7
			C2	7
		RF	C1	7
			C2	7
	$D2 \geq 0,587 \text{ g.cm}^{-3}$	PUR	C1	7
			C2	7
RF		C1	7	
		C2	7	
Total de corpos de prova				168

Fonte: Autor

2.5 Análise estatística

O experimento foi idealizado no delineamento estatístico inteiramente casualizado (DIC) no esquema $2 \times 2 \times 2$, sendo a densidade aparente em dois níveis, o adesivo em dois níveis e a condição de umidade em dois níveis. Nos resultados de densidade aparente utilizou-se o teste *t* de Student ($P < 0,05$). Os resultados de resistência à compressão normal às fibras, cisalhamento paralelo às fibras e percentual de falha na madeira foram submetidos à análise de variância (ANOVA) a 5 % de probabilidade de erro, submetido ao teste de Shapiro-Wilk ($p < 0,05$) para normalidade dos resíduos e utilizou-se o teste de comparação das médias de Tukey ($p < 0,05$).

3. RESULTADOS

3.1 Propriedades físicas da madeira

Os valores médios das propriedades das tábuas de madeira de *E. urophylla* \times *E. grandis* obtidos nos ensaios de densidade aparente, teor de umidade, retração volumétrica e inchamento volumétrico foram $0,595 \text{ g.cm}^{-3}$, 9,34%, 13,29% e 15,40%, respectivamente.

O lote de tábuas de madeira de *E. urophylla* \times *E. grandis* apresentou uma densidade aparente média próxima ao sugerido pela NBR 7190 [6] para fabricação de MLC, que é entre $0,65$ e $1,00 \text{ g.cm}^{-3}$.

Após a determinação das propriedades físicas da madeira e de posse dos valores de densidade aparente apresentado pelas tábuas, as madeiras foram divididas em dois grupos. O primeiro, com densidade aparente menor do que $0,587 \text{ g.cm}^{-3}$ (Grupo 1), e o segundo, com densidade aparente maior ou igual a $0,587 \text{ g.cm}^{-3}$ (Grupo 2).

3.2 Módulo de elasticidade

Os valores médios dos módulos de elasticidade obtidos por ensaios de vibração longitudinal, vibração transversal, *stress wave* e flexão estática na madeira de *E. urophylla* \times *E. grandis* foram iguais a 14.981 MPa, 13.788 MPa, 11.840 MPa e 12.684 MPa, respectivamente.

3.3 Compressão normal às fibras e cisalhamento paralelo às fibras na MLC

Os resultados obtidos para compressão normal às fibras nos corpos de prova de MLC seca e saturada podem ser observados na Figura 1.

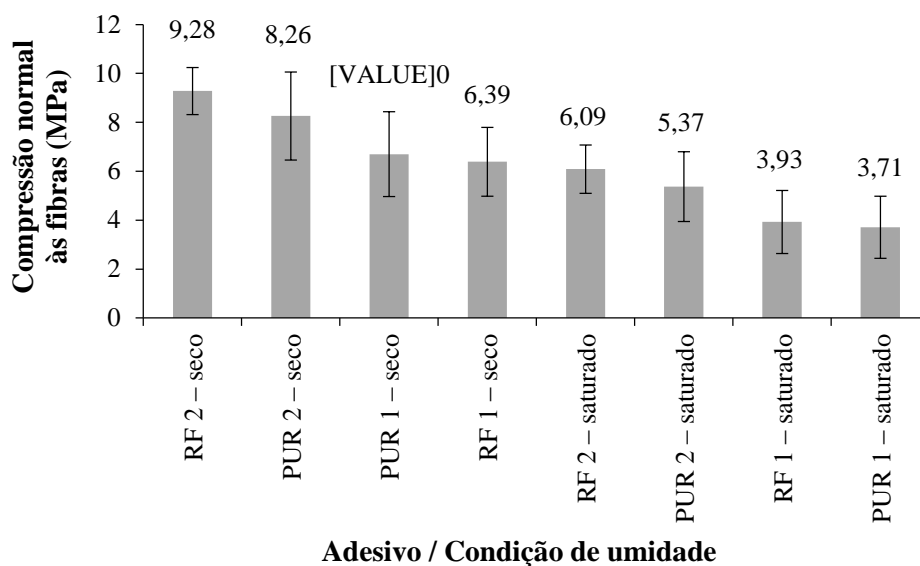


Figura 1: Valores médios de resistência à compressão normal às fibras. 1: Densidade aparente da madeira $< 0,587 \text{ g.cm}^{-3}$; 2: Densidade aparente da madeira $\geq 0,587 \text{ g.cm}^{-3}$; RF: Adesivo resorcinol-formaldeído; PUR: Adesivo poliuretano de mamona.

