

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E ENGENHARIAS  
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS FLORESTAIS E DA MADEIRA

CLARA GASPAR FOSSI DE SOUZA

AVALIAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA DA MADEIRA LAMELADA  
COLADA (MLC) DE EUCALIPTO UTILIZANDO ADESIVO  
POLIURETANO SUBMETIDA AO INTEMPERISMO ACELERADO  
E AOS ORGANISMOS XILÓFAGOS

JERÔNIMO MONTEIRO  
ESPÍRITO SANTO

2021

CLARA GASPAR FOSSI DE SOUZA

AVALIAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA DA MADEIRA LAMELADA  
COLADA (MLC) DE EUCALIPTO UTILIZANDO ADESIVO  
POLIURETANO SUBMETIDA AO INTEMPERISMO ACELERADO  
E AOS ORGANISMOS XILÓFAGOS

Monografia apresentada ao  
Departamento de Ciências  
Florestais e da Madeira do Centro  
de Ciências Agrárias e Engenharia  
da Universidade Federal do Espírito  
Santo, como requisito parcial para a  
obtenção do título de Engenharia  
Industrial Madeireira.

JERÔNIMO MONTEIRO  
ESPÍRITO SANTO

2021

CLARA GASPAR FOSSI DE SOUZA

AVALIAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA DA MADEIRA LAMELADA  
COLADA (MLC) DE EUCALIPTO UTILIZANDO ADESIVO  
POLIURETANO SUBMETIDA AO INTEMPERISMO ACELERADO  
E AOS ORGANISMOS XILÓFAGOS

Monografia apresentada ao Departamento de Ciências Florestais e da Madeira do Centro de Ciências Agrárias e Engenharia da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenharia Industrial Madeireira.

Aprovada em 20 de setembro de 2021.

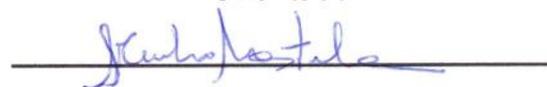
COMISSÃO EXAMINADORA



Prof. Dr. Pedro Gutemberg de Alcântara Segundinho

Universidade Federal do Espírito Santo

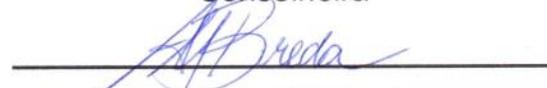
Orientador



Leonor da Cunha Mastela

Universidade Federal do Espírito Santo

Conselheira



Augusto Melo Moulin Breda

Universidade Federal do Espírito Santo

Examinador

*“Você nunca sabe que resultados virão da sua ação. Mas se você não fizer nada, não existirão “*  
*Mahatma Gandhi*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por tudo aquilo que eu tenha alcançado.

A minha família, pelo amor e dedicação ao longo da minha vida. À minha vó, Maria Aparecida, ao meu irmão, Gabriel, meu pai, aos meus tios, ao meu melhor amigo e namorado, Claudio e as minhas amigas (Juliana e Shayanny), por serem fonte de inspiração, dedicação e amor, e por estarem sempre ao meu lado.

À Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), por todo aprendizado e amizades que aqui adquiri. E oportunidade de realizar o curso de Engenharia Industrial Madeireira.

Ao meu orientador, professor Dr. Pedro Gutemberg de Alcântara Segundinho, pela atenção, dedicação e por me dar a oportunidade de ter desenvolvido esse trabalho.

Aos professores, por compartilharem seus conhecimentos e contribuírem para meu aprendizado.

Ao técnico do Laboratório de Ciência da Madeira (LCM) José Geraldo Lima de Oliveira, pela ajuda na realização dos ensaios mecânicos e ao marceneiro Eley Palácio Constantino, pela amizade e ajuda na preparação dos corpos de prova.

A todos os colegas, professores e funcionários do Departamento de Ciências Florestais e da Madeira que direta ou indiretamente contribuíram para que este trabalho fosse realizado.

Aos meus amigos Ramon Ferreira Oliveira, Leonor da Cunha Mastela, Fernanda Dalfior Maffioletti, Jaqueline Rocha de Medeiros, Augusto Melo Moulin Breda e Katiúcia Andreia Silva de Araujo, pelo apoio durante a pesquisa.

A todas outras pessoas não citadas aqui, mas que direta ou indiretamente auxiliaram na realização desse trabalho. A todos vocês, meu muito obrigada.

## RESUMO

Neste trabalho foram avaliadas as qualidades dos elementos de MLC (madeira lamelada colada) produzidos com madeira de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* utilizando adesivo comercial poliuretano (PUR). Para produção dos elementos de MLC a densidade da madeira pode variar de 0,400 g/cm<sup>3</sup> e 0,750 g/cm<sup>3</sup> e o teor de umidade variar de 7 a 14 %. No presente estudo a densidade foi de 0,65 g/cm<sup>3</sup> e umidade de 10,53 %, portanto, valores dentro da faixa considerada para produção de elementos lamelados colados (MLC). Os ensaios mecânicos foram realizados visando avaliar a resistência à compressão paralela, resistência ao cisalhamento na linha de cola, resistência ao cisalhamento *push-out*, ensaio de delaminação e a espessura de linha de cola. Foram realizados ensaios não destrutivos de vibração longitudinal e *stress wave* nos elementos de MLC. Os dados foram submetidos à análise de variância e ao teste Tukey ao nível de 5% de significância. A madeira de eucalipto apresentou boas propriedades físicas e mecânicas, que permite seu uso para confecção de elementos de MLC. Os resultados mostram que a madeira de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* está apta para produção de MLC, pois nos ensaios mecânicos pode-se concluir uma alta resistência do adesivo à base de poliuretano, assim viabilizando seu uso para aplicações estruturais para ambientes secos. Já quando esses elementos de MLC são expostos a condições climáticas, não houve um bom desempenho, havendo descolamento da linha de cola, observada pelas imagens do microscópio de varredura. Constatou-se também mudança significativa na cor da madeira, e esta tornou-se mais susceptível ao ataque de organismos xilófagos.

**Palavras chave:** Propriedades físicas. Propriedades mecânicas. Espessura de linha de cola.

## SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS .....	viii
LISTA DE FIGURAS .....	x
1 INTRODUÇÃO .....	1
1.1 O problema e sua importância .....	2
1.2 Objetivos .....	3
1.2.1 Objetivo geral .....	3
1.2.2 Objetivos específicos.....	3
2 REVISÃO DE LITERATURA .....	4
2.1 Madeira de reflorestamento no Brasil.....	4
2.2 Eucaliptos.....	5
2.3 Madeira Lamelada Colada (MLC) .....	6
2.4 Colorimetria .....	9
2.5 Intemperismo artificial acelerado.....	10
2.6 Organismos xilófagos .....	12
3 METODOLOGIA.....	15
3.1 Caracterização das propriedades físicas da madeira.....	15
3.2 Caracterização das propriedades mecânicas das lamelas.....	16
3.2.1 Vibração Transversal Livre.....	17
3.2.2 Vibração Longitudinal.....	17
3.2.3 Ensaio flexão estática.....	18
3.2.4 Ensaio de <i>Stress Wave</i> .....	19
3.3 Adesivo e montagem dos elementos de MLC .....	19
3.4 Caracterização das propriedades mecânicas dos elementos de MLC.....	21
3.4.1 Vibração Longitudinal .....	21
3.4.2 Ensaio <i>Stress Wave</i> .....	22
3.4.3 Ensaios destrutivos para determinação das propriedades mecânicas dos elementos de MLC .....	22
3.4.4 Ensaio de compressão paralela às fibras.....	23
3.4.5 Ensaio de compressão normal às fibras.....	24
3.4.6 Ensaio de cisalhamento na linha de cola .....	24
3.4.7 Ensaio de cisalhamento <i>push-out</i> na linha de cola .....	25
3.4.8 Ensaio de delaminação .....	26
3.5 Ensaio de microdensitometria de raios-x.....	27

3.6 Espessura de linha de cola .....	28
3.7 Ensaio de intemperismo acelerado e colorimetria .....	29
3.8 Ensaio de preferência alimentar .....	31
3.9 Análise estatística .....	33
4 RESULTADOS DA PESQUISA.....	33
4.1 Propriedades físicas da madeira .....	33
4.2 Propriedades mecânicas da madeira e da madeira lamelada colada .....	35
4.2.1 Ensaio não destrutivos .....	35
4.3 Ensaio destrutivos .....	36
4.3.1 Compressão paralela às fibras.....	37
4.3.2 Compressão normal às fibras.....	39
4.3.3 Cisalhamento na linha de cola .....	40
4.3.4 Ensaio cisalhamento <i>push-out</i> .....	41
4.3.5 Delaminação .....	42
4.4 Ensaio de Microdensitometria de raios-x.....	43
4.5 Espessura da linha de cola .....	44
5.6 Intemperismo acelerado e colorimetria .....	45
5.7 Ensaio de preferência alimentar .....	51
5 CONCLUSÃO.....	53
6 REFERÊNCIAS.....	55
Anexo 1 .....	68

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros técnicos dos ciclos de intemperismo utilizados no ensaio de intemperismo acelerado.....	29
Tabela 2 - Classificação da variação total da cor ( $\Delta E^*$ ) da madeira após os tratamentos.....	31
Tabela 3 - Valores médios das propriedades físicas para madeira de <i>Eucalyptus urophylla</i> x <i>Eucalyptus grandis</i> .....	33
Tabela 4 - Média dos valores dos módulos de elasticidade obtidos nas lamelas e elementos de MLC.....	35
Tabela 5 - Média dos valores de resistência mecânica, falha na madeira e umidade obtidos por ensaios de cisalhamento na minha de cola, cisalhamento <i>push-out</i> na linha de cola, compressão paralela às fibras e compressão normal às fibras.....	36
Tabela 6 - Valores médios dos parâmetros colorimétricos das amostras de <i>Eucalyptus urophylla</i> x <i>Eucalyptus grandis</i> em condição antes do intemperismo e depois do intemperismo nas direções transversal e longitudinal nos 3 tratamentos (radial, tangencial e mista).....	45
Tabela 7 - Variações ocorridas entre os valores dos parâmetros colorimétricos das amostras da madeira de <i>Eucalyptus urophylla</i> x <i>Eucalyptus grandis</i> .....	47
Tabela 8 - Valores médios de densidade aparente das <i>Eucalyptus urophylla</i> x <i>Eucalyptus grandis</i> em condição antes do intemperismo e depois do intemperismo nas direções transversal e longitudinal nos 3 tratamentos (radial, tangencial e mista).....	49
Tabela 9 - Valores médios da delaminação, após a exposição ao intemperismo artificial.....	50
Tabela 10 - Valores médios da perda de massa (%) e desgaste (nota) dos elementos de MLC no sentido transversal causados pelo ataque de <i>Nasutitermes corniger</i> no ensaio de preferência alimentar.....	51
Tabela 11 - Perda de massa e desgaste dos elementos de MLC no sentido longitudinal causados pelo ataque de <i>Nasutitermes corniger</i> , ensaio de preferência alimentar.....	52

Tabela 12 - Grupos de cores obtidos no agrupamento de cluster usando as variáveis cromáticas L, a*, b* e h. ....	68
--	----

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Classificação visual.....	15
Figura 2 - Vibração transversal nas lamelas. ....	17
Figura 3 - Vibração longitudinal das lamelas.....	18
Figura 4 - Flexão estática nas lamelas.....	18
Figura 5 - <i>Stress wave</i> nas lamelas. ....	19
Figura 6 - Montagem dos elementos de MLC de eucalipto. ....	20
Figura 7 - Adesivo e montagem dos elementos de MLC.....	21
Figura 8 - Vibração longitudinal dos elementos de MLC. ....	21
Figura 9 - <i>Stress wave</i> nos elementos de MLC.....	22
Figura 10 - Esquema de retirada dos corpos de prova dos elementos de MLC. DS: Densidade e estabilidade dimensional, CP: compressão paralela às fibras, PS: cisalhamento <i>push-out</i> , CS: cisalhamento na linha de cola, LC: linha de cola IAT: intemperismo acelerado transversal, IAL: intemperismo acelerado longitudinal, CN: compressão normal às fibras e DL: delaminação. ....	23
Figura 11 - Corpo de prova de MLC para compressão paralela às fibras. ....	24
Figura 12 - Corpo de prova de MLC para compressão normal às fibras. ....	24
Figura 13 - Corpo de prova de cisalhamento na linha de cola. ....	25
Figura 14 - Malha para medir a falha na madeira no ensaio de cisalhamento. ....	25
Figura 15 - Corpo de prova tipo 'H' <i>push-out</i> para ensaio de cisalhamento à compressão para duas linhas de cola. ....	26
Figura 16 - a) Corpo de prova para ensaio de delaminação. b) Autoclave. ....	27
Figura 17 - Corpo de prova de raio x de microdensitometria e equipamento Fagus GreCon DAX 6000. ....	28
Figura 18 - Equipamento utilizado para medir linha de cola.....	28
Figura 19 - Câmara de intemperismo acelerado utilizada (A), amostras dispostas dentro da câmara (B) e amostras fixadas (C).....	29
Figura 20 - Espectrofotômetro portátil. ....	31
Figura 21 - Montagem distribuição das amostras (A); disposição da colônia de térmita para o ensaio de preferência alimentar (B). ....	32
Figura 22 - Valores médios de resistência à compressão paralela às fibras. Médias seguidas por mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). ....	38

Figura 23 - Valores médios de resistência à compressão paralela às fibras. Médias seguidas por mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). .....	39
Figura 24 - Valores médios de resistências ao cisalhamento na linha de cola. Médias seguidas por mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). .....	40
Figura 25 - Valores médios de resistências ao cisalhamento <i>push-out</i> na linha de cola. Médias seguidas por mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). .....	41
Figura 26 - Delaminação. ....	43
Figura 27 - Gráficos de densitometria. ....	44
Figura 28 – Linha de cola. Fonte: O autor. ....	45
Figura 29 – (A) tratamento tangencial na seção transversal, (B) tratamento radial na seção transversal, (C) tratamento misto na seção transversal, (D) tratamento tangencial na seção longitudinal, (E) tratamento radial na seção longitudinal, (F) tratamento misto na seção longitudinal. ....	48
Figura 30 - demonstração da delaminação no microscópio de varredura. ....	50

## 1 INTRODUÇÃO

No setor florestal, a principal atividade é certamente a produção madeireira que é utilizada em vários âmbitos industriais, com finalidade moveleira, produção de celulose e papel, construção civil, produção de energia, entre outros (MESQUITA et al., 2017).

Na fabricação de madeira lamelada colada (MLC) pode-se utilizar várias espécies de madeira, em diversas idades e diferentes classes diamétricas. Dessa maneira, para obter condições necessárias para um projeto arquitetônico, a necessidade de árvores com grandes comprimentos para garantir uma alta resistência e maior envergadura, ficou no passado, conforme Yang et. al. (2008). A vantagem do MLC é o aproveitamento de grande quantidade de peças com pequenas dimensões e a utilização qualitativa das peças, usando as de maior módulo de elasticidade nas regiões mais solicitadas. Na estrutura pode-se haver a possibilidade de variar a espécie de madeira, de acordo com a solicitação de resistência das laminações em cada região da viga (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 2010).

Os elementos estruturais de MLC, mesmo com rigoroso controle com relação as matérias-primas e o processo de produção, demonstram certa variação nas propriedades mecânicas referente ao próprio material utilizado; sendo assim, é de extrema importância verificar se as propriedades mecânicas definidas no projeto serão atendidas. De acordo com a norma canadense CAN/CSA 0177 (2006), os produtos acabados podem ser testados em condições de laboratório. Em outras palavras, o controle de qualidade na produção é essencial para comprovar que as propriedades físicas e mecânicas da MLC são suficientes para atender aos padrões normatizados.

Os estudos relacionados com caracterização tecnológica da madeira vão além dos estudos anatômicos físicos e mecânicos. Outros fatores, como a cor, os constituintes químicos, a secagem e a durabilidade natural, completam uma melhor caracterização e utilização de uma determinada espécie madeireira. Contudo esses parâmetros são menos utilizados, talvez pela maior dificuldade da realização desses ensaios (GONÇALEZ et al., 2001).

Dentre as técnicas para se avaliar a qualidade da madeira, a colorimetria tem evoluído, sendo capaz de estabelecer correlações entre a cor da madeira e as propriedades mecânicas do módulo de ruptura (MOR) e módulo de

elasticidade (MOE) e propriedades físicas. (THOMPSON, 2006, RIBEIRO, 2009). Com a exposição ao intemperismo, a cor e a textura da madeira são alteradas (SUDIYANI et al., 1999). Essas alterações ocorrem devido à ação dos raios ultravioletas, que provocam tanto a fotodegradação quanto a fotodescoloração da madeira, diminuindo seu tempo de vida útil (GOUVEIA, 2008). Todos os elementos do clima influenciam mutuamente as propriedades da madeira, mas a radiação solar e a precipitação são dominantes em relação aos outros mecanismos de intemperismo (CREEMERS et al. 2002).

### **1.1 O problema e sua importância**

O emprego da madeira para construção civil apresenta vantagens por proporcionar uma construção mais rápida e eficiente. O MLC, um elemento a base de madeira, muito empregado no referido segmento industrial, desenvolvido por tecnologia alemã e australiana, é considerado um produto novo no Brasil, mesmo sendo a primeira unidade fabril fundada em 1934, em Curitiba, Paraná. (ZANGIACOMO, 2003).

Nos países, de clima temperado, com um alto índice de desenvolvimento industrial, onde se tem o pleno conhecimento das técnicas aplicadas na produção de MLC, há vários estudos sobre a utilização das madeiras de coníferas. Estes estudos avaliam as propriedades da madeira que favorecem sua aplicação para compor os elementos colados.

No Brasil, onde se tem uma vasta área de Floresta Plantada com *Eucalyptus* 6,9 milhões de ha segundo Instituto Brasileiro de Árvores – IBÁ (2020), são necessários estudos para avaliação da qualidade da madeira, do referido gênero, para produção da madeira lamelada colada, avaliação de qualidade do elemento de MLC e de adesivos que melhor se adequem a técnica de produção.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo geral

Produzir e testar elementos de MLC a partir da madeira do híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* utilizando adesivo poliuretano (PUR) e avaliar o material por meio de ensaios experimentais.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- Confeccionar os elementos de MLC.
- Determinar as propriedades físicas (densidade, retratibilidade e anisotropia) da madeira do híbrido;
- Realizar os ensaios de caracterização das propriedades físicas e mecânicas na madeira e nos elementos de MLC (flexão estática, vibração transversal livre, vibração longitudinal, *Stress Wave*, cisalhamento na linha de cola, compressão paralela às fibras, compressão normal às fibras, cisalhamento *push-out* na linha de cola);
- Realizar os ensaios de delaminação para avaliar a abertura das linhas de cola dos elementos de MLC.
- Realizar a medição da espessura da linha de cola dos elementos de MLC.
- Avaliar, por meio da colorimetria quantitativa, a estabilidade da cor após ensaios intemperismo acelerado.
- Analisar o comportamento da MLC exposta na máquina de intemperismo acelerado e verificar as amostras intemperizadas, em relação a durabilidade natural da madeira de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* a térmitas xilófagos.
- Comparar e analisar os dados estatisticamente.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Madeira de reflorestamento no Brasil

O Brasil possui uma área total de 9 milhões de hectares de florestas plantadas, respondendo por 91% de toda a madeira produzida para fins industriais e por 6,2% do PIB industrial. Assim, o Brasil possui o maior potencial para o desenvolvimento de uma economia verde (IBÁ, 2020).

