



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E ENGENHARIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

RAFAEL GONÇALVES ESPÓSITO DE OLIVEIRA

DESEMPENHO DA MADEIRA LAMINADA COLADA DE EUCALIPTO

JERÔNIMO MONTEIRO – ES

2018

RAFAEL GONÇALVES ESPÓSITO DE OLIVEIRA

DESEMPENHO DA MADEIRA LAMINADA COLADA DE EUCALIPTO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Ciências Florestais na Área de Concentração Ciências Florestais.
Orientador: Prof. Dr. Fabricio Gomes Gonçalves
Coorientador: Prof. Dr. Pedro Gutemberg de Alcântara Segundinho

JERÔNIMO MONTEIRO – ES

2018

DESEMPENHO DA MADEIRA LAMINADA COLADA DE EUCALIPTO

RAFAEL GONÇALVES ESPÓSITO DE OLIVEIRA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Ciências Florestais na Área de Concentração Ciências Florestais.
Orientador: Prof. Dr. Fabricio Gomes Gonçalves
Coorientador: Prof. Dr. Pedro Gutemberg de Alcântara Segundinho

Aprovada em 27 de fevereiro de 2018.

Prof. Dr. Fabricio Gomes Gonçalves (Orientador)
Universidade Federal do Espírito Santo

Prof. Dr. Pedro Gutemberg de Alcântara Segundinho (Coorientador)
Universidade Federal do Espírito Santo

Prof. Dr. José Tarcísio da Silva Oliveira (Examinador interno)
Universidade Federal do Espírito Santo

Prof.^a Dr.^a Rejane Costa Alves
(Examinador externo)
Universidade Federal do Espírito Santo

Prof. Dr. Macksuel Soares de Azevedo (Examinador externo)
Universidade Federal do Espírito Santo

RESUMO GERAL

OLIVEIRA, Rafael Gonçalves Espósito De. **DESEMPENHO DA MADEIRA LAMINADA COLADA DE EUCALIPTO**. 2018. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES. Orientador: Prof. Dr. Fabricio Gomes Gonçalves. Coorientador: Prof. Dr. Pedro Gutemberg de Alcântara Segundinho.

Os objetivos deste trabalho foram produzir elementos de madeira laminada colada (MLC) a partir da madeira de clones de *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla* e avaliar seu comportamento quando submetida ao esforço de compressão normal às fibras. Para a produção dos elementos de madeira laminada colada (MLC), a madeira foi classificada com base na densidade aparente das tábuas, em dois grupos (1: < 0,587 g/cm³; 2: ≥ 0,587 g/cm³). Os elementos de MLC foram colados com dois adesivos, resorcinol-formaldeído, “Cascofen”, e outro, um adesivo poliuretano bi componente, à base de mamona. Foram determinados o teor de umidade das tábuas, a densidade aparente e a retratibilidade, e realizados ensaios mecânicos de compressão normal às fibras, cisalhamento paralelo às fibras, cisalhamento na linha de cola e delaminação. Para caracterização anatômica e avaliação da qualidade da colagem, foram preparadas lâminas histológicas para visualização dos elementos anatômicos da espécie e para mensuração da linha de cola. Observou-se que a madeira avaliada apresentou resultados satisfatórios para ser utilizada na fabricação de MLC, sobretudo naquelas tábuas de maior densidade aparente e colados com o adesivo resorcinol-formaldeído, com maiores valores para as solicitações mecânicas avaliadas. As tábuas de maior densidade apresentaram vasos de maiores diâmetros, raios altos e largos tornando a sua estrutura propícia para mobilidade e penetração do adesivo. A densidade apresentou correlação com as propriedades mecânicas, a espessura de linha de cola principal apresentou correlação com o adesivo e com o percentual de falha na madeira, o adesivo também apresentou correlação com o percentual de falha na madeira. A compressão normal às fibras apresentou correlação com os cisalhamentos paralelo às fibras e na linha de cola, este último apresentou correlação com a densidade aparente, adesivo, linha de cola secundária e diâmetro dos vasos. O cisalhamento paralelo às fibras apresentou correlação com o cisalhamento na linha de cola e com os diâmetros dos vasos. A altura e largura dos raios apresentaram correlação com o número de células.

Palavras-chave: caracterização tecnológica, adesivos, elemento estrutural, compressão normal às fibras.

GENERAL ABSTRACT

OLIVEIRA, Rafael Gonçalves Espósito De. **EUCALYPTUS GLUED-LAMINATED WOOD PERFORMANCE**. 2018. Dissertation (Master's in Forest Sciences) - Federal University of Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES. Advisor: Dr. Fabricio Gomes Gonçalves. Co-advisor: Pedro Gutemberg de Alcântara Segundinho.

The objectives of this work were to produce bonded laminated wood (MLC) elements from the wood of *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla* clones and to evaluate their behavior when submitted to the normal compression stress to the fibers. For the production of bonded laminated wood (MLC), the wood was classified based on the apparent density of the boards, in two groups (1: $<0.587 \text{ g / cm}^3$, 2: $\geq 0.587 \text{ g / cm}^3$). The MLC elements were glued with two adhesives, resorcinol-formaldehyde, "Cascophen", and another, a bi-component, castor-based polyurethane adhesive. The moisture content of the boards, the apparent density and the shrinkability, and mechanical tests of normal compression to the fibers, parallel shear to the fibers, shear in the glue line and delamination were determined. For anatomical characterization and collage quality evaluation, histological slides were prepared to visualize the anatomical elements of the species and to measure the glue line. It was observed that the evaluated wood presented satisfactory results to be used in the manufacture of MLC, especially in those boards of higher apparent density and bonded with the resorcinol-formaldehyde adhesive, with higher values for the mechanical stresses evaluated. The higher density boards presented vessels with larger diameters, high and wide radii, making the structure propitious for mobility and penetration of the adhesive. The density showed a correlation with the mechanical properties, the thickness of the main glue line showed correlation with the adhesive and with the percentage of failure in the wood, the adhesive also presented correlation with the percentage of wood failure. The normal fiber compression showed a correlation with the shearings parallel to the fibers and in the glue line. The latter showed a correlation with the apparent density, adhesive, secondary glue line and vessel diameter. The shear parallel to the fibers showed a correlation with the shear strength in the glue line and the vessel diameters. The height and width of the rays had a correlation with the number of cells.

Keywords: technological characterization, adhesives, structural element, normal fiber compression.

Sumário

RESUMO GERAL	3
GENERAL ABSTRACT	5
1. INTRODUÇÃO GERAL	8
1.2 OBJETIVO GERAL.....	9
1.3 OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	9
Capítulo I	11
ESTUDO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS EM MADEIRA LAMINADA COLADA DE EUCALIPTO	11
1. INTRODUÇÃO	13
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	15
2.1 Caracterização das propriedades físicas da madeira	15
2.2 Adesivos empregados e confecção dos elementos colados	15
2.3 Caracterização das propriedades mecânicas da madeira laminada colada	17
2.4 Análise estatística.....	18
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	19
3.1 Propriedades físicas da madeira	19
3.2 Propriedades mecânicas da madeira e da madeira laminada colada.....	20
3.2.1 Compressão normal às fibras.....	21
3.2.2 Cisalhamento paralelo às fibras.....	23
3.2.3 Cisalhamento na linha de cola.....	25
4. CONCLUSÕES	29
5. REFERÊNCIAS	30
Capítulo II	32
ESTUDO DA INTERFACE MADEIRA-ADESIVO EM MADEIRA LAMINADA COLADA DE <i>Eucalyptus grandis</i> x <i>E. urophylla</i>.....	32
1. INTRODUÇÃO	34
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	35

2.1 Caracterização das propriedades da madeira	36
2.2 Adesivos empregados e confecção dos elementos colados	36
2.3 Visualização da interface madeira-adesivo	37
2.4 Caracterização anatômica	38
2.5 Ensaio de delaminação nos blocos de madeira laminada colada.....	39
2.6 Análise estatística.....	40
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
3.1 Propriedades físicas da madeira	41
3.2 Interface madeira-adesivo	41
3.3 Características anatômicas.....	43
3.4 Ensaio de delaminação	46
3.5 Relação entre espessura da linha de cola principal e secundária e a densidade aparente.	48
4. CONCLUSÕES	50
5. REFERÊNCIAS	51
Capítulo III	53
CORRELAÇÃO ENTRE PROPRIEDADES FÍSICAS, MECÂNICAS E CARACTERÍSTICAS ANATÔMICAS EM MADEIRA LAMINADA COLADA DE <i>Eucalyptus grandis</i> x <i>E. urophylla</i>.....	53
1. INTRODUÇÃO	55
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	57
2.1 Determinação do coeficiente de correlação de Person	57
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	60
4. CONCLUSÕES	64
5. REFERÊNCIAS	66
3. CONCLUSÃO GERAL.....	68
Apêndice	69

1. INTRODUÇÃO GERAL

A madeira é um material de origem biológica, renovável e de elevada complexidade em termos de suas características físicas, químicas, anatômicas e mecânicas. As variações que ocorrem em suas propriedades demandam conhecimento para o uso correto desse material, uma vez conhecida suas características e propriedades, a madeira pode ser empregada em uma gama de aplicações, dentre elas, como elemento estrutural.

A caracterização tecnológica da madeira possibilita relacionar suas propriedades, e fornece informações para a qualificação da madeira para determinado uso. A avaliação da estrutura anatômica da madeira descreve a morfologia dos diferentes tipos de células que a compõe, como também possibilita a mensuração dos elementos celulares quanto as suas dimensões e frequência de ocorrência. A densidade está relacionada com a porosidade exercendo influência direta nos processos de colagem (ALBINO, 2009; MOTTA, 2011).

Com a crescente utilização de espécies provenientes de reflorestamento, surgem algumas limitações para o emprego da madeira como elemento estrutural, como largura e comprimento das peças, que estão correlacionadas com o diâmetro e altura da árvore (ALBINO, 2009). Essas limitações podem ser suprimidas pelo emprego de madeira laminada colada (MLC), que consiste na colagem de peças de madeira em forma de lamelas (tábuas) dispostas com as fibras paralelas entre si, proporcionando a confecção de peças de maior comprimento.

Neste contexto, a madeira laminada colada se mostra como uma alternativa viável para melhorar o aproveitamento da matéria-prima, sendo que o processo de produção de elementos de MLC é dependente da tecnologia dos adesivos empregados no processo de colagem e da espécie a ser utilizada, fazendo com que a combinação perfeita entre esses fatores resulte em um produto final de boa qualidade (ALBINO, 2009).

A MLC apresenta diversas vantagens quando comparada à madeira maciça. Segundo Pfeil e Pfeil (2003) essas vantagens são, confecção de peças de maior dimensão, a redução dos defeitos ocasionados por secagem irregular, a possibilidade de fazer construções de peças de eixo curvo, e ser possível selecionar as lâminas de melhor qualidade para as posições de maior solicitação de esforço.

A redução da disponibilidade de espécies nativas acarreta na necessidade de desenvolvimento de alternativas viáveis para a utilização racional da madeira. Diante desta realidade, a madeira laminada colada apresenta-se como uma alternativa profícua por ser um material versátil, com respeito às formas, dimensões e resistência dos elementos estruturais, podendo para sua produção serem utilizadas espécies de baixa densidade e até mesmo de qualidade estrutural inferior, reduzindo, assim, a demanda por madeira de elevada qualidade. (FIORELLI, 2005; MIOTTO, DIAS, 2009).

1.2 OBJETIVO GERAL

Produzir elementos de madeira laminada colada a partir da madeira de clones de *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla* e avaliar seu comportamento quando submetida ao esforço de compressão normal as fibras.

1.3 OBJETIVOS ESPECIFICOS

Foram objetivos específicos deste trabalho o estudo em três capítulos:

Capítulo I: Estudo das propriedades físicas e mecânicas em madeira laminada colada de eucalipto.

Capítulo II: Estudo da interface madeira-adesivo em madeira laminada colada de *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla*.

Capítulo III: Correlação entre as propriedades físicas, mecânicas e características anatômicas em madeira laminada colada de *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla*.

2. REFERÊNCIAS

ALBINO, V. C. S. **Estudo do comportamento da colagem da madeira de *Eucalyptus grandis* W. Hill exMaiden com adesivo termoendurecedor resorcinol - formaldeído.** 2009. 89 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.

IORELLI, J. **Estudo teórico e experimental de vigas de madeira laminada colada reforçadas com fibra de vidro.** 2005. 108f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

MIOTTO, J. L.; DIAS, A. A. Produção e avaliação de vigas de madeira laminada colada confeccionadas com lâminas de eucalipto. **Revista Tecnológica**, Maringá, Edição especial ENTECA, 2009.

MOTTA, J. P. **Propriedades tecnológicas da madeira de *Tectona grandis* L.f. proveniente do Vale do Rio Doce, Minas Gerais.** 2011. 113f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES, 2011.

PFEIL, W.; PFEIL, M. **Estruturas de Madeira.** 6^a ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2003.

Capítulo I

ESTUDO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS EM MADEIRA LAMINADA COLADA DE EUCALIPTO

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi determinar as propriedades físicas e mecânicas em madeiras de eucalipto previamente classificadas e segregadas em duas classes de densidade e coladas com dois adesivos (resorcinol-formaldeído e poliuretano de mamona). Os ensaios mecânicos foram realizados visando avaliar a resistência à compressão normal às fibras. Como propriedades físicas foram determinadas o teor de umidade para controle dos ensaios, a retratibilidade e a massa específica aparente. As propriedades mecânicas foram resistência à compressão normal às fibras e ensaios complementares de resistência ao cisalhamento na madeira e cisalhamento na linha de cola. Observou-se que a madeira de *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla* apresentou resultados satisfatórios para ser utilizada na fabricação de MLC, sobretudo naquelas em que foram utilizadas tábuas de maior densidade aparente ($\geq 0,587 \text{ g/cm}^3$) e coladas com o adesivo resorcinol-formaldeído apresentando maiores valores para a solicitação de compressão normal às fibras.

Palavras-chave: ensaios físicos; ensaios mecânicos; colagem.

CHAPTER I

STUDY OF PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES IN LAMINATED WOOD COLLECTED BY EUCALYPTUS

ABSTRACT

The objective of this work was to determine the physical and mechanical properties of eucalyptus wood previously classified and segregated into two density classes and bonded with two adhesives (resorcinol-formaldehyde and castor-polyurethane). The mechanical tests were performed aiming to evaluate the resistance to normal compression to the fibers. As physical properties were determined the moisture content for control of the tests, the retratibility and the apparent specific mass. The mechanical properties were resistance to normal compression to the fibers and complementary tests of shear strength in the wood and shear in the glue line. It was observed that *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla* wood presented satisfactory results to be used in the manufacture of MLC, especially in those using boards of higher bulk density ($\geq 0.587 \text{ g / cm}^3$) and bonded with resorcinol-formaldehyde adhesive presenting higher values for the request of normal compression to the fibers.

Keywords: physical tests; mechanical tests; collage.

1. INTRODUÇÃO

O conhecimento das propriedades de determinado material é indispensável para sua aplicação e utilização de forma correta. A madeira laminada colada não é exceção, por se tratar de um produto oriundo de um organismo biológico, que está sujeita as variações a ela imposta em seu local de origem, como luminosidade, temperatura, disponibilidade hídrica, tratos silviculturais, espaçamento, ataque de organismos predadores, idade e material genético.

Dentre as propriedades físicas que contribuem para as variações ocorridas na madeira se destacam o teor de umidade, a densidade aparente e a retratibilidade. Essas propriedades influenciam no peso, volume, estabilidade dimensional e na resistência mecânica.