Os corpos de prova colados com o adesivo resorcinol-formaldeído, ensaiados na condição seca e representante do Grupo 2 (tábuas mais pesadas) foram os que apresentaram maior média para resistência à compressão normal às fibras (9,28 MPa), sendo 10,99% superior ao maior valor encontrado para o adesivo poliuretano (8,26 MPa) nas mesmas condições. Tal diferença entre tratamentos advém da variabilidade natural do material e não da influência do adesivo.

Os resultados obtidos no ensaio de resistência ao cisalhamento dos corpos de prova de MLC secos e saturados são expostos na Figura 2.

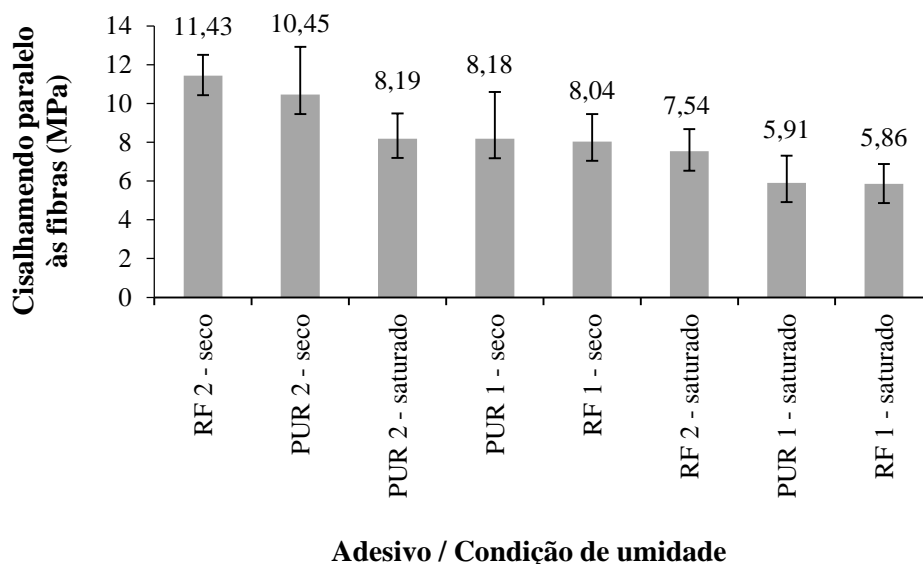


Figura 2: Valores médios de resistências ao cisalhamento na madeira lamelada colada. 1: Densidade aparente da madeira $< 0,587 \text{ g.cm}^{-3}$; 2: Densidade aparente da madeira $\geq 0,587 \text{ g.cm}^{-3}$; RF: Adesivo resorcinol-formaldeído; PUR: Adesivo poliuretano de mamona.

A título informativo, apesar de o delineamento estatístico apontar pequenas diferenças entre os adesivos, elas são inerentes ao delineamento e estão aqui representadas apenas para ilustração. Os corpos de prova colados com o adesivo resorcinol-formaldeído (RF), ensaiados na condição seca e representante do

Grupo 2 (tábuas mais pesadas) foram os que apresentaram maior média para resistência ao cisalhamento paralelo às fibras (11,43 MPa), 8,69 % superior aos valores apresentados pelos corpos de prova colada com o adesivo poliuretano de mamona (10,45 MPa) nas mesmas condições.

Os corpos de prova colados com o adesivo resorcinol-formaldeído, ensaiados na condição saturada e representante do Grupo 1 (tábuas mais leves) foram os que apresentaram menor média para resistência ao cisalhamento paralelo às fibras (5,86 MPa); seu valor foi 0,95 % inferior ao menor valor para o adesivo poliuretano nas mesmas condições.

Na análise isolada dos fatores, todos os possíveis contrastes entre as médias dos níveis do fator adesivo foram estatisticamente nulos ($F > 0,05$). Para os fatores *condição de umidade e densidade aparente*, o contraste entre as médias foi significativo pelo teste *t* de Student ($P < 0,05$) (Tabela 1).

Tabela 1: Valores médios encontrados para a resistência à compressão normal às fibras e ao cisalhamento paralelo às fibras em ambas classes de densidade aparente da madeira e condição de umidade para a madeira lamelada colada do híbrido de *E. urophylla* × *E. grandis*.