De acordo com relatório do IBÁ (2020), as plantações de eucalipto ocupam 6,97 milhões de hectares no país, principalmente nos estados de Minas Gerais, São Paulo e Mato Grosso do Sul. Os plantios de pinus ocupam uma área de 1,64 milhões de hectares, principalmente nos estados do Paraná e Santa Catarina.

A madeira de reflorestamento é uma opção promissora para a construção civil. Ela surgiu quando a utilização de madeiras certificadas tornou-se necessária a partir do ano de 1993, quando foi fundada a FSC (*Forest Stewardship Council*) e o Cerflor (Programa Brasileiro de Certificação Florestal) (FSC, 2016). No Brasil o setor florestal atua com princípios de sustentabilidade, cumprindo a legislação florestal.

A certificação é uma ferramenta de mercado que permite ao consumidor avaliar a procedência do produto que está adquirindo. Em 2019, houve um crescimento de 23% da área total certificada no Brasil, contabilizando 7,4 milhões de hectares, incluindo áreas para fins comerciais, áreas de conservação e áreas destinadas a outros usos, como estradas e pátios, por exemplo. Considerando apenas a área plantada, estima-se um total de 4,4 milhões de hectares (IBÁ 2020).

O pinus é a principal matéria-prima para produção da maioria dos elementos estruturais, porém, a madeira de *Eucaliptus sp.* tem potencial para ser utilizada na fabricação de elementos estruturais, como MLC e MLCC (madeira lamelada colada cruzada) devido a suas propriedades físicas e mecânicas da madeira e à disponibilidade de matéria-prima (TAREZO e SZUCS, 2010).

O gênero *Eucaliptus* inclui um grande número de espécies e pode ser cultivado em diferentes climas e tipos de solo, apresentando rápido crescimento e produtividade (SILVEIRA, 2008). Além disso, possui características distintas que o tornam adequado para diversos fins, entre os quais se destacam

laminados, móveis, estruturas, caixas, pilares, escoras, mourões e carvão (ALZATE, 2004).

## 2.2 Eucaliptos

O gênero *Eucalyptus* é originário da Austrália, Tasmânia e outras ilhas da Oceania. Segundo a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA (2020) o eucalipto possui mais de 700 espécies reconhecidas botanicamente. Estas espécies têm propriedades físicas e químicas tão diversas que fazem com que os eucaliptos sejam usados para as mais diversas finalidades como, estacas, moirões, dormentes, celulose e papel, chapas de fibras e de partículas, movelaria, laminação, estruturas, energia (carvão vegetal e lenha) e medicamentos.

As espécies do gênero *Eucalyptus* são reconhecidas pelo rápido crescimento, alta produtividade, ampla adaptabilidade ambiental e possibilidade de diferentes usos da madeira, além da contribuição quanto à diminuição da pressão sobre os ecossistemas nativos (Wink et al., 2013). Na construção civil em geral, existe uma grande variedade no número de espécies apropriadas, como por exemplo, *E. alba*, *E. camaldulensis*, *E. cloeziana*, *C. citriodora*, *E. deglupta*, *E. maculata*, *E. microcorys*, *E. paniculata*, *E. botryoides*, *E. pilularis*, *E. resinífera*, *E. robusta*, *E. tessellaris*, *E. tereticornis* (PAIVA et al., 2011).

As variações genéticas das espécies de eucaliptos, acrescida à dominância genética, tendo em vista ainda a presença de características específicas, movimentou programas de hibridação visando o melhoramento genético, com o intuito de introduzir características de tolerância não presentes nas espécies tradicionalmente utilizadas (BELTRAME et al., 2012). O propósito que se pretende alcançar nos programas de melhoramento genético de *Eucalyptus* é a escolha de híbridos com boas características silviculturais e tecnológicas, que assegurem o aumento de produtividade, uniformização na qualidade da madeira, maior resistência a pragas e doenças, e assegure madeira de qualidade para diferentes usos (ARAÚJO et al., 2015). O híbrido *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* apresenta uma densidade superior as espécies originárias (0,48 e 0,60 g/cm<sup>3</sup>), alta taxa de crescimento volumétrico e cerne distinto do alburno e de cor rosa claro (COSTA, 2011; HSING; PAULA; PAULA, 2016).

O híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* possui rápido crescimento, com uma rotatividade de corte variando entre seis e sete anos de idade. Para a fabricação de madeira serrada com a finalidade de beneficiamento secundário, são necessárias madeiras com quantidade significativa de lenho adulto (BASSA et al., 2007).

Com as boas características de crescimento, ligadas a um padrão de qualidade admissível, as espécies *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus grandis* (assim como os seus híbridos) foram utilizadas como matéria-prima nas serrarias e demais indústrias madeireiras do Brasil. Segundo Barbosa (2013), a resistência mecânica, a sua brutalidade e a tolerância ao déficit hídrico do *Eucalyptus urophylla* conferiram a espécie alto potencial para ser empregada em programas de hibridação com o *Eucalyptus grandis*, que possui boas características silviculturais, resultando em um material homogêneo e com qualidade apropriada para fins industriais.

O híbrido *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* é bastante utilizado no Brasil para obtenção de celulose de fibra curta por apresentar elevado rendimento e alta qualidade da polpa. Todavia, constata-se o desenvolvimento de pesquisas para conhecer a estrutura da madeira, de forma a aplicar o produto na fabricação de painéis e laminados (GONÇALEZ et al., 2014).

Serenine Junior et al. (2019) avaliou as propriedades tecnológicas da madeira de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* com cinco anos de idade para uso estrutural. Na análise o autor obteve uma densidade básica média da madeira de 0,44 g/cm<sup>3</sup> e densidade aparente média de 0,53 g/cm<sup>3</sup>. Dessa madeira, a madeira juvenil do híbrido testado foi considerada um material de média densidade. Através do ensaio de compressão paralela às fibras, o módulo de elasticidade obtido foi igual a 10.549 MPa e a resistência, 42,86 MPa. Portanto, os autores constataram que eucalipto *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* pode ser utilizado em estruturas de pequeno e médio porte.

### **2.3 Madeira Lamelada Colada (MLC)**

A fabricação da MLC abrange duas técnicas muito antigas. A MLC foi produzida a partir da técnica da colagem juntamente com a técnica da laminação, ou seja, a partir das lamelas ocorre a reconstituição da madeira (CALIL NETO, 2011).

A MLC possui o termo “Madeira lamelada colada” pois é produzida a partir

de lamelas de dimensões menores se comparadas às dimensões da peça final assim constituída. Essa técnica é composta por lamelas unidas por colagem, que ficam em uma disposição tal que as suas fibras se localizem paralelas entre si (CALIL NETO, 2011).

A MLC surgiu no século XIX em países europeus, especialmente na Alemanha. Essa inovação chegou à América do Norte em 1934, quando foi implantada a primeira empresa para a produção de MLC nos Estados Unidos em Peshtigo, Wisconsin, dando-se a possibilidade ao emprego da técnica no campo estrutural (AZAMBUJA, 2006).

Nos Estados Unidos, ocorreu um grande aumento na aplicação da MLC para uso interno desde 1935 e em meados de 1940 para uso externo, Segundo Duwadi e Ritter (1997), são utilizadas, em sua grande maioria, madeiras de espécies coníferas. Na fabricação de MLC as coníferas são largamente empregadas, pois apresentam uma melhor penetração e interação com os adesivos (SANTOS; DEL MENEZZI, 2010). Segundo Moody, Hernandez e Liu (1999) na colagem de MLC pode-se utilizar todas as espécies florestais madeireiras. Contudo, algumas espécies madeireiras possuem características físicas e químicas mais apropriadas para a fabricação de MLC, enquanto que outras espécies necessitam do emprego de colas especiais ou de modificação das colas já comercializadas por meio de misturas para que garantam um produto de boa qualidade (SANTOS; DEL MENEZZI, 2010).

No Brasil, a primeira indústria de produtos de MLC foi a Esmara Estruturas de Madeira Ltda, fundada em 1934 em Curitiba (PR), com conhecimento trazido por imigrantes alemães. Outras empresas foram instaladas, posteriormente, na Região Sul. Na década de 1960, o Engenheiro Vinicio Walter Callia desenvolveu junto no Instituto de Pesquisas Tecnologias de Estado de São Paulo a madeira lamelada colada produzida pela madeira de pinheiro-do-paraná; logo após fundou a primeira empresa produtora de MLC (ICIMOTO, 2013). Atualmente, no país, existem sete indústrias produtoras de MLC, sendo localizadas entre os estados das regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste (LEITE; SANTOS; VALLE, 2017).

As madeiras de reflorestamento no Brasil, em particular, abrangem os gêneros *Pinus* e *Eucalyptus*, gêneros esses que têm sido empregados na produção de lamelas para MLC. Os avanços dos estudos sobre as propriedades físicas e mecânicas desses gêneros estão permitindo conhecer

o comportamento da madeira com a aplicação de adesivos. Segundo Miotto (2009), que determinou de maneira experimental e numérica o desempenho estrutural de vigas mistas de MLC e concreto reforçado com fibras de vidro, houve um acréscimo significativo no módulo de ruptura (MOR) das vigas mistas em relação às vigas de MLC quando produzidas como vigas mistas.

Estudos relacionados com madeira de eucalipto têm mostrado resultados interessantes desta espécie para elementos estruturais de MLC. Oliveira (2018) analisou o desempenho da madeira lamelada colada empregando madeira de *Eucalyptus sp.* e adesivo resorcinol-formaldeído (RF). Para os fatores de resistência utilizados, as estruturas apresentaram bons resultados.

Dessa forma, o controle sobre as matérias-primas e o processo produtivo deve ser rigoroso, pois os elementos estruturais de MLC apresentam certa variabilidade nas propriedades mecânicas inerentes ao próprio material empregado (SEGUNDINHO et al., 2013). Diante do processo de controle de fabricação, as peças de madeira passam pela classificação visual e mecânica. Segundo Calil Neto (2011), a classificação visual é recomendada por normas para determinar quais peças podem ter uso estrutural, visto que a avaliação consiste na inspeção da superfície das 6 faces (bordas, laterais e extremidades) de cada peça. A classificação mecânica pode ser por meio de ensaios não-destrutivos e consiste em estabelecer o módulo de elasticidade longitudinal nas lamelas. Dentre os mecanismos utilizados para a classificação estrutural, a flexão estática é um dos mais importantes (CUNHA; MATOS, 2010).

Com a classificação mecânica, podemos admitir a localização das peças de acordo com a sua resistência. As lamelas com valores mais altos de MOE podem ser dispostas na parte externa (camadas inferior e superior) e as lamelas com um baixo valor de MOE podem ser posicionadas próximo a linha neutra (camada central) (MASCIA et al., 2018). Essa configuração de balanceamento das lamelas consiste em um maior aproveitamento de peças de madeira, de modo que as peças com maiores valores de MOE são destinadas a regiões mais solicitadas, ou seja, nas regiões de tração e compressão (CUNHA; MATOS, 2010).

As peças compostas (Madeira Laminada Colada) podem ser produzidas em diferentes tamanhos, seções e formas, permitindo o seu uso em projetos estruturais, com possibilidade de alcançar grandes vãos (NEGRELI, 2016). A MLC, sendo um material estrutural, pode ser empregada em vigas, pilares,

pergolados, coberturas, passarelas, escadas, painéis e em revestimentos diversos, assim tendo a possibilidade de diversas composições arquitetônicas e estruturais, difíceis de reproduzir com outros materiais estruturais, como o aço (MELLO, 2007; MIGLIANI, 2019).

## 2.4 Colorimetria

A cor está inclusa no meio das principais propriedades físicas da madeira que são percebidas pelos sentidos humanos. Desse modo, é de grande importância para identificação e classificação das madeiras. A compreensão da cor resulta da análise pelo olho e pelo cérebro para perceber a cor, diante de uma sensação dos raios luminosos, em um intervalo que se localiza entre 400 nm e 700 nm no espectro eletromagnético (CAMARGOS; GONÇALEZ, 2001).

Para que a cor exista, deve haver três variáveis importantes: a fonte de luz, o objeto e o observador. No entanto, uma determinada cor é especificada pela análise visual do objeto, isto é, a análise subjetiva e pode variar dependendo do observador e da fonte de luz utilizada. Para evitar fatores subjetivos no processo de determinação da cor, foram desenvolvidos métodos comparativos e quantitativos de medição de cores (STANGERLIN et al., 2013).

Quando a radiação eletromagnética é focada em um objeto, parte dela é absorvida e outra parte é refletida. A radiação é refletida na faixa visível do espectro eletromagnético, que irá caracterizar a cor do material (LAVISCI et al., 1989; PETTER; GLIESE, 2000; MORI et al., 2005).

De acordo com Mori et al. (2005) a cor é o primeiro contato visual, que pode indicar imediatamente o uso real do material. A cor é uma propriedade importante da madeira, as propriedades físicas e mecânicas se sobressaem para elementos estruturais.

Além dos fatores genéticos inerentes a cada espécie, ela também será afetada por diversos fatores internos e externos à árvore, como estrutura anatômica, composição química, método de colheita, localização da amostra na árvore, condições ambientais, altura, diâmetro e idade (GONÇALEZ et al., 2005). Além disso, a cor pode identificar e indicar o uso de diferentes tipos de madeira, basicamente quando analisada em conjunto com os aspectos de textura e desenho (CAMARGOS; GONÇALEZ, 2001).

Porém, a cor da madeira não é estável, pois tende a mudar com a ação do intemperismo, seja pela lixiviação de substâncias e compostos químicos

ocasionada pela chuva ou ainda pela fotodegradação (PASTORE et al., 2008; ROSU et al., 2010).

Segundo Botosso (2011) as categorias de cores de madeira podem ser classificadas nos seguintes grupos: esbranquiçada, amarelada, avermelhada, acastanhada, parda, enegrecida e arroxeadas. De maneira eventual, também podem ser observadas madeiras de outras cores, como o verde (palo-santo, *Bulnesia sarmientoi*, Zygophyllaceae) ou com várias cores, com um padrão rajado (angelim-rajado, *Marmaroxylon racemosum* Fabaceae).

A cor da madeira e, conseqüentemente, a cor do produto com ela obtido, deverá atender aos padrões de qualidade de mercado exigidos mundialmente. Assim, esta propriedade organoléptica deve ser adicionada ao plano de caracterização tecnológica da madeira, visando a caracterização técnica da madeira para atender a um maior uso deste material (JANIN et al., 2001; MORI et al., 2004), como produção de móveis, pisos, estruturas de madeira, construção naval e marcenaria de alto padrão.

Para melhor avaliação da diversidade de sensações psicofísicas na determinação da cor dos objetos, a colorimetria usa variáveis numéricas para representar as interações causadas pela luz na superfície (COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ECLAIRAGE, 2004). Esse mecanismo descreve cada elemento da cor digitalmente por meio de equipamentos apropriados (MORI et al., 2005).

O colorímetro é um dos equipamentos mais utilizados para análise numérica de cores por ser portátil, fácil de operar, baixo custo de fabricação e poder obter diretamente o valor da medição do componente cromaticidade. No entanto, esses instrumentos não podem gerar dados de refletância espectral, o que limita a precisão dos resultados (GONÇALEZ; MACEDO, 2003).

O sistema CIELAB (Comissão Internacional de L'Eclairage ou Comissão Internacional de Iluminantes), atualmente utilizado na determinação quantitativa da cor (colorimetria), é um método que define a sensação da cor baseado em três elementos: a luminosidade ( $L^*$ ), a tonalidade (coordenadas cromáticas  $a^*$  e  $b^*$ ) e a saturação (C) (CAMARGOS, 1999).

## **2.5 Intemperismo artificial acelerado**

O envelhecimento artificial acelerado ou intemperismo artificial acelerado, a ação do intemperismo também pode ser ocasionada ao natural (no meio

ambiente) pode ser explicado com a lenta degradação dos materiais ao longo do tempo (WILLIAMS, 2005). O mecanismo de degradação depende do tipo de material, mas o motivo é o efeito combinado de uma variedade de fatores encontrados na natureza, como umidade, radiação solar, calor e frio, uso de produtos químicos no material, abrasão e causas biológicas.

O intemperismo artificial acelerado pode causar problemas aos consumidores, pois além de alterar a textura, a cor e brilho da madeira, também afeta o desempenho dos produtos de proteção aplicados sobre a madeira (ISHIGURI et al. 2003). Quando a madeira é submetida ao intemperismo, ela sofre os danos inicialmente observados pela mudança natural de sua cor, podendo inclusive danificar suas propriedades químicas, físicas e mecânicas. No mesmo contexto, para Silva et al. (2007) a observação do efeito do intemperismo sob a cor da madeira é o resultado da lixiviação ocasionada pela chuva e efeito da incidência da luz.

Os raios ultravioletas (UV) presente na luz solar são os mais prejudiciais à degradação da madeira, de modo que os principais polímeros que compõem a madeira passam a sofrer modificação química: celulose, lignina e hemicelulose (FEIST; HON, 1984). Além disso, segundo os autores, a ação da água provoca a lixiviação de extrativos e produtos fotodeteriorados pela luz expondo novas superfícies aos efeitos do tempo.

A profundidade de penetração da radiação ultravioleta pode chegar a 75  $\mu\text{m}$ , e a radiação de luz visível pode chegar a cerca de 200  $\mu\text{m}$ , dependendo da cor original da madeira. Mesmo que a radiação visível penetre mais profundamente e sua energia seja inferior a 70 kcal/mol, isso não é suficiente para quebrar quaisquer ligações químicas nos componentes da madeira, ao contrário da luz ultra violeta que, por possuir maior energia (90 kcal/mol), é considerada mais danosa ao uso da madeira (HON, 2001).

Para reduzir o custo e o tempo necessário para os testes de campo e avaliação do intemperismo, uma máquina para simular o intemperismo foi desenvolvida em laboratório, permitindo estimar e comparar a durabilidade natural de diferentes espécies de madeiras (GONÇALEZ et al., 2010). Um reator fotoquímico pode ser usado para simular a incidência de raios ultravioletas (UV). Os reatores fotoquímicos podem ser classificados de acordo com a fonte de radiação, que pode ser solar ou artificial (utilizando uma lâmpada de luz ultravioleta, por exemplo). A fonte de radiação artificial mais comum para esse

tipo de reator fotoquímico são as lâmpadas de vapor de mercúrio de baixa, média ou alta pressão, todas com função de emissão ultravioleta. O arranjo dessas lâmpadas costuma permitir que a amostra seja processada para receber a maior concentração possível de fótons. Por este motivo, muitos reatores utilizam placas espelhadas, ou mesmo as tornam cilíndricas, cuja parede interna é feita de material reflexivo (GONÇALEZ et al., 2010; NEUMANN et al., 2002).

