



Estado do Paraná

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ - Unioeste
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS
PPGCA

CARACTERIZAÇÃO DE MADEIRA DE *Eucalyptus urograndis*
E ADESIVO A BASE DE ÓLEOS VEGETAIS VISANDO O
EMPREGO EM PEÇAS DE MADEIRA LAMINADA COLADA

Fernando Nunes Cavalheiro

Toledo – Paraná – Brasil

2021



Estado do Paraná

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ - Unioeste
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS
PPGCA

CARACTERIZAÇÃO DE MADEIRA DE *Eucalyptus urograndis*
E ADESIVO A BASE DE ÓLEOS VEGETAIS VISANDO O
EMPREGO EM PEÇAS DE MADEIRA LAMINADA COLADA

Fernando Nunes Cavalheiro

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais da Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Unioeste/Campus Toledo, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Mestre em Ciências Ambientais.

**Orientador: Prof. Dr. Reinaldo
Aparecido Bariccatti**
Coorientador: Prof. Dr. Gustavo Savaris

AGOSTO/2021

Toledo - PR



Estado do Paraná

Nunes Cavalheiro, Fernando
CARACTERIZAÇÃO DE MADEIRA DE *Eucalyptus urograndis* E
ADESIVO A BASE DE ÓLEOS VEGETAIS VISANDO O EMPREGO EM PEÇAS
DE MADEIRA LAMINADA COLADA / Fernando Nunes Cavalheiro;
orientador Reinaldo Aparecido Bariccatti; coorientador
Gustavo Savaris. -- Toledo, 2021.
123 p.

Dissertação (Mestrado Acadêmico Campus de Toledo) --
Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Centro de
Engenharias e Ciências Exatas, Programa de Pós-Graduação em
Ciências Ambientais, 2021.

1. Estruturas de madeira. 2. Floresta Plantada. 3. Química
da madeira . 4. Adesivo Natural . I. Bariccatti, Reinaldo
Aparecido , orient. II. Savaris, Gustavo , coorient. III.
Título.

Dedico ao meu avô Antônio Medard Nedel (in memoriam).

“...Ser ao mesmo tempo economicamente próspero, socialmente justo, politicamente democrático, ambientalmente sustentável, culturalmente diverso. Esse é o grande esforço que nos levará a ter um país, que seja também, com a mesma radicalidade, socialmente justo...”

Marina Silva

“Não sacia a fome quem lambe pão pintado”

Santo Agostinho

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus, que sempre esteve comigo, me guiando e me dando forças ao longo da caminhada.

Agradeço à minha Avó, minha mãe e minha irmã, que embora tenham visto o caos na minha mente e o medo do fracasso, nunca me deixaram desistir e sempre me impulsionaram com palavras de encorajamento para que eu atingisse meu objetivo.

Agradeço à minha família que torciam por mim sempre.

Ao Prof. Dr. Gustavo Savaris pelo conhecimento e os ensinamentos transmitidos durante toda essa pesquisa, além do grande incentivo e apoio para realização deste trabalho. Ainda, obrigado por proporcionar essa grande oportunidade e pela ótima orientação, confiança depositada, paciência e amizade construída.

Ao Prof. Dr. Reinaldo Aparecido Bariccatti por confiar no meu empenho, pelo auxílio, paciência e por toda ajuda dispensada. Seu bom humor e comprometimento foram fundamentais para a conclusão deste trabalho.

Aos professores Douglas Dragunski e Alfredo Petruski pelos ensinamentos em química e estruturas de madeira.

Aos amigos que entraram em minha vida por meio deste mestrado, Caroline, Marli, Paula, Jean e aos que estão aqui comigo desde a graduação, Carol, Felipe, Fernanda, Gabriel, Giovani, Isabele, Otávio e Paola; agradeço-lhes por tudo, especialmente pela paciência, atenção e força que prestaram em momentos menos fáceis pelos quais passei, tanto na vida acadêmica quanto pessoal.

Ao grupo “em manutenção”, Paula, Elizamary e Isabelle que desde a graduação, durante as iniciações científicas já compartilhávamos o incentivo mútuo e compreensão, obrigado pela ajuda nos momentos mais complicados, pelos momentos alegres proporcionados e o grande companheirismo. Esses fatos contribuíram muito para alcançar esse objetivo.

Agradeço em especial à Isabelle Costa e Jean Colombari pelas idas incansáveis ao laboratório, que auxiliariam na realização dos ensaios desse trabalho, pelos conhecimentos repassados aos quais eu tão pouco sabia, e ainda, pelas conversas descontraídas.

Aos colegas Paula, Jean, Paola e nosso mascote Dominic por serem a minha fonte de amparo em diversos momentos - madrugadas - que precisei de ajuda e sempre estiveram dispostos a me auxiliar com o máximo de força de vontade, que só amigos verdadeiros dispensam. Ao Dominic, filho da Paola, que nos ensinou afavelmente sobre humanidade, coletividade e empatia.

À minha colega Tainara pela compreensão em minha jornada dupla, para que esse objetivo fosse alcançado e pela amizade construída.

À empresa KEHL Indústria e Comércio LTDA pela doação do adesivo.

À minha madrinha Estel e seu filho Denis pela doação da madeira, fonte de estudo deste trabalho.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná UTFPR, campus Toledo, à Coordenação de Engenharia Civil, que me acolheu como egresso para a utilização dos equipamentos, do espaço físico e pelo ambiente amigoso e acolhedor de trabalho e para a confecção dos corpos de prova. Aos técnicos e estagiários da UTFPR, em especial ao Marcos que muito me ajudou em diversos estágios deste trabalho.

Agradeço à Universidade Paranaense (UNIPAR), na figura do então ex-diretor professor Sergio Ricardo Ferrazoli, pela liberação ao uso das excelentes instalações para o desenvolvimento plenos dos ensaios químicos. Aos técnicos de laboratório da UNIPAR, Rubia, Alex e Giovani que contribuíram para a realização dos ensaios deste trabalho.

Aos meus colegas de trabalho da equipe do semipresencial da UNIPAR, e coordenadora Jéssica, pelo grande incentivo dado durante toda essa fase e pela compreensão, ajuda nos momentos mais complicados, pelos momentos alegres proporcionados e o grande companheirismo.

Agradeço também aos técnicos de laboratório da Unioeste que sempre muito prestativos foram essenciais no desenvolvimento do trabalho.

E à todos que direta ou indiretamente colaboraram para a realização deste trabalho e aqueles que porventura tiveram seus nomes omitidos.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	16
2. OBJETIVOS	19
2.1. Objetivo Geral.....	19
2.2. Objetivos Específicos	19
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
3.1. Madeiras de florestas plantadas	20
3.2. O Gênero <i>Eucalyptus</i>	22
3.2.1. Híbrido do gênero <i>Eucalyptus</i>	24
3.3. Madeira Laminada Colada (MLC).....	25
3.3.1. Vantagens da madeira laminada colada	27
3.4. Colagem da Madeira	29
3.5. Estudos sobre resistência à compressão de peças de madeira laminada colada.....	30
3.6. Adesivo poliuretano de base vegetal	31
3.7. Fatores que afetam a colagem de madeira	34
3.7.1. Propriedades anatômicas	35
3.7.2. Propriedades químicas	37
3.7.3. Propriedades físicas	39
4. MATERIAL E MÉTODOS	44
4.1. Propriedades da espécie de madeira empregada	44
4.1.1. Análise química	46
4.1.1.1. Análise de Termogravimetria.....	47
4.1.1.2. Calorimetria exploratória diferencial (DSC)	47
4.1.1.3. Caracterização de raio-X da madeira	48
4.1.1.4. Teor de extrativos	48
4.1.1.5. Lignina Klason (insolúvel).....	50
4.1.1.6. Lignina Solúvel e Total	51
4.1.1.7. Teor de Holocelulose por cloração	52
4.1.1.8. Teor de α -Celulose	54

4.1.1.9.	Teor de Hemicelulose.....	54
4.1.1.10.	Teor de Cinzas	55
4.1.1.11.	Teor de Umidade.....	55
4.1.1.12.	Hidrossolubilidade da madeira	56
4.1.1.13.	Solubilidade de hidróxido de sódio a 1%	56
4.1.1.14.	pH e Condutividade elétrica.....	56
4.1.2.	Adesivo.....	56
4.1.2.1.	Viscosidade	57
4.1.2.2.	Teor de Sólidos	58
4.1.2.3.	Tempo de trabalho	58
4.1.2.4.	Potencial Hidrogeniônico (pH).....	58
4.1.2.5.	Gel Time.....	58
4.1.2.6.	Análise termogravimétrica (TGA)	59
4.1.2.7.	Espectroscopia de Infravermelho (FTIR).....	59
4.1.2.8.	Análise dos gases evoluídos (EGA)	59
4.1.2.9.	Caracterização por difração de raio X	60
4.2.	Propriedades físicas da madeira	60
4.2.1.	Teor de Umidade.....	60
4.2.2.	Determinação da densidade básica e aparente	61
4.2.3.	Estabilidade dimensional.....	62
4.3.	Propriedades mecânicas da madeira	63
4.3.1.	Definição da gramatura de adesivo	65
4.4.	Microscopia óptica – Interface madeira-adesivo.....	66
4.5.	Resistência à compressão de madeira laminada colada.....	67
4.6.	Análise estatística.....	70
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	71
5.1.	Propriedades química da madeira.....	71
5.2.	Propriedades do adesivo	75
5.3.	Análise termogravimétrica, calorimetria exploratória e difratograma de raio-X da madeira.....	78
5.4.	Análise termogravimétrica, difração de raio-X e FTIR do adesivo.....	81
5.5.	Análise dos gases evoluídos (EGA)	84
5.6.	Propriedades físicas e mecânicas da madeira	86
5.7.	Cisalhamento paralelo as fibras da madeira Eucalyptus urograndis .	89

5.8.	Cisalhamento da linha de cola em relação a gramatura de adesivo.....	91
5.9.	Interface madeira-adesivo	94
5.10.	Análise de resistência a compressão de peças coladas	97
6.	CONCLUSÕES	101
7.	REFERÊNCIAS.....	103
8.	ANEXOS.....	120

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Árvores plantadas no Brasil por Estado e por gênero 2018.	22
Figura 2: Área de árvores plantadas	23
Figura 3: Ilustração de uma peça de madeira laminada colada (MLC).	25
Figura 4: Edifícios em madeira laminada colada e madeira laminada cruzada (Brock Commons Tallwood House, Vancouver, Canada (a); Mjøstårnet, Brumunddal, Noruega (b)).....	27
Figura 5: Reação de formação do grupo uretano.....	32
Figura 6: Reação de polimerização do poliuretano	32
Figura 7: Ilustração da estrutura hierárquica da madeira.	35
Figura 8: Localização do município de Mercedes na microrregião de Toledo - PR	45
Figura 9: Demarcação do fuste (a); Seção de corte (b); Peças identificadas com fuste já demarcados (c); Caibros empilhados para secagem com as demarcações de localização (d).....	46
Figura 10: Equipamento de extração soxhlet acoplado no dispenser de aquecimento.....	49
Figura 11: Extrativos após secagem em estufa.....	49
Figura 12: Procedimentos para obtenção da lignina insolúvel; (a) refluxo; (b) material filtrado em funil de placa sinterizada.....	51
Figura 13: Procedimento para obtenção da holocelulose por cloração. (a) Material em banho-maria durante o procedimento; (b) Processo de lavagem do material; (c) Material após limpo e seco em estufa.	53
Figura 14: Análise de viscosidade.....	57
Figura 15: Modelo do corpo de prova para ensaio de cisalhamento	64

Figura 16: Dimensões do corpo de prova para ensaio de compressão paralelos as fibras (a); Ensaio em prensa universal (b).....	64
Figura 17: Dimensões e detalhamento do corpo de prova para análise de cisalhamento da linha de cola	65
Figura 18: Processo de montagem dos corpos de prova ilustrando a pesagem da quantidade de cola corresponde a gramatura em análise (a); Organização para o processo de prensagem (b); Prensagem dos copos de prova (c); Realização do ensaio em prensa universal de ensaio (d).....	66
Figura 19: Microscópio Zeiss Axioscope 5	67
Figura 20: Modelos de análise de madeira laminada colada	68
Figura 21: Ilustração do procedimento de prensagem (a); Execução do ensaio de resistência em prensa universal (b); Demonstração da instrumentação de módulo de elasticidade (c).....	68
Figura 22: Curva da viscosidade ao longo do tempo de trabalho.....	77
Figura 23: Gráfico da análise termogravimétrica da madeira sob atmosfera de N ₂	79
Figura 24: Calorimetria exploratória diferencial da madeira	80
Figura 25: Difratoograma da serragem de <i>E. urograndis</i>	81
Figura 26: Termogravimetria aglomerante A (a); Termogravimetria aglomerante B (b); Termogravimetria adesivo (aglomerante A + B) (c).	82
Figura 27: Difração de raio-x do adesivo.....	83
Figura 28: Análise de FTIR do adesivo	83
Figura 29: Espectro de infravermelho dos eventos térmicos da TGA	84
Figura 30: Evolução da liberação gasosa ao longo da temperatura.....	85

Figura 31: Valores de precipitação mensal para Toledo-PR para o ano de 2020	89
Figura 32: Boxplot da resistência de cisalhamento da madeira	90
Figura 33: Eficiência da linha de cola; (a) Linha de cola com rompimento na madeira; (b) Linha de cola com quebra juntamente da madeira e adesivo; (c) Linha de cola em que apenas o adesivo rompeu.....	92
Figura 34: Extravasamento do adesivo pelas bordas; (a) Corpo de prova de 150 g/m ² ; (b) Corpo de prova de 200 g/m ² ; (c) Corpo de prova de 250 g/m ²	93
Figura 35: Interface madeira-adesivo (linha de cola) ;(A) Interface madeira- adesivo (150 g/m ²); (B) Interface madeira-adesivo (200 g/m ²).....	95
Figura 36: Interface madeira-adesivo; (C) Interface madeira-adesivo (200 g/m ²); (D) Interface madeira-adesivo (200 g/m ²);	96
Figura 37: Interface madeira-adesivo; (E) Interface madeira-adesivo (150 g/m ²); (F) Interface madeira-adesivo (250 g/m ²).....	97

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores médios da variação dimensional de algumas madeiras utilizadas no Brasil	42
Tabela 2: Dados referente ao plantio da espécie de <i>Eucalyptus</i> sp. ¹	44
Tabela 3: Caracterização química da madeira	71
Tabela 4: Valores médios das propriedades dos adesivos	75
Tabela 5: Propriedades físicas da madeira ²	86
Tabela 6: Umidade da madeira	88
Tabela 7: Cisalhamento paralelo as fibras	89
Tabela 8: Cisalhamento da linha de cola	91
Tabela 9: Compressão paralela a linha de cola dos modelos propostos	98
Tabela 10: Resistência a compressão paralela as fibras corrigidas	98
Tabela 11: Análise de Variância ANOVA para os tratamentos	99
Tabela 12: Análise de Variância ANOVA para a umidade	100

RESUMO

CAVALHEIRO, F. N.; Caracterização de madeira de *Eucalyptus urograndis* e adesivo a base de óleos vegetais visando o emprego em peças de madeira laminada colada. 124 páginas. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE. Toledo, 06 de agosto de 2021.