O teor de umidade presente em uma peça de madeira está relacionado com o ambiente em que a peça, já processada, está inserida e com a massa específica da madeira. Sendo a madeira um material higroscópico, ela está sujeita as variações que ocorrem na temperatura e umidade relativa do ambiente, sua capacidade de adsorção e desorção serão influenciadas pela sua estrutura anatômica (porosidade) e pela massa específica.

A determinação do teor de umidade presente em uma peça de madeira é de suma importância, pois está diretamente relacionado com a resistência mecânica deste material, quando o teor de umidade se encontra acima do ponto de saturação das fibras a queda da resistência mecânica da madeira a uma determinada solicitação de esforço é evidente.

A relação entre a umidade e a resistência mecânica da madeira foi comprovada por Stangerlin et al. (2014), que ao determinarem as propriedades de flexão estática (elasticidade e resistência) na madeira de *Carya illinoensis* quando esta se encontrava na condição saturada (madeira verde) e à 12% de umidade, constataram que presença de água na madeira reduz substancialmente os valores de resistência e rigidez.

A massa específica da madeira é outra propriedade importante para qualificação deste material, é uma das propriedades mais investigadas por pesquisadores da área de Tecnologia de Produtos Florestais, pois está diretamente relacionada com as demais propriedades que a madeira possui. Em se tratando de

colagem de peças de madeira, seu conhecimento necessita de maior atenção, pois pode facilitar ou dificultar esse processo.

Estudos realizados por Plaster et al. (2008), comprovam que, amostras de MLC provenientes de madeira de alta densidade obtiveram maiores dificuldade de adesão, quando comparados a amostras de baixa densidade.

A retratibilidade da madeira é dependente das propriedades já citadas. Ao ganhar umidade, e quando essa está abaixo do ponto de saturação das fibras (PSF), as paredes celulares estarão completamente saturadas ocorrendo o inchamento da madeira, quando ela perde umidade, abaixo do PSF, ocorre a contração, essas alterações dimensionais são indesejáveis podendo limitar seu uso.

Esse caráter higroscópico da madeira se deve à natureza hidrofílica dos constituintes da parede celular, pois a diminuição ou aumento da água de impregnação aproximam ou afastam as cadeias de celulose e microfibrilas. Este afastamento é devido às hidroxilas presentes na celulose e hemiceluloses serem polares e poderem se ligar às moléculas de água, fazendo com que ocorram as variações dimensionais de contração e inchamento (CALIL JUNIOR et al., 2003; GOMES et al., 2006).

A resistência da madeira a determinada solicitação de esforço também é um parâmetro indispensável para sua classificação e uso. Em se tratando de madeira laminada colada, por ser um elemento estrutural que possui suas lâminas (tábuas) coladas de forma que as fibras fiquem paralelas entre si, à determinação das propriedades mecânicas possibilita, por exemplo, acomodar as peças de maior resistência, nas regiões de maior solicitação de esforço.

Dentre as propriedades mecânicas destacamos a compressão normal às fibras que de acordo com Dias (1994) sua maior frequência se encontra nas regiões dos apoios de peças estruturais, onde são aplicadas forças relativamente altas em uma direção onde a madeira apresenta menor resistência, quando comparada à solicitação à compressão paralela às fibras.

O presente trabalho teve como objetivo determinar as propriedades físicas e mecânicas da madeira oriunda do híbrido *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla* e determinar em qual classe de densidade e qual tipo de adesivo, a MLC apresenta maior resistência a compressão normal às fibras.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O presente estudo foi conduzido no Departamento de Ciências Florestais e da Madeira, do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias, da Universidade Federal do Espírito Santo, em Jerônimo Monteiro – ES.

A madeira utilizada para a realização da pesquisa foi um híbrido de árvores de *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla* com 11 anos de idade procedente da empresa Bahia Produtos de Madeira, localizada na cidade de Nova Viçosa, Bahia.

O lote de madeira foi doado em forma de tábuas, de um total de 40 tábuas, as quais foram alocadas para atingir a umidade de equilíbrio local em ambiente protegido de intempéries. Após atingir a umidade de equilíbrio, foi realizada uma classificação visual, para posterior seccionamento das tábuas nas dimensões desejadas para a produção dos blocos de madeira laminada colada.

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 (1997). Foram determinados o teor de umidade, densidade aparente e a retratibilidade, 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 corpos de prova. Os corpos de prova foram seccionados nas dimensões de 3 x 2 x 5 cm, espessura, largura e comprimento respectivamente, que representam as direções radial, tangencial e longitudinal.

2.2 Adesivos empregados e confecção dos elementos colados

Para a 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 bi componentes à base de óleo de mamona.

A aplicação dos adesivos, a escolha do extensor e do catalizador foi mediante recomendações do fabricante. Para a aplicação do Cascophen RS-216-M foram

adicionados 20% de catalisador FM-60-M. Para a aplicação do poliuretano foi utilizada a proporção de 1:1,2, sendo 1 parte do componente A (um pré-polímero) e 1,2 partes do componente B (um poliol).

Para produção da madeira laminada colada as tábuas foram divididas em conformidade com sua densidade aparente, formando-se 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). Dentro dos grupos, as tábuas foram coladas em função da proximidade da densidade aparente.

Foram aplicados 250 g/m^2 de adesivo em linha de cola simples com auxílio de uma espátula, unidas e prensadas em uma prensa com capacidade 15 ton., durante 48 horas, a uma pressão de 1 MPa e temperatura de 20°C (Figuras 1a, 1b, 1c, 1d) e umidade relativa do ar de 65%, de acordo com recomendações da NBR 7190 (ABNT, 1997).

Após o término da prensagem, os elementos de madeira laminada colada foram dispostos em local coberto e mantidos em equilíbrio higroscópico com o meio, para que se pudesse atingir a cura completa dos adesivos.

Após a divisão dos grupos, as tábuas foram seccionadas e transformadas em lamelas com dimensões de $21 \times 21 \text{ cm}$ e $2,5 \text{ cm}$ de espessura, totalizando 56 lamelas, que coladas em pares, produziram 28 elementos de madeira laminada colada.

Cada grupo foi composto por um total de 28 lamelas, das quais se produziram 14 elementos de madeira laminada colada, sendo 7 desses elementos colados com o adesivo resorcinol-formaldeído, e os outros 7 com o adesivo à base de resina extraída da mamona, sendo este um adesivo bi componente a base de mamona.

Figura 1. Etapas de preparação dos blocos de madeira laminada colada. a) Aplicação do adesivo; b) Espalhamento do adesivo; c) Montagem dos elementos de madeira laminada colada - MLC; d) Aplicação de pressão constante.



Fonte: O Autor.

Em cada ciclo da colagem das lamelas, as peças foram aplainadas na face que recebeu o adesivo com intuito de homogeneizar a superfície para que a união entre duas faces não fosse prejudicada por alguma imperfeição e o fluxo do adesivo não fosse interrompido.

2.3 Caracterização das propriedades mecânicas da madeira laminada colada

Após a produção dos elementos de madeira laminada colada, estes foram aplainados nas faces laterais para remoção do excesso de adesivo devido à pressão

aplicada sobre os mesmos. No Quadro 1 estão descritos os ensaios realizados, bem como os documentos normativos utilizados como referência.

Quadro 1: Descrição dos ensaios mecânicos.

Norma	ASTM D143 (ASTM, 2000)
Ensaio	Compressão normal às fibras e cisalhamento paralelo às fibras
Observações	56, 28 por grupo de densidade aparente, 14 por adesivo, 7 para condição de umidade.
Norma	ASTM D 905 (ASTM, 2009)
Ensaio	Cisalhamento na linha de cola.
Observações	56
Norma	ASTM D-5266 (ASTM, 1999).
Ensaio	Avaliação do percentual de falha na madeira.
Observações	56

2.4 Análise estatística

O experimento foi idealizado no delineamento estatístico inteiramente casualizado no esquema $2 \times 2 \times 2$, sendo densidade aparente em dois níveis, o adesivo em dois níveis e a condição de umidade em dois níveis. Os resultados obtidos foram submetidos à análise de variância a 5% de probabilidade de erro.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Propriedades físicas da madeira

As tábuas apresentam densidade aparente igual a 0,595 g/cm³ (Tabela 1). A densidade é uma importante propriedade para classificação das peças de madeira conforme a classe de resistência mecânica, sendo sua determinação necessária em projetos estruturais. Esta classificação é utilizada na verificação dos esforços que a peça deverá suportar, pois as propriedades mecânicas de resistência e rigidez estão associadas à mesma (VEIGA, 2014).

Tabela 1 – Valores médios para a densidade aparente, teor de umidade, contração e inchamento tangencial e radial para a madeira de *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla*.

Massa específica aparente (g/cm ³)		Teor de umidade (%)	
0,595 (0,107)		9,344 (0,551)	
Retratibilidade			
Contração		Inchamento	
Tangencial	Radial	Tangencial	Radial
7,897 (1,508)	4,492 (1,074)	8,604 (1,803)	4,717(1,198)
Fator anisotrópico (T/R)*			
1,815 (0,392)			

*T = Tangencial; R = Radial; valores entre parênteses referem-se ao desvio padrão.

Fonte: O Autor.

A densidade aparente e o teor de umidade são fatores indispensáveis para fabricação de elementos de madeira laminada colada, uma vez que estes influenciam no tempo de prensagem, na pressão aplicada e na penetração e cura do adesivo, durante o processo de produção (SEGUNDINHO et al., 2015).

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 as quais interferem significativamente em suas propriedades físico-mecânicas tornando importante o conhecimento a respeito das mesmas. A direção transversal necessita de maior atenção, pois se difere entre os sentidos radial e tangencial, sendo o último o que apresenta maior variação (MELO, 2013; OLIVEIRA et al., 2010).

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 (OLIVEIRA et al, 2010).

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 maior resistência ao produto colado.

Na Tabela 1 se pode observar o valor médio do fator anisotrópico das tábuas foi de 1,815. Por meio do valor de contração do sentido transversal, é possível fazer uma relação entre a contração tangencial e a radial, a qual fornece uma ideia do comportamento das madeiras, em relação à secagem, indicando maior ou menor propensão de ocorrerem defeitos nas peças. Os valores 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* (OLIVEIRA et al., 2010).

Após a determinação das propriedades físicas da madeira e de posse dos valores de densidade aparente apresentado pelas tábuas, estas foram divididas em dois grupos.

O primeiro grupo apresentou valores de densidade aparente de 0,406 g/cm³ a 0,586 g/cm³, desta forma foi composto pelas tábuas com densidade menor do que 0,587 g/cm³. O segundo grupo apresentou valores de densidade aparente de 0,587 g/cm³ a 0,928 g/cm³, desta forma foi composto pelas tábuas com densidade aparente maior ou igual a 0,587 g/cm³.

3.2 Propriedades mecânicas da madeira e da madeira laminada colada

Para os ensaios de compressão normal às fibras, cisalhamento paralelo às fibras, cisalhamento na linha de cola e percentual de falha na madeira não houve interação de segunda ordem entre os fatores densidade (Grupo 1 e Grupo 2) x adesivo (PUR e RF) x condição de umidade (madeira seca e saturada). As interações de primeira ordem entre os fatores também foram não significativas, ou

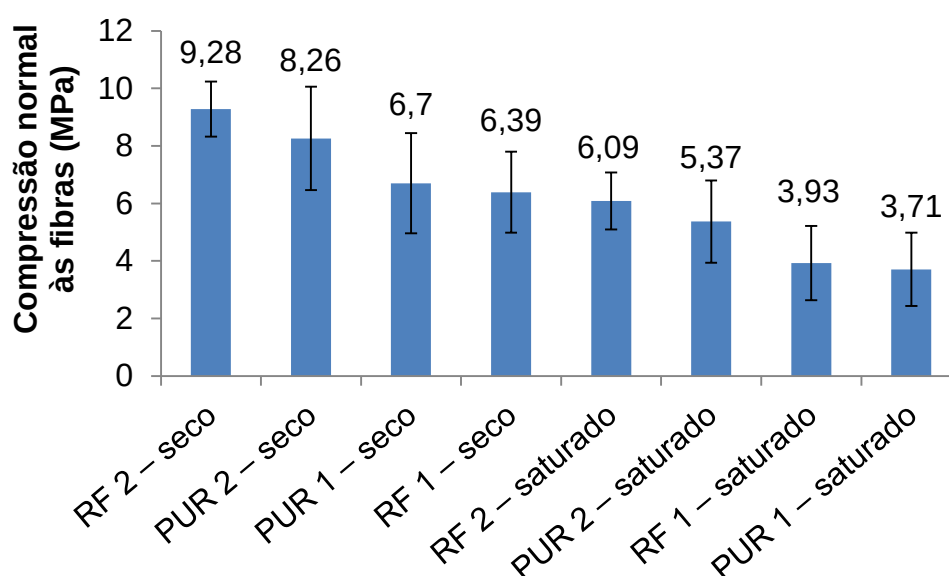
seja, o comportamento de um fator não depende dos níveis dos outros fatores, sendo, portanto independentes. Apenas o ensaio de cisalhamento na linha de cola apresentou interação de primeira ordem significativa ao nível de 5% de probabilidade pelo teste F entre os fatores condição (seca e saturada) e 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 os fatores.

3.2.1 Compressão normal às fibras

Os resultados obtidos para compressão normal às fibras nos corpos de prova de MLC seca e saturada podem ser observados na Figura 2.

Os corpos de prova colados com o adesivo resorcinol-formaldeído, ensaiados na condição seca e representantes do Grupo 2 ($\rho \geq 0,587 \text{ g/cm}^3$) foram os que apresentaram maior média para resistência a 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.

Figura 2 – Valores médios de resistência à compressão normal às fibras na madeira seca e saturada.



*1 = Densidade $< 0,587 \text{ g/cm}^3$; 2 = Densidade $\geq 0,587 \text{ g/cm}^3$; RF: Adesivo resorcinol-formaldeído; PUR: Adesivo poliuretano de mamona.

Fonte: O Autor.

O valor obtido foi superior ao encontrado por Fonte (2004) que em seu estudo sobre pontes protendidas de *Eucalyptus citriodora* obteve o valor médio de 8,6 MPa para resistência a compressão normal às fibras. Prim e Piovesan (2011) estudaram as propriedades de duas espécies de madeiras utilizadas na construção civil obtendo o valor de 8,3 MPa para a espécie de *Eucalyptus grandis* quando submetida a esta solicitação de esforço. Ambos os trabalhos utilizaram a NBR 7190/1997 para condução dos ensaios.

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 ($p < 0,587 \text{ g/cm}^3$), 3,71 Mpa. Este valor foi 5,60% inferior ao menor valor encontrado para o adesivo resorcinol-formaldeído (3,93 MPa) nas mesmas condições.

Este resultado se atribui a densidade das peças que em função de sua estrutura anatômica apresentou maior proporção de espaços vazios possuindo menor massa por unidade de volume para resistirem à solicitação de esforço.

Este fato, acrescido do elevado teor de umidade das peças faz com que a resistência da madeira diminua, pois com o aumento da água de impregnação acumulada nas paredes celulares ocorre a redução das pontes de hidrogênio que são responsáveis por ligarem as moléculas de água às microfibrilas dos polissacarídeos que formam a madeira. A medida que o teor de umidade é elevado, ocorre o afastamento das microfibrilas e redução da resistência mecânica (LOGSDON, 1998)

Na análise isolada dos fatores, todos os possíveis contrastes entre as médias dos níveis do fator adesivo, foram estatisticamente nulos, Teste F ($p < 0,05$). Já para os fatores condição de umidade e densidade aparente, o contraste entre as médias foi significativo (Tabela 2).

Tabela 2 – Médias da resistência à compressão normal às fibras analisando os grupos de densidade e o teor de umidade.