Em relação à química da madeira, segundo Pastore (2004), a lignina é considerada o primeiro grande componente polimérico a se decompor, processo que pode ser acompanhado por diminuição do teor de lignina e formação de grupos carboxílicos superficiais. A deterioração da celulose se manifesta pela perda de peso e diminuição do grau de polimerização (PANDEY, 2005). Portanto, a fotodegradação da madeira é um fenômeno superficial, pois um grande número de grupos (carbonila, dupla ligação, hidroxila fenólica, etc.) ou sistema cromóforo (quinona, bifenila, etc.) distribuídos na camada externa impedem a fotodegradação da madeira (COSTA et al., 2011; PASTORE, 2004).

A cor da madeira varia com a composição química das substâncias presentes no xilema: taninos, fenóis, flavonoides, estilbenos, quinonas e outros. Essas substâncias conferem as diferentes cores à madeira. Mesmo assim, a cor da madeira não é estável, pois muda com o tempo, escurece devido à oxidação (causada principalmente pela exposição ao ambiente) e reage com componentes químicos como a lignina (HON, 2001).

## **2.6 Organismos xilófagos**

A madeira por ser um material biológico fica sujeita a deterioração, inclusive causada por agentes bióticos ou abióticos. Em geral, a madeira possui uma resistência natural relativamente baixa a organismos xilófagos; desse modo, necessita de algum tratamento ou conjunto de medidas para conferir maior proteção durante seu uso, aumentando assim sua vida útil nos diversos meios em que é utilizada (BROCCO, 2019).

A biodeterioração da madeira acontece principalmente pelos organismos capazes de digerir a madeira, dentre eles, os fungos, insetos, e organismos marinhos, com destaque para os dois primeiros. No meio dos insetos, as térmitas, comumente chamadas de cupins, são as maiores causadoras de danos à madeira, dando ênfase para as térmitas subterrâneas, presentes na maioria

dos estudos de deterioração da madeira, em comparação às térmitas de madeira seca e úmida (CLAUSEN, 2010).

As térmitas se alimentam completamente de celulose, e a madeira possui um alto teor de celulose em sua composição, sendo assim o alimento preferido por um grande número de espécies (OLIVEIRA et al., 1986; SHELTON; GRACE, 2003). Apesar disso, é uma substância de difícil digestão, sendo preciso um grande arsenal enzimático. A madeira não é só composta pela celulose: também possui lignina, o que dificulta sua alimentação. Logo somente a celulose tem valor nutritivo para aqueles organismos providos de um adequado complexo enzimático capaz de realizar sua digestão (BREZNAK, 1982; OLIVERA et al., 1986).

Em vários estudos sobre a resistência natural da madeira se restringe em registrar as características da madeira atacada, sendo deficiente os estudos sobre os mecanismos dos insetos e razões fisiológicas e químicas para o diferente comportamento das térmitas diante as diversas espécies de madeiras (BECKER, 1971).

A maioria das espécies de térmitas está associada a protozoários e bactérias. Esses microrganismos têm um meio adequado as suas sobrevivências e fornecem ao inseto os produtos da degradação. No caso dos cupins subterrâneos (Rhinotermitidae), por exemplo, a absorção da madeira ocorre pela mastigação e ruptura mecânica (e alguma ação enzimática) da madeira (celulose), pelos protozoários e bactérias simbióticas encontradas no intestino posterior das térmitas (SHELTON; GRACE, 2003).

Algumas espécies possuem extrativos que não são muito agradáveis, repelentes ou tóxicos para os insetos xilófagos. Diante da ação desses compostos existe uma diferença conforme a espécie de madeira. Além do mais, estudos relatam que um mesmo extrativo age de maneira diferente entre as espécies de insetos xilófagos (CARTER; SMYTHE, 1974; OLIVEIRA et al., 1986).

Estudos com madeira de eucalipto têm mostrado resultados interessantes desta espécie com relação ao ataque de organismo xilófagos. Lopes (2014) realizou ensaios de preferência alimentar com *Nasutitermes corniger*, utilizando madeira de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*, onde encontrou resultado de 100% de perda de massa e para *Corymbia torrelliana*, resultaram entre 97,8% e 100%.

Resultados encontrados por Brito (2015) analisando perda de massa no ensaio de preferência alimentar com o *Nasutitermes corniger* indicaram que a madeira de *Pinus taeda* foi totalmente consumida, já a madeira de *Corymbia citriodora* (madeira natural) obteve uma perda de massa de 67%.

Os resultados das pesquisas apontadas mostram como é complexa a natureza dos fatores atuantes nos mecanismos dos insetos xilófagos e o que determinam a resistência natural de uma madeira. Os extrativos afetam de diferentes maneiras várias espécies de insetos xilófagos, o que torna necessários estudos sobre os componentes químicos pertencentes aos extrativos de madeiras de reconhecida durabilidade natural, a fim de se conhecer seus efeitos nos organismos dos insetos xilófagos (BROCCO, 2019).

### 3 METODOLOGIA

A madeira utilizada nesse trabalho foi um híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* adquirida pela Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). O presente estudo foi conduzido no Laboratório de Estruturas de Madeira (LEMAD), do Departamento de Ciências Florestais e da Madeira (DCFM), da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), localizado na cidade de Jerônimo Monteiro, ES.

O lote de madeira, composto por 72 lamelas, foi acondicionado na sala de climatização por 45 dias, até atingir a umidade de equilíbrio. As lamelas tiveram suas dimensões ajustadas para 60 x 5,5 x 2,5 cm (comprimento, largura e espessura, respectivamente). Na sequência foi feita uma classificação visual das peças para a colagem, onde se objetivou selecionar as lamelas com menos defeitos, nós ou esmoados. (Figura 1).



Figura 1 - Classificação visual

Fonte: O autor.

#### 3.1 Caracterização das propriedades físicas da madeira

A caracterização das propriedades físicas do lote de madeira foi determinada de acordo com os métodos de ensaios definidos na Norma Brasileira Regulamentadora – NBR 7190 (ABNT,1997). Foram determinados densidade aparente (Equação 1), teor de umidade (Equação 2) e estabilidade dimensional (Equações 3 e 4).

Para determinação das propriedades físicas, foi retirada uma amostra de cada lamela, totalizando 72 amostras. Foram utilizadas as mesmas amostras para ambos os ensaios, com dimensões nominais de 2 x 2 x 3 cm (espessura x

largura × comprimento) que representam as direções radial, tangencial e longitudinal, respectivamente.

$$\rho_{ap} = \frac{m}{v} \quad \text{Eq. (1)}$$

Em que:

m: massa da madeira, em gramas.

v: volume da madeira, em centímetros quadrados.

$$U\% = \frac{m_i - m_s}{m_s} \times 100 \quad \text{Eq. (2)}$$

Em que:

$m_i$ : massa inicial da madeira, em gramas;

$m_s$ : massa da madeira seca, em gramas.

$$\varepsilon_{r,12} = \frac{L_{12,sat} - L_{12,sec}}{L_{12,sat}} \times 100 \quad \text{Eq. (3)}$$

$$\varepsilon_{i,12} = \frac{L_{12,sat} - L_{12,sec}}{L_{12,sec}} \times 100 \quad \text{Eq. (4)}$$

Em que:

$\varepsilon_r$ : deformações específicas de retração;

$\varepsilon_i$ : deformações específicas de inchamento;

$L_{sat}$ : dimensões da madeira saturada;

$L_{sec}$ : dimensões da madeira seca;

$L_{12}$ : direções radial e tangencial.

### 3.2 Caracterização das propriedades mecânicas das lamelas

A caracterização das propriedades mecânicas das lamelas, foi realizada a partir de ensaios não-destrutivos. Nos ensaios foram utilizadas todas as lamelas, que foram medidas e pesadas para realização dos ensaios de vibração transversal livre, vibração longitudinal, flexão estática e *stress wave*.

### 3.2.1 Vibração Transversal Livre

O ensaio de vibração transversal livre foi realizado conforme a norma ASTM E1876 (ASTM, 2007) e ASTM C215 (ASTM, 2008), através do *software Sonelastic*®. O ensaio consiste em analisar vibrações transitórias, das quais se extraem as frequências para o cálculo dos módulos elásticos e as respectivas taxas de atenuação para o cálculo do amortecimento. O *software* identifica quais são as frequências de vibração e os respectivos amortecimentos mediante o processamento da resposta acústica do corpo a uma excitação mecânica por impulso (leve batida no corpo de prova). Para a realização do ensaio a lamela é posicionada sobre os fios de aço do suporte e o captador acústico CA-PD posicionado abaixo da lamela, em seguida é aberto um canal do captador pelo *software* no computador e é realizada a batida com o excitador manual na face oposta ao captador. O *software* capta as frequências e apresenta o valor do MOE (Figura 2).



Figura 2 - Vibração transversal nas lamelas.

Fonte: O autor.

### 3.2.2 Vibração Longitudinal

O ensaio de vibração longitudinal foi realizado conforme a norma ASTM E1876 (ASTM, 2007), através do *software Sonelastic*®. Este ensaio consiste no mesmo modo de aquisição do ensaio de vibração transversal livre. Para a realização do ensaio a lamela é posicionada sobre os fios de aço do suporte e o captador acústico CA-PD posicionado em uma extremidade da lamela, em seguida é aberto um canal do captador pelo *software* no computador e é realizada a batida com o excitador manual na extremidade oposta ao captador. O *software* capta as frequências e apresenta o valor de MOE (Figura 3).



Figura 3 - Vibração longitudinal das lamelas.

Fonte: O autor.

### 3.2.3 Ensaio flexão estática

O ensaio de flexão estática foi realizado nas lamelas para obter o módulo de elasticidade, de modo que atendesse as prescrições da norma ASTM D143. Para a realização do experimento foi necessário um anel dinamométrico com auxílio de uma prensa hidráulica e um relógio comparador para medir o deslocamento (flecha). Foi aplicada uma carga nas lamelas até atingir uma flecha de 2,8 mm (Figura 4). O módulo de elasticidade foi determinado através da Equação 5.

$$\delta = \frac{P \times L^3}{48 \times I \times E} \quad E = \frac{P \times L^3}{48 \times I \times \delta} \quad \text{Eq. (5)}$$

Em que:

P = Força aplicada em GPa.

L = Distancia do vão em m.

I = Inercia da seção em  $m^4$ .

$\delta$  = Flecha em m.



Figura 4 - Flexão estática nas lamelas.

Fonte: O autor.

### 3.2.4 Ensaio de *Stress Wave*

Nos ensaios *stress wave* foi utilizado o equipamento FAKOPP *Microsecond Timer* da empresa FAKOPP Ent. Foram colocadas duas agulhas (sensores) nas extremidades de cada lamela projetado para medir o tempo de propagação de ondas de tensão, que é impulsionada pelo martelo no sensor de partida e a unidade exibe o tempo de propagação medido (Figura 5). Todo o conjunto do equipamento conta com uma caixa de temporizador de microsegundo e um martelo de impacto.

Com os sensores acoplados, com o auxílio do martelo foram dadas batidas para medir três tempos de onda no sentido longitudinal para cada lamela.

Com o auxílio da Equação 6, conseguimos obter o módulo de elasticidade dinâmico.

$$E_{s,w} = v^2 \times \frac{\rho}{g} \times 10^{-5} \quad \text{Eq. (6)}$$

Em que:

$E_{s,w}$  = Módulo de elasticidade dinâmico pelo *Stress Wave Timer* (MPa);

$v$  = Velocidade da onda na madeira ( $\text{m.s}^{-1}$ );

$\rho$  = Densidade do corpo de prova ( $\text{kg.m}^{-3}$ );

$g$  = Aceleração da gravidade ( $\text{m.s}^{-2}$ ).



Figura 5 - *Stress wave* nas lamelas.

Fonte: O autor.

### 3.3 Adesivo e montagem dos elementos de MLC

Na colagem das lamelas utilizou-se adesivo comercial de poliuretano bi-componente (PUR), à base de óleo de mamona. Para aplicação do poliuretano

foi utilizada a proporção de 1:1,2, sendo 1 parte do componente A (pré-polímero) e 1,2 partes do componente B (poliol).

Para realização da colagem, as dimensões das lamelas eram 2,5 × 5,5 × 60 cm (espessura × largura × comprimento), essas foram organizadas de acordo com seus valores de módulo de elasticidade à flexão. Foi adotado o método de balanceamento de rigidez para que os elementos de MLC atendessem a configuração de flexão de uma viga, com lamelas de maiores valores de MOE nas extremidades e menores valores no centro.

Para a confecção de cada elemento de MLC foram unidas 4 lamelas com fibras paralelas entre si (Figura 6). No total foram confeccionados 18 elementos de MLC, sendo 6 elementos de MLC na orientação tangencial, 6 na orientação radial e 6 na orientação mista.

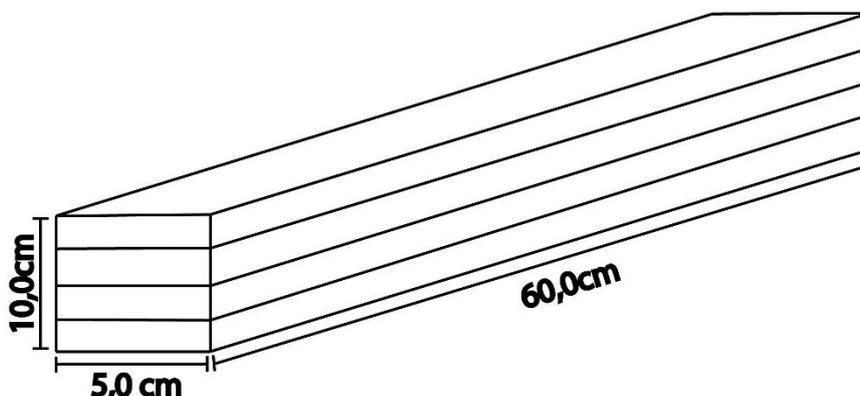


Figura 6 - Montagem dos elementos de MLC de eucalipto.

Fonte: O autor.

As lamelas foram coladas com gramatura de 300 g.m<sup>-2</sup> por linha de cola simples. O adesivo foi aplicado utilizando uma espátula (Figura 7A). Os elementos de MLC foram prensados em prensa hidráulica com capacidade de 15 toneladas, durante 24 horas a uma pressão de 1 MPa. Foram utilizadas três prensas, com disposição de 6 elementos de MLC em cada uma (Figura 7B). Após a prensagem os elementos de MLC foram mantidos no laboratório para atingir a cura completa do adesivo. Após a cura completa os elementos de MLC foram aplainados na marcenaria do departamento de Ciências Florestais e da Madeira, nas dimensões finais de 10 × 5 × 60 cm (altura × largura × comprimento) (Figura 7C).

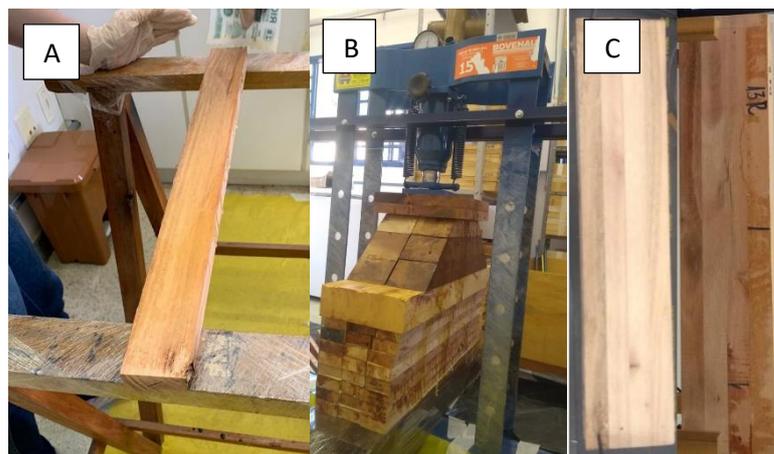


Figura 7 - Adesivo e montagem dos elementos de MLC.

Fonte: O autor.

### 3.4 Caracterização das propriedades mecânicas dos elementos de MLC

As determinações das propriedades mecânicas dos elementos de MLC foram realizadas por meio de ensaios não-destrutivos e destrutivos. Nos ensaios não-destrutivos utilizaram-se todos os 18 elementos de MLC, os quais foram medidos e pesados para realização dos ensaios de vibração longitudinal e *Stress Wave*. Dos elementos de MLC foram retirados corpos de prova para determinação das propriedades mecânicas nos ensaios destrutivos.

#### 3.4.1 Vibração Longitudinal

Os ensaios de vibrações longitudinais, nos 18 elementos MLC, foram realizados conforme a norma ASTM E1876, através do *Software Sonelastic®* (Figura 8), seguindo a metodologia aplicada na caracterização das propriedades mecânicas das lamelas individuais de acordo com item 3.2.2, sendo capturadas as frequências e determinação do MOE, para todos elementos de MLC.



Figura 8 - Vibração longitudinal dos elementos de MLC.

Fonte: O autor.

### 3.4.2 Ensaio *Stress Wave*

Nos ensaios *stress wave* foi utilizado o equipamento FAKOPP Microsecond Timer da empresa FAKOPP Ent., seguindo os mesmos procedimentos utilizados para caracterização das propriedades mecânicas das lamelas e com as mesmas equações, descritas no item 3.2.4, obtendo-se o módulo de elasticidade dinâmico para os 18 elementos de MLC (Figura 9).



Figura 9 - *Stress wave* nos elementos de MLC.

Fonte: O autor.

### 3.4.3 Ensaios destrutivos para determinação das propriedades mecânicas dos elementos de MLC

Após caracterizar as propriedades mecânicas dos elementos de MLC, com utilização de ensaios não destrutivos, foram então retirados os corpos de prova para ensaio de compressão paralela às fibras, compressão normal às fibras, cisalhamento *push-out*, cisalhamento na linha de cola, linha de cola, intemperismo artificial e delaminação. Os corpos de prova foram retirados ao longo do elemento de MLC conforme mostra a Figura 10.

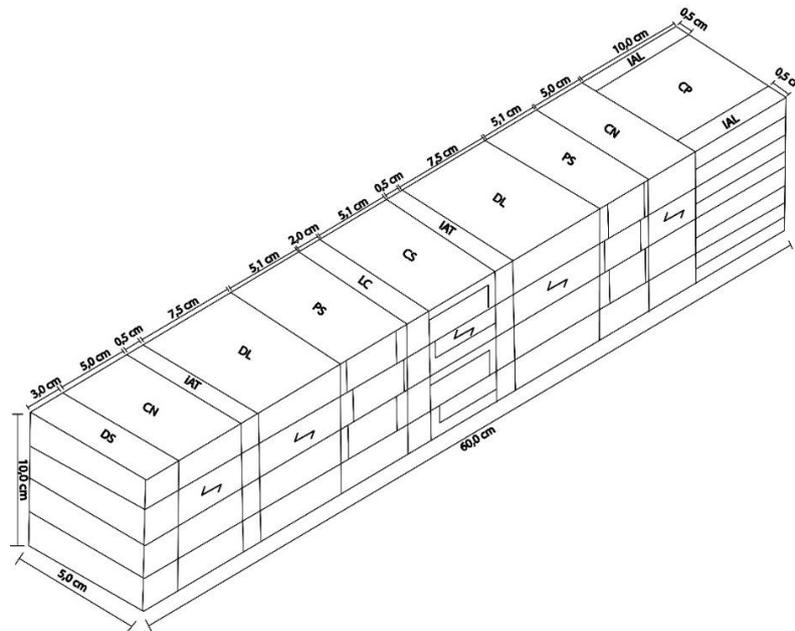


Figura 10 - Esquema de retirada dos corpos de prova dos elementos de MLC. DS: Densidade e estabilidade dimensional, CP: compressão paralela às fibras, PS: cisalhamento *push-out*, CS: cisalhamento na linha de cola, LC: linha de cola IAT: intemperismo acelerado transversal, IAL: intemperismo acelerado longitudinal, CN: compressão normal às fibras e DL: delaminação.