PROPRIEDADE AVALIADA	PARÂMETRO ESTUDADO	
	Densidade	
Resistência à compressão normal às fibras (MPa)	D1*	D2
	5,18 b	7,25 a
	Umidade	
	Condição seca	Condição saturada
	7,66 a	4,77 b
Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras (MPa)	Densidade	
	D1	D2
	7,00 b	9,40 a
	Umidade	
	Condição seca	Condição saturada
	9,53 a	6,87 b

* D1: densidade aparente da madeira menor que 0,587 g.cm⁻³; D2: densidade aparente da madeira maior ou igual a 0,587 g.cm⁻³. Letras diferentes na linha diferem entre si pelo teste *t* de Student ($P < 0,05$).

Pode-se observar que os corpos de prova representantes do Grupo 2 (tábuas mais pesadas) apresentaram maior média para a resistência ao cisalhamento paralelo às fibras (9,40 MPa), ocorrendo o mesmo com os corpos de prova ensaiados na condição seca (9,53 MPa).

Os corpos de prova representantes do Grupo 2 (tábuas mais pesadas) apresentaram maior resistência ao ensaio de compressão normal às fibras, e quando consideramos a umidade ocorre o mesmo com os corpos de prova ensaiados na condição seca. As variações estão associadas à densidade da madeira e a idade aproximada de 11 anos e tal comportamento explicado devido a heterogeneidade natural presente da madeira.

3.4 Cisalhamento na linha de cola

Na Figura 3 estão descritos os resultados para o ensaio de resistência ao cisalhamento na linha de cola.

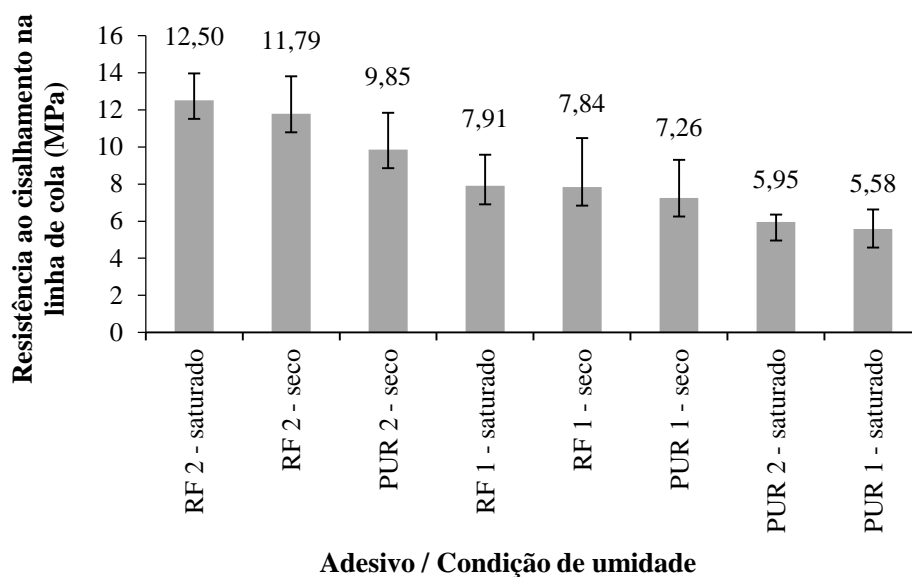


Figura 3: Valores médios de resistências ao cisalhamento na linha de cola. 1: Densidade aparente da madeira $< 0,587 \text{ g.cm}^{-3}$; 2: Densidade aparente da madeira $\geq 0,587 \text{ g.cm}^{-3}$; RF: Adesivo resorcinol-formaldeído; PUR: Adesivo poliuretano de mamona.

Para este ensaio, os melhores desempenhos para a resistência ao cisalhamento na linha de cola foram naqueles corpos de prova colados com o adesivo resorcinol-formaldeído, no Grupo 2 (tábuas mais pesadas) e ensaiados na condição saturada (12,50 MPa). Tal resultado não foi afetado pela umidade; sendo a madeira classificada para confeccionar os elementos de MLC e os corpos de prova isentos de defeitos, atribuiu-se a variabilidade da madeira, uma vez que a cola foi capaz de restituir além da resistência da madeira.

As interações duplas entre os fatores condição (seca e saturada) e adesivo (PUR e RF), bem como entre os fatores adesivos (PUR e RF) e densidade (Grupo 1 e Grupo 2) foram significativas ($F \leq 0,05$), evidenciando desta forma dependência entre os fatores (tabelas 2 e 3).