A colagem da madeira é uma técnica muito antiga, mas também muito complexa, pois envolve diversas variáveis, que englobam desde as características da madeira até as propriedades inerentes ao adesivo. A satisfação no processo de colagem está atrelada à linha de cola, a qual serve para predizer o desempenho do adesivo quando exposto a esforços. Seguindo a tendência mundial empresas buscam em opções florestais novas alternativas para agregar valor aos produtos, desta forma, o gênero *Eucalyptus* surge como opção potencial para a utilização. Uma alternativa aos adesivos convencionais são os adesivos de base natural, normalmente os poliuretanos, que são compostos de um polímero bicomponente. Com isso, o presente estudo tem o objetivo de produzir e ensaiar peças comprimidas, feitas em madeira laminada colada, utilizando madeira de *Eucalyptus urograndis* em idade de 72 meses e adesivo bicomponente à base de óleos vegetais, na proporção de 1:2 de isocianato e polioliol, respectivamente. Foi realizada a caracterização da madeira para se obter as suas propriedades físicas, químicas e mecânicas, assim como para o adesivo foram analisadas algumas propriedades físicas, químicas e térmicas. Para os modelos de tratamentos analisados foram considerados corpos de prova com seção transversal quadrada de 5 cm de lado, com 15 cm de comprimento. Os ensaios foram realizados seguindo as normas NBR 7190 (ABNT, 1997) e ASTM D 905 (ASTM, 1998). Foram montados doze corpos de prova para cada modelo de tratamento, sendo: maciço, duas lâminas de madeira, três lâminas de madeira e quatro lâminas de madeira. Cada corpo de prova foi ensaiado individualmente até a ruptura. Para a análise de dados foi avaliada a resistência dos modelos propostos frente ao número de lâminas de madeira. Como resultado, a espécie apresentou densidade básica de $0,46\text{g/cm}^3$, teor de extrativos totais 3,37%, lignina total 31,5% holocelulose 64,5% e resistência à compressão paralela às fibras de 9,13 MPa. O adesivo apresentou teor de sólidos 96%, tempo de trabalho de 26 min e viscosidade igual a 4.488,18 cp. Os valores médios mais elevados de resistência ao cisalhamento foram obtidos em juntas provenientes da menor gramatura de adesivo adotada. As gramaturas de adesivo testadas apresentaram diferenças significativas nos resultados, demonstrando maior eficiência a de 150g/m^2 . Para a visualização da interface madeira-adesivo utilizou-se análise por fotomicrografias, em que foi possível caracterizar a linha de cola produzida pela ligação entre o adesivo e a madeira, evidenciando a eficiência da gramatura de cola adotada. Para a análise de resistência a compressão de peças coladas, o número de lâminas não influenciou na resistência da peça. Para caracterização observou-se que a madeira avaliada apresentou resultados satisfatórios para ser utilizada na fabricação de MLC.

PALAVRAS-CHAVE: Madeira laminada colada; Florestas plantadas; resistência a compressão; adesivo.

ABSTRACT

CAVALHEIRO, F. N.; **Characterization of Eucalyptus urograndis wood and adhesive based on vegetable oils for use in glued laminated wood pieces.** 124 pages. Dissertation (Master's degree) – Western Paraná State University - UNIOESTE. Toledo, August 06, 2021.

The wood gluing process is a very old technique, but also very complex, because it involves several variables, ranging from wood characteristics to the adhesive inherent properties. Satisfaction in the gluing process is linked to the glue line, which serves to predict the adhesive's performance when exposed to stresses. Following the world trend, companies search in forest options new alternatives to add value to the products, this way, the Eucalyptus genus appears as a potential option to be used. An alternative to conventional adhesives is the natural-based adhesives, usually polyurethanes, which are composed of a bicomponent polymer. With this, the present study aims to produce and test compressed parts made of glued laminated timber using 72-month-old Eucalyptus urograndis wood and vegetable oil-based bicomponent adhesive, in a 1:2 isocyanate and polyol, respectively. The wood was characterized to obtain its physical, chemical, and mechanical properties, and for the adhesive some physical, chemical, and thermal properties were analyzed. For the treatment models analyzed were considered specimens with square cross section of 5 cm side, with 15 cm length. The tests were carried out following the NBR 7190 (ABNT, 1997) and ASTM D 905 (ASTM, 1998) standards. Twelve specimens were assembled for each treatment model, being: solid, two wood veneers, three wood veneers and four wood veneers. Each specimen was individually tested until failure. For data analysis the resistance of the proposed models was evaluated in relation to the number of wood veneers. As a result, the species showed a basic density of 0.46g/cm^3 , total extractive content of 3.37%, total lignin of 31.5%, holocellulose of 64.5%, and fiber parallel compressive strength of 9.13 MPa. The adhesive had a solids content of 96%, a working time of 26 min, and a viscosity equal to 4,488.18 cp. The highest average values of shear strength were obtained in joints from the lowest weight of adhesive adopted. The tested adhesive weights showed significant differences in the results, with the 150g/m^2 adhesive showing higher efficiency. For the visualization of the wood-adhesive interface a photomicrographic analysis was used, in which it was possible to characterize the glue line produced by the bond between the adhesive and the wood, evidencing the efficiency of the glue weight adopted. For the analysis of the compressive strength of glued pieces, the number of veneers did not influence the strength of the piece. For characterization it was observed that the wood evaluated presented satisfactory results to be used in the manufacture of glulam.

KEY WORDS: Glued laminated timber; planted forests; compressive strength; adhesive.

1. INTRODUÇÃO

O setor de florestas plantadas é amplamente competitivo, fundamentado em bases sustentáveis e com grande potencial de expansão para a economia brasileira. Devido ao fomento da pesquisa e das favoráveis condições climáticas em nosso país, nos tornamos líderes mundiais em produtividade, sendo incontestável que o plantio de árvores é capaz de preservar nossas florestas primárias (MAPA, 2018).

Nos últimos anos, o enfoque dado às causas ambientais e à sustentabilidade, inerentes à necessidade de utilizar elementos estruturais de qualidade, foi capaz de proporcionar uma evolução em produtos derivados de madeira, justamente por tornar-se possível a utilização de madeiras provenientes de florestas plantadas, fomentando produtos ecologicamente corretos, proporcionando novos campos de aplicação e garantindo um sólido mercado consumidor. Além de reduzir os danos ambientais, os produtos engenheirados de madeira propiciam um menor uso da madeira maciça, já que tornam possível o uso de quase que a totalidade da matéria prima para a sua manufatura (CALIL NETO, 2011).

Neste contexto, uma alternativa viável ao uso de madeira maciça é a madeira laminada colada (MLC), que consiste na colagem de peças de madeira em forma de lamelas, proporcionando a confecção de peças de maior comprimento, empregando-a nas mais diversas formas estruturais (OLIVEIRA, 2018). Esta técnica também possibilita utilizar exclusivamente madeira proveniente de floresta plantada (COSTA TIENNE, 2006).

Seguindo a tendência mundial empresas buscam em opções florestais novas alternativas para agregar valor aos produtos, desta forma, o gênero *Eucalyptus* surge como opção potencial para a utilização em produtos de maior valor agregado, que inclui desde a madeira serrada a aplicações na construção civil (OLIVEIRA, 1997; MAPA, 2018).

Os derivados de materiais lignocelulósicos são cada vez mais comuns, devido a capacidade do melhor aproveitamento da matéria prima. Por isso, é importante compreender o comportamento entre a madeira, material utilizado

como substrato, e o adesivo empregado na confecção de peças coladas (PASSOS et al., 2006)

O procedimento de colagem da madeira proporciona um aumento considerável em seu aproveitamento geral. O reordenamento e a reconstituição por meio de ligações adesivas, propicia uma homogeneização das propriedades físico-mecânicas dos artefatos, possibilita a melhor utilização de peças de menor dimensão, agrega densidade e estabilidade dimensional por meio da pressão e temperatura de colagem e ainda é capaz de promover uma mitigação da exploração excessiva de florestas (MACIEL et al., 2010).

Na manufatura de produtos de madeira laminada colada tanto o adesivo como a madeira são componentes fundamentais. Por isso, uma matéria prima de rápido crescimento, como da espécie *Eucalyptus*, reduz o uso de madeira de fonte nativa e a possibilidade do desmatamento ilegal.

Uma variável influente no desempenho da MLC é o adesivo, amplamente utilizados os derivados de fenóis. Porém, estes adesivos são derivados de petroquímicos e tem em sua composição diversos tipos de compostos orgânicos voláteis, não biodegradáveis, podendo causar danos à saúde e ao meio ambiente (AZAMBUJA, 2006; AZEVEDO et al., 2011).

Uma alternativa aos adesivos convencionais são os adesivos de base natural, normalmente os poliuretanos, que são compostos de um polímero bicomponente formado por um pré-polímero e um polioliol advindo da extração dos óleos vegetais, incapazes de emanar substâncias tóxicas, é biodegradável e proveniente de recurso natural e renovável (AZAMBUJA, 2006; MARINHO et al., 2013).

Neste cenário, o tipo de adesivo e sua interação com as propriedades físicas, químicas e mecânicas da madeira, visa a adequar o processo produtivo de peças constituídas em modelo laminado colado disponham comportamento final apropriado para as diversas condições às quais possam ser submetidas. O uso de espécies alternativas de madeira para a confecção da MLC implica na necessidade de estudos para o entendimento e a busca de processos adequados de produção para a obtenção de um produto de qualidade.

Assim o presente trabalho teve o objetivo de avaliar a utilização de madeira do híbrido *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* proveniente de floresta plantada da região oeste do Paraná, e do adesivo a base de óleos

vegetais para produção de peças comprimidas de madeira laminada colada (MLC).

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Avaliar a utilização de madeira de *Eucalyptus urograndis*, proveniente de floresta plantada, com idade de 72 meses, em conjunto com o adesivo à base de óleos vegetais para produção de peças comprimidas de madeira laminada colada (MLC).

2.2. Objetivos Específicos

- Determinar propriedades químicas, físicas e mecânicas da madeira de *Eucalyptus urograndis*.
- Analisar o desempenho do adesivo poliuretano a base de óleos vegetais para colagem de peças de madeira de *Eucalyptus urograndis*;
- Avaliar a influência da gramatura de adesivo na resistência à compressão de peças de madeira coladas;

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste item serão abordados aspectos importantes sobre o eucalipto e seus usos no Brasil, a composição química da madeira, principalmente associados à espécie supracitada, as características e técnicas de produção de elementos de madeira laminada colada.

A colagem da madeira é uma técnica muito antiga, mas também muito complexa, pois envolve diversas variáveis, que englobam desde as características da madeira até as propriedades inerentes ao adesivo. A satisfação no processo de colagem está atrelada a linha de cola, a qual serve para predizer o desempenho do adesivo quando solicitado por esforços mecânicos.

Processos que envolvem a reconstrução da madeira são proveitosos para a indústria, pois as características estruturais podem ser facilmente manejadas de acordo com a finalidade da peça. Por isso, faz-se necessário compreender as características de cada material utilizado no procedimento de colagem, aspirando melhores desempenhos de qualidade da peça, custos e aproveitamento. Neste sentido, cada adesivo possui propriedades próprias, o que os tornam mais aplicáveis em peças estruturais em relação aos outros.

3.1. Madeiras de florestas plantadas

A variação na demanda dos produtos florestais está condicionada ao crescimento populacional e o aumento de renda per capita. Ainda, se somam a estes, o fato que a matéria prima advinda de florestas plantadas são cada vez mais necessárias para o suprimento do mercado de produtos e serviços florestais, uma vez que as medidas de proteção das florestas naturais tornam sua exploração cada vez mais restrita (MAPA, 2018).

Produtos de origem florestal estão presentes em segmentos que utilizam a madeira como matéria-prima sendo eles o de celulose e papel, o de laminados, serrados e compensados, o de siderurgia e carvão vegetal e o de energia e, no setor de bens de consumo como as indústrias gráficas, moveleira, química e a

construção civil. Assim, a crescente demanda por madeira, energia e fibras tem encarado a floresta como um bem precioso e estratégico (IBÁ, 2016).

Essas plantações suprem à demanda das indústrias de madeira no Brasil e devido à alta produtividade das plantações, custos de produção relativamente baixos, extensa área de terra e tecnologia avançada o setor proporciona relevância para a economia brasileira, sendo competitivo, com vasto potencial de expansão e ainda ligado a bases sustentáveis, comprometido com a preservação ambiental, já que o plantio de árvores preserva as florestas primárias (CALIL NETO, 2011; MAPA, 2018).

O segmento destaca-se ainda pelo elevado impacto social e econômico, pois, aliado à expansão do setor há a geração de emprego e de renda ao longo da cadeia produtiva de transformação da madeira. Uma vez que o cultivo de florestas permite a todos os produtores a diversificação de renda, seja por meio de plantios puros (bosquetes), ou até mesmo por sistemas integrados como o sistema silvipastoris e agroflorestais (SANTAROSA et al., 2014; MOREIRA et al. 2017).

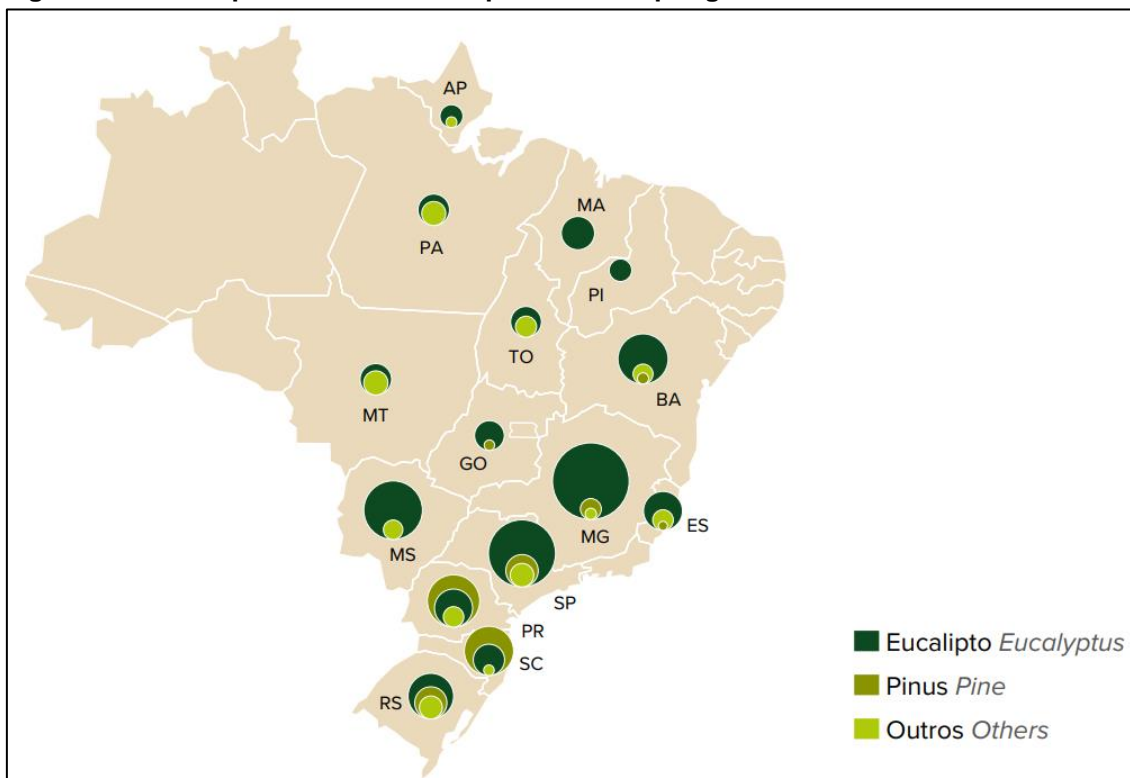
Também pode-se destacar que as atividades de base florestal nos municípios são empregadas em áreas de menor índice de desenvolvimento humano (IDH), englobando a participação de pequenos e médios produtores na cadeia produtiva. Com isso, o setor abrange oportunidades de emprego e geração de riqueza, contribuindo para o desenvolvimento regional sustentável a partir do cultivo de árvores como alternativa viável economicamente e ambientalmente (ANDREJOW, 2018; IBÁ, 2019).