Fonte: O autor.

#### 3.4.4 Ensaio de compressão paralela às fibras

Para o ensaio de compressão paralela às fibras, foram aplicados os métodos de ensaio da norma ASTM D143 (ASTM, 2000). A partir deste ensaio, o módulo de elasticidade paralelo à direção das fibras e a resistência à compressão paralela às fibras foram determinados. As dimensões dos corpos de prova de compressão paralela às fibras, obtido a partir dos elementos de MLC, são de 2,5 × 2,5 × 10 cm (largura, espessura e altura, respectivamente), conforme a Figura 11 abaixo.

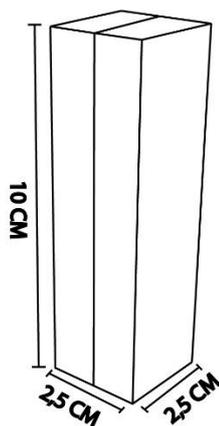


Figura 11 - Corpo de prova de MLC para compressão paralela às fibras.

Fonte: O autor.

### 3.4.5 Ensaio de compressão normal às fibras

Para o ensaio de compressão normal às fibras dos corpos de prova, foi utilizada a norma NBR 7190 (ABNT, 1997). A partir deste ensaio, o módulo de elasticidade na direção normal às fibras e a resistência à compressão normal às fibras foram determinados. As dimensões dos corpos de prova de compressão normal às fibras, obtido a partir dos elementos de MLC, são de 5 × 5 × 10 cm (largura, espessura e altura), respectivamente, conforme a Figura 12.

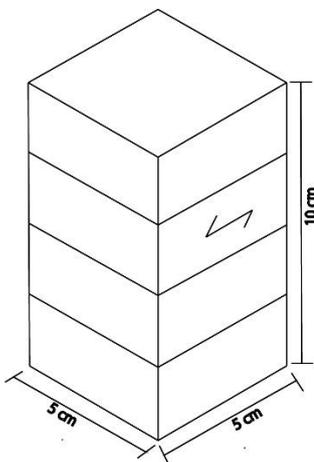


Figura 12 - Corpo de prova de MLC para compressão normal às fibras.

Fonte: O autor.

### 3.4.6 Ensaio de cisalhamento na linha de cola

Para o ensaio de cisalhamento na linha de cola, foram confeccionados corpos de prova dos elementos de MLC, Figura 13. Neste ensaio também foi avaliada a falha na madeira. O procedimento de ensaio está de acordo com a

norma ASTM D 905 – *Standard Test for Strength Properties of Adhesive Bonds in Shear by Compression Loading* (ASTM, 2009).

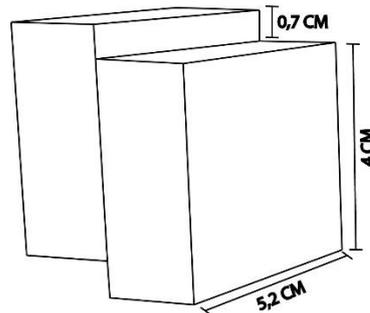


Figura 13 - Corpo de prova de cisalhamento na linha de cola.

Fonte: O autor.

Para o ensaio de cisalhamento na linha de cola, as percentagens de falhas na madeira, relativa à área cisalhada na linha de cola, foi quantificada com o auxílio de uma lâmina quadriculada transparente, com precisão de 1% (38,1 × 50,8 mm), Figura 14. De acordo com a norma ASTM D 905 (ASTM, 2009) foram realizadas avaliações da percentagem de falhas na madeira.

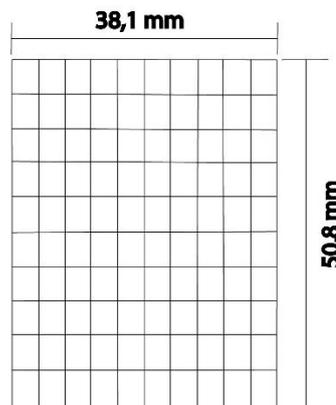


Figura 14 - Malha para medir a falha na madeira no ensaio de cisalhamento.

Fonte: O autor.

### 3.4.7 Ensaio de cisalhamento *push-out* na linha de cola

Para o ensaio de cisalhamento na linha de cola foi realizado com corpo de prova do tipo 'H' *push-out*, (Figura 15). Este teste foi realizado para avaliar a resistência ao cisalhamento e conseqüentemente à qualidade de duas linhas de cola. O procedimento de carregamento das amostras, com uma taxa de cinco milímetros por minuto. Foi realizado de acordo com ASTM D 905 (ASTM, 2009).

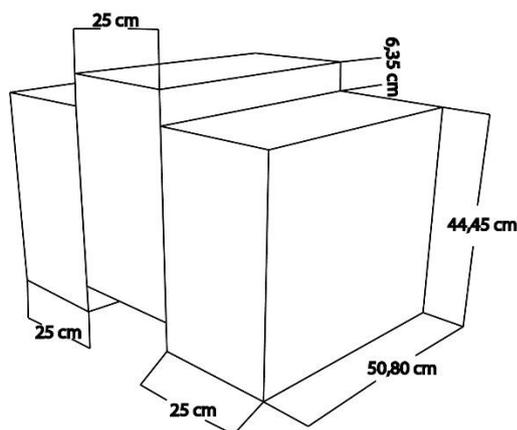


Figura 15 - Corpo de prova tipo 'H' *push-out* para ensaio de cisalhamento à compressão para duas linhas de cola.

Fonte: O autor.

Para o ensaio de cisalhamento *push-out* na linha de cola foi quantificada a percentagem de falhas na madeira, relativa à área cisalhada na linha de cola, com o auxílio de uma lâmina quadriculada transparente, com precisão de 1% (38,1 × 50,8 mm) ilustrada na Figura 14. As avaliações das percentagens de falhas na madeira foram realizadas conforme a norma ASTM D 905 (ASTM, 2009).

### 3.4.8 Ensaio de delaminação

Para o ensaio de delaminação foi empregada a norma, AITC T110, da *American Institute of Timber Construction - AITC* (2007). Os corpos de prova foram colocados em uma autoclave, onde as linhas de cola ficaram expostas a tensões devido ao efeito de vácuo e pressão, em três séries de dois ciclos de umedecimento e secagem.

Para cada série de tratamento os seguintes procedimentos foram realizados: os corpos de prova foram inseridos na autoclave (Figura 16) e submetidos a aplicação de vácuo de 0,8 Kgf/cm<sup>2</sup>, durante 30 minutos. Após este procedimento, sob vácuo, a autoclave foi preenchida com água e foi aplicada uma pressão de 5,62 Kgf/cm<sup>2</sup> durante 2 horas. Após esse tempo, a água foi drenada do interior da autoclave e foi aplicado um novo ciclo de vácuo. Foi realizado preenchimento com água e pressão totalizando 5 horas de tratamento. Os corpos de prova foram retirados da autoclave e colocados para secar ao ar livre, finalizando a primeira série de tratamento. A série de tratamento dos corpos de prova em autoclave foi realizado por três vezes. Ao final do ensaio, foi

avaliado o comportamento da madeira colada, por meio do comprimento da fenda obtida no processo delaminação dividido pelo comprimento da linha de cola. Foi determinada a porcentagem nas duas faces do corpo de prova.

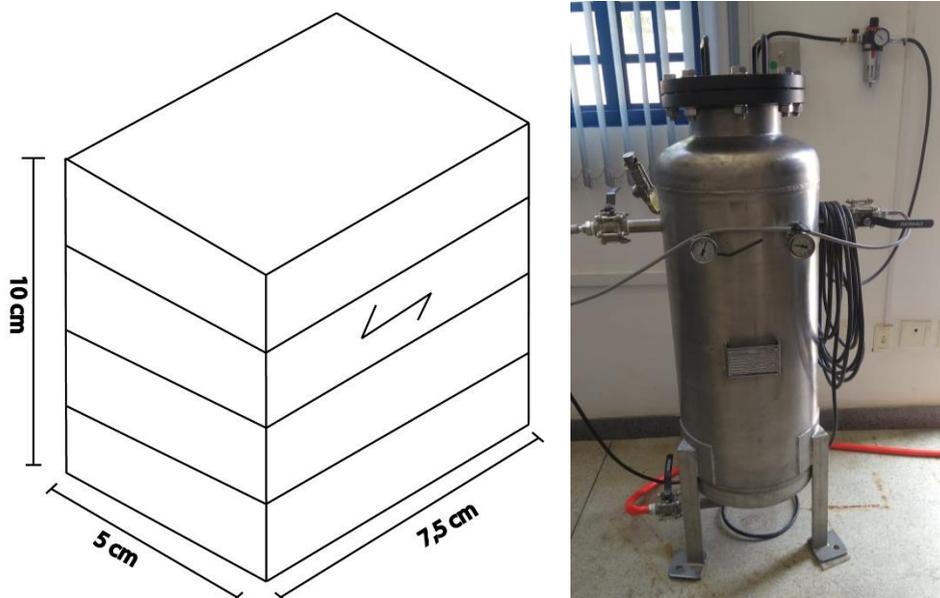


Figura 16 - a) Corpo de prova para ensaio de delaminação. b) Autoclave.

Fonte: O autor.

### 3.5 Ensaio de microdensitometria de raios-x

Foram retiradas amostras dos elementos de MLC com  $5 \times 5 \times 10$  cm (largura, espessura e altura, respectivamente), ilustrada na Figura 17, totalizando doze corpos de prova para cada tratamento. As amostras foram acondicionadas na sala de climatização para que tivessem uma umidade próxima de 12%.

Para realização desse ensaio foi utilizado uma tecnologia de raio X, instrumento de medição de laboratório Fagus GreCon DAX 6000 que mede o perfil de densidade aparente da madeira (Figura 17). Inicialmente, o equipamento faz uma varredura contínua ao longo da espessura dos corpos de prova, pelos feixes de raio X. A intensidade de raio X que atravessa pontualmente as amostras dos corpos de prova, incide sobre o detector e é transformada em densidade aparente imediatamente por meio do *software*.



Figura 17 - Corpo de prova de raio x de microdensitometria e equipamento Fagus GreCon DAX 6000.

Fonte: O autor.

### 3.6 Espessura de linha de cola

Foram retiradas amostras de cada linha de cola dos elementos de MLC com  $2,5 \times 2,0 \times 1,5$  cm (comprimento, largura, espessura, respectivamente), totalizando 3 linhas de cola por elemento de MLC, sendo 18 linhas de cola por tratamento.

Foram realizados cortes finos sobre a superfície transversal da amostra com uma faca a fim de se obter uma área lisa visível da linha de cola para a captura de imagem. Foram tiradas quatro imagens por linha de cola com a câmera acoplada no Estereoscópio SZ (STMPRO) (Figura 18).

A espessura da linha de cola foi mensurada por meio das imagens analisadas no *software* BEL Capture, em que foram obtidas dez medidas para cada linha de cola. Tendo quatro imagens por linha de cola foram totalizadas quarenta medidas por linha de cola e cento e vinte medidas por elemento de MLC.



Figura 18 - Equipamento utilizado para medir linha de cola.

Fonte: O autor.

### 3.7 Ensaio de intemperismo acelerado e colorimetria

O intemperismo acelerado foi executado em câmara climática modelo Bass/UUV (Figura 19A), que simula os efeitos causados pelo intemperismo natural madeira, e que possui, oito lâmpadas ultravioletas. Para efeito de condensação há pontos de saída de vapor (Figura 19B) na câmara climática. Para esse ensaio foi empregada a norma *American Society for Testing and Materials* - ASTM G154 (2006). Para possibilitar o ensaio, as amostras foram fixadas em placas de MDF (*Medium Density Fiberboard*) nas dimensões das janelas de exposição com um prego (Figura 19C).

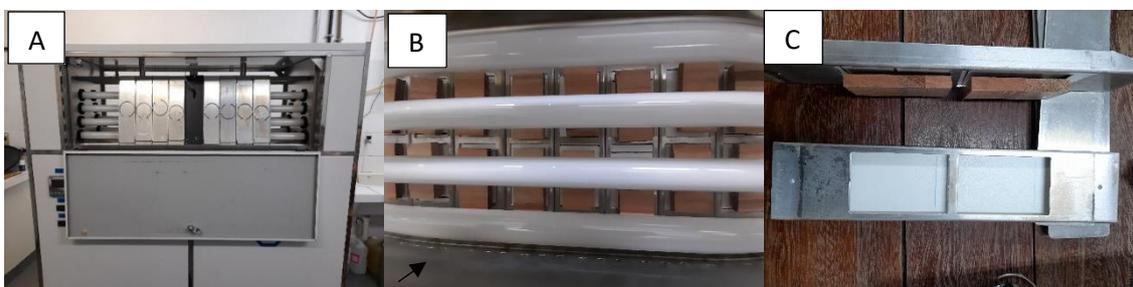


Figura 19 - Câmara de intemperismo acelerado utilizada (A), amostras dispostas dentro da câmara (B) e amostras fixadas (C).

Fonte: O autor.

Os corpos de prova foram expostos de acordo com o ciclo 4 da norma citada. O ciclo total de exposição foi de 600 horas, conforme os parâmetros citados na Tabela 1, totalizando 50 ciclos completos de 12 horas cada.

Tabela 1 - Parâmetros técnicos dos ciclos de intemperismo utilizados no ensaio de intemperismo acelerado.

Parâmetro	Características
Radiação	1,55 W/(m <sup>2</sup> . nm)
Exposição Luminosa	8h na fixa do ultravioleta a 70 ± 3 °C / 340 nm comprimento de onda
Condensação	4h de condensação a 50 ± 3°C

Fonte: Adaptado ASTM G154 (2016)

Ao final do processo de intemperismo acelerado as amostras passaram por uma análise de densidade, colorimetria e delaminação, com a finalidade de comparar os resultados antes e depois do intemperismo acelerado.

Para se determinar a cor seguiram-se preceitos do sistema CIEL\*a\*b (*Comison International d L'Éclairge* – CIE,1976). Para isso foi utilizado o espectrofotômetro portátil modelo CM 2600 D, ilustrado na Figura 20. As coordenadas colorimétricas avaliadas pelo aparelho são: L\*, a\* e b\*. A saturação (C), e o ângulo de tinta foram calculados pelas seguintes equações 8 e 9.

$$C = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \quad \text{Eq. (8)}$$

$$h^* = \tan^{-1} \frac{b^*}{a^*} \quad \text{Eq. (9)}$$

A luminosidade é (L\*) indica os eixos de preto a branco, variado de 0 a 100. Já o parâmetro a\* varia de 0 a 60 no eixo verde a vermelho, enquanto b\* varia de azul a amarelo, variando de 0 a 60 (BARROS; MUNIZ; MATOS, 2014). O aparelho utilizado foi configurado, mantendo o diâmetro de desobstrução da área de iluminação igual a 3 mm (SAV – *SmallAreaView*), o iluminante padrão sendo D65 e 10° para o ângulo de observação. Posteriormente o aparelho foi calibrado no padrão preto e branco de acordo com o manual do equipamento.

Foram determinadas oito leituras por corpo de prova. As medições foram realizadas antes e depois do intemperismo nas amostras. A variação total da cor da madeira antes e depois do ensaio de intemperismo acelerado foi determinado pelo emprego da Equação 10, conforme Konica Minolta (2007).

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad \text{Eq. 10}$$

Em que:

$\Delta E^*$ : variação total da cor da madeira após o tratamento;

$\Delta L^*$ ,  $\Delta a^*$  e  $\Delta b^*$ : variação das coordenadas L\*, a\* e b\* após o tratamento, respectivamente.



Figura 20 - Espectrofotômetro portátil.

Fonte: Google Imagens.

Após os cálculos, as variações totais de cor das amostras foram classificadas ao utilizar a tabela proposta por Hikita, Toyoda e Azuma (2001), com base em níveis de percepção visual (Tabela 2).

Tabela 2 - Classificação da variação total da cor ( $\Delta E^*$ ) da madeira após os tratamentos.

Varição Total da Cor ( $\Delta E^*$ )	Classificação
Desprezível	0,0 – 0,5
Quase imperceptível	0,5 – 1,5
Ligeiramente perceptível	1,5 – 3,0
Notável	3,0 – 6,0
Muito expressiva	6,0 – 12,0

Fonte: Adaptado de Hikita, Toyoda e Azuma (2001)

### 3.8 Ensaio de preferência alimentar

Os corpos de prova ficaram organizados em uma caixa com capacidade de 500 litros, com uma camada de  $\pm 10$  cm de areia úmida. A caixa foi apoiada sobre quatro blocos cerâmicos colocados em bandejas de plástico com água para evitar a fuga dos cupins, conforme metodologia descrita por Paes et al. (2007).

O ensaio de preferência de alimentar foi realizado com a térmita *Nasutitermes corniger*. Para a montagem do ensaio, os corpos de prova com dimensões de 5 x 10 x 0,6 cm (largura x altura x espessura) respectivamente, foram secos em estufa ( $60 \pm 2$  °C) até atingirem peso constante; depois, foram

distribuídos segundo um delineamento em blocos casualizados (Figura 21). As amostras foram fixadas, tendo a metade do seu comprimento soterrado na areia.



Figura 21 - Montagem distribuição das amostras (A); disposição da colônia de térmita para o ensaio de preferência alimentar (B).

Fonte: O autor.

O ensaio se manteve em sala climatizada ( $26 \pm 2$  °C e  $65\% \pm 5$  UR) durante 45 dias. Após o término do ensaio as amostras foram limpas com uma escova de cerdas macias para retirar o excesso de areia e secas em estufa a  $60 \pm 2$  °C até atingirem massas constantes. Foram determinados a perda de massa e o desgaste (nota) sofridos em função da atividade biológica, segundo as normas da *American Society for Testing and Materials* - ASTM (2005) (Tabela 3).

Tabela 3 - Avaliação do desgaste provocado pelos cupins nos corpos de prova.

Tipos de desgaste	Nota
Sadio, permitindo escarificações superficiais	10
Ataque superficial	9
Ataque moderado, havendo penetração	7
Ataque intensivo	4
Falha, havendo ruptura dos corpos-de-prova	0

Fonte: (ASTM, 2005).

### 3.9 Análise estatística

Para os ensaios físicos e mecânicos a análise estatística foi conduzida sob o delineamento inteiramente casualizado. Os resultados obtidos foram analisados por meio de análise de variância e teste de comparação de médias, aplicando-se o teste de Tukey a 5% de significância.