No estudo do comportamento do fator condição (seca e saturada) dentro de cada nível do fator adesivo (PUR e RF) se pode constatar que dentro do nível C1 (seca) e C2 (saturada), os contrastes entre as médias dos níveis do adesivo (PUR e RF) foram estatisticamente diferentes de zero, ao nível de 5 % de probabilidade. Já para o estudo do fator adesivo (PUR e RF) dentro de cada nível do fator condição (seca e saturada) se pode verificar que dentro do nível A2 (RF) o contraste entre as médias foi estatisticamente nulo ($F > 0,05$), ocorrendo o inverso dentro do nível A1 (PUR).

Tabela 2: Média do comportamento para resistência ao cisalhamento na linha de cola (MPa) dos fatores condição de umidade dentro dos níveis do adesivo.

CLASSE DE CONDIÇÃO DE UMIDADE AVALIADA	ADESIVO	
	Poliuretano de mamona	Resorcinol-formaldeído
C1	8,55 Ba*	9,82 Aa
C2	5,76 Bb	10,21 Aa

* Letras maiúsculas na horizontal e minúsculas na vertical não diferem entre si pelo teste de Tukey ($P > 0,05$); C1: corpo de prova na condição seca; C2: corpo de prova na condição saturada.

Para o estudo do comportamento do fator adesivo (PUR e RF) dentro de cada nível do fator densidade (Grupo 1 e Grupo 2), pôde-se constatar que dentro dos níveis A1 (PUR) e A2 (RF) o contraste entre as médias dos níveis do fator densidade é estatisticamente diferente de zero, ao nível de 5 % de probabilidade; o mesmo resultado foi encontrado para o estudo do fator densidade (Grupo 1 e Grupo 2) dentro de cada nível do fator adesivo (PUR e RF).

Tabela 3: Média do comportamento para resistência ao cisalhamento na linha de cola (MPa) dos fatores adesivos dentro das classes de densidade.

ADESIVO	DENSIDADE (G.CM ⁻³)	
	Grupo 1	Grupo 2
Poliuretano de mamona	6,42 Bb	7,90 Ab
Resorcinol-formaldeído	7,88 Ba	12,15 Aa

* Letras diferentes, maiúsculas na horizontal e minúsculas na vertical, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($P > 0,05$). Grupo 1: densidade aparente da madeira menor que $0,587 \text{ g.cm}^{-3}$; Grupo 2: densidade aparente da madeira maior ou igual a $0,587 \text{ g.cm}^{-3}$.

Na análise isolada dos fatores, todos os possíveis contrastes entre as médias dos níveis dos fatores densidade (Grupo 1 e Grupo 2), adesivos (PUR e RF) e condição de umidade (seca e saturada) foram significativamente nulos ($F > 0,05$) (Tabela 4).

Tabela 4: Média para o percentual de falha na madeira analisando os fatores umidade, densidade aparente e adesivo.

CARACTERÍSTICA AVALIADA		FALHA NA MADEIRA (%)
Densidade aparente da madeira	$< 0,587 \text{ g.cm}^{-3}$	76,25 a
	$\geq 0,587 \text{ g.cm}^{-3}$	65,36 b
Condição de umidade	seca	77,21 a
	saturada	64,39 b
Adesivo	poliuretano de mamona	54,71 b
	resorcinol-formaldeído	86,89 a

* Letras iguais na vertical não diferem entre si pelo teste de Tukey ($P > 0,05$) dentro da característica estudada.

Na Tabela 4 observa-se que os corpos de prova representantes do Grupo 1 (tábuas mais leves) foram os que apresentaram maior média para o percentual de falha na madeira igual a 76,25 % sendo superior aos corpos de prova do Grupo 2 (tábuas mais pesadas) que apresentaram média para o percentual de falha na madeira igual a 65,36 %. Na condição de umidade os corpos de prova secos apresentaram maior falha na madeira do que os corpos de prova saturados.

O adesivo resorcinol-formaldeído (RF) foi o que apresentou maior média para a análise de falha na madeira (86,89 %), ou seja, foi o que apresentou maior resistência ao esforço solicitado, fazendo com o que a maior porcentagem das rupturas ocorresse na madeira e não na linha de cola; seu valor foi superior aos valores apresentados pelo adesivo poliuretano de mamona (PUR).