O ramo de florestas plantadas brasileiras vem mostrando um aumento em sua capacidade de produtividade florestal, sendo resultante, além dos fatores ambientais propícios à silvicultura, a aplicação de novas tecnologias, aliadas ainda ao melhoramento genético de semente e clonagem de espécies. Esse aprimoramento tem levado o país a se destacar na produtividade florestais, de espécies plantadas, como o Eucalyptus (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE - MMA, 2019; TORRES et al., 2016; IBÁ, 2019).

O Brasil possui cerca de 10 milhões de hectares em florestas plantadas, os gêneros Eucalyptus e o Pinus destacam-se, representando aproximadamente 96% do total. De acordo com a Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ), os plantios mais significativos estão localizados nos Estados de Minas Gerais (24%), São

Paulo (17%) e Mato grosso do Sul (16%) para o *Eucalyptus*, e no Paraná (42%), Santa Catarina (34%), Rio Grande do Sul (12%) e São Paulo (8%) para o Pinus, conforme ilustrado na Figura 1 (IBGE, 2018; IBÁ, 2019; MAPA, 2019). Ainda nos últimos anos mostrou-se uma expansão para o gênero Eucalipto, enquanto o Pinus manteve-se praticamente estável (IBÁ, 2019).

Figura 1: Árvores plantadas no Brasil por Estado e por gênero 2018.



Fonte: Relatório IBÁ, 2019.

3.2. O Gênero *Eucalyptus*

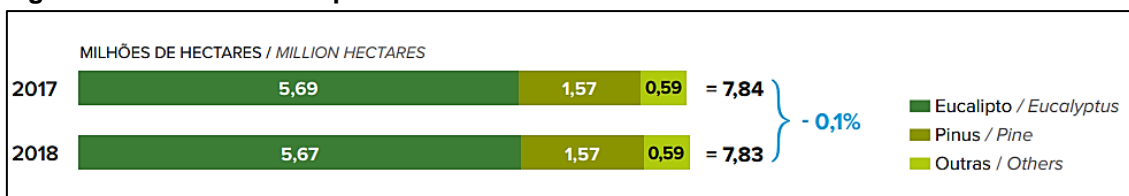
O gênero *Eucalyptus*, pertence à família Myrtaceae, é originário da Austrália, com exceção das espécies *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus deglupta*, as quais são oriundas de outras regiões das ilhas da Oceania. São mais de 670 espécies que já foram identificadas, e ainda, existe muitas variedades e híbridos (BERTOLA, 2013). Quanto a sua distribuição em escala mundial, o plantio de eucalipto possui destaque, estima-se que 20 milhões de hectares estejam plantados e distribuídos em zonas tropicais, subtropicais e temperadas (REJMÁNEK; RICHARDSON, 2011).

O gênero apresenta uma alta produtividade e potencialidade de adaptação em diversas regiões do nosso país. Conhecido por possuir uma alta taxa de crescimento, plasticidade, forma retilínea do fuste, desrama natural, facilidade de propagação (sexuada e assexuada), e ainda com madeira de variações tecnológicas adaptadas para as mais heterogêneas condições de uso (OLIVEIRA et al., 1999; STACKPOLE et al., 2011).

O *Eucalyptus* é um gênero de grande aceitação no setor de produtos florestais e vem sendo apresentado como um grande substituto de madeiras de florestas nativas e de madeira de pinus, em razão da insuficiência destas para o mercado florestal de produtos industrializados (SBS, 2000). Também, a redução na distância dos centros consumidores, como uma alternativa viável para o suprimento de madeira para a demanda do mercado.

A Figura 2 expõem que o setor brasileiro de florestas plantadas ostenta uma área de 7,83 milhões de hectares, sendo, deste total, 5,69 milhões de hectares são de eucalipto, assim, dentre as florestas plantadas que fornecerem matéria prima a indústria madeireira nacional, comprova-se que o gênero *Eucalyptus* é o de maior importância (IBÁ 2019).

Figura 2: Área de árvores plantadas



Fonte: Relatório IBÁ, 2019.

O *Eucalyptus* sp é uma das espécies mais importantes na indústria madeireira brasileira, em virtude da facilidade de implantação em grandes maciços e versatilidade de sua madeira (BATISTA et al., 2016). Seguindo a tendência mundial, empresas buscam em opções florestais novas alternativas para agregar maior valor aos produtos, desta forma, o gênero *Eucalyptus* surge como opção potencial para a utilização em produtos de maior valor agregado, que inclui desde a madeira serrada a aplicações na construção civil madeira processada para produção de aglomerados, chapas de fibra, lâminas e outros (OLIVEIRA, 1997; LIMA, 2006; MAPA, 2018).

O rápido crescimento, a boa qualidade da madeira e fibras, e as condições edafoclimáticas (relação espécie-solo-clima para o plantio), fizeram o eucalipto ter a preferência do setor em sua utilização em plantios florestais (SANTAROSA et al., 2014; DABA, 2016). Ainda o melhoramento genético dessas plantas com a finalidade de obter variedades, ou híbridos, torna-os capazes de apresentar um maior rendimento (CARVALHO, 2010).

3.2.1. Híbrido do gênero *Eucalyptus*

A produtividade e qualidade da madeira dos plantios florestais de *Eucalyptus* sp no Brasil aumentaram de maneira significativa por conta da produção de híbridos interespecíficos deste gênero, seguida da clonagem dos melhores indivíduos das progênes geradas (SANTOS et al., 2013).

Os híbridos do gênero *Eucalyptus* vêm adquirindo importância com árvores de madeiras mais uniformes, ajudando a evitar ineficiências e melhorando a sua utilidade, proporcionado pelo rápido crescimento, resistentes a pragas e doenças e com madeira de alta qualidade (COSTA, 2014).

O *Eucalyptus urograndis* é um híbrido desenvolvido no Brasil, gerado a partir do cruzamento de duas espécies do gênero *Eucalyptus* sp, sejam estes o *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*. As espécies precursoras deste híbrido apresentam características significativas para sua utilização, como resistência mecânica e a tolerância ao déficit hídrico advinda do *Eucalyptus urophylla*; também, o bom desempenho silvicultural do *Eucalyptus grandis* (CARVALHO, 2000; BARBOSA, 2013; GONÇALEZ et al., 2014).

O cruzamento obteve um híbrido com um crescimento favorecido, entre seis e sete anos, além de um leve aumento na densidade básica, a fim de se obter melhorias no rendimento e nas propriedades físicas (BASSA et al., 2007; CARVALHO, 2000; COSTA 2014). Com uma densidade maior do que as espécies que o originaram e uma alta capacidade de produção de celulose, o híbrido *Eucalyptus urograndis* está entre os clones mais plantados em reflorestamento no Brasil (COSTA, 2014).

Este híbrido é amplamente comercializado como matriz na produção de papel e celulose, carvão vegetal, painéis de aglomerados, fibras de madeiras e peças de madeira laminada colada (IWAKIRI et al., 2013).

3.3. Madeira Laminada Colada (MLC)

A redução da disponibilidade de madeira de florestas nativas (primárias) impulsionou o desenvolvimento de madeira projetada, que é uma alternativa de material compósito à madeira maciça, composta de madeira e adesivos, e está disponível em diversas variedades, sendo os tipos mais comuns: madeira laminada de folheado (Madeira Microlaminada), madeira laminada colada, viga composta I, madeira laminada cruzada. Além da sustentabilidade, e a escolha de produtos de madeira por causa de sua estética. (GASTON 2014; GOSSELIN et al., 2017; MALLO; ESPINOZA 2015; MARKSTRÖM et al. 2018; BAKAR et al., 2004; BAYATKASHKOLI, ALI et al., 2011; SEGUNDINHO et al., 2013; NADIR; NAGARAJAN, 2014; ANSHARI, 2017).

As propriedades mecânicas e físicas desses produtos dependem das relações de interação entre a qualidade do recurso, o processo de fabricação e as aplicações. Em geral, suas propriedades mecânicas são mais uniformes em comparação com a madeira maciça (RIBEIRO et al., 2009).

A madeira laminada colada (MLC), trata-se de um produto estrutural composto pela associação de lâminas (tábuas) de madeira, que apresentam dimensões relativamente reduzidas quando comparadas a dimensão final da peça constituída. A disposição das lâminas é feita de forma que as fibras fiquem paralelas entre si e a união dessas lâminas se dá através do processo de colagem (Figura 3) (PFEIL, 2003; FIORELLI; DIAS, 2006; SEGUNDINHO et al. 2013; GOMES et al., 2020).

Figura 3: Ilustração de uma peça de madeira laminada colada (MLC).



Fonte: Acervo do autor, 2020.

A prática de execução de estruturas constituídas de madeira laminada colada é antiga, o uso desse conceito originou-se na Europa por volta do século XIX, sendo a primeira estrutura executada data de 1893, na construção de um auditório em Basel, na Suíça, obtendo ascensão após a segunda guerra mundial, devido a introdução de adesivos mais duráveis (PETRAUSKI, 1999; MOODY; LIU, 1999; GOMES, 2020).

No início a utilização da madeira laminada colada estava restrita a ambientes estruturais internos, entretanto, com o desenvolvimento de adesivos hidro resistentes, sua aplicação pode ser explorada em ambientes externos, permitindo a utilização em construções de estruturas como coberturas e pontes (FIORELLI; DIAS, 2006).

Nos últimos anos o conceito de madeira laminada colada passou a ser amplamente utilizado, permitindo a fabricação de componentes estruturais com grandes dimensões, com curvaturas e propriedades mecânicas aprimoradas, permitindo a execução de maiores vãos. A aplicação deste conceito permite que a madeira seja empregada de forma mais eficiente, explorando melhor suas propriedades mecânicas (TSOUMIS, 1991; BAYATKASHKOLI et al. 2011).

Países ocidentais, europeus e do sudeste asiático estão utilizando extensivamente a madeira, particularmente os produtos de madeira projetada, tanto para fins estruturais quanto não-estruturais. Esses elementos são usados de forma reta ou curva em inúmeras aplicações de construção, incluindo complexos esportivos, edifícios comerciais, igrejas e casas residenciais (Figura 4). Portanto, o emprego da madeira sob a técnica do laminado colado, pouco difundida no Brasil, é marcante em países do hemisfério norte (BAKAR, et al., 2004; SZUCS et al., 2006; BAKAR, et al., 2004; BAYATKASHKOLI et al., 2011; SEGUNDINHO, et al., 2013; NADIR; NAGARAJAN, 2014).

Figura 4: Edifícios em madeira laminada colada e madeira laminada cruzada (Brock Commons Tallwood House, Vancouver, Canada (a); Mjøstårnet, Brumunddal, Noruega (b)).



Fonte: The University of British Columbia, 2020 (a); The skyscraper center, 2019 (b).

3.3.1. Vantagens da madeira laminada colada

Por se tratar de um produto obtido da associação de lâminas de madeira, uma das maiores vantagens da MLC é um aumento considerável do aproveitamento geral da madeira, permitindo o uso de peças de tamanhos reduzidos na formação de produtos que formem um componente estrutural de maior dimensão e valor agregado.

Além disso, os defeitos de redução de resistência que ocorrem naturalmente são aleatorizados ao longo do volume do componente estrutural. O aspecto da madeira laminada colada resolveu fundamentalmente o problema de a madeira não poder satisfazer os requisitos de engenharia sobre dispersão de tamanho e defeitos, ainda, é capaz de promover uma mitigação da exploração excessiva de florestas, já que possibilita um melhor aproveitamento da matéria prima (ROWELL, 2005; MACIEL et al., 2010; ANSHARI, 2017).

Outro fator importante é a classificação das peças, eliminando defeitos, como nós e rachaduras, selecionando peças de maior resistência para regiões em que haverá maiores solicitações e ainda a possibilidade da variação de espécies de madeira dentro de uma mesma estrutura (ABNT, 1997; ROWELL 2005; ROSS, 2010).

Utilizando peças de menor dimensão e com secagem controlada reduz-se a extensão das fissuras por retração, em comparação com os elementos de madeira sólida com grandes dimensões. Além disso, maiores valores de resistência para o estado seco também são obtidos (ABNT, 1997; BERGLUND; ROWELL, 2005).

O desenvolvimento da madeira laminada colada, em que os elementos estão em paralelo, traz uma oportunidade para a produção de elementos de madeira com dimensões transversais quase ilimitadas. O fato de a madeira laminada colada possuir uma excelente relação resistência/massa em relação ao aço e concreto, permite ser utilizada em estruturas com grandes vãos. No entanto, o comprimento dos elementos de madeira é limitado devido a problemas de produção e transporte (AICHER et al., 2012).

A tecnologia de colagem específica permite a "soldagem/colagem" de peças de madeira laminada colada quase *in situ*. Isso supera todos os antigos obstáculos econômicos e técnicos impostos por comprimentos de transporte limitados e os altos custos de transporte. A nova tecnologia de junção possibilita a fabricação de peças de grande comprimento em quase qualquer lugar, enviando a limitação do comprimento pelo transporte e depois montando estas no local sem perdas de resistência e rigidez. Tal prática construtiva era reservada até o momento para construções em aço soldado (AICHER et al., 2012; CEPELKA; MALO, 2014).

Ao laminar peças menores de madeira, em um recurso utilizado de forma mais sábia e econômica. Os projetos de madeira laminada colada são muito racionais e a madeira colada é utilizada como um material de construção funcional. Principalmente é usado para destacar a estética da madeira, isso faz com que arquitetos e engenheiros a explorem para uma composição agradável integrando-a ao ambiente (HERZOG, 2013; VILUMA; GABRENAS, 2019).