Para o ensaio de preferência alimentar para possibilitar a análise estatística, em caso de não haver homogeneidade, é necessário transformar os dados de perda de massa em:  $\arcsen \sqrt{\frac{x}{100}}$ ; e os do desgaste em:  $\sqrt{\frac{nota}{0,5}}$  segundo Steel e Torrie (1980). Na análise e avaliação dos ensaios, foi empregado o teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ), para os fatores e interações detectados como significativos pelo teste de F ( $p \leq 0,05$ ).

## 4 RESULTADOS DA PESQUISA

### 4.1 Propriedades físicas da madeira

Os valores médios das propriedades físicas da madeira de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* obtidos nos ensaios de densidade aparente, teor de umidade e estabilidade dimensional estão descritos na Tabela 3.

Tabela 3 - Valores médios das propriedades físicas para madeira de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*.

Tratamento	Densidade Aparente (g/cm <sup>3</sup> )	Estabilidade Dimensional					
		Retração		Inchamento		Fator anisotrópico (T/R)	Variação Volumétrica (%)
		Tangencial (%)	Radial (%)	Tangencial (%)	Radial (%)		
Tangencial	0,62a	8,52a	5,82a	9,33a	6,19a	1,49a	14,07a
Mista	0,66a	8,08a	6,47a	8,77a	6,98a	1,28a	13,81a
Radial	0,65a	8,57a	6,07a	9,42a	6,51a	1,69a	14,17a

\*T = Tangencial; R = Radial. Médias seguidas pela mesma letra na vertical não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ( $p \geq 0,05$ ).

Fonte: O autor.

A densidade aparente da madeira teve em média dos três tratamentos  $0,65 \text{ g/cm}^3$ , variou de baixa a média. O lote de lamelas de madeira de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* apresentou uma densidade aparente média próxima ao sugerido pela NBR 7190 (1997) para fabricação de MLC, que é entre  $0,65$  e  $1,00 \text{ g/cm}^3$ . Já para Miotto e Dias (2009), a produção de MLC a madeira deve ter densidade entre  $0,400 \text{ g/cm}^3$  e  $0,750 \text{ g/cm}^3$ , tendo que essa madeira é ideal para confecção dos elementos de MLC.

O conhecimento da densidade e teor de umidade para fabricação dos elementos de MLC é de extrema importância, pois elas influenciam no tempo de prensagem, na pressão aplicada e na penetração e cura do adesivo, durante o processo de produção (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 2010; NBR 7190 CB-02, 2013; SEGUNDINHO et al., 2015).

Conforme a Tabela 3 é possível verificar que as diferenças dimensionais foram aproximadamente 25% no sentido tangencial, tanto para retração quanto para o inchamento. Segundo estudo feito por Freitas et al. (2016) foi analisado a estabilidade dimensional de clones de eucalipto, obtiveram uma retração tangencial de 9,13%, uma retração radial 5,67% e um fator anisotrópico igual a 1,78 para *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*. Tendo uma similaridade com os valores obtidos neste estudo.

Por ser um material higroscópico, a madeira pode absorver ou perder água para o meio que se encontra, o que pode ser causado por contração e inchamento. Essas mudanças ocorrem de forma desigual nos diferentes planos anatômicos da madeira. Geralmente, a mudança de volume ocorre em maior proporção na direção tangencial dos anéis de crescimento, seguida da direção radial, que é quase desprezível na direção paralela à grã (SILVA; OLIVEIRA, 2003). A diferença entre contração e inchamento da madeira nas três direções anatômicas se deve à estrutura micros e submicroscópicas da parede celular (GOMES et al., 2006).

A taxa de encolhimento de volume mostra a mudança total que ocorre na mudança de absorção de umidade, mas a mudança linear ao longo do plano de orientação da madeira é geralmente mais importante porque eles são diferentes e tornam a madeira um material anisotrópico. Especialmente quando se trata de mudanças dimensionais laterais (radiais e tangenciais), há um desequilíbrio entre os valores da contração. Da mesma forma, o desequilíbrio entre a retração é denominado fator anisotrópico ou coeficiente de anisotropia, que é relação

entre a retração tangencial e a retração radial (OLIVEIRA et al., 2010).

Na tabela 3 pode-se observar o valor médio do fator anisotrópico das lamelas (1,49). O comportamento da madeira durante a secagem depende desse coeficiente, de modo que ele indica maior ou menor capacidade das peças a fendilharem ou empenarem. De acordo com Oliveira et al. (2010) os valores variam de 1,3 a 1,4 para madeiras muito estáveis, e valores acima de 3 para madeiras muito instáveis dimensionalmente, como madeiras de muitas espécies do gênero *Eucalyptus*. Quanto menor for a diferença de unidade do coeficiente de anisotropia, mais estável dimensionalmente será uma madeira, conseqüentemente vão ocorrer menos empenamentos e rachaduras a mesma estará sujeita a desenvolver (FREITAS et al., 2016).

## 4.2 Propriedades mecânicas da madeira e da madeira lamelada colada

### 4.2.1 Ensaio não destrutivos

Na tabela 4 são mostrados os resultados dos ensaios não destrutivos, para as lamelas, os resultados apresentados, correspondem à Vibração longitudinal, Vibração transversal, *Stress Wave* e Flexão Estática e para os elementos lamelados colados, os resultados dos ensaios de Vibração longitudinal e *Stress Wave*.

Tabela 4 - Média dos valores dos módulos de elasticidade obtidos nas lamelas e elementos de MLC.

Tratamento	MOE – Lamelas				MOE – Elementos de MLC	
	VL (GPa)	VT (GPa)	SW (GPa)	FE (GPa)	VL (GPa)	SW (GPa)
<b>Radial</b>	17,46Aa	16,53Ab	16,78Ab	15,92Ac	17,34Ba	16,64Aa
<b>Tangencial</b>	18,32Aa	17,63Ab	17,28Ab	16,66 Ac	18,51Aa	17,02Ab
<b>Mista</b>	17,69Aa	16,56Ab	16,54Ab	15,84 Ac	17,61Ba	16,57Ab

\* VL: Vibração Longitudinal; VT: Vibração Transversal; SW: *Stress Wave*; FE: Flexão Estática. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na vertical e minúscula na horizontal não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ( $p \geq 0,05$ ).

Fonte: O autor.

Considerando o ensaio de vibração longitudinal, onde foi obtido o maior módulo de elasticidade, de modo que os corpos de prova sofrem impacto na direção longitudinal, posto que a direção do movimento da onda ocorre na mesma direção do modo longitudinal. Explicando-se o maior módulo de elasticidade (SEGUNDINHO et al., 2012).

Entre os métodos dinâmicos, o ensaio de vibração longitudinal de barras de seção transversal quadrada ou redonda é o método mais claro para determinar o módulo de elasticidade ou módulo de Young (CANDIAN, 2007).

O ensaio de vibração transversal livre é considerado uma técnica confiável para apresentar o módulo de elasticidade, acima de tudo pela grande aderência do modelo físico do fenômeno e seu correspondente modelo teórico matemático. Esse módulo pode ser correlacionado ao módulo de flexão estática (BALLARIN; TARGA; PALMA, 2002).

O ensaio utilizado *Stress Wave* consiste em uma relação direta com a velocidade de propagação da onda e a densidade da madeira, pois quanto maior o tempo da velocidade da onda que é percorrido ao longo da madeira maior o módulo de elasticidade. Ao mesmo tempo, a velocidade de propagação da onda também é influenciada pela quantidade de material lenhoso. Assim, de modo geral, quanto maior a densidade, maior o módulo de elasticidade (CUNHA; MATOS, 2010).

### 4.3 Ensaio destrutivos

Os resultados para os ensaios de cisalhamento na linha de cola, cisalhamento *push-out* na linha de cola, compressão paralela às fibras e compressão normal às fibras, para os elementos laminados colados estão apresentados na tabela 5.

Tabela 5 - Média dos valores de resistência mecânica, falha na madeira e umidade obtidos por ensaios de cisalhamento na linha de cola, cisalhamento *push-out* na linha de cola, compressão paralela às fibras e compressão normal às fibras.

Ensaio	Tratamentos		
	Tangencial	Mista	Radial
$f_{v0}$ (MPa)	11,83a	9,68b	7,98b

<b>Cisalhamento na linha de cola</b>	Falha na madeira (%)	82,00a	92,75a	97,66a
	Umidade (%)	10,43	10,05	10,83
<b>Push-out na linha de cola</b>	$f_{v0}$ (MPa)	9,84a	9,07a	7,23b
	Falha na madeira (%)	94,00a	77,08ab	100,00b
	Umidade (%)	10,25	10,33	10,83
<b>Compressão Paralela</b>	$f_{c0}$ (MPa)	58,19a	54,27a	52,85a
	Umidade (%)	10,56	10,33	10,82
<b>Compressão Normal</b>	$F_{c90}$ (MPa)	8,93a	8,98a	7,78a
	Umidade (%)	10,44	10,14	10,50

\* Médias seguidas por mesma letra na horizontal não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

Fonte: O autor.

O teor médio de umidade encontrado foi de 10,53%, também dentro da faixa ideal, segundo Miotto e Dias (2009). O teor de umidade variou de 7% a 14% dependendo do adesivo utilizado.

#### 4.3.1 Compressão paralela às fibras

Os resultados obtidos para compressão paralela às fibras nos corpos de prova dos elementos de MLC podem ser observados na (Figura 22).

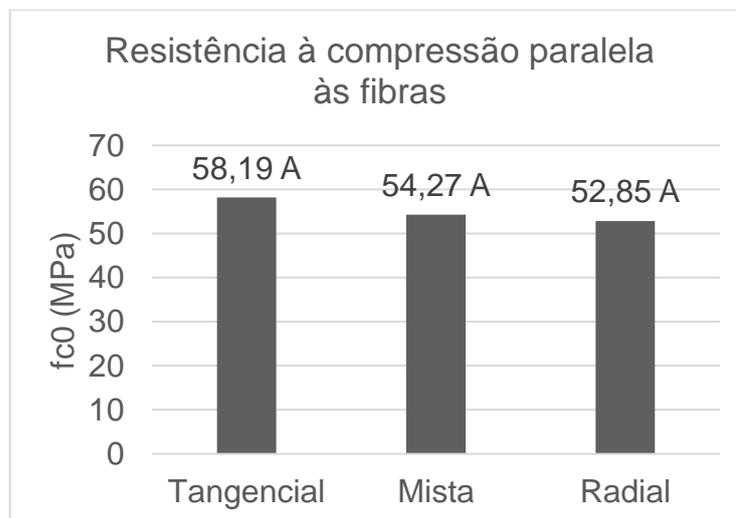


Figura 22 - Valores médios de resistência à compressão paralela às fibras. Médias seguidas por mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

Fonte: O autor.

A orientação tangencial apresentou a maior média de resistência à compressão paralela às fibras (58,19 MPa), sendo 6,75% maior que a média apresentada pelos corpos de prova mista na mesma condição (54,27 MPa) e 9,17% maior que a média apresentada pelos corpos de prova radial na mesma condição (52,85 MPa); porém, as médias não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

Os resultados da resistência à compressão paralela às fibras alcançados neste estudo foram superiores ao encontrados por Segundinho et al. (2018), no qual os corpos de prova de MLC colados com poliuretano na condição seca tiveram uma resistência de 50,90 MPa.

O *Eucalyptus citriodora* obteve o valor médio de 57,8 MPa para resistência a compressão paralela às fibras em uma pesquisa realizada sobre pontes protendidas (FONTE, 2004), tendo uma similaridade com os valores obtidos neste estudo.

A maior resistência com valor absoluto à compressão paralela às fibras foi verificada nas madeiras coladas no sentido tangencial, pois a orientação tangencial da face transversal possui os raios dispostos no sentido favorável à penetração do adesivo. Segundo Botosso (2011) a face tangencial da madeira está perpendicular à direção dos raios, sendo esta, paralela ao eixo do caule (tronco), fazendo com que o adesivo entre pelos raios e resulte num melhor desempenho da colagem. Com a penetração do adesivo, houve uma maior falha

na madeira do que no adesivo, sinal que a linha de cola resistiu aos esforços mecânicos. Assim a resistência à compressão paralela é maior no sentido tangencial.

#### 4.3.2 Compressão normal às fibras

Os resultados obtidos para compressão normal às fibras nos corpos de prova dos elementos de MLC podem ser observados na (Figura 23).

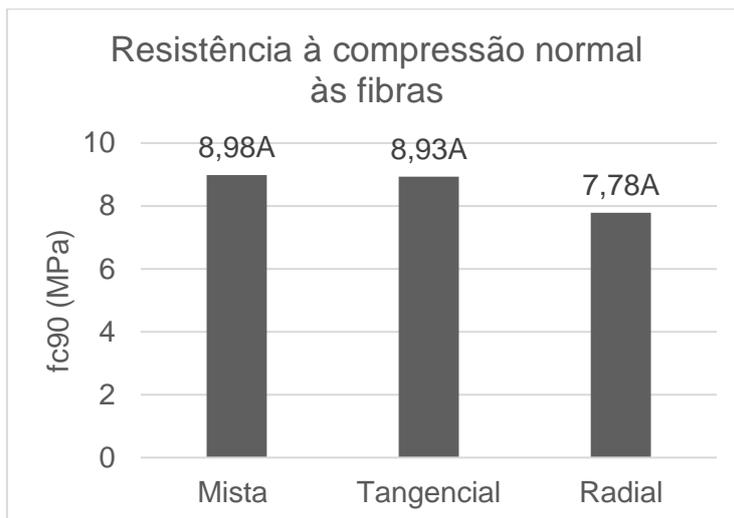


Figura 23 - Valores médios de resistência à compressão paralela às fibras. Médias seguidas por mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

Fonte: O autor.

A orientação mista foi a que apresentou maior média de resistência à compressão normal às fibras (8,98 MPa), sendo 0,56% maior que a média apresentada pelos corpos de prova tangencial na mesma condição (8,93 MPa) e 13,36% maior que a média apresentada pelos corpos de prova na direção radial na mesma condição (7,78 MPa); entretanto, as médias não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

Os valores obtidos são inferiores aos encontrados por Segundinho et al., (2018) em seu estudo sobre as propriedades da madeira laminada colada o valor médio da madeira de *Eucalyptus* sp. e poliuretano sob condições secas é de 10,61 MPa.

Os valores obtidos nesse estudo foram similares aos encontrados por Segundinho et al. (2021) em sua pesquisa de avaliação da madeira de híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* para utilização em madeira

lamelada colada, onde a média da resistência à compressão normal às fibras foi de 8,26 MPa para as madeiras coladas com poliuretano na condição seca.

Ao analisar a Figura 23, é possível perceber que os corpos de prova na orientação mista e tangencial obtiveram uma maior resistência à compressão normal às fibras. Isso se deve devido a direção dos raios favorecendo positivamente a penetração do adesivo, conforme citado anteriormente no item 4.3.1.

### 4.3.3 Cisalhamento na linha de cola

Na Figura 24 estão descritos os resultados para o ensaio de resistência ao cisalhamento na linha de cola dos corpos de prova de MLC de eucalipto.



Figura 24 - Valores médios de resistências ao cisalhamento na linha de cola. Médias seguidas por mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

Fonte: O autor.

Da mesma forma que nos demais ensaios, a maior média de resistência ao cisalhamento na linha de cola correspondeu aos corpos de prova no tratamento tangencial com (11,83 MPa) que foi 18,17% superior aos tratamentos na orientação mista (9,68 MPa) e 32,54% da orientação radial na mesma condição (7,98 MPa). Com isso, a média na orientação tangencial difere estatisticamente da mista e da radial.

Resultados similares foram encontrados por Segundinho et al. (2018) que obtiveram resistência igual a 12,68 MPa para poliuretano seca. Bianche et al.

(2017), analisando o cisalhamento na linha de cola de *Eucalyptus sp.* usando adesivo poliuretano, obtiveram 7,72 MPa para madeira seca.

Segundinho et al. (2021) avaliando o cisalhamento na linha de cola de *Eucalyptus urophylla x Eucalyptus grandis* utilizando adesivo de mamona, encontraram 9,85 MPa para a madeira seca no grupo 2 (lamelas mais pesadas) e 7,26 MPa para a madeira seca no grupo 1 (lamelas mais leves), valores similares ao encontrado nesse estudo.

Na Tabela 4 são apresentados os valores médios percentuais para falha na madeira para os elementos de MLC de *Eucalyptus urophylla x Eucalyptus grandis*. Pode-se observar um alto percentual de falha na madeira de 90,8%, significando boa qualidade na adesão, pois os valores de falha demonstram que a coesão do adesivo e a resistência da interface adesivo-madeira são mais altas que a resistência da própria madeira (ASTM, 2000).

#### 4.3.4 Ensaio cisalhamento *push-out*

Na Figura 25 estão descritos os resultados para o ensaio de resistência ao cisalhamento *push-out* na linha de cola dos corpos de prova de MLC de eucalipto.

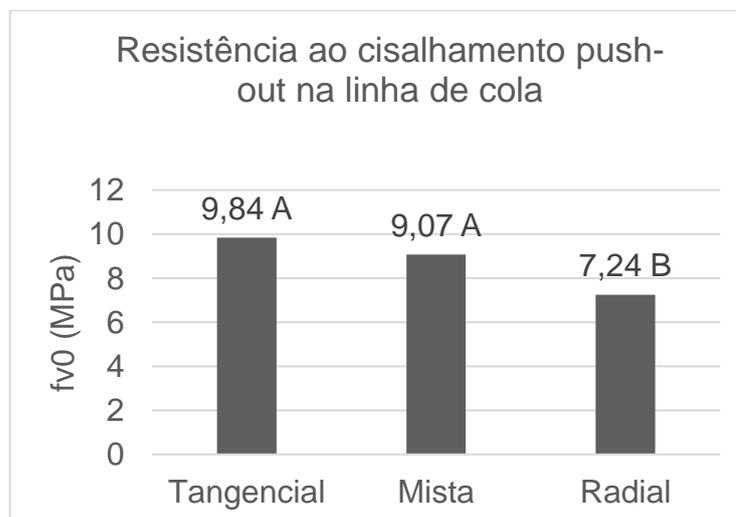


Figura 25 - Valores médios de resistências ao cisalhamento *push-out* na linha de cola. Médias seguidas por mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

Fonte: O autor.

Da mesma forma que nos demais ensaios, a maior média de resistência ao cisalhamento na linha de cola correspondeu aos corpos de prova no

tratamento tangencial com (9,84 MPa) que foi 7,82% superior aos tratamentos na orientação mista na mesma condição (9,07 MPa) e 26,42% da orientação radial na mesma condição (7,24 MPa). Com isso, as médias nas orientações tangencial e mista não diferem entre si estatisticamente. Já na orientação radial, as médias diferem estatisticamente da tangencial e da mista.

No ensaio de cisalhamento *push-out*, tentou-se apresentar a aplicação do cisalhamento em duas linhas de cola. Observou-se que na maioria corpos de prova ocorreu ruptura por fendilhamento; isso significa que os corpos de prova resistiram a carga solicitada na linha de cola.