4. DISCUSSÃO

4.1 Propriedades físicas da madeira

O valor de densidade encontrado está dentro do ideal para confecção de MLC, que de acordo com MIOTTO e DIAS [12] deve estar $0,40 \text{ g.cm}^{-3}$ e $0,75 \text{ g.cm}^{-3}$. A densidade e o teor de umidade são fatores indispensáveis para fabricação de elementos de madeira lamelada colada, uma vez que influenciam no tempo de prensagem, na pressão aplicada e na penetração e cura do adesivo, durante o processo de produção [1].

O teor de umidade ideal está na faixa de 7% a 14% de umidade [12], que pode influenciar na formação e performance da ligação madeira-adesivo [13]. A umidade ainda pode interferir na colagem, visto que tal variação está relacionada à retração volumétrica e ao inchamento volumétrico, que provocam na madeira deformações excessivas e a consequente perda de eficiência da linha de cola, principalmente quando se trata de adesivo poliuretano [14].

Por ser um sólido poroso com estrutura capilar, a madeira está sujeita ao fenômeno de sorção, ou seja, ganho e perda de umidade para o meio em que se encontra. Como resultado, surgem as variações dimensionais e de constituição, as quais interferem significativamente em suas propriedades físicas e

mecânicas, tornando importante o conhecimento a respeito dessas variações. Faz-se necessária a direção transversal de maior atenção, pois se difere entre os sentidos radial e tangencial, este último com maior variação [15, 16].

A diferença das variações dimensionais entre as direções radial e tangencial é atribuída às características anatômicas, principalmente o volume de raio presente, em que quanto maior o número de células, que constituem sua largura e altura, maior a contribuição em termos da restrição da variação dimensional na direção radial [16].

Por ser um material anisotrópico, alguns defeitos como torções, rachaduras e empenamentos podem ocorrer durante o processo de secagem. Estes defeitos limitam ou impossibilitam a utilização da peça no processo de colagem, uma vez que a superfície deve ser homogênea em toda sua extensão, para facilitar a mobilidade do adesivo, a transferência de tensão de uma face a outra e a formação de linha de cola homogênea, conferindo, desta forma, resistência ao produto colado [14-16].

Os valores do fator anisotrópico variam de 1,3 a 1,4 para madeiras muito estáveis, e superiores a 3 para madeiras muito instáveis, como madeiras de muitas espécies do gênero *Eucalyptus* [16]. Pode-se dizer que a madeira utilizada nesse estudo possui altos valores de inchamento volumétrico e retração volumétrica, ambos acima de 10 %.

4.2 Caracterização mecânica da MLC

Para os ensaios de compressão normal às fibras, cisalhamento na madeira, cisalhamento na linha de cola e percentual de falha na madeira não houve interação tripla entre os fatores densidade (Grupo 1 e Grupo 2) × adesivo (PUR e RF) × condição de umidade (seca e saturada). As interações duplas entre os fatores também foram não significativas, portanto, independentes. Neste contexto, o ensaio de cisalhamento na linha de cola apresentou interação dupla significativa ($F \leq 0,05$) entre os fatores condição (seca e saturada) e adesivo (PUR e RF), bem como entre os fatores adesivos (PUR e RF) e densidade (Grupo 1 e Grupo 2) evidenciando desta forma dependência entre eles.

4.3 Compressão normal às fibras da MLC

O valor obtido da madeira colada com resorcinol-formaldeído (RF) na condição seca foi inferior ao encontrado por SEGUNDINHO *et al.* [14], que em seu estudo sobre a caracterização da madeira lamelada colada de *Eucalyptus* sp. obtiveram o valor médio de 10,61 MPa para madeiras coladas com poliuretano (PUR) e 8,68 MPa para madeiras coladas com resorcinol-formaldeído (RF) na resistência a compressão normal às fibras e superior ao obtido por PRIM e PIOVESAN [17], que estudaram as propriedades de duas espécies de madeiras utilizadas na construção civil, obtendo o valor de 8,30 MPa para a espécie de *E. grandis* quando submetida ao esforço de compressão normal às fibras.

Os menores valores foram encontrados para os corpos de prova colados com o adesivo poliuretano de mamona, ensaiados na condição saturada e representante do Grupo 1 (tábuas mais leves), 3,71 MPa; este valor foi 5,60 % inferior ao menor valor encontrado para o adesivo resorcinol-formaldeído (RF) (3,93 MPa) nas mesmas condições. Este resultado se atribui à densidade das peças que, devido a sua estrutura anatômica, apresenta maior proporção de espaços vazios, possuindo menor massa por unidade de volume para resistirem à solicitação de esforço [18].