3.4. Colagem da Madeira

A colagem é um dos mais importantes sistemas de fixação utilizados em produtos florestais. Grandes volumes de adesivos são empregados com sucesso em indústrias, adicionados a partículas e fibras de madeira, resultando em produtos como painéis, peças de madeira laminada colada e madeira laminada cruzada (PIZZI e MITTAL, 2017).

O conceito do processo de colagem envolve a adesão que é definida como um fenômeno físico e químico, interfacial, que prevê uma interação entre superfícies sólidas. Enquanto o adesivo é uma substância capaz de unir materiais a partir do contato de suas superfícies, os aderentes são os materiais sólidos ligados ao adesivo, comumente chamados de substratos. Os mecanismos envolvidos no processo de adesão podem ser explicados por teorias mecânicas, difusão de polímeros e adesão química (MARRA, 1992; ABMCI; 2003).

Na teoria de adesão mecânica, o adesivo em forma líquida penetra nos substratos porosos devido a sua fluidez, então o processo de solidificação ocorre formando o ancoramento entre os substratos. Na maioria dos casos, o aumento da adesão por esse tipo de ligação pode ser atribuído simplesmente ao aumento da área interfacial, devido à rugosidade da superfície, e no quanto as características do substrato irão permitir a penetração do adesivo nos poros (SCHULTZ; NARDIN, 1994; PIZZI; MITTAL, 2017).

A teoria da difusão de polímeros admite que a adesão ocorra por meio da difusão de cadeias de polímeros a nível molecular através da interface, que permite conseqüentemente uma absorção gradual. Esse mecanismo supõe que as cadeias poliméricas são móveis e solúveis entre si. Para problemas de adesão, como em processos de penetração e solidificação do adesivo, esse fato é relevante. Portanto, se o fenômeno da interdifusão está envolvido, a resistência da junta irá depender de diferentes fatores, como tempo de contato, temperatura, natureza e peso molecular dos polímeros (SCHULTZ; NARDIN, 1994; MANO; MENDES, 2004).

Já na adesão química, o fenômeno de adesão ocorre por meio de ligações químicas iônicas e covalentes e/ou forças intermoleculares secundárias. A resistência relativa ou energia de colagem de cada tipo de

interação depende da força da ligação e o tipo de ligação química, depende da reatividade entre o adesivo e substrato (SCHULTZ; NARDIN, 1994; PIZZI, 1994).

A colagem de peças de madeira é realizada com espalhamento do adesivo sobre a superfície da madeira, a qual terá a fase de movimento como início do processo e se finaliza com a fase de solidificação, formando ancoramento entre as peças. Os adesivos de madeira são utilizados há muitos séculos e vem melhorado a cada ano, principalmente com relação ao progresso químico (SCHULTZ; NARDIN, 1994; COSTA TIENNE, 2006; PIZZI; MITTAL, 2017).

A qualidade da colagem e, portanto, as propriedades e o desempenho de derivados de madeira são determinados por três parâmetros principais: a madeira, especialmente a superfície da madeira, incluindo a interface entre a madeira (superfície) e a linha de cola; o adesivo aplicado; as condições de trabalho e parâmetros do processo (PIZZI; MITTAL, 2017).

3.5. Estudos sobre resistência à compressão de peças de madeira laminada colada

A propriedade da resistência a compressão paralela às fibras é importante para o sucesso da estrutura da madeira laminada colada. Uma vez que o elemento está em serviço, seja como um pilar ou uma viga, o elemento estrutural estará sob tensões normais, atuantes na direção paralela às fibras, e uma boa ligação de lâminas é necessária para suportar a tensão solicitante (FARIA et al., 2019).

Bons resultados para a resistência a compressão e ao cisalhamento indicam a qualidade adesiva para aplicações externas, satisfazendo assim condições adesivas para aplicação estrutural de acordo com NBR 7190 (ABNT, 1997).

Almeida et al., (2014) destacam que o conhecimento dessas propriedades é imprescindível para uma utilização racional do material e um correto dimensionamento. Desta forma, nota-se a crescente difusão em estudos evidenciando a propriedade mecânica de compressão paralela as fibras.

Em seu estudo teórico experimental sobre pontes protendidas de *Eucalyptus citriodora*, Fonte (2004) obteve o valor médio de 57,8 MPa para

resistência a compressão paralela às fibras de peças de MLC, satisfazendo o desempenho necessário para aplicação em estruturas robustas.

Segundinho et al. (2018), analisando madeira laminada colada de *Eucalyptus* sp., produzida com adesivos resorcinol-fenol-formaldeído e poliuretano, evidenciam que os corpos de prova de MLC colados com poliuretano na condição seca tiveram uma resistência à compressão paralela as fibras na ordem de 50,90 MPa e na condição saturada em torno de 30,98 MPa.

Magalhães e Santos (2009), estudando parâmetros de projeto do ponto de vista arquitetônico e estrutural, em madeira laminada colada de *Eucalyptus grandis*, constataram que resultados de resistência à compressão paralela às fibras da ordem de 84 MPa são adequados a um material estrutural.

Analisando madeira lamelada colada com *Acacia mangium* com adesivos estruturais, Segundinho et al. (2015) constataram que a resistência de compressão paralela às fibras não diferiu estatisticamente entre diferentes tipos de adesivos.

Faria et al. (2019), estudando o número de lâminas no comportamento mecânico de madeira laminada colada (MLC) de *Toona ciliata*, produzidas com adesivo poliuretano vegetal, notaram que não houve diferença estatística para as propriedades de compressão paralela às fibras e resistência ao cisalhamento para sólidos em madeira e para as peças laminadas coladas, chegando a um valor de compressão paralela as fibras de 22,86 MPa.

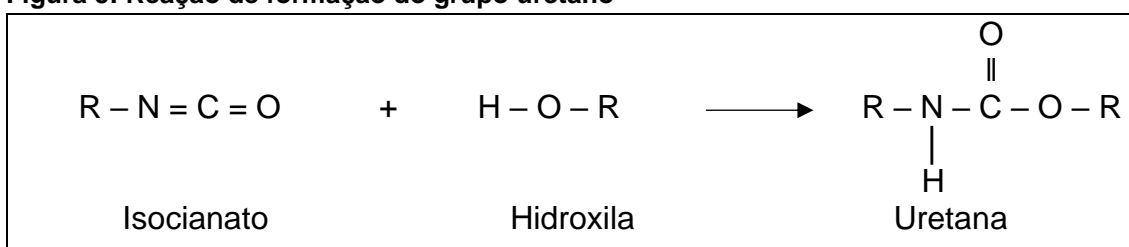
Observa-se, portanto, a partir dos estudos apresentados, que a resistência pode sofrer alteração dependendo do adesivo e da estrutura anatômica do material, e ainda é importante compreender a interação entre o substrato e o adesivo para assimilar toda a eficiência do componente estrutural.

3.6. Adesivo poliuretano de base vegetal

Os poliuretanos são compostos orgânicos descobertos por Otto Bayer, em 1937, a partir da reação de dois compostos que resultava em um produto de estrutura macromolecular (VILAR, 2002). O desenvolvimento comercial deu-se na Alemanha, com expansibilidade década após década, iniciando com a fabricação de espumas rígidas e adesivos, mais tarde elastômeros e espumas flexíveis, e recentemente a utilização em tintas e vernizes (QUINI, 2011).

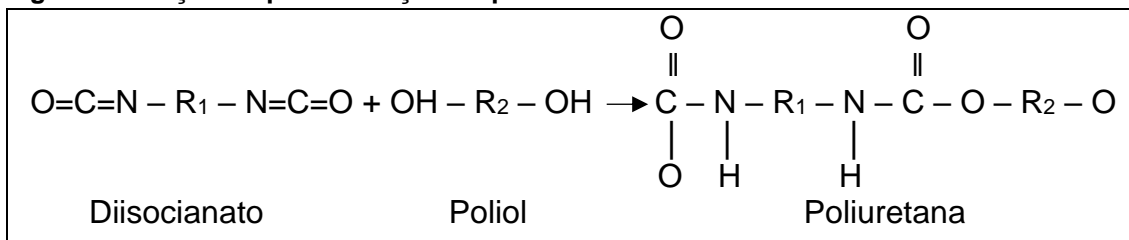
As poliuretanas são polímeros que possuem em suas unidades repetitivas os grupamentos uretanos produzidos pela reação de compostos contendo grupamentos hidroxilas com grupamentos isocianatos (Figura 5). Ainda, é possível além dos grupos uretanos, as poliuretanas possuírem hidrocarbonetos alifáticos e aromáticos, grupos éster e éter, ureia, amida, dentre outros. A polimerização dos uretanos ocorre entre dois ou mais grupamentos de isocianato e um álcool polifuncional, composto que contém o grupo –OH, definido como um polioliol (Figura 6) (VILAR, 2002; LOPES, 2008; CANGEMI et al., 2009).

Figura 5: Reação de formação do grupo uretano



Fonte: Adaptado Vilar 2002.

Figura 6: Reação de polimerização do poliuretano



Fonte: Adaptado Vilar 2002.

Os adesivos poliuretanos podem ser obtidos a partir de duas rotas. A primeira é uma única etapa resultando em um adesivo poliuretano monocomponente, onde é apresentado o bloqueio linear, destacando-se na estrutura básica os três tipos de intermediários de síntese: o polioliol, diisocianatos e extensores de cadeia.

A segunda rota ocorre em duas etapas, e resulta em uma resina bicomponente. Primeiro, obtém-se um pré-polímero, em que a polimerização está incompleta. Este pré-polímero, quando misturado estequiometricamente a um polioliol, resulta em poliuretano. Desta forma, as particularidades do polímero como interpenetração, flexibilidade, força inter-cadeia são explicadas a partir do

balanceamento e das características químicas do polioliol utilizado no processo de reação com o pré-polímero (JESUS, 2000).

O processo de reação química do poliuretano durante a colagem ocorre em etapas. Primeiramente, ocorre uma mudança do estado físico líquido-sólido e o adesivo assume comportamento termoplástico. Seguidamente, o grupamento isocianato presente no adesivo reage com o grupamento hidroxila (OH) da madeira, e ainda, com a umidade presente no ar e na madeira, então, forma uma estrutura reticular semelhante à de um adesivo termorrígido. Nesta segunda fase, o adesivo adquire uma resistência eficiente ao calor, frio e solventes (GARCIA; RECH, 2011; PIZZI; MITTAL, 2017).

Os adesivos poliuretanos podem ter seus polióis advindos de diferentes fontes tanto de petróleo quanto de outras fontes, cujos monômeros podem ser obtidos de óleos vegetais como soja, canola, milho, palma e mamona (LUO et al., 2008).

Para a colagem da madeira geralmente são utilizados adesivos sintéticos, contudo alguns são tóxicos para o ser humano. Desta forma, a aplicação de adesivos de fontes naturais torna-se atrativa, porque possuem potencial para substituição de derivados petroquímicos. A maior parte da atenção é focada na pesquisa e desenvolvimento de materiais mais novos, a partir de materiais renováveis (SUN et al., 2012; PIZZI; MITTAL, 2017).

Atualmente, os polióis à base de óleo vegetal são alternativas às matérias-primas à base de hidrocarbonetos para a síntese de poliuretanos (PU), pois são ecológicos e competitivos em termos de custos (MUTLU; MEIER, 2010).

Os poliuretanos obtidos de óleos vegetais, como o óleo de mamona, são tipicamente resistentes à água, flexíveis devido à presença de uma longa cadeia de ácidos graxos e apresentam bom desempenho em condições de baixa temperatura, com velocidades de cura que podem variar de acordo com o fabricante (ZHANG; ZHOU, 1999; GAO; ZHANG, 2001; VALERO et al., 2009; MUTLU; MEIER, 2010; MALIK; KAUR, 2018).

Sua competitividade em relação a outros polímeros está basicamente ligada a três fatores: deriva de uma matéria-prima natural e renovável, suas propriedades mecânicas são superiores às dos polímeros derivados de petróleo e o custo dos diisocianatos no Brasil é razoável. Também, sabe-se que o adesivo

é curado à temperatura ambiente, mas a cura pode ser acelerada utilizando temperaturas de 60 a 90 °C (CLARO NETO, 1997; DIAS; LAHR, 2004).

O emprego de adesivo poliuretano obtido de óleos vegetais pode ser empregado na produção de chapas de madeira aglomerada, madeira laminada colada e laminada cruzada dentre outros, devido à forte resistência à água e aos raios UV, forte resistência mecânica e o fato de que é derivado de uma substância natural e fonte renovável facilmente encontrada na maior parte do país (CLARO NETO, 1997; DIAS; LAHR, 2004).

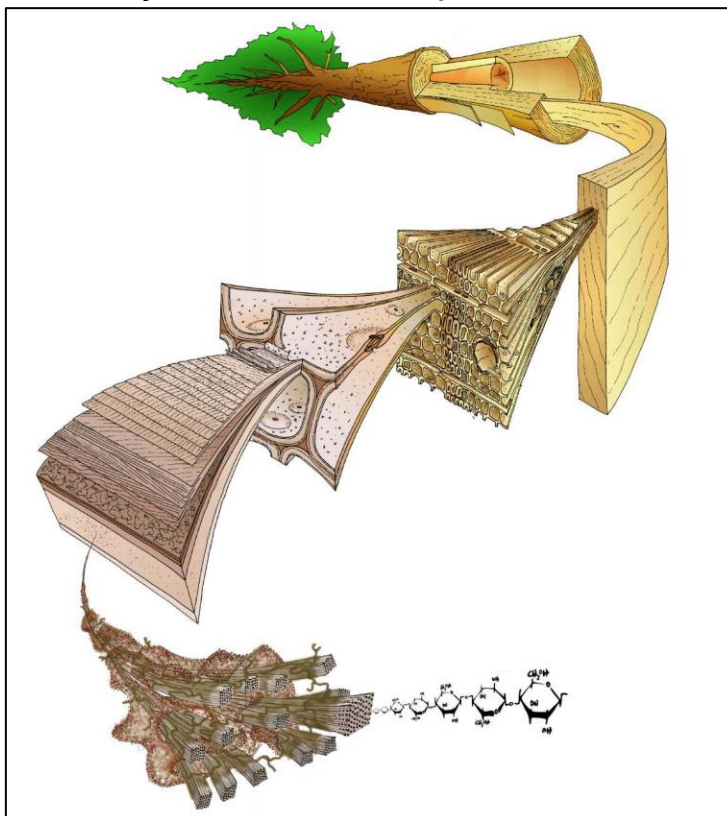
Alguns estudos que analisaram o comportamento do adesivo de poliuretano para uso em madeira laminada colada com madeira de espécies reflorestadas (*Eucalyptus* e *Pinus*) (JESUS, 2000; AZAMBUJA e DIAS, 2006; AZAMBUJA, 2006) salientam a eficiência do adesivo quanto a resistência ao cisalhamento paralela às fibras, resistência à tração perpendicular e paralela às fibras, sendo uma eficiente alternativa para o uso em madeira laminada colada ou peças de madeira projetada.