Os valores médios obtidos nesse trabalho foram próximos aos encontrado por Almeida et al. (2014), nos quais os autores avaliaram a qualidade da adesão de vigas de MLC de Paricá e Lyptus, utilizando adesivos resorcinol-formaldeído (RF) e melanina-ureia-formaldeído (MUF), apresentando valores médios para resistência ao cisalhamento *push-out* de 9,50 MPa e 7,75 MPa para peças de MLC utilizando madeira de Lyptus e adesivos MUF e RF, respectivamente.

Resultados similares foram encontrados por Segundinho et al. (2015) que obtiveram resistência igual a 8,66 MPa para madeira seca de *Acácia mangium* e adesivo poliuretano.

#### 4.3.5 Delaminação

Diante das médias de cada tratamento pode-se perceber que o tratamento tangencial foi o que obteve maior porcentagem de delaminação (38,53%), com diferença de 53,10% que foi superior ao tratamento misto na mesma condição (18,07%) e 56% do tratamento radial na mesma condição (16,95%). De acordo com a estatística a média da orientação tangencial difere das orientações mista e radial, sendo que as orientações mista e radial não diferem entre si.

Os resultados obtidos no ensaio de delaminação nas orientações mista e radial foram inferiores. Já na orientação tangencial os resultados foram similares aos encontrados por Segundinho et al. (2018), onde a delaminação para PUR foi igual a 34,40%; já nas orientações mista e radial os resultados foram inferiores. Resultados similares foram encontrados por Calil et al. (2014) cujos valores de delaminação nas madeiras variou entre 0% e 38,6%.

Através da análise dos dados obtidos é possível observar que na orientação tangencial ocorreu uma maior porcentagem de delaminação. Isso

acontece porque a variação dimensional da madeira é mais acentuada na orientação tangencial (GALVÃO; JANKOWSKY, 1985).

Na figura 26 é possível observar como ficaram os corpos de prova após o ensaio de delaminação. Na orientação tangencial, que estão representados os dois topos do corpo de prova, as seis linhas que foram expostas na autoclave (Figura 26 A), são os corpos de prova da orientação mista nas mesmas condições (Figura 26 B) e são corpos de prova na orientação radial nas mesmas condições (Figura 26 C).

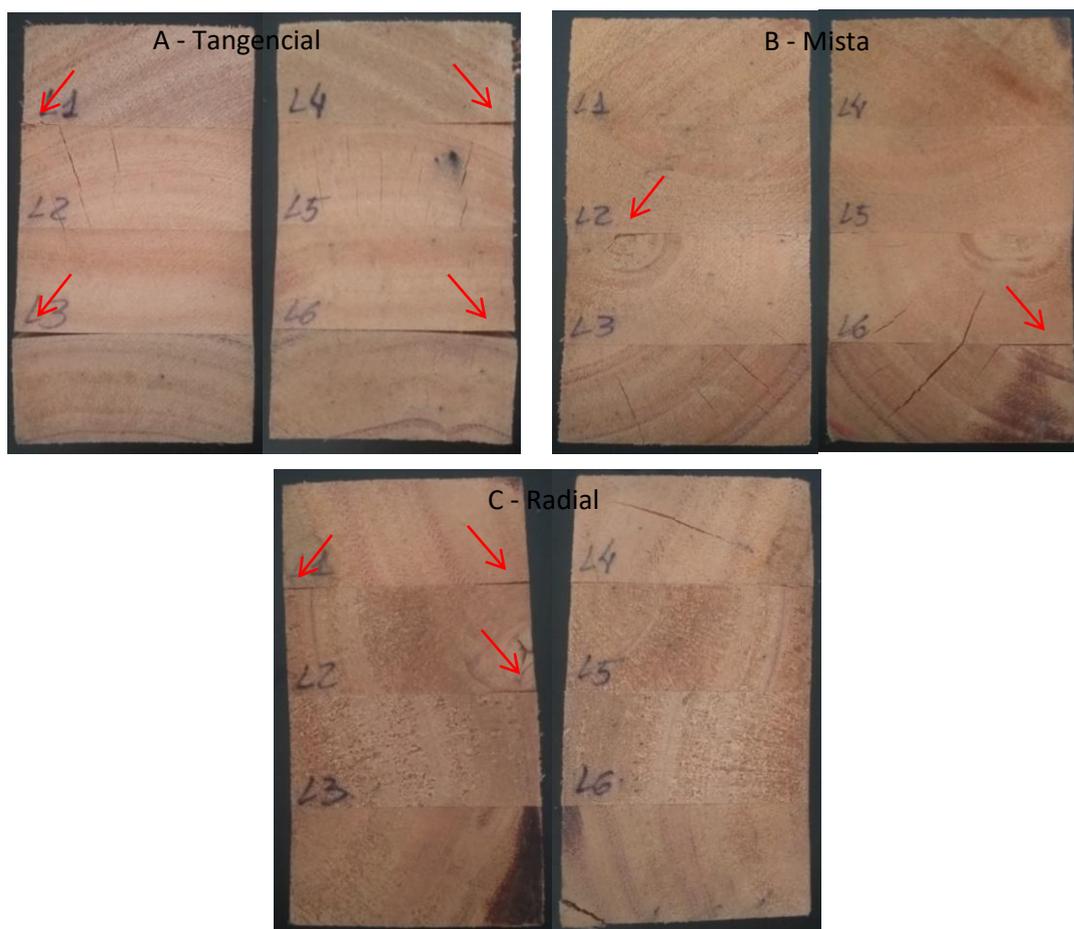


Figura 26 - Delaminação.

Fonte: O autor.

#### 4.4 Ensaio de Microdensitometria de raios-x

Os valores médios de densidade aparente realizada através do raio X nos elementos de MLC indicaram que para cada tratamento as médias foram similares estatisticamente. A diferença na orientação mista ( $651,37 \text{ Kg/m}^3$ ) foi superior, com uma diferença de 0,75% da orientação radial ( $646,48 \text{ Kg/m}^3$ ) e 2,07% da orientação tangencial, resultando numa média de ( $637,85 \text{ Kg/m}^3$ ). De

acordo com o teste de médias pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ), as médias não diferem estatisticamente.

Por meio dos gráficos de densidade obtidos no ensaio de microdensitometria de raio X, é possível observar que houve um aumento de densidade na linha de cola, onde ocorreram “picos” na densidade. Isso ocorre porque a densidade de adesivo é mais elevada do que a densidade da madeira. Com esse elevado valor de densidade aparente, que foi influenciado pela densidade do adesivo, pode ser observado nos gráficos que a densidade do adesivo influenciou na densidade média dos elementos (Figura 27).

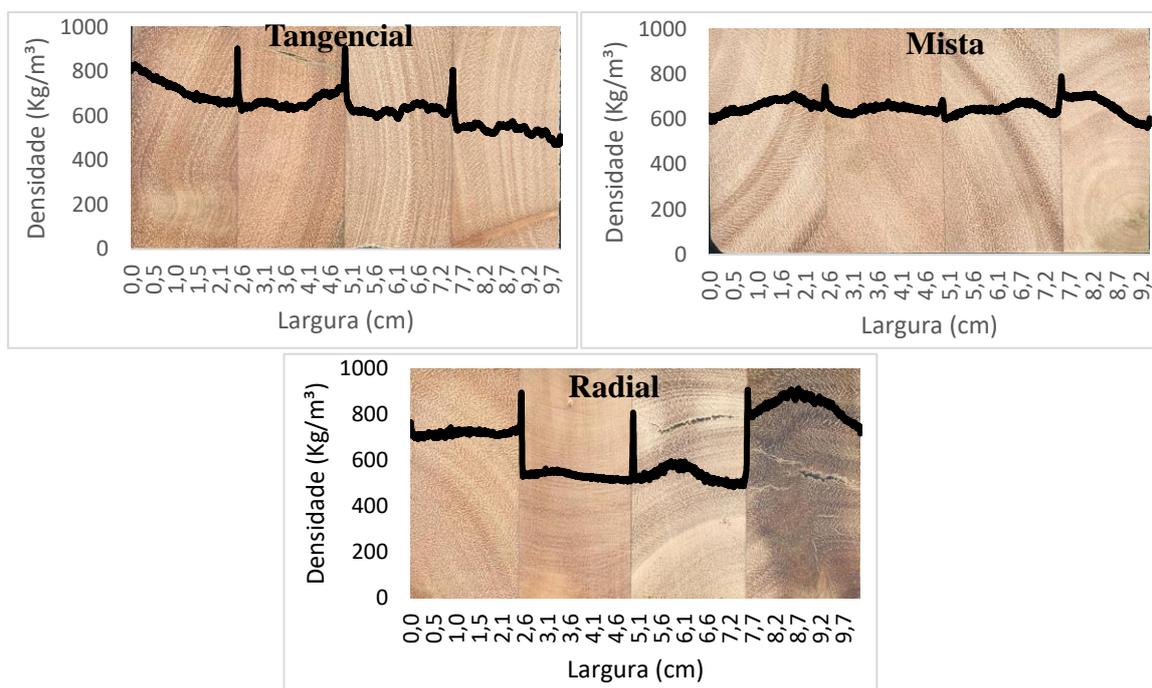


Figura 27 - Gráficos de densitometria.

Fonte: O autor.

#### 4.5 Espessura da linha de cola

Diante das médias de cada tratamento pode-se perceber que o tratamento radial obteve maior espessura de linha de cola, com (89,25  $\mu\text{m}$ ) de diferença, ou seja, 9,82% de diferença, que foi superior à do tratamento tangencial (80,49  $\mu\text{m}$ ) e 17,15% maior que a orientação mista (73,94  $\mu\text{m}$ ). Logo as médias diferiram estatisticamente entre si.

Botosso (2011) obteve uma menor espessura da linha de cola na orientação tangencial, o que pode ser explicado pelo fato de que tangencialmente a madeira está perpendicular à direção dos raios, sendo esta

direção paralela ao eixo do caule (tronco). Com isso o adesivo penetra na madeira pelos raios mais facilmente (Figura 28).

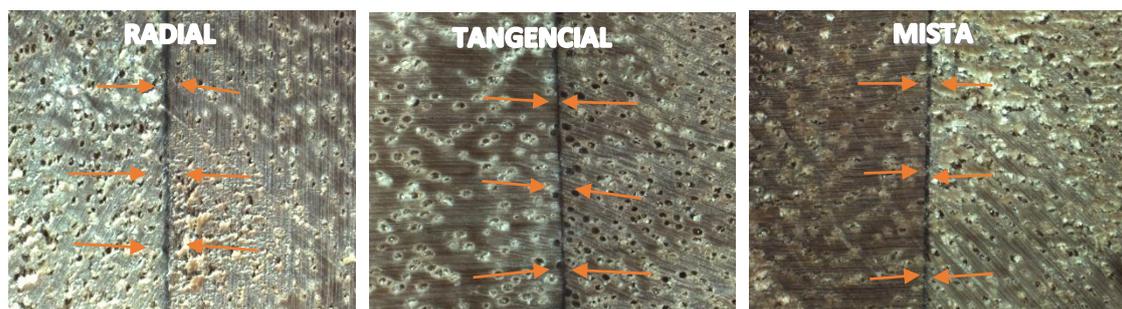


Figura 28 – Linha de cola.

Fonte: O autor.

### 5.6 Intemperismo acelerado e colorimetria

Os valores médios dos parâmetros colorimétricos ( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ,  $C$  e  $h^*$ ), em condições antes e depois do intemperismo correspondem às leituras feitas nas faces transversal e longitudinal dos três tratamentos da madeira de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*, e estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Valores médios dos parâmetros colorimétricos das amostras de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* em condição antes do intemperismo e depois do intemperismo nas direções transversal e longitudinal nos 3 tratamentos (radial, tangencial e mista).

		$L^*$	$a^*$	$b^*$	$C$	$h$	Cor	
Antes	R	Trans.	60,59 (2,12)	12,19 (0,87)	17,20 (0,58)	21,13 (0,83)	54,81 (1,90)	Marrom claro
		Long.	68,69 (2,01)	13,00 (0,79)	19,44 (0,69)	23,42 (0,89)	56,35 (1,31)	Marrom claro
	T	Trans.	61,99 (1,60)	11,88 (0,76)	16,14 (0,62)	20,07 (0,92)	53,82 (1,23)	Marrom claro
		Long.	69,65 (2,56)	13,75 (1,19)	20,24 (0,84)	24,53 (1,33)	56,13 (1,40)	Marrom claro
	M	Trans.	61,38 (2,04)	11,15 (0,58)	16,71 (0,97)	20,17 (0,90)	56,11 (1,74)	Marrom claro
		Long.	67,82 (1,72)	12,65 (0,46)	20,19 (0,93)	23,87 (0,96)	58,10 (0,99)	Marrom claro
Depois	R	Trans.	42,13 (2,31)	15,29 (0,78)	26,48 (1,97)	30,62 (2,06)	59,61 (1,07)	Amarelo amarronzado
		Long.	51,39 (2,50)	15,63 (0,42)	31,05 (2,09)	34,83 (1,87)	62,98 (1,59)	Amarelo amarronzado

T	Trans.	43,27 (2,39)	14,39 (0,63)	25,95 (1,03)	29,71 (1,06)	60,86 (1,29)	Amarelo amarronzado
	Long.	52,41 (3,12)	16,11 (0,30)	31,82 (1,63)	35,70 (1,32)	62,96 (1,68)	Amarelo amarronzado
M	Trans.	44,49 (2,00)	14,40 (0,46)	26,57 (1,10)	30,25 (1,13)	61,31 (1,11)	Amarelo amarronzado
	Long.	51,67 (1,72)	15,96 (0,46)	31,40 (0,93)	35,27 (0,96)	62,89 (0,99)	Amarelo amarronzado

Em que:  $L^*$  = claridade;  $a^*$  e  $b^*$  = coordenadas cromáticas; C = saturação;  $h^*$  = ângulo de tinta. R = elemento colado com lamelas radiais; T = elemento colado com lamelas tangenciais; M = elemento colado com lamelas mistas. Trans. = seção transversal do elemento colado e Long. = seção longitudinal do elemento colado. Valores entre parênteses referem-se ao desvio padrão.

Fonte: O autor.

Ao analisar os valores médios dos parâmetros colorimétricos obtidos no estudo, observa-se que a claridade ( $L^*$ ) das amostras depois da exposição ao intemperismo é 26,85 % menor que antes. Dessa maneira, a diminuição da luminosidade, caracteriza o escurecimento das amostras. Nas amostras, antes do intemperismo podemos notar que a cor era marrom claro; após o intemperismo a cor mudou para amarelo amarronzado. Com base na classificação dos grupos de cores contidos no agrupamento de Cluster (Camargos e Gonzalez, 2001), apresentado na Tabela 12 (Anexo 1), é possível identificar as cores correspondentes aos grupos de valores dos parâmetros colorimétricos  $L^*$ ,  $a^*$  e  $b^*$  obtidos para cada tratamento (Tabela 6).

A coordenada  $a^*$  apresentou médias mais elevadas para as amostras depois do intemperismo, representando aumento da pigmentação vermelha após exposição ao intemperismo acelerado.

A coordenada  $b^*$  apresentou médias mais elevadas para as amostras depois do intemperismo, representando aumento da pigmentação amarela após exposição ao intemperismo acelerado.

Verifica-se ainda que os desvios-padrão, de forma geral, são bem homogêneos, mostrando a uniformidade das amostras.

A luminosidade ( $L^*$ ) e as coordenadas de cor ( $a^*$  e  $b^*$ ) das amostras apresentaram uma tendência de escurecimento em seções transversais e longitudinais. De acordo com Ishiguri et al. (2003), a descoloração está relacionada à volatilização de compostos fenólicos em extrativos de madeira.

Além disso, a seção longitudinal apresentou menor redução na luminosidade do que a seção transversal. De acordo com Burger e Richter (1991), a seção longitudinal tem uma superfície mais brilhante devido ao efeito de faixas horizontais de raios. Nishino et al. (2000) afirmaram que as diferenças de cor entre seções longitudinal e transversal podem ser atribuídas a características anatômicas, como arranjo de células, raios grandes e grãos em espiral.

A variação total da coloração ( $\Delta E^*$ ), determinada pela Equação 10, exibida na metodologia, leva em consideração as diferenças das coordenadas cromáticas e de luminosidade, fornecendo assim, uma visão mais ampla da ação do intemperismo sobre a aparência das amostras. Na Tabela 7 estão descritas as variações dos valores dos parâmetros de cor da madeira no seu estado natural e depois do intemperismo.

Tabela 7 - Variações ocorridas entre os valores dos parâmetros colorimétricos das amostras da madeira de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*.

Tratamento		$\Delta L^*$	$\Delta a^*$	$\Delta b^*$	$\Delta E^*$
R	Trans.	-18,46 (1,34)	3,10 (1,56)	9,28 (2,05)	21,96 (1,81)
	Long.	-17,30 (1,67)	2,62 (0,83)	11,61 (2,41)	21,81 (1,43)
T	Trans.	-18,73 (2,15)	2,51 (1,29)	9,82 (1,31)	21,65 (2,23)
	Long.	-17,24 (1,33)	2,35 (1,26)	11,57 (2,26)	21,60 (1,26)
M	Trans.	-16,48 (1,68)	3,12 (0,74)	9,53 (1,48)	19,74 (1,47)
	Long.	-16,14 (1,74)	3,31 (0,68)	11,21 (1,45)	20,48 (2,00)

Valores entre parênteses referem-se ao desvio padrão.

Fonte: O autor.

A média geral dos tratamentos ( $\Delta E^* = 21,21$ ) isso se dá, sobretudo, pela perda da luminosidade, aumento da coordenada  $a^*$  (coloração vermelha). As variações na coloração das amostras ficaram muito acima do mais alto intervalo de valores da tabela de classificação de  $\Delta E^*$  (Tabela 7), caracterizando mudança de cor bastante acentuada. É possível verificar na Tabela 7, por meio dos valores

negativos de  $\Delta L^*$ , que ocorreu escurecimento de todas as superfícies, em relação ao estado natural da madeira.

Na Figura 29 é possível verificar, a influência da exposição ao intemperismo acelerado sobre a cor das amostras da madeira de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*. Observa-se, a partir de análise visual das amostras antes e depois do intemperismo, escurecimento de acordo com exibição da luz ultravioleta e condensação nas amostras. Visualmente, as mudanças são muito apreciáveis em todas as amostras entre todos os tratamentos.



Figura 29 – (A) tratamento tangencial na seção transversal, (B) tratamento radial na seção transversal, (C) tratamento misto na seção transversal, (D) tratamento tangencial na seção longitudinal, (E) tratamento radial na seção longitudinal, (F) tratamento misto na seção longitudinal.

Fonte: O autor.

Na Tabela 8 são mostrados os valores médios de densidade aparente, antes e depois do intemperismo. É possível perceber que os valores de densidade das amostras mudam após serem submetidas ao intemperismo, fato esse que pode ser explicado por esse ensaio se submeter a madeira com uma faixa ultravioleta com temperaturas de até 70 °C e uma condensação com temperatura de até 50 °C, fazendo com que ocorra perda de massa das amostras.

Tabela 8 - Valores médios de densidade aparente das *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* em condição antes do intemperismo e depois do intemperismo nas direções transversal e longitudinal nos 3 tratamentos (radial, tangencial e mista).