Propriedade	Classe de densidade	
Densidade aparente (g/cm ³)	D1 [*]	D2
	5,18b	7,25a
Classe de umidade		
Umidade (%)	C1	C2
	7,66a	4,77b

*D1: densidade menor que 0,587 g/cm³; D2: densidade maior ou igual a 0,587 g/cm³; C1: corpo de prova na condição seca; C2: corpo de prova na condição saturada.

Fonte: O Autor.

Pela Tabela 2 se pode observar que os corpos de prova representantes do Grupo 2 ($\rho \geq 0,587 \text{ g/cm}^3$) foram os que apresentaram maior resistência ao ensaio de compressão normal às fibras, ocorrendo o mesmo com os corpos de prova ensaiados na condição seca.

Este fato se deve a resistência da madeira variar com seu teor de umidade. 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, e é praticamente desprezível para teores de umidade acima do PSF. Também se pode constatar que à medida que a massa específica da madeira aumenta, eleva-se proporcionalmente a resistência mecânica e em sentido contrário, diminui sua permeabilidade (CARNEIRO, 2010; LOGSDON, 1998).

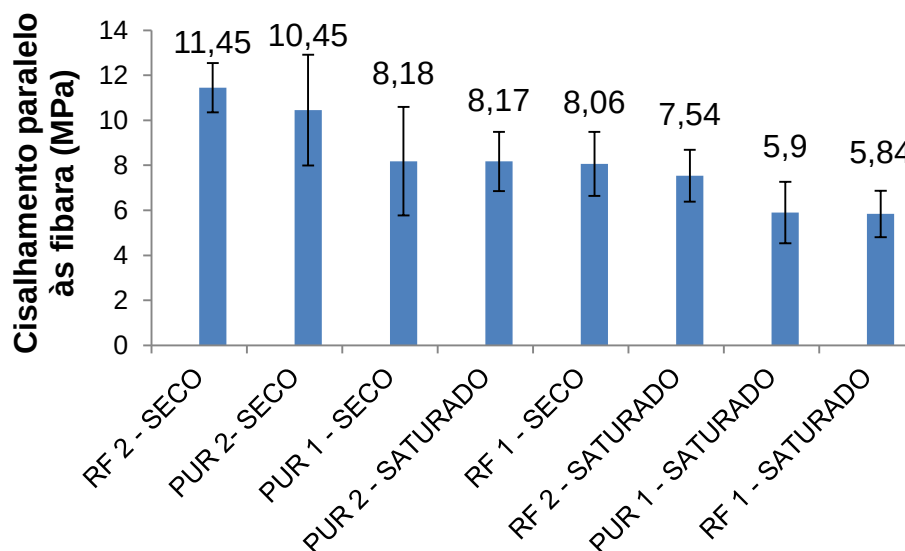
3.2.2 Cisalhamento paralelo às fibras

Os resultados obtidos no ensaio de resistência ao cisalhamento paralelo às fibras dos corpos de prova de MLC secos e saturados são expostos na Figura 3.

Os corpos de prova colados com o adesivo resorcinol-formaldeído, ensaiados na condição seca e representante do Grupo 2 ($\rho \geq 0,587 \text{ g/cm}^3$) apresentaram maior média para resistência ao cisalhamento paralelo às fibras (11,45 MPa) 8,73% superior aos colados com o adesivo poliuretano de mamona (10,45 MPa) nas

mesmas condições. Plaster et al. (2008), para o comportamento de juntas coladas da madeira serrada de *Eucalyptus* sp., encontraram para esta solicitação de esforço o valor de 114 Kgf/cm² (11,18 Mpa).

Figura 3 - Valores médios de resistências ao cisalhamento na madeira seca e saturada.



*1 = Densidade < 0,587 g/cm³; 2 = Densidade ≥ 0,587 g/cm³; RF: Adesivo resorcinol-formaldeído; PUR: Adesivo poliuretano de mamona.

Fonte: O Autor.

Já os corpos de prova colados com o adesivo resorcinol-formaldeído, ensaiados na condição saturada e representante do Grupo 1 ($p < 0,587 \text{ g/cm}^3$) foram os que apresentaram menor média para resistência ao cisalhamento paralelo às fibras (5,84 MPa), seu valor foi 1,02% inferior ao menor valor para o adesivo poliuretano nas mesmas condições (5,90 Mpa).

Sendo neste ensaio a carga aplicada na madeira, o adesivo possui pequena parcela no aumento da resistência mecânica, ocorrendo inverso com a densidade. Na Figura 3 nota-se que três dos quatro maiores valores foram apresentados pelo Grupo 2 ($p \geq 0,587 \text{ g/cm}^3$) (11,45 MPa, 10,45 MPa e 8,18 MPa) o que corrobora com o exposto.

Na análise isolada dos fatores, todos os possíveis contrastes entre as médias dos níveis do fator adesivo, foram estatisticamente nulos pelo Teste F ($p < 0,05$). Para os fatores condição e densidade, o contraste entre as médias foi significativo (Tabela 3).

Tabela 3 - Médias da resistência ao cisalhamento paralelo às fibras (MPa) analisado nos grupos de densidade e condição de umidade.

Propriedade	Classe de densidade	
Densidade aparente (g/cm³)	D1 [*]	D2
	6,99b	9,40a
Classe de umidade		
Umidade (%)	C1	C2
	9,53a	6,86b

* D1: densidade menor que 0,587 g/cm³; D2: densidade maior ou igual a 0,587 g/cm³; C1: corpo de prova na condição seca; C2: corpo de prova na condição saturada.

Fonte: O Autor.

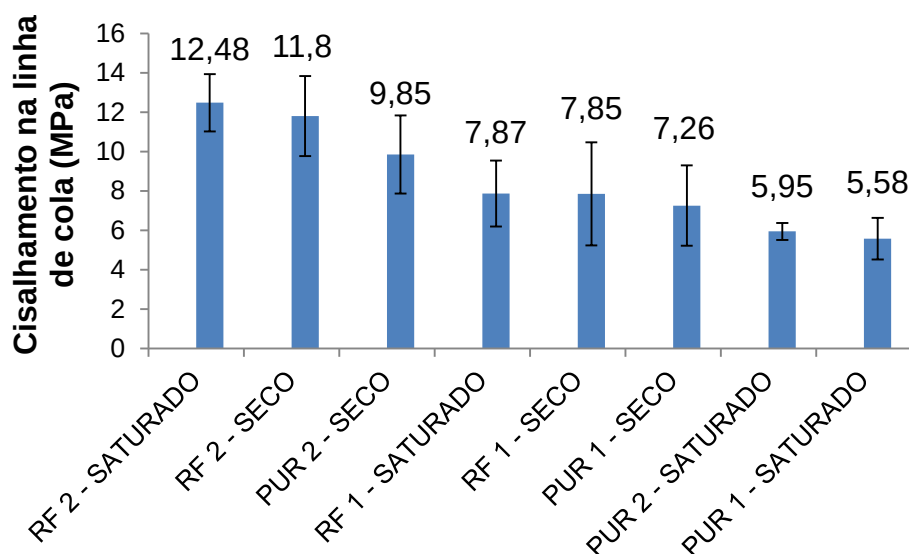
Observar-se que os corpos de prova representantes do Grupo 2 ($\rho \geq 0,587$ g/cm³) apresentaram maior média para a resistência ao cisalhamento paralelo às fibras (9,40), ocorrendo o mesmo com aqueles ensaiados na condição seca (9,53). Este fato é atribuído a maior quantidade de lenho nas tábuas deste grupo, bem como pela aproximação da distância entre as microfibrilas proporcionado pelo baixo teor de umidade das peças.

3.2.3 Cisalhamento na linha de cola

Na Figura 4 estão descritos os resultados para o ensaio de resistência ao cisalhamento na linha de cola. Para este ensaio os melhores desempenhos também foram para os corpos de prova colados com o adesivo resorcinol-formaldeído, representantes do Grupo 2 ($\rho \geq 0,587$ g/cm³), porém ensaiados na condição saturada (12,48 MPa).

Motta et al. (2012) ao estudarem a influência do teor de umidade nas propriedades de adesão da madeira de eucalipto encontraram os valores de 113,25 Kgf/cm² (11,11 MPa), 117,30 Kgf/cm² (11,50 MPa), 115,57 Kgf/cm² (11,33 MPa), 119,74 Kgf/cm² (11,74 MPa), 128, 77 Kgf/cm² (12,63 Mpa) para a resistência ao cisalhamento na linha de cola para as condições de umidade de 8,10, 12, 14 e 16% respectivamente, ocorrendo para este adesivo aumento da resistência com o aumento do teor de umidade.

Figura 4 - Valores médios de resistências ao cisalhamento na linha de cola.



*1 = Densidade < 0,587 g/cm³; 2 = Densidade ≥ 0,587 g/cm³; RF: Adesivo Resorcinol-formaldeído; PUR: Adesivo poliuretano de mamona.

Fonte: O Autor.

Este fato pode ser atribuído a eficaz resistência do adesivo ao cisalhamento e por ser à prova d'água proporcionando juntas resistentes à imersão em água fria ou quente, sendo utilizado nas indústrias naval e de madeira laminada colada (MLC). (LIMA et al., 2014; PAES et al. 2009).

As interações de primeira ordem 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 ($p < 0,05$), evidenciando desta forma dependência entre os fatores. O efeito das interações foi desdobrado e analisado (Tabelas 4 e 5).

No estudo do comportamento do fator condição (seca e saturada) dentro de cada nível do fator adesivo (PUR e RF), constatou-se que dentro do nível C1 (seca) e C2 (saturada), os contrastes entre as médias dos níveis do adesivo (PUR e RF) foram estatisticamente diferente de zero.

Já para o estudo do fator adesivo (PUR e RF) dentro de cada nível do fator condição (seca e saturada), verifica-se que dentro do nível A2 (RF) o contraste entre as médias foi estatisticamente nulo, ocorrendo o inverso dentro do nível A1 (PUR).

Para detectar essas diferenças, as médias dos níveis do fator condição (seca e saturada) em cada combinação do fator adesivo (PUR e RF) estão descritas na Tabela 4. Observa-se que a maior média foi apresentada pelos corpos de prova colados com o adesivo resorcinol-formaldeído e ensaiados na condição saturada (20,36).

Tabela 4 – 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	
	A1	A2
C1	17,11Ba*	19,64Aa
C2	11,53Bb	20,36Aa

*Letras maiúsculas na horizontal e minúsculas na vertical não diferem entre si; C1: corpo de prova na condição seca; C2: corpo de prova na condição saturada; A1: adesivo poliuretano de mamona; A2: adesivo resorcinol-formaldeído.

Fonte: O Autor.

Para o estudo do comportamento do fator adesivo (PUR e RFF) dentro de cada nível do fator densidade (Grupo 1 e Grupo 2), constatou-se que dentro do nível A1 (PUR) e A2 (RF), o contraste entre as médias dos níveis do fator densidade foi estatisticamente diferente de zero, 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 RFF). Na Tabela 5, observa-se que a maior média foi para o Grupo 2 ($p \geq 0,587 \text{ g/cm}^3$) coladas com o adesivo resorcinol-formaldeído (24,29).

Tabela 5 - Média do comportamento para resistência ao cisalhamento na linha de cola (MPa) dos fatores adesivo dentro das classes de densidade.

Adesivo	Densidade	
	D1	D2
A1	12,83Bb*	15,80Ab
A2	15,72Ba	24,29Aa

*Letras maiúsculas na horizontal e minúsculas na vertical não diferem entre si. A1: adesivo poliuretano de mamona; A2: adesivo resorcinol-fenol-formaldeído; D1: densidade menor que $0,587 \text{ g/cm}^3$; D2: densidade maior ou igual a $0,587 \text{ g/cm}^3$.

Fonte: O Autor.

Na análise isolada dos fatores para o percentual de falha na madeira, 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 (madeira seca e saturada), foram estatisticamente nulos (Tabela 6).

Tabela 6 – Média para o percentual de falha na madeira analisando os fatores umidade (%), densidade aparente (g/cm³) e adesivo.

Característica avaliada	Classe		Falha na madeira (%)
Densidade	D1*	densidade <0,587 g/cm ³	76,25a
	D2	densidade ≥ 0,587 g/cm ³	65,36b
Condição de umidade	C1	condição seca	77,21a
	C2	condição saturada	64,39b
Adesivo utilizado	A1	poliuretano de mamona	54,71b
	A2	resorcinol-formaldeído	86,89a

*D1: densidade menor que 0,587 g/cm³; D2: densidade maior ou igual a 0,587 g/cm³; C1: corpo de prova na condição seca; C2: corpo de prova na condição saturada; A1: adesivo poliuretano; A2: adesivo resorcinol-fenol-formaldeído.

Fonte: O Autor.

Observa-se (Tabela 6) que os corpos de prova representantes do Grupo 1 ($\rho < 0,587 \text{ g/cm}^3$) apresentaram maior média para o percentual de falha na madeira, sendo 14,28% superior aos corpos de prova do Grupo 2 ($\rho \geq 0,587 \text{ g/cm}^3$), seguido dos corpos de prova ensaiados na condição seca.

O adesivo resorcinol-formaldeído 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 37,04% superior aos valores apresentados pelo adesivo poliuretano de mamona 54,71%.

Segundinho et al. (2017) estudando a espécie de eucalipto 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. (2008) obteve valor médio de 74,41% para o adesivo resorcinol-formaldeído e Bianchi et al. (2017) encontram 29,75% de falha na madeira para o adesivo resorcinol-formaldeído e 71,10% para o adesivo poliuretano de mamona.

Sendo assim os valores obtidos neste trabalho pertencem ao intervalo dos valores encontrados nas literaturas consultadas, 29,75 a 91,889% para o adesivo resorcinol formaldeído e 44,167% a 71,10 a para o adesivo poliuretano de mamona.

Uma boa estimativa da qualidade da colagem pode ser obtida através do percentual de falha na madeira, em que elevados valores para o porcentual de falha na madeira são indicativos de boa qualidade na adesão, pois indicam que a coesão do adesivo e a resistência da interface adesivo/madeira são similares ou mais elevadas que a resistência da própria madeira (VITAL et al., 2005).

4. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que:

O adesivo resorcinol-formaldeído (RF) foi mais viável para fabricação de elementos estruturais de madeira laminada colada (MLC) em ambientes secos e saturados para a madeira de *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla*.

O Grupo 2 ($\rho \geq 0,587 \text{ g/cm}^3$) junto com o adesivo resorcinol-formaldeído foram os que apresentaram maiores valores médios para o ensaio de resistência a compressão normal às fibras, resistência ao cisalhamento paralelo às fibras e cisalhamento na linha de cola.

O adesivo resorcinol-formaldeído contribuiu para a maior porcentagem de falha na madeira evidenciando boa interação com a madeira utilizada.

5. REFERÊNCIAS

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

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 143**: Standard test methods for small clear specimens of timber. Philadelphia, PA, 2000.

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.

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.

BIANCHE, J. J.; TEIXEIRA, A. P. M.; LADEIRA, J. P. S.; CARNEIRO, A. C. O.; CASTRO, R. V. O.; LUCIA, R. M. D. Cisalhamento na linha de cola de *Eucalyptus* sp. colado com diferentes adesivos e diferentes gramaturas. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 24, 2017.

CALIL JUNIOR., C.; LAHR, F.A.R.; DIAS, A.A. **Dimensionamento de elementos estruturais de madeira**. Barueri, SP: Manole, 2003. 152p.

CARNEIRO, R. P. **Colagem de junta de madeira com adesivo epóxi**. 2010. 90f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2010.

DIAS, A. A. **Estudo da solicitação de compressão normal às fibras da madeira**. 1994. 144f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 1994.

FONTE, T. F. **Pontes protendidas de eucalipto citriodora**. 2004. 116f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2004.