3.7. Fatores que afetam a colagem de madeira

A madeira é um material heterogêneo, possuindo diferentes tipos de células, adaptadas a desempenharem funções específicas (Figura 7). Numa descrição geral, a madeira é constituída primordialmente por células alongadas, cilíndricas, ocas e fechadas nas extremidades, denominadas fibras, que correspondem a 60 a 95% do volume da madeira. Devido à sua origem biológica, os parâmetros relacionados às características da madeira que influenciam a colagem e seu desempenho, muitas vezes não podem ser alterados (REIS et al., 1982; TRUGILHO, 1996; GOMIDE; COLODETTE, 2007; ALBUQUERQUE; LATORRACA, 2012).

A característica dos produtos derivados da madeira está associada à qualidade da própria madeira que é usada para a sua produção que, por sua vez, depende de um conjunto de características químicas, físicas, mecânicas e anatômicas da mesma. Essas propriedades, ao serem adequadamente avaliadas, são parâmetros indicativos que auxiliam no emprego de determinada espécie vegetal para um fim específico (FREDERICO, 2009).

Figura 7: Ilustração da estrutura hierárquica da madeira.



Fonte: Adaptada de HARRINGTON, 2002.

3.7.1. Propriedades anatômicas

A madeira é um tecido complexo, formado a partir do câmbio vascular, constituído por diferentes tipos de células lenhosas. O comportamento das propriedades da madeira está intimamente relacionado à estrutura e à disposição de suas células. Portanto, a análise anatômica pode determinar porque algumas espécies são melhores para determinadas finalidades (EVANGELISTA et al., 2010; TUNG et al., 2010; BRISOLA; DEMARCO, 2011).

As características anatômicas da madeira influenciam o seu comportamento tecnológico e refletem diretamente no processo de industrialização, tendo como destaque as dimensões das fibras e vasos, a densidade e a retratibilidade, com forte variação destas características no sentido radial e longitudinal do tronco das árvores (BONDUELLE et al., 2015; FREITAS et al., 2015; GALLIO et al., 2016).

As condições de movimentações do adesivo no interior da madeira estão relacionadas às propriedades anatômicas da madeira, ou seja, o desempenho

da colagem esta intrinsicamente ligado a penetrabilidade do adesivo (IWAKIRI, 2005).

A porosidade e a permeabilidade das madeiras afetam gradativamente a adesão, pois a adesão mecânica depende dos espaços vazios, para que seja possível a penetração, permitindo, depois da cura, uma fixação do adesivo por ancoramento (PRATA 2010). No entanto, é possível que uma alta porosidade possa ocasionar uma penetração excessiva quando a madeira é considerada de baixa densidade, formando uma linha de cola faminta, espécie de camada apenas de cola, e comprometendo a adesão entre os substratos (ALBUQUERQUE; LATORRACA, 2005).

Os principais parâmetros avaliados para qualidade da madeira são a densidade, porosidade, teor de extrativos, pH e o teor de cinzas. Estes fatores influenciam diretamente no comportamento e ações de mobilidade dos adesivos empregados na produção de peças coladas (IWAKIRI, 2005; BILA et al., 2016).

A presença do lenho inicial ou tardio também são relacionadas à qualidade da colagem de peças. O lenho inicial e o lenho juvenil, que possuem maior porosidade e anéis de crescimento largos, constituem uma madeira que tende a inferior qualidade, pois é mais fraca, com contração e inchamento mais elevados ao longo da grã¹. Essa madeira é fácil para processar a colagem, devido a sua baixa densidade e estrutura porosa, porém com baixa resistência e alta instabilidade. Na madeira do lenho adulto e tardio os anéis de crescimento são formados por células robustas atribuindo melhor estabilidade à colagem (MARRA, 1992).

Dentro de uma mesma espécie, ocorrem variações significativas ao longo do tronco, tanto no sentido da base ao topo, quanto na direção da medula até a casca. Além disso, existem diferenças entre o cerne e o alburno, madeira de início e fim de estação de crescimento e, em escala microscópica, entre células individuais. No entanto, madeiras de alta densidade são difíceis de colar porque possuem paredes de células espessas e lúmens pequenos, fazendo com que a penetração do adesivo seja limitada, obtendo-se uma junta de qualidade inferior (TRUGILHO 1996; MENDES, 1996; IWAKIRI, 2005; LIMA 2006).

¹ A grã da madeira refere-se ao alinhamento geral dos elementos celulares na direção ao eixo longitudinal do tronco ou peça de madeira (PANSIN; DE ZEEUW, 1980).

3.7.2. Propriedades químicas

A composição química da madeira pode expressar variabilidade entre árvores e até mesmo dentro da mesma árvore, sendo decorrente da espécie, condições de crescimento, maturidade e dos tipos de tecidos da planta (KLOCK; ANDRADE, 2013).

Quimicamente a madeira pode ser definida como um biopolímero tridimensional formado por celulose, polioses (hemicelulose) e lignina, e ainda em menor quantidade extrativos e substâncias inorgânicas (cinzas). Porém, a substância química mais abundante em uma árvore viva é a água, mas na madeira em base seca, possui a parede celular formada por um polímero de açúcar (carboidratos 65 a 75%), que são combinados com a lignina (18 a 35%) (ROWELL et al., 2012).

A caracterização química da madeira expressa importância devido sua influência direta na utilização da madeira em diversos ramos da indústria de base florestal, como painéis de madeira (madeira laminada colada), celulose e papel, e geração de energia de biomassa florestal (MARRA, 1992; KLOCK et al. 2005; BRAND, 2010; IWAKIRI et al., 2012b).

A celulose é um polissacarídeo de cadeia linear, em que, apresenta estrutura organizada e parcialmente cristalina, é o principal constituinte da parede celular dos vegetais, e nos vegetais superiores aparece sob a forma de fibras ao longo dos componentes fundamentais. Já as hemiceluloses são polissacarídeos das paredes celulares, de baixo peso molecular e sempre associado à lignina e à celulose, sua função primária não é completamente compreendida. É possível que elas sirvam como um intermediário entre celulose e lignina, talvez facilitando a incrustação das microfibrilas (TRUGILHO; LIMA; MENDES, 1996; GOMIDE; COLODETTE, 2007).

A lignina é outro componente estrutural da madeira, apresenta-se como o componente mais hidrofóbico da madeira, atuando como material cimentante ou adesivo entre as fibras. Está presente dentro das células individuais e na parede celular, onde se encontra associada à celulose e hemicelulose, atribuindo rigidez à célula. Quimicamente é um material amorfo, heterogêneo polifenólico e ramificado (BOWYER; SHMULSKY; HAYGREEN, 2007; ROWELL et al., 2012; VITAL; CARNEIRO; PEREIRA, 2013).

Os extrativos são componentes da madeira que não fazem parte da estrutura química da parede celular, de baixo ou médio peso molecular exceto alguns, como por exemplo os taninos, incluem um elevado número de compostos, sendo extraíveis em água ou solventes orgânicos neutros. A presença de alguns desses componentes influencia a resistência ao ataque de fungos e insetos pela sua natureza fenólica, promovem efeito estético devido à: coloração, odor, permeabilidade (GOMIDE; COLODETTE, 2007; BRISCHKE et al., 2013; MOORE et al., 2015; REINPRECHT, 2016).

A constituição química da madeira interfere diretamente no processo de colagem da madeira. Os tipos de extrativos e suas variações quantitativas, de acordo com a espécie e idade da madeira podem acarretar problemas no processo de polimerização do adesivo, ou até mesmo uma reação entre o extrativo e o adesivo, problematizando assim, o consumo do adesivo e o processo de cura (HILIG, 2000; LIMA, 2006; SANTOS, 2008; MORAIS, 2008).

Santos (2008) e Morais (2008) destacam que para a produção de madeira laminada colada e painéis, espécies com baixos teores de extrativos são as mais desejadas. Na madeira de eucalipto o teor de glicanas e, conseqüentemente o de celulose, bem como o de extrativos, tendem a aumentar com a idade das árvores.

De acordo com Morais (2008) o clone de *E. grandis* x *E. urophylla* exprime uma tendência de queda no teor de extrativos com o aumento da idade até os cinco anos e elevação após esta idade. Esta mudança na tendência de queda se deve ao processo conhecido como cernificação, que é a deposição de extrativos com conseqüente formação do cerne.

Os extrativos presentes na superfície da madeira são os principais contribuidores para a inativação da superfície, ocasionando um pobre umedecimento do adesivo. Durante o processo da cura ou secagem do adesivo os extrativos podem migrar para a superfície e bloquear o contato do adesivo com a madeira. Isto evita o ancoramento após a cura, gerando uma fraca ligação mecânica. Além disso, resinas e exudados oleosos são hidrofóbicos, e como os adesivos utilizados em madeira, na sua maioria, usam a água como carreador, causando assim problemas de umedecimento, fluxo e penetração da superfície coberta pelo extrativo (ROSS et al., 2010; ROWELL et al., 2012).

O potencial Hidrogeniônico (pH) na madeira está ligado com a movimentação dos extrativos presentes no lenho, que podem migrar de uma região para outra (interna-externa), essa medida ainda pode favorecer o pré-endurecimento do adesivo, limitando a umectação, penetração e fluidez. (MARRA,1992; IWAKIRI, 2005; BILA, 2014).

Embora os adesivos possuam valores de pH mais controlados, de modo a produzir a solubilidade e colaborar com a taxa de endurecimento. No procedimento de colagem o pH da madeira pode entrar em conflito com o do adesivo e afetar a ligação adesiva madeira-adesivo-madeira. Ainda, um pH muito baixo ou pH muito alto, podem provocar uma formação excessiva de espuma na mistura prejudicando sensivelmente a aplicação do adesivo. As variações do pH da madeira e adesivo não devem ultrapassar os limites mínimo e máximo de 2,5 e 11, respectivamente (MARRA,1992; IWAKIRI, 2005; JUIZO, 2015).

O pH da madeira também pode ser influenciado pelos componentes minerais inorgânicos na madeira, que raramente é inferior a 0,2% ou superior que 1% do seu peso seco, e em madeiras do gênero *Eucalyptus*, esse teor de cinzas raramente chega a 1%. Ainda, a presença de alguns elementos como, cálcio, fósforo e o enxofre, em dosagem elevadas, podem ser prejudiciais ou até mesmo limitar o material para alguns fins industriais (IWAKIRI, 2005; BILA, 2014; JUIZO, 2015).

3.7.3. Propriedades físicas

O conhecimento sobre as propriedades físicas da madeira faz-se necessário para fomentar o potencial de utilização, uso adequado, e ainda a alternativa de substituição de outras madeiras. As propriedades da madeira apresentam diferenças tanto entre espécies como entre indivíduos de mesma espécie e até entre diferentes regiões de um mesmo indivíduo (BURGER e RICHTER, 1991). Ainda, é necessária atenção às propriedades físicas, para que produto derivado de madeira não apresente elevado nível de degradação e conseqüentemente mantenha comportamento semelhante ao da madeira sólida. Logo, dentre as propriedades físicas pertinentes, podemos destacar a densidade, teor de umidade e estabilidade dimensional.

a) Densidade da madeira

A densidade básica da madeira é uma característica de grande importância e complexa das madeiras, pois varia entre espécies, entre árvores da mesma espécie, em relação à posição radial e longitudinal no tronco, com a idade da árvore, espaçamento e local de plantio (MOKFIENSKI et al., 2003).

A densidade básica, definida como a relação entre a massa da amostra por unidade de volume em condição saturada, resulta da integração das propriedades físico-químicas e características anatômicas do lenho, sendo esta, a principal responsável pelas características de resistência, sendo também um dos parâmetros utilizados para avaliar a qualidade da madeira, por ser de fácil determinação e em virtude de se correlacionar com outras propriedades físicas e mecânicas, estrutura anatômica e espessura de parede de fibras da madeira (BATISTA et al., 2010; MATTOS et al., 2011; SETTE JR, et al., 2012).

A densidade da madeira, influencia diretamente no comportamento e ações de mobilidade dos adesivos empregados na produção do painel e madeira laminada (IWAKIRI, 2005; BILA et al., 2016).

Quanto mais denso é o material menor é seu número de vazios, logo a quantidade de material é maior, no caso da madeira a parede celular. Quando a madeira apresenta uma elevada densidade o grau de dificuldade em adesão tende a aumentar, pois a madeira terá uma quantidade de poros (espaços vazios) reduzido, comprometendo a penetração do adesivo no interior da madeira diminuindo o ancoramento feito pelo adesivo. Também, peças de madeira de densidade elevada, dificilmente aceitam por completo, a conformação dada pelo sistema de colagem e prensagem, ocasionando um contato íntimo débil entre as peças as serem coladas (MARRA, 1992; LATORRACA; ALBUQUERQUE, 2005; ROSS, 2010).

b) Teor de umidade

A secagem da madeira pode ser influenciada por características aliadas a própria espécie florestal, como estrutura anatômica, densidade e anisotropia. Também, a alteração volumétrica verificada no material lenhoso em

consequência da dessorção e absorção de água pode limitar o uso do material para fins industriais (KLITZKE, 2007).

O teor de umidade da madeira é um fator importante na união de peças com adesivo, pois essa propriedade interfere na qualidade quando se refere à estabilidade da ligação adesivo-madeira, de forma que o ritmo de absorção do adesivo (líquido) pela madeira é influenciado pela quantidade de líquido contido nela. Quanto menor for a teor de umidade, maior é a taxa de absorção dos adesivos também mais acelerado é o processo de cura e endurecimento (IWAKIRI, 2005; MOTTA et al., 2012).

Tanto a madeira muito úmida quanto a madeira muito seca são problemáticas para processos de colagem. Quanto mais uniforme for o teor de umidade das peças, mais provável atingir a adesão ótima. Para uma melhor adesão a umidade da madeira devem estar entre 6 e 14% (PROPERZI et al., 2003).

Baixos teores de umidade requerem uma formulação específica do adesivo utilizado. Juntas coladas com madeira verde, em condição úmida, apresentam uma redução na qualidade da linha de cola, no teste de resistência a linha de colagem e ainda um percentual de falha maior quando comparado com a colagem em madeira seca (ST-PIERRE, 2005; AMOAH et al., 2014).

A colagem de peças com elevado teor de umidade pode resultar em defeitos como: rachaduras, empenamentos, juntas abertas e deslocamentos. Ainda, adesivos mais tradicionais não aderem a uma umidade relativa muito elevada, caso contrário, o processo de prensagem deverá ser maior (de 4 a 7 dias), para que a umidade da madeira possa entrar em equilíbrio com a umidade do ar (PROPERZI et al., 2003).

c) Estabilidade dimensional

A madeira é um material altamente higroscópico, com expansão e contração influenciada diretamente pela umidade, fenômeno conhecido como instabilidade dimensional. As variações dimensionais correspondem à dessorção ou adsorção da água localizada nas paredes celulares (GALVÃO; JANKOWSKY, 1985; VIDAURRE, 2013).