Tratamento		Densidade Aparente (g/cm <sup>3</sup> )	
Antes	R	Trans.	0,646a
		Long.	0,638a
	T	Trans.	0,674a
		Long.	0,644a
	M	Trans.	0,634a
		Long.	0,639a
Depois	R	Trans.	0,628a
		Long.	0,613a
	T	Trans.	0,630a
		Long.	0,643a
	M	Trans.	0,628a
		Long.	0,622a

Em que: T = elemento colado com lamelas tangenciais; M = elemento colado com lamelas mistas. Trans. = seção transversal do elemento colado e Long. = seção longitudinal do elemento colado. Médias seguidas pela mesma letra na vertical não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ( $p \geq 0,05$ ).

Fonte: O autor.

Segundo Gonzalez et al., (2014) a densidade aparente da madeira no gênero *Eucalyptus* varia entre 0,40 e 1,20 g/cm<sup>3</sup>, sabendo que classificação pode ser leve, média e pesada, de acordo com o valor obtido. A densidade aparente da madeira apresentou média dos três tratamentos de 0,642 g/cm<sup>3</sup> antes do intemperismo, e depois do intemperismo a média foi de 0,632 g/cm<sup>3</sup>, variando de baixa a média.

De acordo com a classificação citada acima, a madeira de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* estudada pode ser caracterizada como média, por apresentar densidade entre 0,510 g/cm<sup>3</sup> a 0,720 g/cm<sup>3</sup>. Em relação a produção de MLC a madeira deve ter densidade entre 0,400 g/cm<sup>3</sup> e 0,750 g/cm<sup>3</sup>,

sendo que essa madeira é ideal para confecção dos elementos de MLC (MIOTTO; DIAS, 2009).

Ao observar o comportamento das amostras após ação do intemperismo, nota-se que as amostras apresentaram uma certa delaminação ao longo dos 25 dias expostos as essas condições. A madeira exposta as condições de radiação e condensação sofre contração de forma perceptível, ocorrendo falha na linha de cola, conforme mostrado na Figura 30. Na Tabela 9 são mostrados os valores médios da delaminação, após o intemperismo.

Tabela 9 - Valores médios da delaminação, após a exposição ao intemperismo artificial.

	Tratamento					
	Transversal			longitudinal		
	T	M	R	T	M	R
<b>Delaminação (%)</b>	0,00a	1,38a	0,38a	15,18b	11,37ab	5,67ab

Em que: T = elemento colado com lamelas tangenciais; M = elemento colado com lamelas mistas; R = elemento colado com lamelas radiais. Médias seguidas pela mesma letra na horizontal não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ( $p \geq 0,05$ ).

Fonte: O autor.

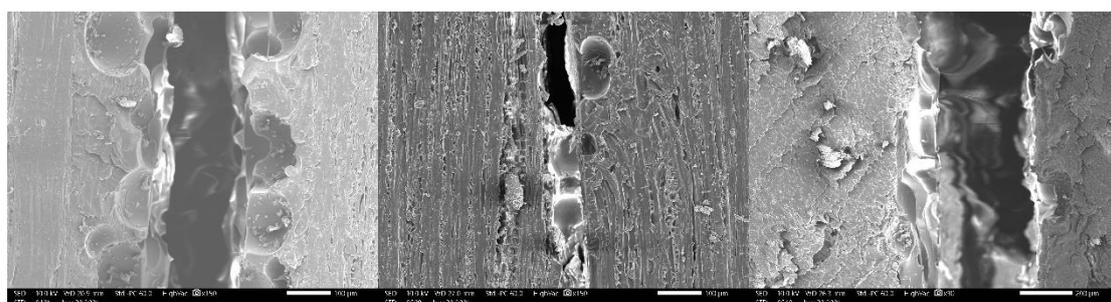


Figura 30 - demonstração da delaminação no microscópio de varredura.

Fonte: O autor.

Os corpos de prova na seção transversal não diferiram estatisticamente na delaminação entre as diferentes orientações das lamelas. A maior delaminação foi de 1,38% e não representou instabilidade na dimensão da amostra. A seção transversal apresentou, no sentido tangencial dos corpos de prova, nas suas faces uma largura de 5 cm, resultando numa menor variação de delaminação.

Diante das médias de cada tratamento e seção pode-se perceber que o tratamento tangencial na seção longitudinal foi o que obteve maior porcentagem de delaminação (15,18%), sendo esse valor 25,10% maior que tratamento misto (11,37%) e 62,65% que tratamento radial (5,67%), ambas nas mesmas condições experimentais. De acordo com a estatística, a média da orientação tangencial difere das orientações mista e radial, sendo que as orientações mista e radial não diferem entre si.

Foi verificada uma maior porcentagem de delaminação na seção longitudinal. No tratamento tangencial a linha de cola foi mais solicitada a contração, porque a variação dimensional da madeira é mais acentuada na orientação tangencial, de modo que a linha de cola na seção longitudinal, de maneira que no sentido tangencial foi na lateral do corpo de prova, sendo representado pela espessura das amostras, com média de 0,6 cm, onde sofreu uma maior variação.

### 5.7 Ensaio de preferência alimentar

Para ensaio de preferência alimentar, a distribuição foi feita em dois blocos, sendo que o primeiro bloco obtinha amostras expostas ao intemperismo no sentido transversal dos elementos de MLC (Tabela 10) e segundo bloco, metade das amostras eram sem intemperismo e outra metade amostras expostas ao intemperismo no sentido longitudinal dos elementos de MLC (Tabela 11), sendo o *Pinus* foi empregado nos dois blocos como controle.

As amostras que obtiveram menor perda de massa foram as de *Pinus*, havendo diferenças significativas após as análises de variância. Este também obteve as maiores notas, indicando um baixo desgaste do material.

Tabela 10 - Valores médios da perda de massa (%) e desgaste (nota) dos elementos de MLC no sentido transversal causados pelo ataque de *Nasutitermes corniger* no ensaio de preferência alimentar.

<b>Tratamento</b>	<b>Perda de Massa (%)</b>	<b>Desgaste (Nota)</b>
<b>Tangencial</b>	90a	0a
<b>Mista</b>	83a	0a
<b>Radial</b>	78a	0a

<b><i>Pinus</i></b>	20b	4,5b
---------------------	-----	------

Médias seguidas por uma mesma letra na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ( $p \geq 0,05$ ).

Fonte: O autor.

Tabela 11 - Perda de massa e desgaste dos elementos de MLC no sentido longitudinal causados pelo ataque de *Nasutitermes corniger*, ensaio de preferência alimentar.

Tratamento		Perda de Massa (%)	Desgaste (Nota)
<b>Com Intemperismo</b>	Tangencial	94a	0a
	Mista	97a	0a
	Radial	89a	0a
<b>Sem Intemperismo</b>	Tangencial	87a	0a
	Mista	90a	0a
	Radial	79a	0a
<i>Pinus</i>		17b	5b

Médias seguidas por uma mesma letra na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ( $p \geq 0,05$ ).

Fonte: O autor.

De acordo com Paes et al. (2007) um dos principais aspectos para limitar os ataques de cupins é a quantidade de extrativos presentes na madeira, que podem ser tóxicos para esses organismos, dificultando o ataque. Tal aspecto pode ter influenciado no menor ataque nas amostras de *Pinus*.

Houve grande porcentagem da perda de massa nos tratamentos com ação do intemperismo, sendo a porcentagem média entre os tratamentos 93%. Já nos tratamentos sem ação do intemperismo a porcentagem média entre os tratamentos foi de 85%. Isso pode ser explicado pelas alterações nas propriedades químicas que ocorrem na superfície da madeira devido aos fótons emitidos pela radiação solar, sendo a ação da luz ultravioleta (espectro eletromagnético menor que 30 nm) a principal responsável pela degradação fotoquímica. Essas alterações se dão através da ruptura das ligações químicas

do material (LEPAGE et al., 1986; SGAI, 2000; KATAOKA; KIGUCHI, 2001). Então, as amostras que foram expostas ao intemperismo acelerado ficaram mais suscetíveis ao ataque dos organismos xilófagos do que as amostras naturais.

Lopes (2014) avaliou madeira de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* não tratado ao ataque causado pelo *Nasutitermes corniger* e encontrou uma perda de massa de 100% e desgaste (nota) de 0, valores similares ao encontrado neste estudo.

Paes et al. (2013) observou o efeito dos extrativos e cinzas na resistência natural de quatro madeiras a cupins xilófagos. Uma dessas madeiras foi o eucalipto, que obteve uma porcentagem de perda de massa de 100% e desgaste (nota) 0, havendo uma similaridade com valores encontrados neste estudo.

## 5 CONCLUSÃO

A partir dos resultados apontados nesse trabalho, é possível concluir que:

- Os valores de resistência aos esforços mecânicos foram significativos, indicando que o adesivo obteve um bom desempenho nos ensaios propostos. Desse modo é indicado a fabricação de elementos de MLC de madeira de eucalipto, com adesivo poliuretano a base de mamona;
- A madeira de eucalipto apresentou propriedades físicas que permitem sua utilização na produção de elementos de MLC, tendo como valores de densidade, teor de umidade e coeficiente de anisotropia bem apropriados para a sua utilização como elemento estrutural;
- O tratamento tangencial foi o que teve uma maior resistência aos ensaios mecânicos, pois a orientação tangencial da face transversal possui os raios dispostos no sentido favorável para penetração do adesivo, houve uma maior falha na madeira do que no adesivo, sinal que a linha de cola resistiu aos esforços mecânicos. Assim a resistência é maior no sentido tangencial.
- A alta porcentagem de delaminação que ocorreu nos corpos de prova, limita o uso em ambientes externos (com elevada umidade);
- De acordo com o balanceamento na montagem dos elementos de MLC, com lamelas de módulo de elasticidade variados de baixo valores a alto. O balanceamento dispõe que lamelas de maior MOE

nas extremidades (inferior e superior) e de menor MOE na camada central dos elementos de MLC, dessa maneira é possível obter elementos de MLC com valores do MOE mais elevados e homogêneos;

- A ação do intemperismo acelerado provocou alterações muito apreciáveis à coloração da madeira de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*. Após a exposição todas as amostras escureceram e apresentaram padrão de cor diferente ao natural. O intemperismo causou mudanças nos elementos de MLC, como a cor, densidade aparente, delaminação. Indicando que é possível que os defeitos causados nos elementos de MLC, possam estar relacionados ao ambiente em que ele foi exposto;
- As amostras que não sofreram ação do intemperismo acelerado submetido ao ensaio de preferência alimentar apresentaram menor porcentagem de perda de massa que as amostras que foram expostas ao intemperismo submetido ao ensaio de preferência alimentar. O controle (*Pinus*) foi o que sofreu menor porcentagem perda de massa. É importante na fabricação de MLC que ocorra um acabamento, como verniz, stain nos elementos estruturais para minimizar o ataque a organismos xilófagos e degradação da madeira ao intemperismo acelerado.

## 6 REFERÊNCIAS

AITC - AMERICAN INSTITUTE OF TIMBER CONSTRUCTION. T110: **Test Methods for Structural Glued Laminated Timber**. Colorado, 2007.

ALMEIDA, D. H.; CAVALHEIRO, R. S.; MACÊDO, L. B.; CALIL NETO, C.; CHRISTOFORO, A. L.; CALIL JÚNIOR, C.; LAHR, F. A. R. **Evaluation of quality in the adhesion of glued laminated timber (glulam) of Paricá and Lyptus wood species**. International Journal of Materials Engineering, Rosemead, v. 4, n. 3, p. 114-118, 2014.

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

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM G154**: standard practice for operating fluorescent light apparatus for UV exposure of nonmetallic materials. Philadelphia: ASTM, 2006. 11 p.

ARAÚJO, M. J.; DIAS, D. C.; SCARPINATI, E. A.; PAULA, R. C. Número de repetições, de plantas por parcela e de avaliações para testes clonais de eucalipto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 50, n. 10, p. 923-931, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7190 - **Projeto de Estruturas de Madeira**. ABNT. Rio de Janeiro. 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto de revisão NBR 7190 CB-02: projeto de estruturas de madeira**. São Paulo: ABNT. 2013.

ASTM - 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. **Anual book of ASTM standards**. Philadelphia, 2005. 608 p.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C215-08**: Standard test method for fundamental transverse, longitudinal and torsional frequencies of concrete specimens. Philadelphia, 2008.

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

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E1876 - 09**: Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration. West Conshohocken, 2007.

AZAMBUJA, M. A. **Estudo experimental de adesivos para fabricação de madeira laminada colada**: avaliação da resistência de emendas dentadas, da durabilidade e de vigas. 2006. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade de São Paulo, São Carlos. 2006.

BALLARIN, A. W.; TARGA, L. A.; PALMA, H. A. L. Ensaio não-destrutivo de vibração transversal na avaliação do módulo de elasticidade de madeiras de reflorestamento. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 8., 2002, Uberlândia, mg. **Anais...** Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2002.

BARBOSA, T. L. **Qualidade da madeira de clones de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* cultivados em cinco regiões do estado de Minas Gerais para produção de celulose**. 2013. 126 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2013.

BARROS, S. V.; MUNIZ, G. I. B.; MATOS, J. L. M. Caracterização colorimétrica das madeiras de três espécies florestais da Amazônia. **Cerne**, v. 20 n. 3, p. 337-342, 2014.

BASSA, A. SILVA JUNIOR, F. G.; SACON, V. M. Misturas de madeira de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e *Pinus taeda* para produção de celulose Kraft através do processo LoSolids. **Scientia Forestalis**, v. 51, n. 75, p. 19-29, 2007.

BECKER, G. Physiological influences on wood-destroying insects of wood compounds and substances produced by microorganisms. **Wood Science and Technology**, v.5, n.3, p.236-246, 1971.

BELTRAME, R.; BISOGNIN, D. A.; MATTOS, B. D.; CARGNELUTTI FILHO, A.; HASELEIN, C. R.; GATTO, D. A.; SANTOS, G. A. Desempenho silvicultural e

seleção precoce de clones de híbridos de eucalipto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, n. 6, p. 791-796, 2012.

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.

BOTOSSO, P. C. Identificação macroscópica de madeiras: guia prático e noções básicas para o seu reconhecimento / Paulo Cesar Botosso. - **Colombo: Embrapa Florestas**, 2011.

BREZNAK, J.A Intestinal microbiota of termites and other xylophagous insects. **Annual Review of Microbiology**, v.36, n.1, p.32-32, 1982.

BRITO, J. P. **Ação de cupins de madeira seca (*Cryptotermes brevis*) e de solo (*Nasutitermes corniger*) nas madeiras termorretificadas de *Pinus taeda* e de *Corymbia citriodora***. 2015. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2015.

BROCO, V. F. **Extratos de resíduos industriais da madeira de teca para proteção da madeira organismos xilófagos**. 2019. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2019.

BURGER, M.L.; RICHTER, H.G. **Wood anatomy**. Nobel, São Paulo. Brazil. 154p. 1991 (in Portuguese).

CALIL, C. N. **MADEIRALAMINADA COLADA (MLC): controle de qualidade em combinações espécie-adesivo-tratamento preservativo**. 2011. 118 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

CAMARGOS, J. A. A. **Colorimetria aplicada na elaboração de uma tabela de cores para madeiras tropicais**. 1999. 99 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade de Brasília, Brasília, 1999.

CAMARGOS, J. A. A.; GONÇALEZ, J. C. A colorimetria aplicada como instrumento na elaboração de uma tabela de cores de madeira. **Brasil Florestal**, n. 71, p. 30-41, 2001.

CAN/CSA 0177. **Qualification Code for Manufactures of Structural Glued – Laminated Timber**. Canadian Standards Association, Alberta, 2006. 56p.

CANDIAN, M. **Estudo da classificação não destrutiva de peças serradas de espécies cultivadas no Brasil para uso em estruturas**. 2007. 51 p.

Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2007.

CARTER, F. L.; SMYTHE, R. V. Feeding and survival responses of *Reticulitermes flavipes* (Kollar) to extractives of wood from 11 coniferous genera. **Holzforschung**, v. 28, n.2, p.41-45, 1974.

CLAUSEN, C. A. Biodeterioration of wood. In: **Wood handbook: wood as an engineering material**. Wisconsin: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2010. cap. 14, p. 1-15 (General Technical Report, FPL-GTR-190).

COMISON INTERNATIONALE D L'ÉCLAIRGE - CIE. **Colrimetry**. Part 4: CIE 1976 (L\*a\*b\*) System. 2ed. Viena; 1986. (CIE,15.2).

COMISON INTERNATIONALE D L'ÉCLAIRGE - CIE. **Colrimetry**. 3rd. ed. Viena: Central Bureau of the CIE, 2004. 82 p.

COSTA, J. A. GONÇALEZ, J. C.; CAMARGOS, J. A. A.; GOMES, I. A. S. Fotodegradação de duas espécies de madeiras tropicais: jatobá (*Hymenaea courbaril*) e tauari (*Couratari oblongifolia*) submetidas à radiação ultravioleta. **Cerne**, Lavras, v.17, n.1, p.133-139, jan./mar. 2011.

COSTA, J. A. **Qualidade da madeira de *Eucalyptus urograndis*, plantado no Distrito Federal, para a produção de celulose kraft**. 2011. 76f.

Dissertação (Mestrado em Ciências florestais) - Universidade de Brasília, Brasília, 2011.

CREEMERS, J.; MEIJER, M.; ZIMMERMANN, T.; SELL, J. Influence of climatic factors on the weathering of coated wood. **Holz als Roh-und Werkstoff**, v. 60, n.6, p. 411-420, dec. 2002.

CUNHA, A. B.; MATOS, J. L. M. Determinação do módulo de elasticidade em madeira laminada colada por meio de ensaio não destrutivo (“stress wave timer”). **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 34, n. 2, p. 345-354, 2010.

CUNHA, A. B.; MATOS, J. L. M. Rigidez e resistência de vigas estruturais de madeira laminada colada e com perfil i compostas por diferentes adesivos.

**Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 20, n. 2, p. 345-356, 2010.

DUWADI, S. R.; RITTER, M. A. Timber Bridges in the United States. **Public Road Magazine**, Volume 60, n.3, Federal Highway Administration, winter, 1997.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **O eucalipto**. 2020. Disponível em:

<<https://www.embrapa.br/florestas/transferencia-de-tecnologia/eucalipto>>.

Acesso em: 28 dezembro 2020.

FEIST, W. C.; HON, D. N. S. Chemistry of weathering e protection. In: ROWELL, R. M. **The chemistry of solid wood**. Washington, D. C.: American Chemical Society, 1984. p.401-454.

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

FOREST PRODUCTS LABORATORY. **Wood Handbook: Wood as an Engineering Material**. Madison: U.S. Department of Agriculture, 1999. 463p.

FOREST PRODUCTS LABORATORY. **Wood handbook: wood as an engineering material: general technical report FPL-GTR-190**. Madison: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, 2010. 508p.

FREITAS, D. L.; CARVALHO, D. E.; BELTRAME, R.; SANTOS, G. A.; GATTO, D. A.; HASELEIN, C. R. Estabilidade dimensional da madeira de clones de Eucalyptus spp. **Sci. Agrar. Parana.**, Marechal Cândido Rondon, v. 15, n. 4, p. 435-439, 2016.