GOMES, D. F. F.; SILVA, J. R. M.; BIANCHI, M. L.; TRUGILHO, P. F. Avaliação da estabilidade dimensional da madeira acetilada de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 70, v. 34, p. 125-130, 2006.

LIMA, D. M.; AMORIM, M. M.; LIMA JUNIRO, H. C.; BARBOSA, N. P.; WILRICH, F. L. Avaliação do comportamento de vigas de bambu laminado colada submetidas à flexão. **Ambiente Construindo**, Porto Alegre, v. 14, n. 1, p. 15-27, 2014.

LOGSDON, N. B. **Influência da umidade nas propriedades de resistência e rigidez da madeira**. 1998. 174f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 1998.

MELO, R. R. Estabilidade dimensional de compostos de madeira. **Ciência da Madeira**, Pelotas, v. 4, n. 2, p. 152-195, 2013.

MOTTA, J. P.; OLIVEIRA, J. T. S.; ALVES, R. C. Influência do teor de umidade nas propriedades de adesão da madeira de eucalipto. **Construindo**, Belo Horizonte, v.4, n. 2, p. 1-8, 2012.

OLIVEIRA, J. T. S.; TOMAZELLO FILHO, M.; FIEDLER, N. C. Avaliação da retratibilidade da madeira de sete espécies de *eucalyptus*. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 34, n. 5, p. 929-936, 2010.

PAES, J. B.; OLIVEIRA, A. K. F.; OLIVEIRA, E.; LIMA, C. R. Caracterização físico-mecânica do laminado colado de bambu (*Dendrocalamus giganteus*). **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 19, n. 1, p. 41-51, 2009.

PLASTER, O. B.; OLIVEIRA, J. T. S.; ABRAHÃO, C. P.; BRAZ, R. L. Comportamento de juntas coladas da madeira serrada de *Eucalyptus* sp. **Cerne**, Lavras, v. 14, n. 3, p. 251-258, 2008.

PRIM, J. A.; PIOVESAN, A. Z. Estudo sobre as propriedades de duas espécies de madeiras utilizadas na construção civil. **Unoesc e Ciência**, Jaoçaba, v. 2, n. 1, p. 77-86, 2011.

SEGUNDINHO, P. G. A.; FRANÇA, L. C. A.; NETO, P. N. M.; GONÇALVES, F. G.; OLIVEIRA, J. T. S. Madeira lamelada colada (MLC) com Acácia mangium e adesivos estruturais. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 43, n. 107, p. 533-540, 2015.

SEGUNDINHO, P. G. A.; GONÇALVES, F. G.; GAVA, G. C.; TINTI, V. P.; ALVES, S. D.; REGAZZI, A. J. Eficiência da colagem de madeira tratada de *Eucalyptus cloeziana* F. Muell para produção de madeira laminada colada (MLC). **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 22, n. 2, p. e11808, 2017.

STANGERLIN, D. M.; MELO, R. R.; GATTO, D. A.; CADEMARTORI, P. H. G. Propriedades de flexão estática da madeira de *Carya illinoensis* em duas condições de umidade. **Ciência da Madeira**, Pelotas, v. 1, n. 2, p. 70-79, 2014.

VEIGA, N. S. **Inferência da densidade da madeira estimada por esclerometria**. 2014. 68f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2014.

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). Viçosa. **Revista Árvore**, v. 29, n. 5, p. 801-807, 2005.

Capítulo II

ESTUDO DA INTERFACE MADEIRA-ADESIVO EM MADEIRA LAMINADA COLADA DE *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla*

RESUMO

Os objetivos desse estudo foram visualizar a interface madeira-adesivo, mensurar a espessura da linha de cola e avaliar a interação dessa variável com a densidade aparente de juntas coladas com os adesivos resorcinol-formaldeído e com o adesivo poliuretano de mamona. Foi realizada a caracterização anatômica da madeira de *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla*, para esta finalidade foram preparadas lâminas histológicas para o estudo anatômico e realizada a mensuração da linha de cola. Também foram produzidos corpos de prova para os ensaios de delaminação, de acordo com instrumento normativo. O experimento foi um delineamento inteiramente casualizado no esquema fatorial 2×2 , sendo densidade aparente em dois níveis e o adesivo em dois níveis. Houve penetração do adesivo nos vasos e nos raios e a espessura da linha de cola foi maior nas tábuas com densidade $\geq 0,587 \text{ g/cm}^3$ coladas com o adesivo resorcinol-formaldeído.

Palavras-chave: linha de cola; anatomia da madeira; propriedades físicas, resorcinol-formaldeído; poliuretano de mamona.

CHAPTER II

STUDY OF WOOD-ADHESIVE INTERFACE IN WOODED LAMINATED WOOD OF *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla*

ABSTRACT

The objectives of this study were to visualize the wood-adhesive interface, to measure the thickness of the glue line and to evaluate the interaction of this variable with the apparent density of joints bonded with resorcinol-formaldehyde adhesives and with the polyurethane castor adhesive. The anatomical characterization of the wood of *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla* was performed, for this purpose histological slides were prepared for the anatomical study and the tail line measurement was performed. Test specimens were also produced for the delamination assays, according to the normative instrument. The experiment was a completely randomized design in the 2 × 2 factorial scheme, with apparent density at two levels and the adhesive at two levels. There was penetration of the adhesive into the vessels and the rays and the thickness of the glue line was higher in the boards with density $\geq 0.587 \text{ g / cm}^3$ bonded with the resorcinol-formaldehyde adhesive.

Keywords: glue line; anatomy of wood; physical properties, resorcinol-formaldehyde; castor polyurethane.

1. INTRODUÇÃO

Todas as etapas do processo de produção de determinado material devem ser executadas corretamente, sendo determinado o nível de execução por meio de ensaios regulamentados por normas específicas.

A madeira laminada colada, um produto estrutural obtido pela colagem de tábuas com as fibras paralelas entre si com emprego de adesivo, necessita de informações a respeito da resistência mecânica desse produto, e dentre as variáveis que podem responder determinado comportamento mecânico se pode citar a densidade aparente e a espessura da linha de cola.

A densidade aparente fornece informações para subsidiar os métodos que deverão ser adotados durante o processo de colagem, pela sua determinação é possível estimar a proporção de espaços intercelulares desobstruídos disponíveis para a inserção de alguma substância, em se tratando de colagem, para recebimento do adesivo.

A proporção de espaços vazios aliado as dimensões e disposição dos elementos celulares irão exercer influência sobre a mobilidade do adesivo e sua penetração na estrutura da madeira.

Com a caracterização anatômica se pode visualizar a distribuição de seus elementos celulares, sua proporção, diâmetro, altura e largura. Estes parâmetros estão associados à porosidade e permeabilidade, que contribui para penetração do adesivo, sua profundidade nos espaços vazios do aderente e formação de linha de cola resistente à delaminação.

O adesivo aplicado sobre a superfície de uma peça de madeira penetra em seus espaços intercelulares preenchendo-os e se ancorando com a formação de “ganchos”. A densidade aparente da madeira irá favorecer ou dificultar esta mobilidade e penetração.

As características anatômicas da espécie influenciarão na formação da linha de cola, podendo ocorrer dois tipos de linhas irregulares, espessa e faminta. Quando são favoráveis (baixa densidade aparente, vasos com maior frequência e com maiores diâmetros, raios altos e largos) podem resultar na penetração excessiva do adesivo, caso este não apresente uma viscosidade ideal, e na formação de linha de cola faminta.

Quando as características anatômicas da espécie são desfavoráveis, ocorrerá baixa penetração e a formação de linha de cola espessa. Ambos os tipos de linha de cola são indesejáveis, pois sua ocorrência acarreta na diminuição da resistência mecânica da junta colada podendo ocorrer a separação das camadas adjacentes do laminado.

O fenômeno físico-químico de adesão prevê um mecanismo de interação entre superfícies sólidas unidas por uma substância com capacidade de manter unidos outros materiais. A função de um adesivo, além de aderir dois substratos, é fluir e preencher espaços vazios entre as juntas a serem coladas, diminuindo assim a distância entre elas, gerando interações entre o adesivo e o substrato (BIANCHE et al., 2017).

A compreensão a respeito da interação da interface entre a madeira e o adesivo utilizado na confecção de produtos colados é uma importante análise para avaliação da qualidade da colagem, principalmente em relação à madeira do gênero *Eucalyptus*, que apresenta rápido crescimento e uma grande área no que se refere a florestas plantadas (ALBINO, 2009).

O trabalho teve como objetivo mensurar a espessura da linha de cola principal e secundária e correlacionar esta variável com a densidade aparente da madeira de *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla*. Também foi realizada a caracterização anatômica da madeira em estudo com intuito de descrever as dimensões e distribuição de seus elementos.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O presente estudo foi conduzido no Departamento de Ciências Florestais e da Madeira, do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias, da Universidade Federal do Espírito Santo, em Jerônimo Monteiro – ES.

A madeira utilizada para a realização da pesquisa foi um híbrido de árvores de *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla* com 11 anos de idade procedente da empresa Bahia Produtos de Madeira, localizada na cidade de Nova Viçosa, Bahia.

O lote de madeira foi doado em forma de tábuas, de um total de 40 tábuas, as quais foram alocadas para atingir a umidade de equilíbrio local em ambiente protegido de intempéries. Após atingir a umidade de equilíbrio, foi realizada uma

classificação visual, para posterior seccionamento das tábuas nas dimensões desejadas para a produção dos blocos de madeira laminada colada.

2.1 Caracterização das propriedades 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 (1997). Foram determinados o teor de umidade e a densidade aparente 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 corpos de prova. Os corpos de prova foram seccionados nas dimensões de 3 x 2 x 5 cm, espessura, largura e comprimento respectivamente, que representam as direções radial, tangencial e longitudinal.

2.2 Adesivos empregados e confecção dos elementos colados

Para a 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 bi componentes à base de óleo de mamona.

A aplicação dos adesivos, a escolha do extensor e do catalizador foi mediante recomendações do fabricante. Para a aplicação do Cascophen RS-216-M foram adicionados 20% de catalisador FM-60-M. Para a aplicação do poliuretano foi utilizada a proporção de 1:1,2, sendo 1 parte do componente A (um pré-polímero) e 1,2 partes do componente B (um poliol).

Para produção da madeira laminada colada as tábuas foram divididas em conformidade com sua densidade aparente, formando-se 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). Dentro dos grupos, as tábuas foram coladas em função da proximidade da densidade aparente.

Após a divisão dos grupos, as tábuas foram seccionadas e transformadas em lamelas com dimensões de 21 x 21 cm e 2,5 cm de espessura, totalizando 56 lamelas, que produziram 28 elementos de madeira laminada colada.

Cada grupo foi composto por um total de 28 lamelas, das quais se produziram 14 elementos de madeira laminada colada, sendo 7 desses elementos colados com o adesivo resorcinol-formaldeído, e os outros 7 com o adesivo bi componente a base de mamona.

Foram aplicados 250 g/m^2 de adesivo em linha de cola simples com auxílio de uma espátula, unidas e prensadas em uma prensa com capacidade 15 ton., durante 48 horas a uma pressão de 1 MPa e temperatura de 20°C , de acordo com recomendações da NBR 7190 (ABNT, 1997). Após o término da prensagem, os elementos de madeira laminada colada foram dispostos em local coberto e mantidos em equilíbrio higroscópico com o meio, para que se pudesse atingir a cura completa dos adesivos.

Em cada ciclo da colagem das lamelas, estas foram aplainadas na face que recebeu o adesivo com intuito de homogeneizar a superfície para que a união entre duas faces não fosse prejudicada por alguma imperfeição e o fluxo do adesivo não fosse interrompido.

2.3 Visualização da interface madeira-adesivo

Para o estudo da interface madeira-adesivo foi adotada a metodologia de Albino et al. (2010). As amostras foram obtidas de um cubo central de $0,5 \times 0,5 \times 0,5 \text{ cm}$ a partir das juntas coladas.

Esses cubos foram dispostos em um béquer com água destilada sobre uma chapa aquecedora até alcançar a ebulição da água. Decorrido este período, produziram-se as lâminas com o uso de um micrótomo de deslize, no qual se retirou de cada cubo duas lâminas que foram montadas com uso de glicerina e água destilada.

Foram preparados um total de 28 cubos, 14 para o Grupo 1 ($< 0,587 \text{ g/cm}^3$) e 14 para o Grupo 2 ($\geq 0,587 \text{ g/cm}^3$), dentro dos grupos, 7 para cada adesivo, dos quais deram origem a 56 lâminas. Para cada cubo foi realizada 30 medições distribuídas em suas respectivas lâminas, 15 para linha de cola principal e 15 para linha de cola secundária (Tabela 1).

Tabela 1. Distribuição das medições nas linhas de cola.

Densidade × Adesivo	LP	LS	TOTAL
D1AD1*	105	105	210
D1AD2	105	105	210
D2AD1	105	105	210
D2AD2	105	105	210
TOTAL	420	420	840

*D1: densidade menor que 0,587 g/cm³; D2: densidade maior ou igual a 0,587 g/cm³; AD1: adesivo poliuretano de mamona; AD2: adesivo resorcinol-formaldeído; LP: Linha de cola principal; LS: Linha de cola secundária.

Fonte: O Autor.

A mensuração da espessura das linhas de cola principal e secundária foi realizada com auxílio de uma lente de 5x de aumento a partir de medições feitas de uma extremidade a outra na largura da linha de cola, com a utilização do software *AxioVision* Rel. 4.5, conforme a metodologia de Albino et al. (2010).

2.4 Caracterização anatômica

Para confecção de lâminas para realização da caracterização anatômica, foram cortados corpos de prova nas dimensões 1,0 x 1,5 x 2,0 cm, nas direções radiais, tangenciais e longitudinais respectivamente.

Cada corpo-de-prova foi amolecido em água destilada até à ebulição e fixado no micrótomo de deslize, para a obtenção dos cortes dos planos transversal, radial e tangencial, sendo em seguida montados em lâminas temporárias, com uso de glicerina e água destilada.

Foram feitas fotomicrográficas das lâminas, com o uso do software *AxioVision* Rel. 4.5. A identificação microscópica foi realizada com auxílio de uma lente de 10x de aumento, e foram observadas as características anatômicas como poros (vasos) e raios.

Os parâmetros mensurados foram: para os vasos, frequência vascular em poros/mm² e o diâmetro em micrômetro, para os raios, a altura, a largura em

micrômetro e a frequência em raios/mm de acordo com a norma *International Association of Wood Anatomists* – IAWA (1989).

2.5 Ensaio de delaminação nos blocos de madeira laminada colada

O ensaio de delaminação foi realizado conforme a *American Institute of Timber Construction* norma AITC T110 (2007). O ensaio consistiu em colocar os corpos de prova dentro de uma autoclave (Figura 1), expondo as linhas de cola a tensões causadas pelo efeito de vácuo e pressão, em três ciclos de umedecimento e secagem, durante um período de 5 dias.

Na primeira etapa do ensaio, os corpos de prova foram inseridos em um autoclave sendo aplicado vácuo de 75 ± 10 kPa, por um período de 2 horas. Decorrido o tempo, o vácuo foi liberado e aplicou-se água seguida da aplicação de pressão de 540 ± 20 kPa durante 2 horas.