A maior resistência dos corpos de prova representantes do Grupo 2 se deve à densidade e ao teor de umidade abaixo de 20 %. Com o aumento do teor de umidade da madeira observa-se uma diminuição em sua resistência mecânica. Esta variação na resistência é mais sensível para teores de umidade abaixo do ponto de saturação das fibras (30 %), e é praticamente desprezível para teores de umidade acima deste [19]. Também se pode constatar que, à medida que a massa específica da madeira aumenta, elevam-se proporcionalmente a resistência mecânica e durabilidade, e, em sentido contrário, diminuem-se a permeabilidade e trabalhabilidade [20].

4.4 Cisalhamento paralelo às fibras da madeira

Ao estudar o comportamento de juntas coladas da madeira serrada de *Eucalyptus* sp., PLASTER *et al.* [21] encontraram para esta propriedade o valor igual a 11,18 MPa, valor próximo ao encontrado neste estudo. Neste ensaio o adesivo possui pequena contribuição no aumento da resistência mecânica, ocorrendo o inverso com a densidade. Na Figura 2 se pode notar que três dos quatro maiores valores foram apresentados pelo Grupo 2 (tábuas mais pesadas) (11,43 MPa, 10,45 MPa e 8,19 MPa), o que corrobora o exposto.

Os corpos de prova representantes do Grupo 2 ensaiados na condição seca foram os que apresentaram

maior média para a resistência ao cisalhamento paralelo às fibras. Tal fato é atribuído à maior quantidade de lenho adulto nas tábuas deste grupo, que ocorreu devido à variabilidade natural da madeira.

4.5 Cisalhamento na linha de cola

MOTTA *et al.* [22], ao estudarem a influência do teor de umidade nas propriedades de adesão da madeira de eucalipto, encontraram os valores de 11,10 MPa, 11,50 MPa, 11,74 MPa e 12,62 MPa para a resistência ao cisalhamento na linha de cola para as condições de umidade de 8 %, 10 %, 12 % e 16 %, respectivamente, não havendo efeito significativo do teor de umidade no desempenho das juntas coladas para o resorcinol-formaldeído.

Este fato pode ser atribuído à eficaz resistência do adesivo ao cisalhamento e pelo fato de ser à prova d'água, proporcionando juntas resistentes à imersão em água fria ou quente, sendo utilizado nas indústrias naval e de MLC [23, 24].

Corroborando esse estudo, SEGUNDINHO *et al.* [14], estudando MLC produzida com madeira de *Eucalyptus* sp., verificaram que o tratamento com RF apresentou maior eficiência devido à grande porcentagem de cisalhamento na madeira, tanto na MLC seca, quanto na MLC saturada, sendo o contrário do que ocorreu na linha de cola no tratamento com PUR.

SEGUNDINHO *et al.* [25], estudando a espécie de *Eucalyptus cloeziana*, encontraram 91,89 % de falha na madeira para o adesivo resorcinol-formaldeído e 44,17 % para o adesivo poliuretano de mamona. PLASTER *et al.* [21] obtiveram valor médio de 74,41 % para o adesivo resorcinol-formaldeído; BIANCHE *et al.* [26] encontraram 29,75 % de falha na madeira para o adesivo resorcinol-formaldeído e 71,10 % para o adesivo poliuretano de mamona. Dessa forma os valores encontrados neste trabalho pertencem ao intervalo dos valores encontrados na literatura, 29,75 % a 91,89 % para o adesivo RF e 71,10 % a 44,167 % para o adesivo PUR.

Uma boa estimativa da qualidade da colagem pode ser obtida por meio do percentual de falha na madeira, em que elevados valores são indicativos de boa qualidade na adesão, pois indicam que a coesão do adesivo e a resistência da interface adesivo/madeira são iguais ou mais elevadas que a resistência da própria madeira [27].

As maiores resistências ao cisalhamento na linha de cola ocorreram na classe de densidade alta, conforme verificado em pesquisas [28]. É importante frisar que as propriedades físicas e mecânicas são influenciadas pela anatomia e a mesma propriedade pode diferir bastante dentro da mesma espécie devido a esse fator intrínseco da madeira [29].

5. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que o adesivo resorcinol-formaldeído se mostrou mais viável para fabricação de madeira lamelada colada em ambientes secos e saturados para a madeira do híbrido *E. grandis* × *E. urophylla*.