FSC, **Floresta para todo sempre**. 2016. Disponível em: <<https://br.fsc.org/pt-br/faq>> Acesso em: 21 janeiro 2021.

GALVÃO, A. P. M.; JANKOWSKY, I. P. **Secagem racional da Madeira**. São Paulo: Nobel, 1985. 112p.

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, p.125 - 130, 2006.

GONÇALEZ, J. C. FÉLIX, T. L. F.; GOUVEIA, F. N.; CAMARGOS, J. A. A.; RIBEIRO, P. G. Efeito da radiação ultravioleta na cor da madeira de freijó (*Cordia goeldiana* Huber) após receber produtos de acabamentos. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.20, n.4, p.657-664, out./dez. 2010.

GONÇALEZ, J. C.; JANIN, G.; SANTORO, A. C. S.; COSTA, A. F.; VALE, A. T. Colorimetria quantitativa: uma técnica objetiva de determinar a cor da madeira. **Brasil Florestal**, ano XX, n. 72, p. 47-48, nov. 2001.

GONÇALEZ, J. C. JANIN, G.; FARIAS, A. L. S.; GODOJ, A. C. L.; CHARRIER, F.; CHARRIER, B. Valorisation d'espèces brésiliennes de substitution pour l'industrie du meuble: tanimbuca et louro. **Bois et Forêts des Tropiques**, v. 286, n. 4, p. 55-64, 2005.

GONÇALEZ, J. C.; MACEDO, D. G. Colorimetria aplicada à madeira de eucalipto. In: SEMINÁRIO DE PRODUTOS SÓLIDOS DE MADEIRA DE EUCALIPTO, 2., 2003, Belo Horizonte. **Anais**. Viçosa, MG: Sociedade de Investigações Florestais: Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Florestal, 2003. p. 81-95. Editores: Silva, J. de C. & Gomes, J. M.

GONÇALEZ, J. C.; SANTOS, G. L.; SILVA JUNIOR, F. G.; MARTINS, I. S.; COSTA, J. A. Relações entre dimensões de fibras e de densidade da madeira ao longo do tronco de *Eucalyptus urograndis*. **Scientia Forestalis**, v. 42, n. 101, p. 81-89, 2014.

GOUVEIA, F. N. **Aplicação de tratamentos térmicos para estabilização colorimétrica de madeiras tropicais**. Brasília: UnB, 2008. 131 p. Tese (Doutorado em Ciências florestais) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

HIKITA, Y.; TOYODA, T.; AZUMA, M. **Weathering testing of timber – discoloration**. In: IMAMURA, Y. High performance utilization of wood for outdoor uses. Kyoto, Japão: Press-net, 2001.

- HON, D. N. S. Weathering and photochemistry of wood. In: HON, D. N. S.; SHIRAISHI, N. **Wood and cellulosic chemistry**. 2.ed. New York: Marcel Dekker, 2001. 928p.
- HSING, T. Y.; PAULA, N. F.; PAULA, R. C. Características dendrométricas, químicas e densidade básica da madeira de híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*. **Ciência Florestal**, v. 26, n. 1, p. 273-283, 2016.
- IBÁ. **Indústria Brasileira de Árvores 2020**. Brasília, 2020, 66p.
- ICIMOTO, F. H; **Dormentes em madeira laminada colada de *Pinus oocarpa***. 2013. 126f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2013.
- ISHIGURI, F.; MARUYAMA, S.; TAKAHASHI, K.; ABE, Z.; YOKOTA, S.; ANDOH, M.; YOSHIZAWA, N. Extractives relating to heartwood color changes in sugi (*Crytomeria japonica*) by a combination of smoke-heating and UV radiation exposure. **Journal of Wood Science**, Tokyo, v.49, n.2, p.135-139, abr. 2003.
- JANIN, G. A.; GONÇALEZ, J.; ANANIAS, R. A.; CHARRIER, B.; SILVA, G. F.; DILEM, A. Aesthetics appreciation of wood colour and patterns by colorimetry. part 1. colorimetry theory for the cielab system. **Maderas: Ciencia y Tecnologia**, v. 3, n. 1/2, p. 3-13, 2001.
- KATAOKA, Y.; KIGUCHI, M. Depth profiling of photo-induced degradation in wood by FT-IR microspectroscopy. **Journal of Wood Science**, Tóquio, v.47, p.325-327, 2001.
- KONICA MINOLTA. **Precise color communication**: color control from perception to instrumentation. Konica Minolta Sensing Inc., 2007. 62p.
- LAVISCI, P. JANIN, G.; UZIELLI, L. Qualité Du bois de six essences Du maquis méditerranéen. **Forêt Méditerranéenne**, v. 11, n. 1, p. 69-78, 1989.
- LEITE, T. M.; SANTOS, P. A. F. M; VALLE, I. M. R. O uso da madeira laminada colada no Brasil: panorama e desafios. In: CONGRESSO LATINOAMERICANO DE ESTRUTURAS DE MADERA, 2, 2017, Buenos Aires. **Anales ...** Buenos Aires: Universidad Nacional Noroeste, 2017. p. 1-12.

LEPAGE, E.S. **Manual de preservação de madeiras**. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT. Divisão de madeiras. São Paulo, v. I e II, 707p, 1986.

LESTARI, A. S. R. D.; HADI, Y.; HERMAWAN, D.; SANTOSO, A. The physical and mechanical properties of glulam made from pine and Jabon Woods. **Journal of Tropical Wood Science and Technology**, v. 16, p. 93-101, 2018.

LOPES, D. J. V. **Eficácia dos parâmetros do tratamento industrial na tratabilidade e durabilidade de madeiras de eucalipto**. 2014. 97p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2014.

MASCIA, N. T.; BERTOLINE, C. A. A.; BASÁGLIA, C. D.; DONADON, B. F; Numerical analysis of glued laminated timber beams reinforced by Vectran fibers. **Ambiente Construído**, v. 18, n. 3, p. 359-373, 2018.

MELLO, R. L. **Projetar em madeira**: uma nova abordagem. 2007. 195f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) – Universidade de Brasília, Brasília, 2007.

MESQUITA, R. R. S.; GONÇALEZ, J. C.; PAULA, M. H. Comportamento da madeira de *Tectona grandis* frente ao intemperismo. **Floresta**, Curitiba, PR, v. 47, n. 1, p. 29 - 35, jan. / mar. 2017.

MIGLIANI, Audrey. O que é Madeira Laminada Colada (MLC ou Glulam)?. **ArchDaily**, 2019. Disponível em: <[https://www.archdaily.com.br/br/928061/o-que-emadeira-laminada-colada-mlc-ou-glulam#:~:text=A%20madeira%20laminada%20colada%20\(MLC,resina%20de%20melamina%20ou%20poliuretano\)>](https://www.archdaily.com.br/br/928061/o-que-emadeira-laminada-colada-mlc-ou-glulam#:~:text=A%20madeira%20laminada%20colada%20(MLC,resina%20de%20melamina%20ou%20poliuretano)>)>. Acesso em: 16 jul. 2021.

MIOTTO, J. L. **Estruturas mistas de madeira-concreto: avaliação das vigas de madeira laminada colada reforçadas com fibras de vidro**. 2009. 325p. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Universidade de São Paulo, São Carlos. 2009.

MIOTTO, J. L.; DIAS, A. A. Produção e avaliação de vigas de madeira laminada colada confeccionadas com lâminas de eucalipto. **Revista Tecnológica**, 37-47, 2009.

MORI, C. L. S. O.; MORI, F. A.; LIMA, J. T.; TRUGILHO, P. F.; OLIVEIRA, A. C. Influência das características tecnológicas na cor da madeira de eucaliptos. **Ciência Florestal**, v. 14, n. 2, p. 123-132. 2004.

MORI, C. L. S. O.; LIMA, J. T.; MORI, F. A.; TRUGILHO, P. F.; GONÇALEZ, J. C. Caracterização da cor da madeira de clones de híbridos de *Eucalyptus* spp. **Cerne**, v. 11, n. 2, p.137-146, 2005.

NEGRELI, M. **Avaliação numérico-experimental do comportamento de elementos de MCL na flexão** / Murilo Negreli. Itapeva, SP, 2016.

NEUMANN, M. G.; QUINA, F. H. A fotoquímica no Brasil. **Química Nova**, São Paulo, v. 25, supl.1, p.34-38, maio 2002.

NISHINO, Y.; JANIN, G.; YAMADA, Y.; KITANO, D. Relations between the colorimetric values and densities of sapwood. **Journal of Wood Science**. v. 46, n. 4, p. 267-272, 2000.

OLIVEIRA, A.M.F.; LELIS, A.T.; LEPAGE, E.S.; LOPES, G.A.C.; OLIVEIRA, L.C.S.; CANEDO, M.D.; MILANO, S. Agentes destruidores de madeira. In: LEPAGE, E.S. **Manual de preservação de madeiras**. São Paulo: IPT, Divisão de Madeiras, 1986. p.99-278.

OLIVEIRA, J. T. S.; TOMAZELLO FILHO, M.; FIEDLER, N. C. Avaliação da retratibilidade da madeira de sete espécies de *Eucalyptus*. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 34, n. 5, p. 29-936, 2010.

PAES, J. B.; LIMA, C. R.; OLIVEIRA, E.; MELO, R. R. Resistência natural de sete madeiras ao cupim subterrâneo (*Nasutitermes corniger* Motsch.) em ensaio de preferência alimentar. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 2, n. 1, p. 57-62, 2007.

PAES, J. B.; MEDEIROS NETO, P. N.; LIMA, C. R., FREITAS, M. F., DINIZ, C. E. F. Efeitos dos extrativos e cinzas na resistência natural de quatro madeiras a cupins xilófagos. **Cerne**, Lavras, v. 19, n. 3, p. 399-405, jul./set. 2013.

PAIVA, H. N.; JACOVINE, L. A. G.; RIBEIRO, G. T.; TRINDA, C. **Cultivo de eucalipto: implantação e manejo**. 1. ed. Viçosa - MG: Aprenda Fácil, 360 p. 2011.

PANDEY, K. K. A note on the influence of extractives on the photo-discoloration and photo-degradation of wood. **Polymer Degradation and Stability**, v.87, n.2, p.375-379, fev. 2005.

PASTORE, T. C. M. **Estudos do efeito da radiação ultravioleta em madeiras por espectroscopias Raman (FTRaman), de refletância difusa no infravermelho (DRIFT) e no visível (CIE-L\*a\*b\*)**. 2004. 117f. Tese (Doutorado em Química) – Universidade de Brasília, Brasília, 2004.

PASTORE, T. C. M.; OLIVEIRA, C. C. K. de; RUBIM, J. C.; SANTOS, K. O. Efeito do intemperismo artificial em quatro madeiras tropicais monitorado por espectroscopia de infravermelho (DRIFT). **Química Nova**, São Paulo, v. 31, n. 8, p. 2071-2075, 2008.

PETTER, O. C. & GLIESE, R. **Fundamentos de colorimetria**. Porto Alegre: Laboratório de Processamento Mineral, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2000. Apostila do Curso de Fundamentos de Colorimetria.

RIBEIRO, P. G. **Utilização de técnicas não destrutivas para caracterização de madeiras de *Pinus caribaea* Var. *hondurensis* e de *Eucalyptus grandis***. 2009. 114 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

ROSU, D.; TEACA, C. A.; BODIRLAU, R.; ROSU, L. FTIR and color change of the modified wood as a result of artificial light irradiation. **Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology**, Lausanne, v. 99, p. 144-149, 2010.

SANTOS, C. M. T.; DEL MENEZZI, C. H. S. Efeito da gramatura sobre a resistência ao cisalhamento da linha de cola de duas madeiras tropicais: seru (*Allantoma lineata*) e marupá (*Simarouba amara*). **Floresta**, v. 40, n. 2, p. 345-354, 2010.

SEGUNDINHO, P. G. A., COSSOLINO, L. C., PEREIRA, A. H. A.; CALIL JUNIOR, C. Aplicação do método de ensaio das frequências naturais de vibração para obtenção do módulo de elasticidade de peças estruturais de madeira. **Revista Árvore**, Viçosa - MG, v. 36, n. 6, 2012.

SEGUNDINHO, P. G. A.; FRANÇA, L. C. A.; MADEIROS NETO, P. N.; GONÇALEZ, F. G.; OLIVEIRA, J. T. S. Madeira lamelada colada (MLC) com

*Acacia mangium* e adesivos estruturais. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 43, p. 537, 2015.

SEGUNDINHO, P. G. A.; CARREIRA, M. R.; CALIL NETO, C.; REGAZZI, A. J.; DIAS, A. A.; CALIL JUNIOR, C. Avaliação do módulo de elasticidade de peças de madeira laminada colada (MLC) obtido por meio do ensaio de vibração transversal. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 13, n. 2, p. 7-14, 2013.

SEGUNDINHO, P. G. A.; SILVA, A. C.; GONÇALVES, F. G.; REGAZZI, A. J. Caracterização da madeira laminada colada de *Eucalyptus* sp. produzida com adesivos resorcinol-fenol-formaldeído e poliuretano. **Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)**, Pelotas, v. 9, n. 2, p. 123-133, 2018.

SEGUNDINHO, P. G. A.; OLIVEIRA, R. G. E.; GONÇALVES, F. G.; LOPES, N. F.; ALVES, R. C.; AZEVEDO, M. S. Avaliação da madeira de híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* para utilização em madeira lamelada colada. **Revista matéria**, v. 26, n. 3, 2021.

SERENINE JUNIOR, L.; MELO, R. R.; CASTRO, V. G.; SOUZA, M. J. C.; BATISTA, F. G. Qualidade da madeira juvenil de um híbrido clonal (*Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* – H13). **Advances in Forestry Science**, v.6, n.1, p.523-527, 2019.

SGAI, R. D. **Fatores que afetam o tratamento para preservação de madeiras**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil/Edificações) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 122p. 2000.

SHELTON, T. G.; GRACE, J. K. Termite physiology in relation wood degradation and termite control. In: GOODELL, B.; NICHOLAS, D. D.; SCHULTZ, T. P (Eds.). **Wood deterioration and preservation: advances in our changing world**. Washington, DC: American Chemical Society, p.242-252. 2003.

SILVA, J. C.; OLIVEIRA, J. T. S. Avaliação das propriedades higroscópicas da madeira de *Eucalyptus saligna* sm., em diferentes condições de umidade relativa do ar. **R. Árvore**, Viçosa-MG, v.27, n.2, p.233-239, 2003.

SILVA, J. O.; PASTORE, T. C. M.; PASTORE JUNIOR, F. Resistência ao intemperismo artificial de cinco madeiras tropicais e de dois produtos de acabamento. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.17, n.1, p.17-23, jan./mar. 2007.

SILVEIRA, R. B. **Análise da rentabilidade potencial de investimentos em reflorestamento de eucalipto no leste de Mato Grosso do Sul e Norte do Paraná.** 2008. 41 f. Dissertação (Mestrado em Produção e Gestão Industrial). Universidade para o Desenvolvimento do Estado e da Região do Pantanal, Campo Grande, Mato Grosso do Sul, 2008.

STANGERLIN, D. M.; COSTA, A. F.; GONÇALEZ, J. C.; PASTORE, T. C. M.; GARLET, A. Monitoramento da biodeterioração da madeira de três espécies amazônicas pela técnica da colorimetria. **Acta Amazônica**, v. 43, n. 12, p. 178-184, 2013.

STEEL, R. G. D.; TORRIE, J. H. **Principles and procedures of statistic: a biometrical approach.** 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1980. 633 p.

SUDIYANI, Y.; TSUJIYAMA, S.; IMAMURA, Y.; TAKAHASHI, M.; MINATO, K.; KAJITA, H. Chemical characteristics of surfaces of hardwood and softwood deteriorated by weathering. **Journal of Wood Science**, v. 45, n. 4, p. 348-353, ago. 1999.

THOMPSON, R. M. **Resistência de painéis de partículas orientadas (OSB) tratados termicamente frente ao intemperismo.** 2006. 48 p. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal) - Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

WILLIAMS, R. S. Weathering of wood. In: ROWELL, R. M. **Handbook of wood chemistry and wood composites.** Florida: CRC Press, 2005. p.139-185.

WINK, C.; REINERT, D. J.; MULLER, I.; REICHERT, J. M.; JACOMET, L. **A idade das plantações de Eucalyptus sp. influenciando os estoques de carbono.** Ciência Florestal, Santa Maria, v. 23, n. 2, p. 333-343, abr.-jun., 2013.

YANG, T. H.; WANG, S. Y.; LIN, C. J.; TSAI, M. J. **Evaluation of the mechanical properties of Douglas-fir and Japanese cedar lumber and its structural glulam by nondestructive techniques.** Construction and Building Materials, Amsterdam, v. 22, p. 487-493, 2008.

ZANGIÁCOMO, A. L. **Emprego de espécies tropicais alternativas na produção de elementos estruturais de madeira laminada colada.** 2003.

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) -, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2003.

## Anexo 1

Tabela 12 - Grupos de cores obtidos no agrupamento de cluster usando as variáveis cromáticas L, a\*, b\* e h.

GRUPO CLUSTER	COR	INTERVALOS DAS VARIÁVEIS CROMÁTICAS				
		L	a*	b*	C	h
01	Amarelo-oliva	64-64	06-06	46-46	47-47	82-82
02	Branco	69-80	04-08	19-27	21-28	71-79
03	Marrom-escuro	38-51	06-11	10-16	12-19	50-61
04	Rosa	55-68	11-27	18-27	23-30	53-64
05	Amarelo-claro	65-76	07-11	26-37	28-38	71-77
06	Roxo	36-39	12-07	03-07	12-16	14-29
07	Preto-avermelhado	28-35	04-08	03-06	05-10	35-44
08	Marrom-arroxeadado	29-44	08-11	08-12	11-16	34-52
09	Oliva	40-55	05-10	12-22	13-24	60-71
10	Oliva-claro	70-73	01-04	22-26	22-27	81-87
11	Branco-acinzentado	74-86	03-06	16-25	17-26	74-83
12	Marrom-escuro	35-51	11-16	13-18	17-23	43-55
13	Marrom-oliva	48-71	09-13	22-30	25-32	64-72
14	Preto	26-36	01-06	02-08	03-09	49-64
15	Vermelho-escuro	35-38	17-21	13-15	21-26	33-38
16	Cinza-rosado	61-76	04-08	13-20	14-21	67-76
17	Vermelho	37-52	17-24	16-23	24-31	39-52
18	Oliva-amarelado	51-69	06-09	20-27	21-28	69-76
19	Laranja-amarelado	53-54	24-27	34-38	42-46	54-55
20	Amarelo-alaranjado	49-66	12-19	31-36	33-40	61-67
21	Marrom-claro	45-61	10-13	16-25	19-28	54-66
22	Rosa-acinzentado	55-71	07-11	14-22	16-25	59-68
23	Amarelo-amarronzado	45-61	12-19	23-30	27-34	52-65
24	Amarelo	73-76	04-07	38-42	39-42	81-84
25	Marrom-avermelhado	39-57	13-17	18-23	23-29	50-58

Fonte: Camargos e González, 2001.