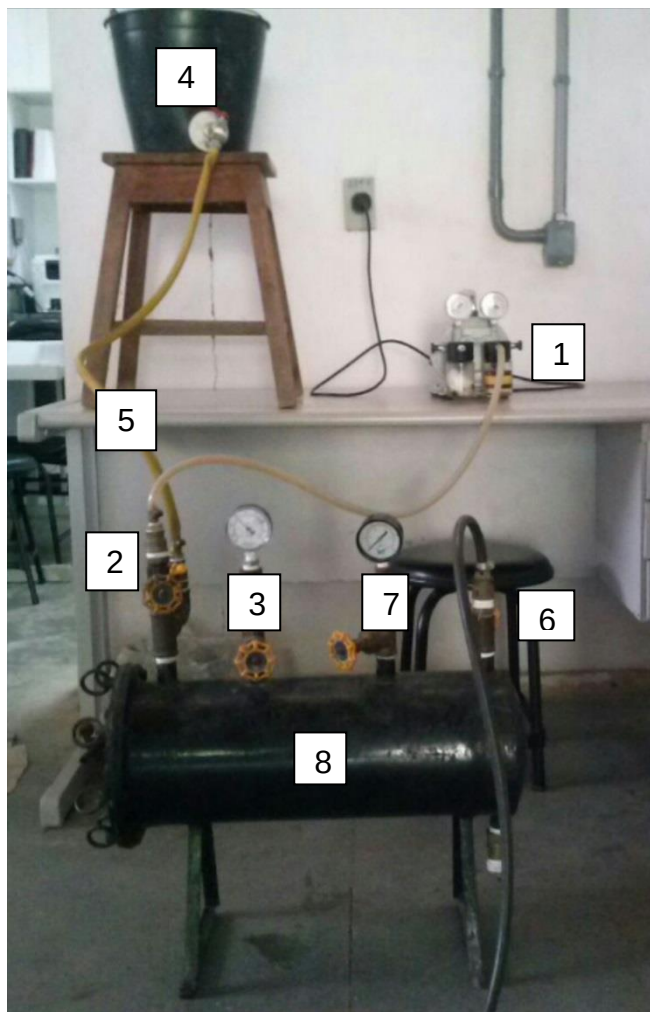
Após esse período, novamente aplicou-se vácuo de 75 ± 10 kPa, por um período de 2 horas, seguido da aplicação da água seguida de pressão de 540 ± 20 kPa durante 2 horas, totalizando 8 horas de permanência na autoclave.

Após decorrido o período de permanência na autoclave, os corpos de prova foram retirados e alocados em local coberto para redução da umidade por um período de 24 horas, totalizando 32 horas no primeiro ciclo.

No segundo e terceiro ciclos foram repetidos os mesmos procedimentos do primeiro ciclo. Ao final do ensaio, previu-se o comportamento da madeira laminada colada exposta ao exterior, por meio da porcentagem de delaminação, que é obtida nas duas faces de topo dos corpos de prova.

A Figura 1 ilustra o equipamento para realização do ensaio. A porcentagem de delaminação foi obtida por meio da relação entre o comprimento máximo da abertura (fenda) de uma linha de cola e o seu comprimento

Figura 1. Equipamento utilizado para o ensaio de delaminação.



*1: Bomba de vácuo; 2: Válvula para aplicação do vácuo; 3: Relógio marcador da bomba de vácuo; 4: Recipiente com água; 5: Mangueira para inserção de água na autoclave; 6: Válvula para aplicação da pressão; 7: Relógio marcador da pressão aplicada; 8: Autoclave.

Fonte: O Autor.

2.6 Análise estatística

O experimento foi idealizado no delineamento inteiramente casualizado no esquema fatorial 2×2 , sendo a densidade aparente em dois níveis e o adesivo em dois níveis. Os resultados obtidos foram submetidos à análise de variância a 5% de probabilidade de erro. Também foi realizada uma estatística descritiva para analisar quantitativamente as características anatômicas da espécie em estudo.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

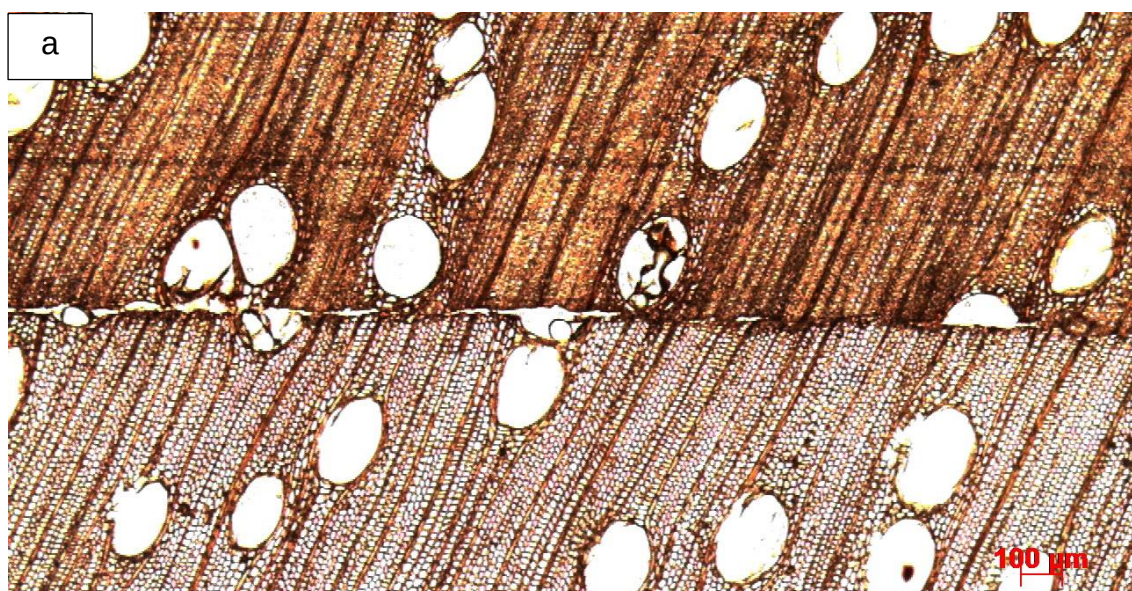
3.1 Propriedades físicas da madeira

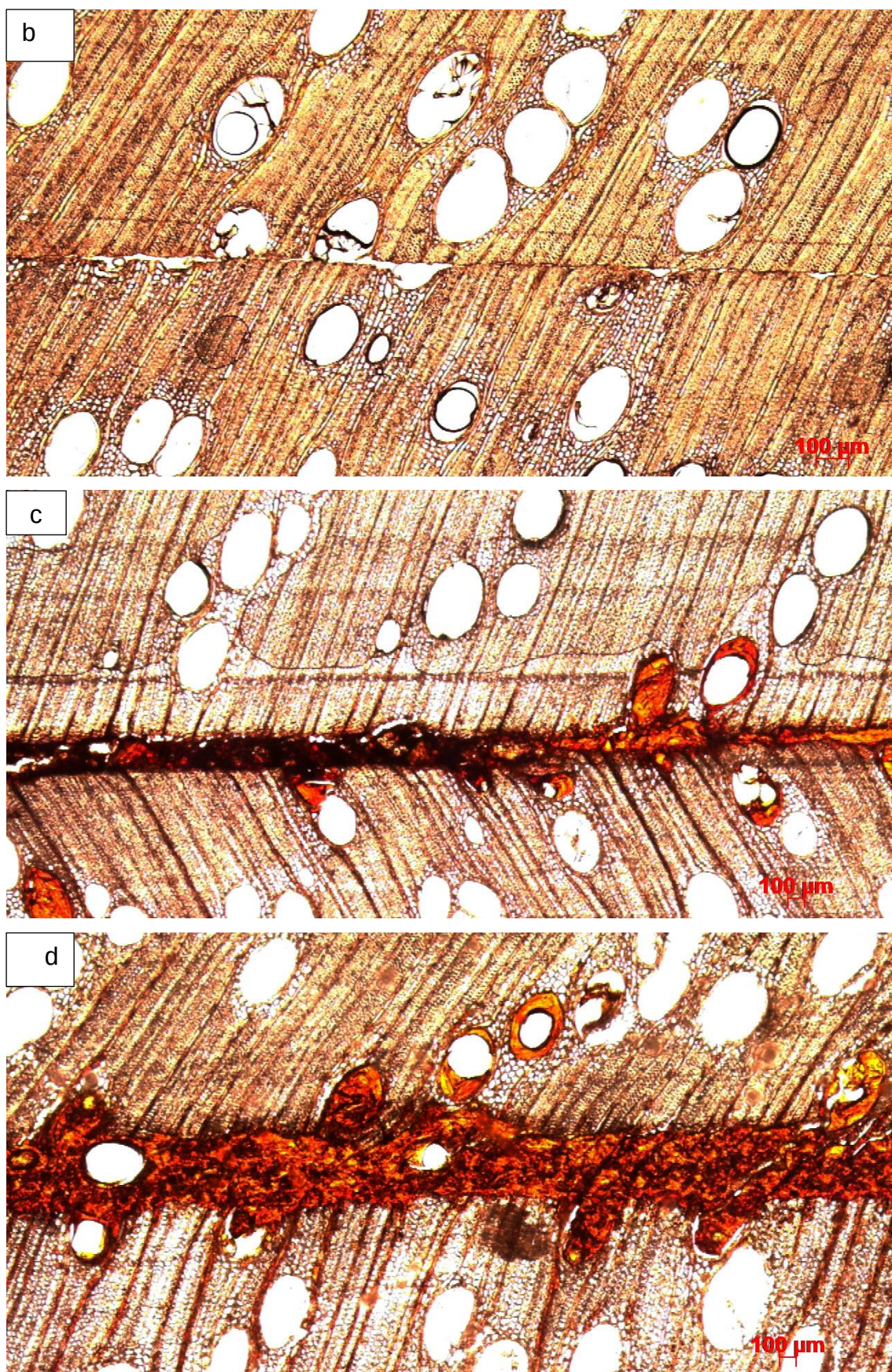
A madeira de *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla* tiveram densidade aparente média de $0,595 \text{ g/cm}^3$ e o teor de umidade médio de 9,344%. Essas propriedades influenciam na penetração do adesivo, na pressão aplicada, no tempo de prensagem e na cura do adesivo fazendo da sua determinação fator indispensável para a produção de elementos de madeira laminada colada (SEGUNDINHO et al., 2015).

3.2 Interface madeira-adesivo

As Figuras de 2a, 2b, 2c, 2d mostram a interface madeira - adesivo na face transversal das juntas coladas com os adesivos poliuretano de mamona e resorcinol-formaldeído para o material em estudo.

Figura 2. Linha de cola no plano transversal das juntas coladas com poliuretano a base de mamona e resorcinol-formaldeído.





*a: poliuretano de mamona nas tábuas do Grupo 1 ($< 0,587 \text{ g/cm}^3$); b: poliuretano de mamona nas tábuas do Grupo 2 ($\geq 0,587 \text{ g/cm}^3$); c: resorcinol-formaldeído nas tábuas do Grupo 1 ($< 0,587 \text{ g/cm}^3$); d: resorcinol-formaldeído nas tábuas do Grupo 2 ($\geq 0,587 \text{ g/cm}^3$).

Fonte: O Autor.

Por meio das fotomicrográficas foi possível observar a penetração do adesivo na estrutura anatômica da madeira, tendo maior visibilidade as linhas de cola formadas pelo adesivo resorcinol-formaldeído devido sua coloração avermelhada.

Quando alcançadas boas condições de molhabilidade se torna possível a penetração de adesivo profundamente na estrutura capilar da madeira. A criação de uma ligação forte entre um adesivo e o substrato requer resina suficiente para penetrar nos componentes da madeira, para isso o adesivo deve apresentar mobilidade satisfatória para que ocorra uma excelente interação entre o adesivo e substrato (CHANDLER et al., 2005).

Pode-se afirmar que a superfície da madeira no momento da colagem apresentava boas condições para a criação de uma forte ligação e que a quantidade de adesivo utilizada foi suficiente para o propósito.

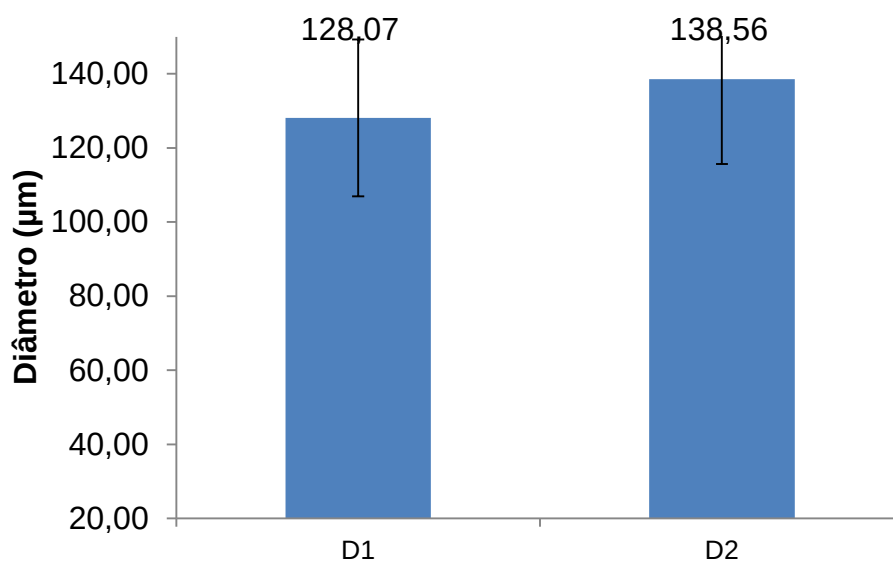
Houve penetração do adesivo nos elementos de vasos e ao longo dos raios. As células de vasos apresentam em suas paredes terminais e/ou laterais perfurações que permitem a comunicação dessas células entre si. Essas características podem contribuir para a entrada do adesivo nesta estrutura e formação de ancoramento entre o mesmo e o elemento de vaso. Como os elementos de vaso se dispõem um sobre o outro em séries longitudinais formando longos tubos, de comprimento variado, o adesivo pode fluir de um vaso para outro (ALBINO, 2009; VENDRÚSCOLO, 2005).

A penetração do adesivo nas células de raio pode ter ocorrido por meio das células de transferência, uma vez que são constituídos por células parenquimáticas que funcionam como elementos condutores no sentido radial. Às células parenquimáticas possuem parede celular com células de transferência que são modificadas para permitir o transporte, que em geral é de curta distância (ALBINO, 2009). Sendo assim, a penetração do adesivo nas células de raio pode ter ocorrido por meio das células de transferência.

3.3 Características anatômicas

A Figura 3 ilustra o comportamento médio dos diâmetros dos vasos para madeira estudada.

Figura 3. Valores médios para diâmetro dos vasos da madeira de *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla*.



*D1: densidade menor que 0,587 g/cm³; D2: densidade maior ou igual a 0,587 g/cm³.

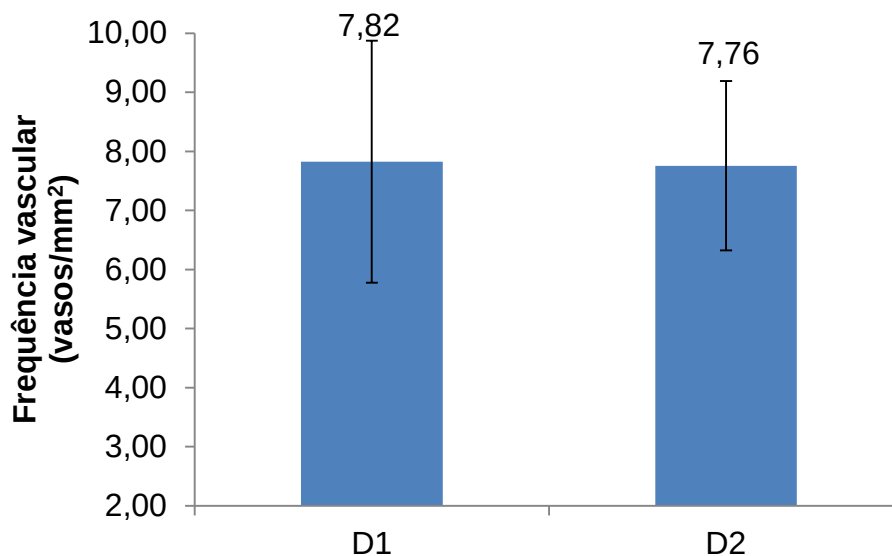
Fonte: O Autor.