A madeira lamelada colada produzidos com a madeira do grupo de densidade igual ou maior a 0,585 g.cm⁻³ colada com o adesivo resorcinol-formaldeído apresentaram maiores valores médios para o ensaio de resistência à compressão normal às fibras, resistência ao cisalhamento paralelo às fibras e cisalhamento na linha de cola. Tais elementos colados também contribuíram para a maior porcentagem de falha na madeira, evidenciando boa interação com a madeira utilizada. Ressalta-se que na resistência à compressão normal às fibras da madeira a linha de cola não sofre esforço mecânico devido ao cisalhamento, logo não há influência da resistência ao cisalhamento paralelo às fibras da madeira.

A produção de MLC utilizando adesivo poliuretano (PUR) também pode ser recomendada, desde que seja garantido o emprego em locais secos e cujos esforços não tenham influência na linha de cola, tal como ocorre na resistência à compressão normal às fibras.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais da UFES, à Fundação de Amparo à Pesquisa do Espírito Santo (FAPES) pelo financiamento da pesquisa e pela concessão da bolsa de estudos em nível de mestrado e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos em nível de mestrado.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] SEGUNDINHO, P.G.A., FRANÇA, L.C.A., NETO, P.N.M., *et al.* “Madeira lamelada colada (MLC) com *Acacia mangium* e adesivos estruturais”, *Scientia Forestalis*, v. 43, n. 107, pp. 533-540, Set., 2015.
- [2] SENA-CRUZ, J., JORGE, M., BRANCO, J.M., *et al.* “Bond between glulam and NSM CFRP laminates”, *Construction and Building Materials*, v. 40, pp. 260-269, Mar., 2013.
- [3] ZANGIÁCOMO, A.L., LAHR, F.A.R. “Emprego de espécies tropicais alternativas na produção de elementos estruturais de madeira laminada colada”, *Cadernos de Engenharia de Estruturas*, v. 9, n. 40, pp. 103-131, 2007.
- [4] CALIL JUNIOR, C., LHAR, F.A.R., DIAS, A.A. *Dimensionamento de elementos estruturais de madeira*, Barueri, Manole, 2003.
- [5] TIENNE, D.L.C., NASCIMENTO, A.M., GARCIA, R.A., *et al.* “Qualidade de adesão de juntas de madeira de pinus coladas em condições simuladas de serviço interna e externa”, *Floresta e Ambiente*, v. 18, n. 1, pp. 16-29, Jan.-Mar., 2011.
- [6] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7190*: Projeto de estruturas de madeira, Rio de Janeiro, 1997.
- [7] ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM D-143*: Standard test methods for small clear specimens of timber, Philadelphia, PA, 2000.
- [8] ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM D-905*: Standard test method for strength properties of adhesive bonds in shear by compression loading, Philadelphia, PA, 2009.
- [9] ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM D-5266*: Standard Practice for Estimating the Percentage of Wood Failure in Adhesive Bonded Joints, Philadelphia, PA, 1999.
- [10] ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM E-1876*: Standard test method for dynamic Young's modulus, shear modulus and Poisson's ratio by Impulse Excitation of Vibration, Philadelphia, PA, 2007.
- [11] MEDEIROS NETO, P.N., PAES, J.B., SEGUNDINHO, P.G.A. “Determinações dos módulos de elasticidade e ruptura de madeiras por técnicas não destrutivas e destrutiva”, *Scientia Forestalis*, v. 44, n. 111, pp. 683-690, Set., 2016.
- [12] MIOTTO, J.L., DIAS, A.A. “Produção e avaliação de vigas de madeira laminada colada confeccionadas com lâminas de eucalipto”, *Revista Tecnológica*, pp. 37-47, 2010.
- [13] ALBUQUERQUE, C.E.C., IWAKIRI, S., KEINERT JÚNIOR, S. “Adesão e adesivos”, In: Iwakiri, S. (ed.), *Painéis de madeira reconstituída*, Curitiba, FUPEF, 2005.
- [14] SEGUNDINHO, P.G.A., SILVA, A.C., GONÇALVES, F.G., *et al.* “Caracterização da madeira laminada colada de *Eucalyptus* sp. produzida com adesivos resorcinol-fenol-formaldeído e poliuretano”, *Ciência da Madeira*, v. 9, n. 2, pp. 123-133, Jul., 2018.
- [15] MELO, R.R. “Estabilidade dimensional de compostos de madeira”, *Ciência da Madeira*, v. 4, n. 2, pp. 152-195, Nov., 2013.
- [16] OLIVEIRA, J.T.S., TOMAZELLO FILHO, M., FIEDLER, N.C. “Avaliação da retratibilidade da madeira de sete espécies de *Eucalyptus*”, *Revista Árvore*, v. 34, n. 5, pp. 929-936, 2010.
- [17] PRIM, J.A., PIOVESAN, A.Z. “Estudo sobre as propriedades de duas espécies de madeiras utilizadas na construção civil”, *Unoesc e Ciência*, v. 2, n. 1, pp. 77-86, Jan.-Jun., 2011.
- [18] TSOUKIS, G. *Science and Technology of wood: structure, properties, utilization*. New York, Van Nostrand Reinhold, 1991. 494 p.
- [19] LOGSDON, N.B., CALIL JR., C. “Influência da umidade nas propriedades de resistência e rigidez da madeira”, *Cadernos de Engenharia de Estruturas*, n. 18, pp. 77-107, 2002.
- [20] MADY, F.T.M. *Conhecendo a madeira*. Informações sobre 90 espécies comerciais. Programa de desenvolvimento empresarial e tecnológico – SEBRAE/AM, 1 ed., Manaus, 2000.
- [21] PLASTER, O.B., OLIVEIRA, J.T.S., ABRAHÃO, C.P., *et al.* “Comportamento de juntas coladas da madeira serrada de *Eucalyptus* sp.”, *Cerne*, v. 14, n. 3, pp. 251-258, Jul.-Set., 2008.
- [22] MOTTA, J.P., OLIVEIRA, J.T.S., ALVES, R.C. “Influência do teor de umidade nas propriedades de adesão da madeira de eucalipto”, *Construindo*, v. 4, n. 2, pp. 1-8, Jul.-Dez., 2012.