A deterioração das ligações adesivas pode ser influenciada pela variação dimensional da madeira, ocorridas durante e após o processo de colagem, pois afeta a tensão das junta coladas, acarretando uma tensão mais elevada devido ao processo de retração ou de inchamento (PRATA, 2010; VIDAURRE, 2013).

Defeitos na madeira durante a secagem como colapso, rachaduras e empenamentos evidenciam a necessidade de novas técnicas de colagem que melhoram o comportamento da madeira quanto a sua estabilidade dimensional frente as linhas de cola (MORRI et al., 2003; KLITZKE, 2007).

Tabela 1 - Valores médios da variação dimensional de algumas madeiras utilizadas no Brasil

Madeira	Variação		Coeficiente de Anisotropia
	Tangencial (%)		
	Tangencial	Radial	
<i>Cedro</i>	6.3	4.3	1.5
<i>Ipê</i>	5.5	4.0	1.4
<i>Jequitibá</i>	5.5	3.0	1.9
<i>Jatobá</i>	6.5	2.7	2.4
<i>Pindaíba</i>	9.4	3.4	2.8
<i>Corymbia citriodora</i>	9.6	6.5	1.5
<i>Eucalyptus maculata</i>	9.4	5.9	1.6
<i>Eucalyptus tereticornes</i>	16.7	7.3	2.3
<i>Eucalyptus urophylla</i>	15.3	7.9	2.0
<i>Eucalyptus grandis</i>	10.1	5.0	2.1
<i>Eucalyptus saligna</i>	14.8	7.7	2.0
<i>Eucalyptus urophylla x Eucalyptus grandis</i>	9.1	5.7	1.8
<i>Eucalyptus urophylla x Eucalyptus globulus</i>	7.6	4.0	1.9

Fonte: Galvão & Jankowsky (1985), Oliveira (1997), Rodrigues (2008), De Freitas (2016).

Madeiras com um coeficiente de anisotropia superior a 2 (Tabela 1), apresentam maior dificuldade em secar e como regra geral madeiras que contraem menos são mais estáveis (MORRI et al., 2003; KLITZKE, 2007; PRATA, 2010). A heterogeneidade do coeficiente de anisotropia fica evidente na Tabela 1, essa variação entre as dimensões tangenciais e as radiais é atribuída

à forma de organização dos elementos celulares a influência dos raios e a alternância entre os lenhos inicial e tardio como sendo responsáveis pelas diferenças entre as contrações nas direções radial e tangencial (GALVÃO; JANKOWSKY, 1985).

A estabilidade dimensional das madeiras de lei também induz importantes tensões nas linhas de cola quando o teor de umidade flutua (FRIHART; HUNT, 2010). Considerando as dificuldades inerentes à colagem de madeiras de lei, a força da linha de cola alcançável de uma determinada espécie, sistema adesivo e a sustentabilidade devem ser cuidadosamente avaliados para confirmar a relevância do seu uso em um produto de madeira de engenharia estrutural, como a madeira laminada colada, tendo a existência de produtos florestais advindo de florestas plantadas (KNORZ et al., 2015; AMMANN et al. 2016; KONNERTH et al., 2016).

4. MATERIAL E MÉTODOS

Este capítulo descreve os ensaios realizado durante o desenvolvimento do presente trabalho, cujo programa experimental foi dividido nas seguintes etapas: ensaios de caracterização físico-química da madeira, análise físico-química do adesivo e ensaios mecânicos dos modelos propostos.

Os ensaios físico-químicos da madeira tiveram como finalidade determinar as propriedades químicas da madeira, possíveis de influenciarem no processo de adesão. Ainda, a análise físico-químicas do adesivo foram realizadas com o intuito de caracterizar e conhecer o comportamento do material junto aos procedimentos de adesão e trabalho do material. Já os ensaios mecânicos foram realizados para compreender o comportamento das peças frente ao estresse de compressão paralelas as fibras e a linha de cola.

4.1. Propriedades da espécie de madeira empregada

A madeira avaliada neste trabalho é oriunda de plantios comerciais de espécie *Eucalyptus urograndis*, uma espécie híbrida de *E. grandis* e *E. urophylla*, proveniente de um produtor particular, situado dentro da microrregião da cidade de Toledo, a oeste do Estado do Paraná, localizado no município de Mercedes (24 ° 27 ' 14 " S; 54 ° 09 ' 42 " W), apresentado na Figura 8. A região apresenta precipitação média anual de 1664,8 mm, temperatura média anual de 22,30 °C e umidade relativa do ar média anual de 74,1%² e os dados referentes ao plantio das árvores podem ser vistos na Tabela 2.

Tabela 2: Dados referente ao plantio da espécie de *Eucalyptus* sp.¹

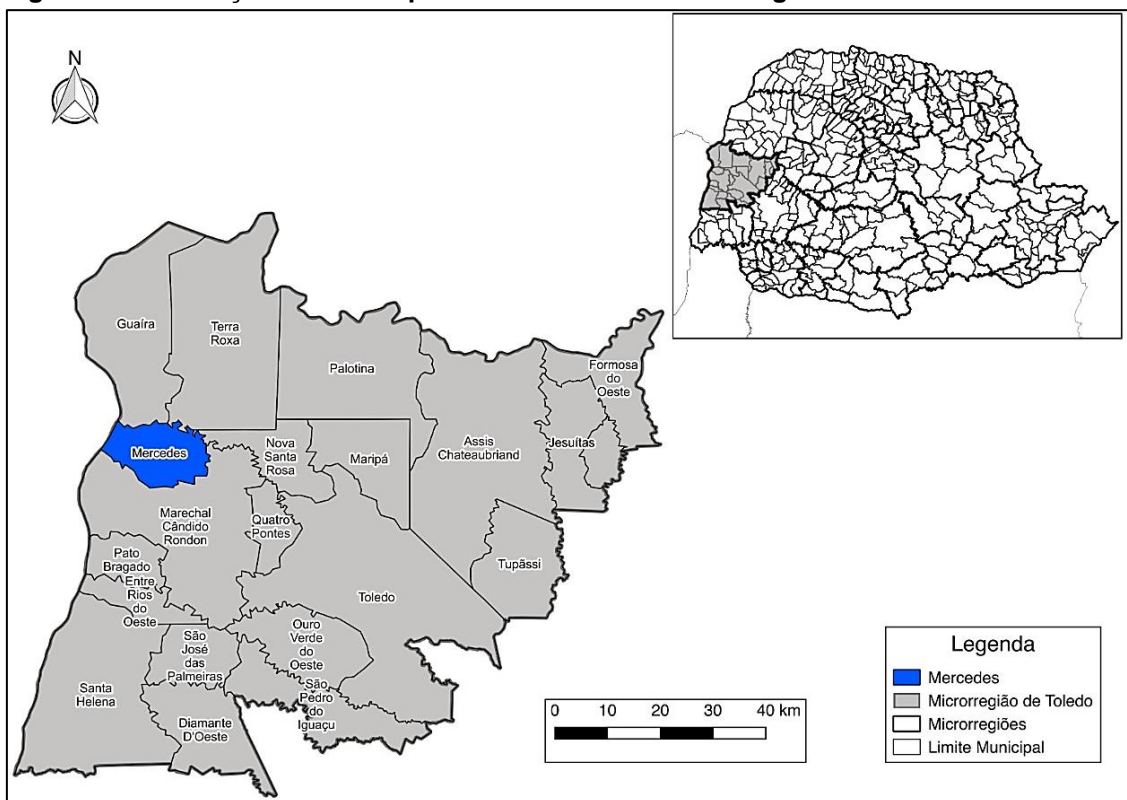
Espécie/ Híbrido	Idade (meses)	Altitude (m)	Latitude (DMS)	Longitude (DMS)	Espaçamento do Plantio (m)	IMA ² (m ³ /há)
<i>E. urograndis</i>	72	386	24°27'02.5"S	54°06'37.8"W	3,00 X 2,00	-

¹ Dados fornecidos pelo produtor.

² Incremento médio anual. Não havia registros.

² INMET- Instituto Nacional de Meteorologia, 2020.

Figura 8: Localização do município de Mercedes na microrregião de Toledo - PR



Fonte: Acervo do autor, 2020.

Da espécie definida foram selecionadas, aleatoriamente, 14 árvores, através de amostragem causal simples. Após a seleção, as árvores foram colhidas utilizando-se a seção correspondente às duas primeiras toras a partir da base (Figura 9a), resultando em 28 toras com aproximadamente 1 metro cada, variando entre 26 e 30 cm de diâmetro. Posteriormente, as toras foram identificadas individualmente e cada tora foi demarcada com um disco colorido sobre o fuste, para que dessa forma fosse possível identificar a região dentro do tronco em que estava cada peça após o corte (Figura 9 b;c). A região central do disco colorido (em vermelho) foi definida como lenho juvenil, o qual não evidenciaríamos propriedades de interesse nesse trabalho (Figura 9d).

Figura 9: Demarcação do fuste (a); Seção de corte (b); Peças identificadas com fuste já demarcados (c); Caibros empilhados para secagem com as demarcações de localização (d).



Fonte: Acervo do autor, 2020.

As toras foram transportadas para uma indústria de beneficiamento para a retirada de pranchões³ com aproximadamente 8 cm de espessura e após isso realizou o corte em caibros (8 x 8 cm), os quais foram dispostos para secagem no laboratório de estruturas da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus de Toledo.

4.1.1. Análise química

Amostras da madeira foram submetidas à análise química, empregando os ensaios de teor de extrativos, lignina solúvel e insolúvel, holocelulose, α - celulose, hidrossolubilidade, solubilidade em NaOH, pH e condutividade térmica realizados nos laboratórios de botânica da Universidade Paranaense e nos

^{3,4} Definida de acordo com a ABNT – NBR 14.807/2002

laboratórios de análise de qualidade de água do Grupo de Pesquisas em Recursos Pesqueiros e Limnologia – GERPEL Unioeste campus Toledo-PR.

4.1.1.1. Análise de Termogravimetria

A análise termogravimétrica (TGA) envolve a pesagem de uma amostra em uma atmosfera controlada em função da variação de temperatura e do tempo.

A amostra particulada é suspensa em uma balança de alta sensibilidade que mede a perda de massa da amostra conforme o sistema é aquecido. Nitrogênio ou outro gás flui ao redor da amostra para remover os produtos de pirólise ou combustão.

Para análise termogravimétrica da madeira, utilizou-se o aparelho TGA Perkin Elmer STA 6000. As análises foram realizadas sob atmosfera inerte de gás nitrogênio (N₂), a uma vazão constante de 50 mL/min, utilizando-se aproximadamente 8,148 mg de amostra, em cápsula de alumina aberta.

As curvas termogravimétricas foram obtidas a partir de 30 °C até a temperatura máxima de 600 °C, com taxa de aquecimento de 10 °C/min. A curva termogravimétrica (TG) foi obtida para avaliar a perda de massa em função da temperatura e da curva da derivada primeira da perda de massa (DTG).

4.1.1.2. Calorimetria exploratória diferencial (DSC)

A calorimetria exploratória diferencial (DSC) pode ser usada para medir a capacidade térmica, fornecer dados cinéticos e dar informações sobre temperaturas de transição e fusão. Na DSC, tanto a amostra como a referência são aquecidas por aquecedores separados. Ocorrendo uma diferença de temperatura entre a amostra e a referência devido a reações exotérmicas ou endotérmicas na amostra, a entrada de energia é ajustada para remover esta diferença. Assim, a temperatura do suporte da amostra é sempre mantida idêntica à da referência.

Para a calorimetria exploratória diferencial (DSC), foi utilizado o equipamento DSC Shimadzu TA 60. As curvas DSC foram obtidas em atmosfera

de nitrogênio com vazão constante de 50 mL/min, utilizando-se uma cápsula de alumínio prensada. Foram usados aproximadamente 7,661 mg de serragem de madeira, e procedeu-se à análise da temperatura inicial de 30 °C até a temperatura máxima de 600 °C, com taxa de aquecimento de 10 °C/min.

4.1.1.3. Caracterização de raio-X da madeira

Os difratogramas foram obtidos utilizando um difratogramas Bruker D2 Phaser, radiação Cu K α filtrada, 40 KV, 20 mA, velocidade do goniômetro de 2°/min. Todas as medidas foram feitas à temperatura ambiente, com variação de 2θ entre 5° e 75° C.

4.1.1.4. Teor de extrativos

De acordo com a TAPPI T 257 cm12 (2012), “Amostragem e preparação da madeira para análise”, obteve-se uma amostra de serragem de madeira que passa na peneira de 0,42 mm (40 mesh) e fica retido na peneira de 0,60 mm (30 mesh). A serragem foi submetida a uma extração em um extrator *soxhlet* utilizando os solventes ciclohexano, uma solução de ciclohexano e álcool etílico (1:2, v/v), etanol 95% e água destilada, conforme a norma TAPPI T204 cm-97 (2007), modificada.

Tomou-se uma porção da amostra já separada e inseriu-se no dedal de extração, em seguida conectou-se o aparelho de extração *soxhlet* na posição vertical para um balão de extração de fundo reto, então encheu-se o balão com 150 mL de solvente e posteriormente iniciou-se o fluxo de água na seção do condensador. Com a ajuda de chapa aquecedora para fornecer uma taxa de ebulição as amostras por não menos de 24 (vinte e quatro) extrações, correspondentes a um período de 6 horas, para cada solvente. A Figura 10 demonstra os aparelhos de extração *soxhlet* acoplados em série e sob o dispenser de aquecimento.

Figura 10: Equipamento de extração soxhlet acoplado no dispenser de aquecimento.

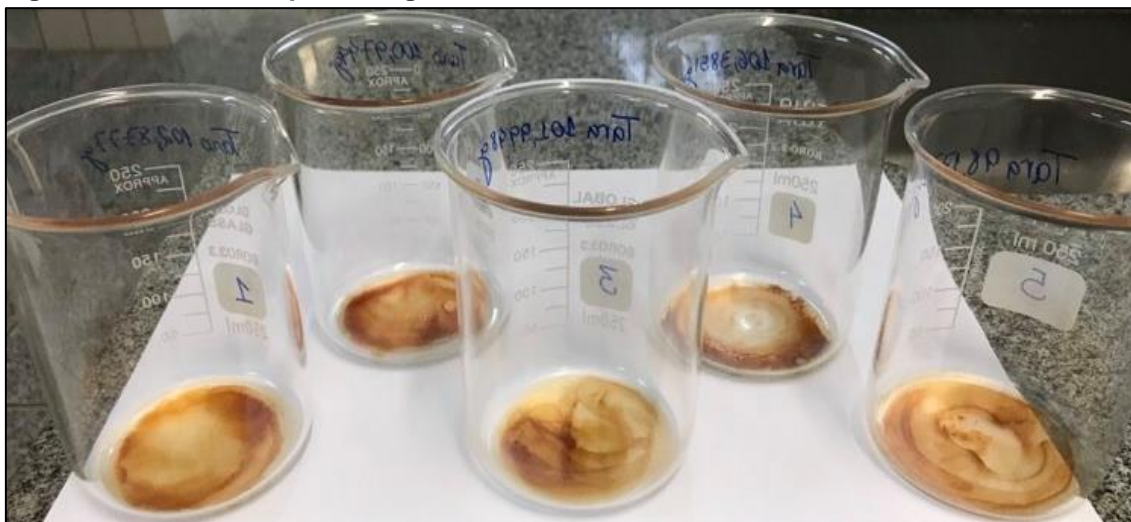


Fonte: Acervo do autor, 2020.