Os maiores diâmetros dos vasos foram observados para a amostra das tábuas do Grupo 2 ($\geq 0,587 \text{ g/cm}^3$) (138,56 μm), este valor foi 7,57% superior ao valor apresentado pelo Grupo 1 ($< 0,587 \text{ g/cm}^3$) (128,07 μm). Os valores encontrados neste trabalho foram superiores ao encontrado por BOSCHETTI et al., (2015), 125,5 μm e Queiroz (2002), 116 μm , em árvores de 6 anos, em seus respectivos estudos para a espécie de *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla*.

A espécie utilizada no presente estudo possuía 11 anos de idade. De acordo com Adamopoulos et al. (2011) a transição de lenho juvenil para adulto ocorre de forma gradual entre os sete e quatorze anos de crescimento da espécie.

O híbrido utilizado nesse estudo se encontrava mais próximo de atingir a fase adulta, nesta fase a madeira apresenta paredes mais espessas, menor frequência de ocorrência das células de vasos e aumento dos diâmetros dos mesmos, fato que poderia explicar o contraste entre os valores encontrados neste trabalho e os encontrados nas literaturas consultadas.

Figura 4. Valores para frequência vascular da madeira de *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla*.



* D1: densidade menor que 0,587 g/cm³; D2: densidade maior ou igual a 0,587 g/cm³.

Fonte: O Autor.

Para a frequência vascular, as amostras das tábuas do Grupo 1 (< 0,587 g/cm³) apresentaram maior frequência (7,82 vasos/mm²), 0,77% superior ao Grupo 2 (≥ 0,587 g/cm³) (7,76 vasos/mm²). Sendo o híbrido do presente estudo doado por uma empresa comercial, é possível que dentro do lote pudesse existir tábuas oriundas de árvores com idades distintas e sendo a idade um fator importante para a correta classificação da espécie, uma vez que contribui para a formação de madeira adulta, permitindo um maior espessamento das paredes celulares, dos vasos e dos parênquimas, ela pode ter contribuído para a diferença dos elementos anatômicos apresentados pelas tábuas (GONÇALVES et al., 2009).

O valor encontrado no presente trabalho foi inferior ao encontrado por Queiroz (2002) (11,22 vasos/mm²) e por Oliveira (2009) (14,14 vasos/mm²).

Nas figuras 3 e 4 se pode observar que a maior frequência vascular para as madeiras do Grupo 1 (tábuas mais leves) foi compensada pela menor dimensão do diâmetro dos vasos. Oliveira et al. (2012) estudando o *E. grandis* verificaram que as madeiras que apresentaram os menores diâmetros vasculares foram as que apresentaram maior frequência vascular.

Na Tabela 2 está apresentado os valores médios e quantitativo para as características dos raios da madeira. Pode perceber que os maiores valores para as

variáveis analisadas a respeito dos raios das tábuas foram encontrados nas tábuas representantes do Grupo 2 ($\geq 0,587 \text{ g/cm}^3$).

Tabela 2. - Valores médios e descritivos dos parâmetros mensurados nos raios da madeira de *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla*.

Parâmetros avaliados	D1	D2
Altura (μm)	234,72 (63,91)	254,58 (73,69)
Largura (μm)	13,33 (2,93)	16,18 (4,75)
Número de células	13,94 (5,77)	15,24 (3,40)
Frequência (raios/mm)	12,84 (1,74)	14,44 (1,59)

*D1: densidade menor que $0,587 \text{ g/cm}^3$; D2: densidade maior ou igual a $0,587 \text{ g/cm}^3$; valores entre parênteses referem-se ao desvio padrão.

Fonte: O Autor.

Para a altura do raio as tábuas do Grupo 2 ($\geq 0,587 \text{ g/cm}^3$) apresentaram valor (254,58 μm) 7,80% superior ao do Grupo 1 ($< 0,587 \text{ g/cm}^3$) (234,72 μm). A largura do raio do Grupo 2 ($\geq 0,587 \text{ g/cm}^3$) (16,18 μm) foi 17,61% superior ao do Grupo 1 ($< 0,587 \text{ g/cm}^3$) (13,33 μm) e o número de células foi 8,53% superior para o Grupo 2 ($\geq 0,587 \text{ g/cm}^3$) (15,24 μm) em relação ao Grupo 1 ($< 0,587 \text{ g/cm}^3$) (13,94 μm).

Para estes mesmos parâmetros Oliveira (2009) encontrou para o híbrido natural de *Eucalyptus grandis* (com 5 anos e 9 meses) valor superior para altura dos raios (259,44 μm), inferior para largura (8,32 μm) e inferior para o número de células (14,66). Esse fato pode ter ocorrido devido à diferença de idade entre as espécies, local de crescimento entre outros tratamentos silviculturais.

3.4 Ensaio de delaminação

Os adesivos quando submetidos as variações de umidade, pressão e temperatura, segundo Fiorelli e Dias (2005), devem apresentar comportamento satisfatório para garantir a integridade do elemento estrutural durante sua vida útil. Após a realização do ensaio, constatou-se que não houve alterações que

comprometessem a integridade na interface madeira-adesivo dos blocos de MLC colados com tábuas de *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla*.

Após análise visual do estado das linhas de cola, se constatou que os corpos de prova não apresentaram fendas de delaminação, apresentando porcentagem de delaminação igual a zero.

O resultado apresentado pelo adesivo poliuretano de mamona no presente trabalho foi igual ao encontrado por Segundinho et al. (2015), em ambos o valor foi 0% de delaminação.

Para o adesivo resorcinol-formaldeído, o resultado foi inferior ao que Calil Neto (2011) obteve para delaminação do híbrido *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla* (38,6%). Ressalta-se que no trabalho realizado por Calil Neto, os corpos de prova eram provenientes de cruzetas produzidas com três lamelas, os corpos de prova após o período de imersão permanecerão durante 88 horas sob secagem natural e cada ciclo teve duração de 96 horas, necessitando desta forma de 12 dias para ser completado.

Possuindo o adesivo viscosidade adequada e encontrando no substrato condições ideais em sua superfície e estrutura microscópica, o produto originado dessa união deve apresentar características iguais ou superiores a soma das características individuais dos materiais que deram origem.

O estudo da interface madeira-adesivo permitiu visualizar a penetração dos adesivos nas células de vasos e raios. A penetração nesses elementos anatômicos possibilitou um melhor ancoramento do adesivo, fazendo com que a resistência da junta colada seja igual ou superior a resistência da própria madeira.

Sendo assim a profundidade de penetração do adesivo na madeira pode ter contribuído para a resistência apresentada pelos corpos de prova no ensaio de delaminação.

Outro fator para este comportamento são as características inerentes dos adesivos utilizados que apresentam alta resistência a umidade sendo aptos para uso exterior (CALIL NETO, 2014).

3.5 Relação entre espessura da linha de cola principal e secundária e a densidade aparente.

Os efeitos da densidade aparente, dos adesivos e da interação entre densidade aparente e os adesivos foram significativos pelo Teste de F ($p < 0,05$) para análise da espessura da linha de cola principal. O efeito da interação entre a densidade aparente e os adesivos foram desdobrados e analisados (Tabela 3).

Tabela 3. Médias para as espessuras das linhas de cola.

Densidade (g/cm ³)	LP (µm) Adesivo		LS (µm) Adesivo	
	PUR	RF	PUR	RF
D1	3,17Ab	125,22Ba	51,77Ab	278,18Ba
D2	1,70Ab	217,77Aa	71,79Ab	432,83Aa

*Letras maiúsculas na vertical e minúsculas na horizontal não diferem entre si; D1: densidade menor que 0,587 g/cm³; D2: densidade maior ou igual a 0,587 g/cm³; PUR: adesivo poliuretano de mamona; RF: adesivo resorcinol-formaldeído; LP: Linha de cola principal; LS: linha de cola secundária.

Fonte: O Autor.

Para o adesivo poliuretano de mamona, o contraste entre médias dos níveis da densidade aparente foi estatisticamente nulo, logo os elementos de madeira laminada colada - MLC colados nas densidades 1 ($< 0,587$ g/cm³) e 2 ($\geq 0,587$ g/cm³) com o adesivo poliuretano de mamona não apresentaram diferença significativa para ambas as espessuras de linha de cola.

Os valores obtidos neste trabalho para a espessura da linha de cola principal (3,17 e 1,70 µm) foram inferiores ao encontrado por Segundinho et al. (2017) (13,41 µm) para a espécie *Eucalyptus cloeziana*, porém para espessura de linha cola secundária os valores foram superiores aos da literatura consultada.

A diferença entre os valores encontrados neste trabalho e os obtidos por Segundinho et al. (2017) podem estar relacionados ao tempo e a pressão aplicada, 48 horas e 1 MPa no presente trabalho, 24 e 1,2 MPa na literatura consultada.

O adesivo resorcinol-formaldeído apresentou comportamento oposto ao do adesivo poliuretano em ambas as linhas de cola formadas, evidenciando contraste

entre as médias dos níveis da densidade aparente, estatisticamente diferente de zero ao nível de execução do Teste F.

A maiores médias para as linhas de cola principal e secundária foram apresentadas pelos corpos de prova colados na densidade 2 ($\geq 0,587 \text{ g/cm}^3$) sendo 42,50% e 35,73% superiores as médias encontrada nos corpos de prova da densidade 1 ($< 0,587 \text{ g/cm}^3$) (Tabela 3).

Os valores foram superiores ao encontrado por Segundinho et al. (2017) (52,13 μm e 60,23 μm). Este contraste pode estar relacionado com a quantidade de adesivo aplicado (neste trabalho 250 g/m^2 em linha de cola simples, na literatura 150 g/m^2 em linha de cola dupla).

Algumas variáveis são importantes para o processo de colagem de madeiras, dentre elas, a quantidade de adesivo a ser aplicado em função da espécie, espessura da lâmina, pressão e tempo de prensagem (CHANDLER et al., 2005; IWAKIRI, 2002; NASCIMENTO et al., 2013).

Dentro das densidades 1 ($< 0,587 \text{ g/cm}^3$) e 2 ($\geq 0,587 \text{ g/cm}^3$) houve diferença significativa entre as linhas de cola formadas com os adesivos empregados na colagem dos elementos de MLC, sendo as maiores médias apresentadas naqueles elementos colados com o adesivo resorcinol-formaldeído.

Dentro da densidade 1 ($< 0,587 \text{ g/cm}^3$) os elementos de MLC colados com o adesivo resorcinol-formaldeído apresentaram média (125,22 μm e 278,18 μm) 97,47% e 81,39% superior àqueles colados com o adesivo poliuretano de mamona (3,17 μm e 51,77 μm) e na densidade 2 ($\geq 0,587 \text{ g/cm}^3$) (217,77 μm e 432,83 μm) 99,22% e 83,41% superior (1,70 μm e 71,79 μm).

As características anatômicas apresentadas na Figura 3 e Tabela 3 justificam os valores superiores apresentados pelo Grupo 2 (tábuas com densidade $\geq 0,587 \text{ g/cm}^3$), pois vasos de maiores diâmetros e raios altos e largos proporcionaram as condições ideais para mobilidade e penetração do adesivo, já a diferença encontrada entre os adesivos pode ser atribuída a viscosidade distinta que ambos apresentam.

Segundinho et al. (2017) realizaram a caracterização desses adesivos e encontraram os valores de 1536,2 Cp para o adesivo poliuretano e 843,3 Cp para o adesivo resorcinol-formaldeído.

Quanto maior a viscosidade apresentada pelo adesivo maior será a dificuldade de espalhamento causada pela baixa fluidez, originando em menor

penetração do adesivo na estrutura capilar da madeira conforme mencionado por Bianche (2014).

4. CONCLUSÕES

A madeira de eucalipto possui uma estrutura complexa, apresentando espaços vazios com diâmetros reduzidos, o que dificulta a entrada e saída de alguma substância.

Por meio dos valores apresentados pelos seus elementos anatômicos do híbrido utilizado no presente estudo foi possível averiguar que:

- A estrutura anatômica apresentada pela madeira de eucalipto estudada possibilitou a penetração do adesivo nos vasos e nos raios;
- A diferença de densidade aparente apresentada pelos grupos possibilitou a distinção da variabilidade dos elementos anatômicos apresentado pelas tábuas. Pôde-se constatar a diferença dos diâmetros e frequência dos vasos, altura, largura e número de células dos raios apresentada dentro de uma mesma espécie;
- Ambos os adesivos utilizados apresentaram características satisfatórias determinadas pelo ensaio de delaminação. Seu comportamento diante das variações de umidade, pressão e temperatura os qualificam para uso estrutural, uma vez que exposto aos fatores mencionados não apresentaram enfraquecimento da linha de cola;
- Houve interação significativa entre as espessuras das linhas de cola e a densidade aparente. As tábuas de maior densidade aparente ($\rho \geq 0,587 \text{ g/cm}^3$) coladas com o adesivo resorcinol-formaldeído foram as que melhor responderam a esta interação.

5. REFERÊNCIAS

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

AMERICAN INSTITUTE OF TIMBER CONSTRUCTION - AITC. **Test T110**: Test methods for structural glued laminated timber – Cyclic delamination test. Centennial, CO, 2007.

ADAMOPOULOS, S.; KARAGEORGOS, A.; PASSIALIS, C.; CHAVENETIDOU, M. Mathematical approach for defining juvenile-mature wood transition zone in black locust and chestnut. **Wood and Fiber Science**, p. 336-342, 2011.

ALBINO, V. C. S. **Estudo do comportamento da colagem da madeira de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden com adesivo termoendurecedor resorcinol - formaldeído**. 2009. 89 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2009.

ALBINO, V. C. S.; MORI, F.A. ; MENDES, L.M. Estudo da interface madeira-adesivo de juntas coladas com resorcinol-formaldeído e madeira de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden. Piracicaba. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 87, p. 509-516, 2010.

BIANCHE, J. J. **Interface madeira-adesivo e resistência de juntas coladas com diferentes adesivos e gramatura**. 2014. 85f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2014.

BIANCHE, J. J.; TEIXEIRA, A. P. M.; LADEIRA, J. P. S.; CARNEIRO, A. C. O.; CASTRO, R. V. O.; LUCIA, R. M. D. Cisalhamento na linha de cola de *Eucalyptus* sp. colado com diferentes adesivos e diferentes gramaturas. **Floresta e Ambiente**, v. 24, 2017.

BOSCHETTI, W. T. N.; PAES, J. B.; OLIVEIRA, J. T. S.; DUDECKI, L. **Características anatômicas para produção de celulose do lenho de reação de árvores inclinadas de eucalipto**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v. 50, n. 6, p. 459-467, 2015.

CALIL NETO, C. **Madeira laminada colada (MLC): controle de qualidade em combinações espécie-adesivo-tratamento preservativo**. 2011. 119f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2011.

CALIL NETO, C. **Ligações com parafusos auto-atarraxantes sem pré-furação para uso em estruturas de madeira**. 2014. 326f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2014.

CHANDLER, J. G.; BRANDON, R. L.; FRIHART, C. R. Examination of adhesive penetration in modified wood using fluorescence microscopy. Bethesda, Md.: Adhesive and Sealant Council. ASC Spring Convention and Exposition, 2005, 10 p.

FIORELLI, J.; DIAS, A. A. Avaliação da delaminação em peças de madeira laminada colada reforçadas com fibra de vidro. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 10, n. 2, p. 241-249, 2005.