- [23] LIMA, D.M., AMORIM, M.M., LIMA JUNIRO, H.C., *et al.* “Avaliação do comportamento de vigas de bambu laminado colada submetidas à flexão”, *Ambiente Construindo*, v. 14, n. 1, pp. 15-27, Jan.-Mar., 2014.
- [24] PAES, J.B., OLIVEIRA, A.K.F., OLIVEIRA, E., *et al.* “Caracterização físico-mecânica do laminado colado de bambu (*Dendrocalamus giganteus*)”, *Ciência Florestal*, v. 19, n. 1, pp. 41-51, Jan.-Mar., 2009.
- [25] SEGUNDINHO, P.G.A., GONÇALVES, F.G., GAVA, G.C., *et al.* “Eficiência da colagem de madeira tratada de *Eucalyptus cloeziana* F. Muell para produção de madeira laminada colada (MLC)”, *Revista Matéria*, v. 22, n. 2, pp. e11808, Jun., 2017.
- [26] BIANCHE, J.J., TEIXEIRA, A.P.M., LADEIRA, J.P.S., *et al.* “Cisalhamento na linha de cola de *Eucalyptus* sp. colado com diferentes adesivos e diferentes gramaturas”, *Floresta e Ambiente*, v. 24, e00077114, Ago., 2017.
- [27] VITAL, B.R., MACIEL, A.S., DELLA LUCIA, R.M. “Efeito de ciclos de umidade relativa e temperatura do ar na resistência de juntas coladas com lâminas de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden, *Eucalyptus saligna* Smith e chapas de fibra de densidade média (MDF)”, *Revista Árvore*, v. 29, n. 5, pp. 801-807, 2005.
- [28] SANTIAGO, S.B., GONCALVES, F.G., LELIS, R.C.C., SEGUNDINHO, P.G.A., PAES, J.B., ARANTES, M.D.C. “Colagem de madeira de eucalipto com adesivos naturais”, *Revista Matéria*, v. 23, p. e-12151, Out., 2018.
- [29] CHRISTOFORO, A.L., COUTO, N.G., ALMEIDA, J.P.B., AQUINO, V.B.M., LAHR, F.A.R. “Apparent density as an estimator of wood properties obtained in testes were failure is fragile”, *Eng. Agríc.*, v. 40. n. 1, pp. 105-112, Jan./Feb. 2020.

ORCID

Pedro Gutemberg de Alcântara Segundinho	https://orcid.org/0000-0002-4393-8686
Rafael Gonçalves Espósito de Oliveira	https://orcid.org/0000-0001-8680-9887
Fabricio Gomes Gonçalves	https://orcid.org/0000-0003-2010-9508
Nayara Franzini Lopes	https://orcid.org/0000-0001-9737-1155
Rejane Costa Alves	https://orcid.org/0000-0003-4059-3974
Macksuel Soares de Azevedo	https://orcid.org/0000-0003-3011-3420