Após decorrido todo o procedimento de extração o balão foi removido e transferiu-se o solvente para um béquer ocasionando a evaporação do solvente em um exaustor químico, em seguida secou em estufa o conteúdo por uma hora a $105 \pm 2^\circ\text{C}$ e esfriou em um dessecador com sílica gel e realizou-se a pesagem do material (Figura 11).

Juntamente com as amostras de madeira, realizou-se o controle de um branco com os solventes utilizados no teste, onde avaliou-se o resíduo de evaporação de 150 mL do solvente.

Figura 11: Extrativos após secagem em estufa



Fonte: Acervo do autor, 2020.

Para a análise de extrativos totais foram realizadas quinze repetições e o percentual de extrativos foi calculado utilizando a Equação 1:

$$\text{Extrativos \%} = \left[\frac{(W_e - W_b)}{W_p} \right] \cdot 100 \quad (1)$$

Onde

W_e = Extrato seco na estufa, g.

W_b = Peso de madeira seco na estufa, g.

W_p = Peso seco em estufa do resíduo em branco, g.

4.1.1.5. Lignina Klason (insolúvel)

O método Klason é um método oficial das normas TAPPI – T222 om-02 (2006) e é a base de outras normas, tais como as normas ABTCP M1071 (ABTCP, 1968) e ABNT NBR 7989 (ABNT, 2003) para determinação de lignina insolúvel em madeira e polpa.

O teor de lignina Klason insolúvel foi determinado utilizando aproximadamente 300 mg de amostra livre de extrativos, sendo transferida para um erlenmeyer com capacidade de 250 mL e adicionados 3 mL de H_2SO_4 72%, para promover a hidrólise ácida, e mantido em banho-maria a $30 \pm 2^\circ C$ durante 1 hora, agitando constantemente.

Em seguida, transferiu-se a solução contida no erlenmeyer para um balão de refluxo de 250 mL, onde adicionou-se 84 mL de água destilada quente, diluindo a solução ácida para 3%, e permanecendo em refluxo por 4 horas (Figura 12a).

Ao fim do refluxo e resfriamento da solução, filtrou-se a lignina insolúvel em um funil de placa sinterizada (Figura 12b), lavando o material com 700ml de água destilada. A lignina, retida no funil, foi seca em estufa a $105 \pm 2^\circ C$ por um período de 4 horas, sendo em seguida resfriada em dessecador com sílica gel e pesada em balança analítica.

Figura 12: Procedimentos para obtenção da lignina insolúvel; (a) refluxo; (b) material filtrado em funil de placa sinterizada



Fonte: Acervo do autor, 2020.

Para determinar a porcentagem de lignina insolúvel foram realizadas três repetições e o teor de lignina foi calculado utilizando a Equação 2.

$$\text{Lignina insolúvel \%} = \left[\frac{\text{MF}}{\left(\frac{0,3}{1 - \frac{\text{E.T.}}{100}} \right)} \right] \cdot 100 \quad (2)$$

Onde

MF= Massa de lignina absolutamente seca, já descontada a tara do funil de placa sinterizada, g.

E.T. = Extrativos Totais (%).

4.1.1.6. Lignina Solúvel e Total

A quantidade de lignina solúvel foi determinada colorimetricamente nos comprimentos de ondas de 215 e 280 nm das soluções resultantes das filtrações do método Klason seguindo Goldschimid (1971). Após obter o filtrado, transferiu-

se para um balão volumétrico de 1000 mL, completando o volume com água destilada. Utilizando-se uma cubeta de quartzo e zerando o equipamento com um branco de H₂SO₄ 72% as leituras foram realizadas nos comprimentos de ondas descritos.

Para a obtenção da porcentagem de lignina solúvel foram realizadas três repetições e para o cálculo do teor de lignina solúvel e da lignina total utilizou-se as Equações 3 e 4, respectivamente.

$$\text{Lignina solúvel \%} = \left[\frac{4,53 \cdot L_{215} - L_{280}}{300 \cdot \left(\frac{0,3}{1 - \frac{\text{E.T.}}{100}} \right)} \right] \cdot 100 \quad (3)$$

Onde

L₂₁₅ = Valores de absorvância da solução a 215 nm.

L₂₈₀ = Valores de absorvância da solução a 280 nm.

E.T. = Extrativos Totais (%).

$$\text{Lignina Total \%} = \text{L. Insolúvel (\%)} + \text{L. Solúvel (\%)} \quad (4)$$

4.1.1.7. Teor de Holocelulose por cloração

A determinação do teor de holocelulose foi realizada utilizando a metodologia apresentada por Rowell. (2005). Em um erlenmeyer de 500 mL, adicionou-se cerca de 2,50 g de amostra livre de extrativos e 80 mL de água destilada. À solução foram acrescentadas 1,00 g de clorito de sódio (NaClO₂) e 0,50 mL de ácido acético glacial. O erlenmeyer contendo os reagentes foi tampado e mantido em banho aquecido a 70 °C (Figura 13a). Após 60 minutos, adicionou-se 1,00 g de clorito de sódio e 0,50 mL de ácido acético, mantendo-se a temperatura.

Em intervalos de uma hora foram adicionados novamente 1,00 g de clorito de sódio e 0,50 mL de ácido acético e prosseguiu-se com o aquecimento em banho-maria até a amostra de madeira ser completamente separada da lignina, permanecendo nesse processo por 8 horas. Após esse período, a

amostra reacional foi mantida em repouso sem adição de qualquer reagente durante 24 horas.

Decorrido o tempo o conteúdo do balão foi transferido para um funil de placa sinterizada, fez-se a lavagem do material com água destilada até atingir pH neutro e o odor de cloro ser removido (Figura 13b). Em seguida lavou-se o material retido no funil com cerca de 20 mL de acetona. O material retido no filtro foi seco em estufa a $105 \pm 2^\circ\text{C}$ resfriada em dessecador com sílica gel e pesada em balança analítica até massa constante (Figura 13c).

Para a obtenção da porcentagem de holocelulose realizaram-se três repetições, determinando-se o teor de holocelulose com a Equação 5.

$$\text{Holocelulose \%} = \left[\frac{(W_{fa} - W_f)}{W_p} \right] \cdot 100 \quad (5)$$

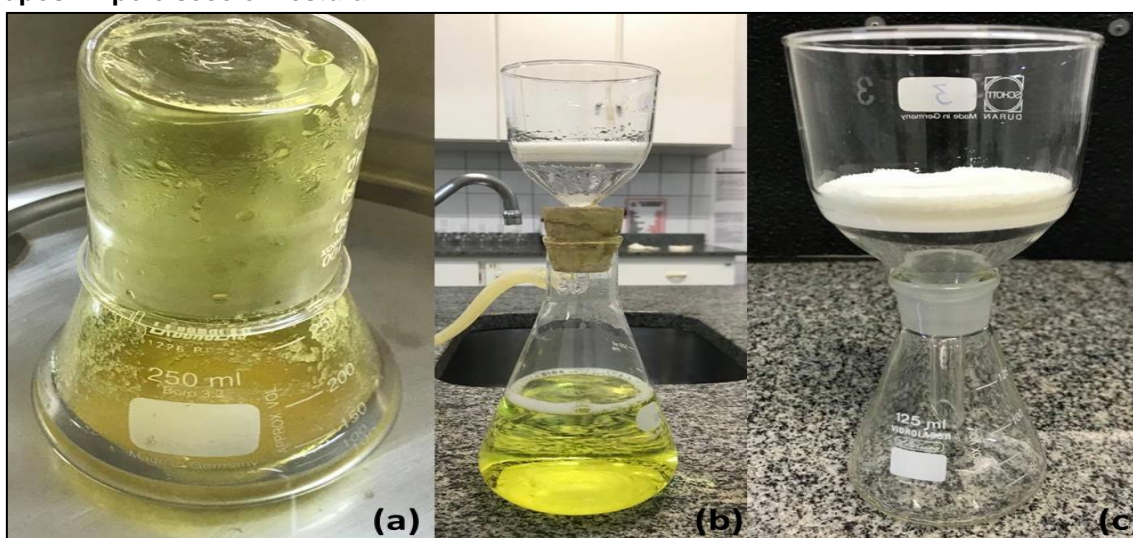
Onde

W_{fa} = Peso do conjunto funil mais amostra seco em estufa, g.

W_f = Peso do funil seco na estufa, g.

W_p = Peso da amostra, g.

Figura 13: Procedimento para obtenção da holocelulose por cloração. (a) Material em banho-maria durante o procedimento; (b) Processo de lavagem do material; (c) Material após limpo e seco em estufa.



Fonte: Acervo do autor, 2020.

4.1.1.8. Teor de α -Celulose

A determinação do teor de α -celulose foi realizada utilizando a metodologia apresentada por Teixeira et al. (2016). Colocou-se 1,00 g da holocelulose, previamente seca, em almofariz e adicionou-se 15 mL de uma solução de NaOH 17,5%. Aguardou-se dois minutos de contato entre a solução e a celulose, sendo então o material macerado por oito minutos com o auxílio de um conjunto almofariz/pistilo.

Após maceração adicionou-se 40 mL de água destilada no almofariz e transferiu-se o conteúdo para um funil de placa sinterizada, acoplando então uma bomba de vácuo.

O precipitado recolhido no funil foi enxaguado até resultar em pH próximo ao da água utilizada. O funil com a α -celulose retida foi levado para uma estufa a $105 \pm 2^\circ\text{C}$, resfriou-se a amostra em dessecador para posterior pesagem, até massa constante.

A porcentagem de α -celulose foi calculada utilizando a Equação 6, sendo repetido o ensaio em três amostras.

$$\text{Teor de } \alpha\text{- Celulose } \% = \left[\frac{(W_{fa} - W_f)}{W_p} \right] \cdot 100 \quad (6)$$

Onde

W_{fa} = Peso do conjunto funil mais amostra seco, g.

W_f = Peso do funil seco na estufa, g.

W_p = Peso da amostra úmida g.

4.1.1.9. Teor de Hemicelulose

O teor corrigido de hemicelulose foi calculado para cada resíduo a partir da diferença entre os teores corrigidos de α -celulose e holocelulose.

4.1.1.10. Teor de Cinzas

O teor de cinzas da madeira foi determinado pelo teor de resíduo resultante da queima completa das amostras, ou seja, a porcentagem de material inorgânico da amostra. De acordo com a norma TAPPI T211 om-02 (2007) modificada, realizou-se 9 repetições para a determinação.

Adiciona-se 1,00 g de amostra triturada e seca em um cadinho de porcelana de massa conhecida e já calcinado, em seguida o conjunto é submetido a temperatura de 525 °C por 4 horas dentro da mufla. O teor de cinzas é determinado pelo quociente entre a massa do material residual e a massa inicial seca, conforme a Equação 7.

$$\text{Teor de cinzas \%} = \left[\frac{(W_{ca} - W_c)}{W_p} \right] \cdot 100 \quad (7)$$

Onde

W_{ca} = Peso do conjunto calcinado, cadinho mais amostra, g.

W_c = Peso do cadinho, g.

W_p = Peso da amostra, g.

4.1.1.11. Teor de Umidade

O teor de umidade da serragem de madeira foi determinado de acordo com a TAPPI 264 cm-97 (1997). O material vegetal a ser analisado foi pesado em cadinho de porcelana, em uma quantidade de aproximadamente 2,00 g. Em seguida, o conjunto material-recipiente foi levado à estufa a 105 ± 2 °C, por três horas. Após a permanência na estufa, o conjunto foi retirado e posto em um dessecador com sílica gel para resfriar à temperatura ambiente por, pelo menos, meia hora.

Findo esse tempo, o conjunto foi pesado em balança analítica, o conjunto deve retornar ao dessecador. Em seguida o conjunto retornou para a estufa por mais meia hora, e repetiu-se o procedimento de resfriamento e pesagem até a obtenção de uma massa constante.

O procedimento foi realizado com nove repetições, para permitir a redução do desvio-padrão e a eliminação de dados fora da escala, sem sacrifício

do rigor estatístico. Para a obtenção da percentagem do teor de umidade celulose utilizando-se a Equação 8.

$$\text{Teor de umidade \%} = \left[\frac{(W_{ca} - W_c)}{W_p} \right] \cdot 100 \quad (8)$$

Onde

W_{ca} = Peso do conjunto úmido, cadinho mais amostra, g.

W_c = Peso do conjunto seco em estufa, cadinho mais amostra, g.

W_p = Peso da amostra úmida, g.

4.1.1.12. Hidrossolubilidade da madeira

A análise de solubilidade em água quente e água fria seguiu-se a norma TAPPI T207 cm-99 (1999) com cinco repetições para cada amostra.

4.1.1.13. Solubilidade de hidróxido de sódio a 1%

A análise de solubilidade de hidróxido de sódio (NaOH) a 1 % seguiu-se a norma TAPPI T212 om-02 (2002) com cinco repetições.

4.1.1.14. pH e Condutividade elétrica

As análises de pH e condutividade elétrica seguiram a norma TAPPI T252 om-02 (2002), com dez repetições para cada teste analisado.

4.1.2. Adesivo

O adesivo utilizado neste trabalho foi o poliuretano bicomponente derivado de óleos vegetais, aglomerante 201, fornecido pela empresa KEHL® Indústria e Comércio. O poliuretano é apresentado na forma bicomponente composta de um polioli e um pré-polímero (isocianato), onde a reação ocorre por policondensation. Em todos os procedimentos de colagem o adesivo foi aplicado

nas duas faces, sendo em uma das faces no sentido horizontal e em outra na vertical, de forma que após a união das faces as tramas de cola ficassem perpendiculares.

Para utilização do adesivo em todas as etapas deste experimento, procedeu-se com a mistura recomendada pelo fabricante, na proporção de 1:2 de isocianato e poliol. O consumo do adesivo para a confecção dos corpos de prova de compressão, foi definido de acordo com o melhor desempenho dos ensaios de cisalhamento na linha de cola.

Para caracterização da cola foi analisada a viscosidade, o teor de sólidos, o tempo de trabalho, gel time, pH, sendo ainda realizadas análises termogravimétricas, calorimetria diferencial de varredura, espectroscopia de infravermelho e caracterização por difração de raio X.

4.1.2.1. Viscosidade

Para a determinação da viscosidade do adesivo seguiu a norma americana ASTM D 1084-97 (método B). Utilizou-se um viscosímetro de Brookfield (mPas) (Figura 14), com haste (spindler) número 63, velocidade de 12 rpm, em amostra de aproximadamente 100 mL. O ensaio iniciou-se no tempo 0 finalizando no tempo 30 min, com uma leitura a cada 1 (um) minuto.