GONÇALVES, F. G.; OLIVEIRA, J. T. S.; DELLA LUCIA, R. M.; NAPPO, M. E.; SARTÓRIO, R. C. Densidade básica e variação dimensional de um híbrido clonal de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 33, n. 2, p. 277-288, 2009.

INTERNATIONAL ASSOCIATION OF WOOD ANATOMISTS. List of microscopic features for hardwood identification. **IAWA Bulletin**, Leiden, v. 10, n. 3, p. 219-332, 1989.

IWAKIRI, S.; KEINERT JÚNIOR, S.; MENDES, L. M.; ALBUQUERQUE, C. A. C.; LATORRACA, J. V. F. **Painéis de Madeira**. Curitiba: FUPEF, p. 197. 2002.

NASCIMENTO, A. M.; GARCIA, R. A.; DELLA LUCIA, R. M. Qualidade de adesão de juntas coladas de diferentes espécies comerciais de madeira. Lavras, **Cerne**, v. 19, n. 4, p. 593-601, 2013.

OLIVEIRA, J. G. L. **Propriedades anatômicas da madeira de dois clones de eucalipto implantados em diferentes localidades Alegre**. 2009. 84 f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre, ES, 2009.

OLIVEIRA, J. G. L.; OLIVEIRA, J. T. S.; ABAD, J. I. M.; SILVA, A. G.; FIEDLER, N. C.; VIDAURE, G. B. Parâmetros quantitativos da anatomia da madeira de eucalipto que cresceu em diferentes locais. Viçosa. **Revista Árvore**, v. 36, n. 3, p. 559-567, 2012.

QUEIROZ, S. C. S. **Efeito das características anatômicas e químicas na densidade básica da madeira e na qualidade da polpa de clones híbridos de *Eucalyptus grandis* x *urophylla***. 74f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2002.

SEGUNDINHO, P. G. A.; FRANÇA, L. C. A.; NETO, P. N. M.; GONÇALVES, F. G.; OLIVEIRA, J. T. S. Madeira lamelada colada (MLC) com acácia mangium e adesivos estruturais. **Scientia Forestalis**, v. 43, n. 107, p. 533-540, 2015.

SEGUNDINHO, P. G. A.; GONÇALVES, F. G.; GAVA, G. C.; TINTI, V. P.; ALVES, S. D.; REGAZZI, A. J. Eficiência da colagem de madeira tratada de *Eucalyptus cloeziana* F. Muell para produção de madeira laminada colada (MLC). **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 22, n. 2, p. e11808, 2017.

VENDRÚSCOLO, A. T. **Comportamento reológico e estabilidade física de polpa de carambola (*Averrhoa carambola* L)**. 2005. 90 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2005.

Capítulo III

CORRELAÇÃO ENTRE PROPRIEDADES FÍSICAS, MECÂNICAS E CARACTERÍSTICAS ANATÔMICAS EM MADEIRA LAMINADA COLADA DE *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla*

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi verificar possíveis correlações existentes entre as propriedades da madeira associadas à madeira laminada colada com madeira de *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla*. Para esta finalidade foram determinadas as propriedades físicas da madeira sólida e suas características anatômicas, as propriedades mecânicas dos elementos de MLC, bem como as espessuras das linhas de cola principal e secundária. Na correlação entre as propriedades a densidade apresentou correlação com as propriedades mecânicas, a espessura de linha de cola principal apresentou correlação com o adesivo e com o percentual de falha na madeira, o adesivo também apresentou correlação com o percentual de falha na madeira. A compressão normal às fibras apresentou correlação com o cisalhamento paralelo às fibras e com o cisalhamento na linha de cola, este último apresentou correlação com a densidade aparente, adesivo, linha de cola secundária e diâmetro dos vasos. O cisalhamento paralelo às fibras apresentou correlação com o cisalhamento na linha de cola e com os diâmetros dos vasos. A altura e largura dos raios apresentaram correlações com o número de células.

Palavras-chave: produção de MLC; colagem; determinação; associação.

CHAPTER III

CORRELATION BETWEEN PHYSICAL, MECHANICAL PROPERTIES AND ANATOMICAL CHARACTERISTICS OF WOODED LAMINATED WOOD OF

Eucalyptus grandis x *E. urophylla*

ABSTRACT

The objective of this work was to verify possible correlations between wood properties associated with laminated wood glued with *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla* wood. For this purpose the physical properties of the solid wood and its anatomical characteristics, the mechanical properties of the MLC elements, as well as the thicknesses of the main and secondary glue lines were determined. In the correlation between the properties the density showed correlation with the mechanical properties, the thickness of the main glue line showed correlation with the adhesive and with the percentage of failure in the wood, the adhesive also presented correlation with the percentage of failure in the wood. The normal fiber compression showed a correlation with the shear parallel to the fibers and with the shear in the glue line. The latter showed a correlation with the apparent density, adhesive, secondary glue line and vessel diameter. The shear parallel to the fibers showed a correlation with the shear strength in the glue line and the vessel diameters. The height and width of the rays had correlations with the number of cells.

Keywords: production; collage; determination; association.

1. INTRODUÇÃO

Dentre os principais materiais utilizados em estruturas, destaca-se a madeira, por ser um material de fonte renovável e de excelente relação resistência/densidade (CALIL et al., 2003).

Dentre as soluções alternativas ao uso da madeira maciça encontra-se a Madeira Laminada Colada (MLC), podendo ser empregada sob as mais variadas formas estruturais, consistindo em um produto que requer precisão de fabricação em todos os seus estágios (CALIL NETO, 2014).

A madeira é um material que apresenta uma estrutura complexa, os elementos constituintes de sua anatomia apresentam proporções e distribuições distintas, essa complexidade estrutural aliada a higroscopicidade da mesma, exercem influências no seu processamento, em que se inclui o processo de colagem.

Além da perfeita execução das etapas de produção de elementos de MLC, outros fatores devem ser avaliados para que o fenômeno de adesão ocorra de forma ímpar, entre o adesivo e o substrato, pois, de acordo com Albino et al. (2010), este fenômeno depende de uma série de fatores como, as características inerentes à própria madeira (anatômica, química e física), características do adesivo (químicas e físicas) e do processo adotado durante a colagem propriamente dita.

Alguns estudos já foram realizados com a finalidade de se avaliar a qualidade da junta colada, como o de Bianche et al. (2017); Calil Neto et al. (2014); Gonçalves et al. (2016); Iwakiri et al. (2013); Motta et al. (2014); Segundinho et al. (2015); Tienne et al. (2011), no entanto, estes estudos tiveram como foco a avaliação mecânica, não sendo abordado a interação entre os fatores que contribuem para o processo de colagem.

No processo de colagem, a estrutura anatômica da madeira, quanto às diferentes dimensões dos elementos celulares, tamanho, disposição e frequência das cavidades celulares que, por sua vez, estão relacionadas com a porosidade e permeabilidade da madeira, interferem significativamente na mobilidade e penetrabilidade do adesivo. A densidade está relacionada com a porosidade e a estrutura anatômica com a permeabilidade, ambas exercem influência direta na colagem (ALBINO, 2009).

Para avaliar a influência das características anatômicas e química da madeira de clones de *Eucalyptus*, Lima et al. (2007), mediante a caracterização e mensuração anatômica e o teor de extrativos totais da madeira, encontraram correlação com a qualidade das juntas coladas. As características anatômicas, em relação à frequência e tamanho de vasos condutores, parênquima radial e o teor de extrativos totais, tiveram correlação com a avaliação da qualidade da colagem das madeiras, quanto à porcentagem de falha na madeira e resistência ao cisalhamento na linha de cola.

Para que se possa avaliar a qualidade da colagem e indispensável à realização de ensaios físicos e mecânicos, em conformidade com os documentos normativos. Os ensaios recomendados para essa avaliação são o cisalhamento na linha de cola, percentual de falha na madeira (avaliação feita após o cisalhamento na linha de cola, com auxílio de uma malha quadriculada de 10x10, em que cada quadrado corresponde a 1%) e delaminação.

Para avaliar a resistência ao cisalhamento na linha de cola, Motta et al. (2014) estudaram cinco árvores de teca com 15 anos de idade que ao serem transformadas em tábuas foram coladas com quatro tipos de adesivo, sendo dois termofixos, resorcinol formaldeído e ureia formaldeído, e dois termoplásticos à base de acetato de polivinílico, o Cascorez 2500 e Cascorez 2590.

Das peças obtidas pelo processo de colagem, foram retirados corpos de prova para o ensaio de cisalhamento na linha de cola e posterior percentual de falha na madeira. Os autores constataram que os resultados estão de acordo com as especificações internacionais para utilizações estruturais, sendo os adesivos testados indicados para a colagem da madeira estudada.

Para avaliar a resistência ao cisalhamento e à delaminação em madeira laminada colada, Calil Neto et al. (2014) investigaram a influência dos fatores tipo de madeira (pinus; teca; eucalipto), adesivo (Purbond; Cascophen) e tratamento (CCA; CCB; CCBS) para a resistência ao cisalhamento e à delaminação.

Os resultados da análise estatística revelaram que o tipo de madeira expressou efeito significativo para ambas as variáveis respostas avaliadas, o mesmo não ocorrendo com os tipos de adesivo e de tratamento. Já o teor de umidade foi significativo em todas as espécies de madeira.

A compreensão a respeito das interações ocorridas entre o adesivo e a madeira no processo de colagem contribui para que se possa obter uma colagem de boa qualidade.

O objetivo deste trabalho foi a determinação do coeficiente de Correlação de Pearson, a fim de avaliar a existência de interdependência entre as propriedades físicas, anatômicas e mecânicas do híbrido clonal de *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla*.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O presente estudo foi conduzido no Departamento de Ciências Florestais e da Madeira, do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias, da Universidade Federal do Espírito Santo, em Jerônimo Monteiro – ES.

A madeira utilizada para a realização da pesquisa foi um híbrido de árvores de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* com 11 anos de idade procedente da empresa Bahia Produtos de Madeira, localizada na cidade de Nova Viçosa, no estado da Bahia.

O lote de madeira foi doado em forma de tábuas, de um total de 40 tábuas, as quais foram alocadas para atingir a umidade de equilíbrio local em ambiente protegido de intempéries. Após atingir a umidade de equilíbrio, foi realizada uma classificação visual, para posterior seccionamento das tábuas nas dimensões desejadas para a produção dos blocos de madeira laminada colada.

2.1 Determinação do coeficiente de correlação de Person

O coeficiente de Pearson foi obtido mediante análise de correlação entre algumas propriedades (Tabela 1). Para a obtenção dos valores para posterior análise da correlação, a madeira foi submetida aos ensaios físicos, mecânicos, mensurada a espessura das linhas de cola principal e secundária e caracterizada anatomicamente.

Como propriedade física foi determinada a densidade aparente de acordo os métodos de ensaios definidos pela Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, Norma Brasileira Regulamentadora – NBR 7190 (1997).

As propriedades mecânicas avaliadas foram a resistência à compressão normal às fibras e cisalhamento paralelo às fibras conforme a ASTM D143 (2000) e o ensaio de cisalhamento na linha de cola de acordo com as recomendações da ASTM D 905 (2009).

Para o ensaio de cisalhamento na linha de cola foi quantificado a percentagem de falhas na madeira com o auxílio de uma lâmina quadriculada transparente, com precisão de 1% (38,1 x 50,8 mm). As avaliações da percentagem de falhas na madeira foram realizadas conforme a norma ASTM D-5266 (1999).

Para obtenção dos dados das linhas de cola principal e secundária foi adotada a metodologia de Albino et al. (2010). Para a caracterização anatômica foram seguidos os métodos da norma *International Association of Wood Anatomists* – IAWA (1989).

Para a 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 bi componentes à base de óleo de mamona.

A aplicação dos adesivos, a escolha do extensor e do catalizador foram realizadas conforme recomendações do fabricante. Para a aplicação do Cascophen RS-216-M foram adicionados 20% de catalisador FM-60-M. Para a aplicação do poliuretano foi utilizada a proporção de 1:1,2, sendo 1 parte do componente A (um pré-polímero) e 1,2 partes do componente B (um poliol).

Cada grupo foi composto por um total de 28 lamelas, das quais se produziram 14 elementos de madeira laminada colada, sendo sete desses elementos colados com o adesivo resorcinol-formaldeído, e os outros sete com o adesivo à base de resina extraída da mamona, sendo este um adesivo bi componente a base de mamona.

Em cada ciclo da colagem das lamelas, estas foram aplainadas na face que recebeu o adesivo com intuito de homogeneizar a superfície para que a união entre duas faces não fosse prejudicada por alguma imperfeição e o fluxo do adesivo não fosse interrompido.

Utilizou-se o coeficiente de correlação de Pearson, ($t < 0,01$). As correlações foram julgadas conforme Dancey e Reidy (2006), sendo 0,1 – 0,3 correlação fraca, 0,4 – 0,6 moderada, 0,7 – 0,9 forte.

Tabela 1. Propriedades físicas, mecânicas e características anatômicas estudadas na determinação do Coeficiente de Pearson.

Propriedades	Densidade	Adesivo	Condição de umidade	Repetições
Compressão normal às fibras	1	RF	Seca	7
		PUR	Saturada	
	2	RF	Seca	
		PUR	Saturara	
Cisalhamento paralelo às fibras	1	RF	Seca	
		PUR	Saturada	
	2	RF	Seca	
		PUR	Saturada	
Cisalhamento na linha de cola	1	RF	Seca	
		PUR	Saturada	
	2	RF	Seca	
		PUR	Saturada	
Falha na madeira	1	RF	Seca	
		PUR	Saturada	
	2	RF	Seca	
		PUR	Saturada	
Linha de cola principal	1	RF	-	
		PUR	-	
	2	RF	-	
		PUR	-	
Linha de cola secundária	1	RF	-	
		PUR	-	
	2	RF	-	
		PUR	-	
Diâmetro dos vasos	1	-	-	33
	2	-	-	
Altura dos raios	1	-	-	17
	2	-	-	
Largura dos raios	1	-	-	
	2	--	-	
Número de células	1	-	-	
	2	-	-	

* 1: Densidade < 0,587 g/cm³; 2: Densidade ≥ 0,587 g/cm³; RF: Adesivo resorcinol-formaldeído; PUR: Adesivo poliuretano de mamona.

Fonte: O Autor.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 2, encontram-se os resultados dos Coeficientes de correlação de Pearson, provenientes da correlação linear entre algumas propriedades físicas, mecânicas e características anatômicas avaliadas para o híbrido clonal de *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla*.

Tabela 2. Coeficientes de correlação de Pearson, obtidos com base na média das características e propriedades avaliadas para o híbrido clonal de *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla*.

	DENS	ADES	LP	LS	CNT	CSM	CSLC	F. MAD	D. VASOS	H. RAIOS	L. RAIOS	Nº CEL
DENS	0	0,0000 (ns)	0,1314 (**)	0,1251 (**)	0,4660 (**)	0,5074 (**)	0,4961 (**)	-0,2174 (ns)	0,1972 (**)	0,1054 (ns)	0,2346 (ns)	0,1394 (ns)
ADES		0	0,7385 (**)	0,0703 (ns)	0,0931 (ns)	0,0096 (ns)	0,4888 (**)	0,5167 (**)	0,0000 (ns)	0,0000 (ns)	0,0000 (ns)	0,0000 (ns)
LP			0	0,0562 (ns)	0,0532 (ns)	0,0039 (ns)	0,3904 (**)	0,5145 (**)	0,0925 (ns)	-0,0953 (ns)	-0,0485 (ns)	-0,0822 (ns)
LS				0	0,3541 (**)	0,3471 (**)	0,5119 (**)	0,0366 (ns)	-0,0030 (ns)	0,0233 (ns)	0,1752 (**)	-0,0186 (ns)
CNT					0	0,8603 (**)	0,5856 (**)	0,1324 (ns)	0,3275 (**)	0,0632 (ns)	-0,2530 (ns)	-0,2334 (ns)
CSM						0	0,5487 (**)	0,0616 (ns)	0,4499 (**)	0,0377 (ns)	-0,2630 (ns)	-0,0374 (ns)
CSLC							0	0,3755 (**)	0,4846 (**)	0,0766 (ns)	-0,2198 (ns)	-0,1030 (ns)
F,MAD								0	0,1028 (ns)	-0,2591 (ns)	-0,3664 (ns)	-0,3514 (ns)
D. VASOS									0	0,2209 (**)	-0,2486 (ns)	-0,1038 (ns)
H. RAIOS										0	0,3614 (**)	0,5034 (**)
L. RAIOS											0	0,6079 (**)
Nº CEL.												0

*DENS: Densidade aparente; ADES: Adesivo; LP: Linha de cola principal; LS: Linha de secundária; CNT: Compressão normal às fibras; CSM: Cisalhamento paralelo às fibras; CSLSC: Cisalhamento na linha de cola; F. MAD: Falha na madeira; D. VASOS: Diâmetro dos vasos; H. RAIOS: Altura dos raios; L. RAIOS: Largura do raio; Nº CEL: Número de células; ** correlação significativa a 1%; ns = correlação não-significativa.

Fonte: O Autor.

A densidade aparente apresentou correlação moderada com a compressão normal às fibras (0,4660) e com o cisalhamento paralelo às fibras (0,5074). Um maior incremento de lenho ocasiona a redução da porosidade na madeira, consequentemente, a madeira apresentará maior área de contato e aumento da resistência mecânica ao esforço ao qual seja submetida.

Os valores foram inferiores aos encontrados por Moreira (2004) para compressão normal às fibras (0,6671) e para o cisalhamento paralelo às fibras (0,7658) quando essas propriedades foram correlacionadas com a densidade aparente. Em seu estudo Moreira (2004) utilizou madeira de eucalipto e o adesivo resorcinol-formaldeído.

Para espessura da linha de cola principal houve correlação moderada com o percentual de falha na madeira (0,5145) e correlação forte com o adesivo (0,7385). Já o adesivo apresentou correlação moderada com o percentual de falha na madeira (0,5167).

Sendo a correlação uma análise estatística que mensura o grau de associação entre variáveis, assim, afirma-se que o comportamento apresentado pela espessura da linha de cola principal, quando correlacionado com o percentual de falha na madeira e com o adesivo era esperado.

A espessura da linha de cola principal irá contribuir para um maior ou menor percentual de falha na madeira. Caso o adesivo não apresentar características desejáveis, como viscosidade ideal, aliado as dificuldades em adentrar a estrutura porosa da madeira por causa da redução ou obstrução dos espaços vazios, acarretará na formação de uma linha de cola principal mais espessa e menor profundidade de penetração do adesivo.

O inverso ocorre quando as condições para mobilidade e penetrabilidade do adesivo são facilitadas pelas características do material. Quando o fluxo do adesivo é facilitado pela estrutura anatômica da madeira, pode ocorrer a formação de uma linha de cola mais fina denominada linha de cola faminta.

Ambas as linhas de cola diminuem a resistência da junta colada acarretando em menor percentual de falha na madeira, uma vez que os tipos de linha de cola formadas não possuem espessura e penetração satisfatórias para resistirem ao esforço solicitado.

Quando no processo de colagem se obtém uma boa interação madeira-adesivo, a linha de cola principal apresenta espessura não muito fina, porém

homogênea em toda extensão da peça colada, conferindo maior resistência e maior percentual de falha na madeira.

Correlação moderada entre a espessura de linha de cola e o percentual de falha na madeira (0,4316) foi obtida por Serrano (2013), estudando juntas de *Eucalyptus grandis* coladas com os adesivos Cascophen e Jowapur.

Houve correlação forte entre a compressão normal às fibras e o cisalhamento paralelo às fibras (0,8603) e moderada entre a compressão normal às fibras e o cisalhamento na linha de cola (0,5856).

A madeira possui maior resistência quando submetida ao esforço na direção paralela aos elementos constituintes de sua estrutura. Sendo assim, caso determinada espécie apresentar altos valores de resistência na direção paralela e sendo a resistência na direção normal inferior, porém proporcional, altos valores de resistência na direção paralela se relacionaram com valores proporcionais na direção normal e vice-versa.

O cisalhamento paralelo às fibras apresentou correlação moderada com o cisalhamento na linha de cola (0,5487) e com o diâmetro dos vasos (0,4499). Ambos os ensaios são parecidos, no entanto com finalidades distintas que se correlacionam pelas características da espécie, do adesivo e das práticas adotadas no processo de colagem.

Caso ocorra boa interação entre a madeira e o adesivo, espera-se que a resistência da linha de cola seja igual ou superior a resistência da madeira, ocasionando a correlação entre os valores apresentados nos ensaios.

O cisalhamento na linha de cola apresentou correlação moderada com a densidade aparente (0,4961), com o adesivo (0,4888), com a linha de cola secundária (0,5119) e com o diâmetro dos vasos (0,4846). Altos valores de cisalhamento na linha de cola podem ser obtidos quando o adesivo e o substrato não apresentam boas condições para que ocorra uma ótima interação.

A penetração necessária que o adesivo deve atingir para se ancorar nas regiões macro e microscópica da madeira será facilitada, caso a espécie apresente características como maior porosidade, vasos de grandes diâmetros e raios altos e largos.

Estes fatores unidos as características do adesivo como viscosidade, pH, teor de sólidos e tempo de cura contribuirão para a formação de uma linha de cola

resistente sendo, portanto, um dos possíveis responsáveis pela correlação apresentada.

A altura dos raios apresentou correlação moderada com o número de células (0,5034), a mesma correlação foi encontrada para a largura do raio e o número de células (0,6079).

Sendo os raios formados por células parenquimáticas e possuindo comprimento indeterminado, pode-se afirmar que aumentando a altura e largura dos raios estes aumentarão sua capacidade para a formação de novas células de armazenamento de substâncias (BURGUER, 1991). Portanto este pode ser um dos possíveis motivos para a correlação apresentada entre estas variáveis.

4. CONCLUSÕES

Como base na análise dos resultados se pôde perceber que:

Houve correlação moderada entre a densidade aparente e à compressão normal às fibras, e o cisalhamento paralelo às fibras e cisalhamento na linha de cola.

A espessura da linha de cola principal apresentou correlação moderada com o percentual de falha na madeira e forte com adesivo, evidenciando dessa forma, que caso o adesivo e substrato possuam as características ideais para formação de uma linha de cola homogênea e bem ancorada elevará a resistência da junta colada e conseqüentemente maior rompimento na madeira.

Houve correlação forte entre a compressão normal às fibras e cisalhamento paralelo às fibras, e correlação moderada entre a primeira e o cisalhamento na linha de cola. O cisalhamento paralelo às fibras apresentou correlação moderada com o cisalhamento na linha de cola.

A partir do comportamento demonstrando por essas propriedades, se pode afirmar que existe relação entre a resistência apresentada pela madeira nas suas direções paralela e perpendicular as fibras.

A correlação moderada apresentada pelo cisalhamento na linha de cola com a densidade aparente, adesivo, linha de cola secundária e diâmetro dos vasos descrevem a boa interação apresentada pelos adesivos e a madeira utilizada.

Os adesivos penetraram em suas células vasculares, formando uma linha de cola secundária profunda proporcionando ótima resistência na mesma, e

evidenciando características satisfatórias apresentadas pelos adesivos, com destaque para o adesivo resorcinol-formaldeído.

As características anatômicas se correlacionaram entre si. A altura e largura dos raios apresentaram correlação moderada com o número de células, fato este esperado.

Estas características apresentadas pela madeira, a qualifica como possuidora de uma boa estrutura para colagem, uma vez que o aumento nas dimensões e proporções dos elementos anatômicos contribuirá e facilitará o processo de colagem.

5. REFERÊNCIAS

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

ALBINO, V. C. S. **Estudo do comportamento da colagem da madeira de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden com adesivo termoendurecedor resorcinol - formaldeído**. 2009. 89 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2009.

ALBINO, V. C. S.; MORI, F.A.; MENDES, L.M. Estudo da interface madeira-adesivo de juntas coladas com resorcinol-formaldeído e madeira de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden. Piracicaba. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 87, p. 509-516, 2010.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM. **ASTM D 143**: Standard test methods for small clear specimens of timber. Philadelphia, PA, 2000.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM. **ASTM D 905**: Standard test method for strength properties of adhesive bonds in shear by compression loading. Philadelphia, PA, 2009.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM. **ASTM D 5266**: Standard Practice for Estimating the Percentage of Wood Failure in Adhesive Bonded Joints. Philadelphia, PA, 1999.

BIANCHE, J. J.; TEIXEIRA, A. P. M.; LADEIRA, J. P. S.; CARNEIRO, A. C. O.; CASTRO, R. V. O.; LUCIA, R. M. D. Cisalhamento na linha de cola de *Eucalyptus* sp. colado com diferentes adesivos e diferentes gramaturas. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 24, 2017.

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

CALIL NETO, C. **Ligações com parafusos auto-atarraxantes sem pré-furação para uso em estruturas de madeira**. 2014. 326f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2014.

CALIL NETO, C.; CHRISTOFORO, A. L.; RIBEIRO FILHO, S. L. M.; LAHR, F. A. R.; CALIL JUNIOR, C. Avaliação da resistência ao cisalhamento e à delaminação em madeira laminada colada. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 24, n. 4, p. 989-996, 2014.

CALIL JR., C.; LAHR, F.A.R.; DIAS, A.A. **Dimensionamento de elementos estruturais de madeira**. Barueri, SP: Manole, 2003. 152p.

DANCEY, C.; REIDY, J. **Estatística Sem Matemática para Psicologia: Usando SPSS para Windows**. Porto Alegre, Artmed, 2006.

INTERNATIONAL ASSOCIATION OF WOOD ANATOMISTS. List of microscopic features for hardwood identification. **IAWA Bulletin**, Leiden, v. 10, n. 3, p. 219-332, 1989.

IWAKIRI, S.; TRIANOSKI, R.; CUNHA, A. B.; PRATA, J. G.; HARA, M.; BILA, N. F.; LUIS, R. C. G.; ARAÚJO, R. D.; BÔAS, B. T. V. Avaliação da resistência de juntas coladas da madeira de *Eucalyptus benthamii* com diferentes adesivos e faces de colagem. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 41, n. 99, p. 411-416, 2013.

LIMA, C. K. P.; MORI, F. A.; MENDES, L. M.; CARNEIRO, A. C. O. Características anatômicas e química da madeira de clones de *Eucalyptus* e sua influência na colagem. **Cerne**, Lavras, v. 13, n. 2, p. 123-129, 2007.

MOREIRA, M. S. S. **Ligações estruturais de peças de madeira por meio de adesivo em áreas reduzidas associado a elementos de pinos**. 2004. 426f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

MOTTA, J. P.; OLIVEIRA, J. T. S.; PAES, J. B.; ALVES, R. C.; VIDAURRE, G. B. Avaliação da resistência ao cisalhamento de juntas coladas com madeira de teca (*Tectona grandis*). **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 42, n. 104, p. 615-621, 2014.

SEGUNDINHO, P. G. A.; FRANÇA, L. C. A.; MEDEIROS NETO, P. N. M.; GONÇALVES, F. G.; OLIVEIRA, J. T. S. Madeira lamelada colada (MLC) com acácia mangium e adesivos estruturais. **Scientia Forestalis**, v. 43, n. 107, p. 533-540, 2015.

SERRANO, L. J. P. **Resistência e elasticidade da madeira e de juntas coladas de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex-Maiden e seus impactos na mecânica de vigas laminadas coladas**. 2013. 100f. Tese (Doutorado em Tecnologia de Produtos Florestais) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013.

TIENNE, D. L. C.; NASCIMENTO, A. M.; GARCIA, R. A.; SILVA, D. B. Qualidade de adesão de juntas de madeira de pinus coladas em condições simuladas de serviço interna e externa. **Floresta e Ambiente**, v. 18, p. 16-29, 2011.

3. CONCLUSÃO GERAL

Apesar da madeira de eucalipto possuir uma estrutura complexa, apresentando espaços vazios com diâmetros reduzidos, o que dificulta a entrada e saída de alguma substância, os valores apresentados pelos elementos anatômicos da madeira utilizada no presente estudo, evidenciou esta como adequada para a prática de colagem, uma vez que estes elementos apresentam boa disposição e proporção para recebimento do adesivo e formação de uma linha de cola resistente.

A diferença de densidade aparente apresentada pelos grupos possibilitou a distinção da variabilidade dos elementos anatômicos apresentado pelas tábuas. O Grupo 2 ($\rho \geq 0,585 \text{ g/cm}^3$) junto com o adesivo resorcinol-formaldeído foram os que apresentaram maiores valores médios para os ensaios de resistência mecânica.

Ambos os adesivos utilizados apresentaram características satisfatórias diante das variações de umidade, pressão e temperatura o que os qualificam para uso estrutural, uma vez que exposto aos fatores mencionados não apresentaram enfraquecimento da linha de cola.

Algumas das propriedades estudadas no presente trabalho apresentaram correlação entre si, com destaque para as apresentadas pelo cisalhamento na linha de cola com a densidade aparente, adesivo, linha de cola secundária e diâmetro dos vasos, bem como entre a altura e largura dos raios e o número de células.

Os adesivos se valeram das condições adequadas apresentadas pela estrutura anatômica da madeira penetrando em suas células vasculares e formando uma linha de cola secundária profunda proporcionando ótima resistência na linha de cola e boa interação madeira-adesivo.

Apêndice

Apêndice A - Resumo das análises de variância para os ensaios mecânicos em função da densidade aparente, dos adesivos e da condição de umidade.

Fonte de variação	Grau de liberdade	Teste F			
		CNT	CSM	CSLC	FM
Condição de umidade	1	60,11 ^{**}	37,99 ^{**}	6,55 ^{ns}	4,56 ^{ns}
Adesivo	1	1,23 ^{ns}	0,01 ^{ns}	35,79 ^{ns}	22,68 ^{ns}
Densidade aparente	1	30,89 ^{**}	30,80 ^{**}	36,86 ^{ns}	4,01 ^{ns}
Cond*Ades	1	0,02 ^{ns}	0,80 ^{ns}	10,97 ^{**}	3,53 ^{ns}
Cond*Dens	1	0,18 ^{ns}	0,96 ^{ns}	0,67 ^{ns}	0,04 ^{ns}
Ades*Dens	1	1,52 ^{ns}	0,10 ^{ns}	8,66 ^{**}	0,28 ^{ns}
Cond*Ades*Dens	1	0,30 ^{ns}	0,96 ^{ns}	2,29 ^{ns}	1,82 ^{ns}

*CNT: Compressão normal às fibras; CSM: Cisalhamento paralelo às fibras; CSLC: Cisalhamento na linha de cola; FM: Percentual de falha na madeira; ** significativo ($F \leq 0,05$); ns: não significativo ($F > 0,05$).

Apêndice B - Resumo das análises de variância para as espessuras das linhas de cola principal e secundária em função da densidade aparente.

Fonte de variação	Grau de liberdade	Teste F	
		LP	LS
Adesivo	1	576,13 ^{**}	5,55 ^{ns}
Densidade aparente	1	18,23 ^{**}	6,77 ^{**}
Ades*Dens	1	45,94 ^{**}	7,73 ^{**}

*LP: Linha de cola principal; LS: Linha de cola secundária; ** significativo ($F \leq 0,05$); ns: não significativo ($F > 0,05$).