Figura 14: Análise de viscosidade



Fonte: Acervo do autor, 2021.

4.1.2.2. Teor de Sólidos

A determinação do teor de sólidos foi realizada utilizando uma adaptação da norma NBR 15315 (ABNT, 2005), pesando-se 1g do adesivo, secando na estufa à temperatura de 105 ± 2 °C por 3 horas e deixando esfriar em dessecador por 30 min e então pesada novamente. O teor de sólidos percentual foi calculado pela diferença entre a massa inicial e final dividida pela massa inicial.

4.1.2.3. Tempo de trabalho

Determinou-se o tempo de trabalho para o adesivo bicomponente a base de óleos vegetais seguindo a recomendação de Carneiro (2006). O tempo de trabalho dos adesivos foi determinado com auxílio de um cronômetro, acionado após a adição de agente endurecedor; para cada amostra, o tempo foi obtido até o endurecimento (cura) dos adesivos, em três repetições.

4.1.2.4. Potencial Hidrogeniônico (pH)

O pH de uma solução é definido como a concentração de íons dissociados de H⁺ e OH⁻, e a sua determinação foi feita pela leitura direta em aparelho denominado pHmetro ou potenciômetro.

4.1.2.5. Gel Time

O tempo de gelatinização adaptado de Carneiro (2006), foi executado com o uso de um béquer em que se inseriu 5 g do adesivo. O conjunto foi imerso em banho maria a temperatura de 100 °C. Com o auxílio de um bastão, agitou-se o líquido constantemente até a sua parada, em função do aumento na resistência do adesivo ao atingir a “fase de gel”. Então o tempo decorrido foi anotado, sendo correspondente a cura ou gel time do adesivo poliuretano.

4.1.2.6. Análise termogravimétrica (TGA)

A estabilidade térmica ou comportamento térmico do adesivo e dos componentes foram avaliados por análise de termogravimétrica (TGA). Para análise termogravimétrica do adesivo, utilizou-se o aparelho TGA Perkin Elmer STA 6000. Estas análises foram realizadas sob atmosfera de gás nitrogênio, a uma vazão constante de 100 mL/min, utilizando-se aproximadamente 7,775 mg, em cápsula de alumina aberta.

As curvas termogravimétricas foram obtidas a partir de 30°C até a temperatura máxima de 900 °C, com taxa de aquecimento de 10 °C/min. A curva termogravimétrica (TG) foi obtida para avaliar a perda de massa em função da temperatura e da curva da derivada primeira da perda de massa (DTG).

4.1.2.7. Espectroscopia de Infravermelho (FTIR)

A polimerização do adesivo foi acompanhada também espectroscopia de infravermelho. O espectro de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), foram obtidos usando um espectrômetro infravermelho PerkinElmer FT-IR Spectrometer Frontier. A análise do poliuretano foi realizada após o processo de cura de 24 horas, em temperatura ambiente na região de 600 a 4000 cm^{-1} , com resolução de 4 cm^{-1} . O adesivo foi analisado utilizando a técnica por ATR (refletância total atenuada). Para a técnica empregada utilizou-se amostras na forma de filmes.

4.1.2.8. Análise dos gases evoluídos (EGA)

A análise dos gases evoluídos (EGA) foi realizada utilizando um analisador térmico simultâneo - STA6000 / Frontier PerkinElmer, com 10 mg de amostra em uma bandeja de platina, sob uma atmosfera de oxigênio e nitrogênio, fluxo de gás de 20 mL min^{-1} , taxa de aquecimento (β) 20 $^{\circ}\text{C min}^{-1}$, faixa de temperatura de 100–600 $^{\circ}\text{C}$. A bomba de vácuo foi programada para 50 mL min^{-1} e a zona de aquecimento de hifenização (tubo de transferência aquecido) foi de 300 $^{\circ}\text{C}$.

Para evitar a condensação de compostos voláteis, a célula de gás FTIR foi aquecida a 300 °C. A análise de infravermelho dos gases liberados foi programada com oito varreduras por repetição na faixa de 4000 – 450 cm⁻¹, resolução de 8 cm⁻¹, adquirindo 2 espectros min⁻¹, resultando em 50 espectros por análise.

4.1.2.9. Caracterização por difração de raio X

Os difratogramas foram obtidos utilizando um difratogramas Bruker D2 Phaser, radiação Cu K α filtrada, 40 KV, 20 mA, velocidade do goniômetro de 2°/min. Todas as medidas foram feitas a temperatura ambiente, com variação de 2 θ entre 5° e 60°.

4.2. Propriedades físicas da madeira

A caracterização das propriedades físicas da madeira foi realizada de acordo com os métodos de ensaios definidos pela NBR 7190 (ABNT, 1997), determinando o teor de umidade, densidade básica e aparente e estabilidade dimensional.

4.2.1. Teor de Umidade

O teor de umidade do lote foi determinado através da diferença da massa inicial e massa seca de cada corpo de prova submetido a secagem a uma temperatura de 103 ± 2 °C (Equação 9). Os corpos de prova possuem uma seção transversal retangular, nas dimensões de 2,0 cm x 3,0 cm e comprimento ao longo das fibras de 5,0 cm, as análises de umidade foram realizadas em nove repetições com 6 corpos de prova por lote, totalizando 54 corpos de prova.

A umidade foi determinada após 14, 36, 112, 149, 196 e 206 dias do corte das árvores.

$$\text{Teor de Umidade \%} = \left[\frac{(W_i - W_s)}{W_s} \right] \cdot 100 \quad (9)$$

Onde

W_i = Massa inicial da madeira, g.

W_s = Massa da madeira seca, g.

4.2.2. Determinação da densidade básica e aparente

A densidade básica, definida pela razão entre a massa seca e o volume saturado (Equação 10), em que, o volume saturado é determinado através das médias das medições de três pontos, em cada dimensão, do corpo de prova. Já para a massa seca, segue-se o mesmo procedimento supracitado no item 4.2.1.

Os corpos de prova correspondem a uma seção transversal retangular, nas dimensões de 2,0 cm x 3,0 cm e comprimento ao longo das fibras de 5,0 cm, assim como para a umidade o ensaio foi realizado em nove repetições com 6 corpos de prova por lote, totalizando 54 corpos de prova.

$$\text{Densidade Básica \%} = \left[\frac{W_s}{V_s} \right] \quad (10)$$

Onde

W_s = Massa seca da madeira, g.

V_s = Volume da madeira saturada, cm³.

Para a densidade aparente, correspondente a razão entre a massa e o volume dos corpos de prova com teor de umidade de 12 % (Equação 11). A dimensão dos corpos de prova e o número de repetições e total de amostras analisadas, coincidem com a densidade básica.

$$\text{Densidade Aparente \%} = \left[\frac{W_{12}}{V_{12}} \right] \quad (11)$$

Onde

W_s = Massa da madeira a 12% de umidade, g.

V_s = Volume da madeira a 12% de umidade, cm³.

4.2.3. Estabilidade dimensional

A determinação da estabilidade dimensional da madeira é dada por meio das propriedades de retração e inchamento. As amostras foram submetidas a um processo de secagem natural até atingir a umidade de aproximadamente 12%, então coletou-se as medidas nas três direções anatômicas sendo axial, radial e tangencial.

Posteriormente foram colocadas para saturação submersas em água, por um período de 7 dias, após a saturação submeteu-se ao procedimento de secagem artificial sendo as amostras colocadas em estufa em temperatura inicial de aproximadamente 28°C, a qual foi gradativamente aumentada até atingir a temperatura de 103 ± 2 °C, mantida nesta temperatura até a madeira atingir umidade de aproximadamente 0%.

Desta forma a retratibilidade linear (nas três direções) foi determinada através da Equação 12, de acordo com a NBR 7190/1997.

$$\text{Retratilidade / Inchamento \%} = \left[\frac{(D_V - D_U)}{D_V} \right] \cdot 100 \quad (12)$$

Onde

D_V = Dimensão linear em condição verde ou saturada, cm.

D_U = Dimensão Linear na condição de umidade desejada, cm.

Para o ensaio de inchamento o corpo de prova deve estar seco, desta forma, utilizou-se a Equação 12 para a determinação do inchamento, considerando a dimensão linear na umidade desejada sendo as dimensões da umidade de aproximadamente 0%.

Ainda foi avaliada a variação volumétrica a qual é determinada em função das dimensões do corpo de prova nos estados saturados e seco definida pela Equação 13.

$$\text{Variação volumétrica \%} = \left[\frac{(V_V - V_U)}{V_V} \right] \cdot 100 \quad (13)$$

Onde

V_V = Volume verde ou saturada (máximo), cm^3 .

V_U = Volume na umidade desejada (seco), cm^3 .

O coeficiente de anisotropia foi obtido pela razão entre a contração máxima tangencial pela contração máxima radial, expresso pela Equação 14.

$$\text{Coeficiente de Anisotropia \%} = \left[\frac{\beta_t}{\beta_r} \right] \quad (14)$$

Onde

β_t = Contração máxima tangencial, (%).

β_r = Contração máxima radial, (%).

4.3. Propriedades mecânicas da madeira

Para a estimativa da resistência ao cisalhamento e compressão paralela às fibras da madeira foram avaliados 18 corpos de prova para cada propriedade investigada, as dimensões em conformidade com a norma NBR 7190 (ABNT, 1997). Para o ensaio de resistência ao cisalhamento o modelo de corpo de prova pode ser mais bem definido pela Figura 15.

A resistência ao cisalhamento paralelo as fibras (f_{v0}), é definida pela máxima tensão de cisalhamento que pode atuar na seção crítica de um corpo de prova prismático, expresso pela equação 15.

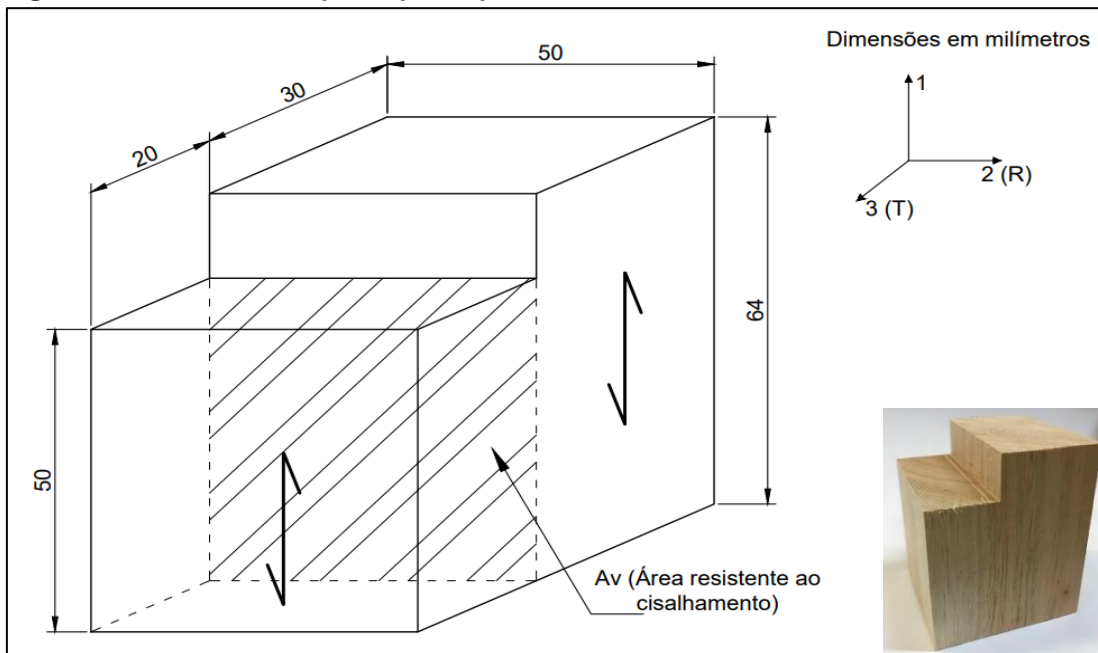
$$f_{v0} = \left[\frac{F_{V0,m\acute{a}x}}{A_{V0}} \right] \quad (15)$$

Onde

$F_{V0,m\acute{a}x}$ = Máxima força cisalhante aplicada, N (Newtons).

A_{V0} = Área inicial da seção crítica, em plano paralelo as fibras, $\text{N (m}^2\text{)}$.

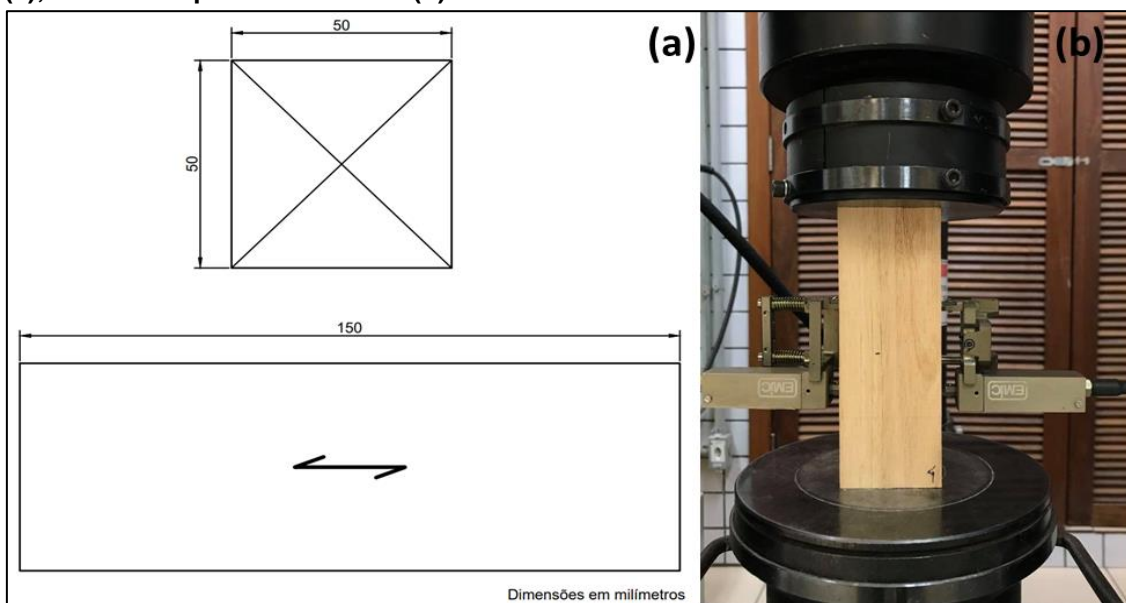
Figura 15: Modelo do corpo de prova para ensaio de cisalhamento



Fonte: Adaptada NBR 7190/1997, 2021.

A resistência à compressão paralela as fibras (f_{c0}) é definida pela máxima tensão de compressão que pode atuar em um corpo de prova com a seção transversal quadrada (5 x 5 cm) e comprimento de 15, detalhados na Figura 16a, e o ensaio é realizado em prensa hidráulica servo controlada, conforme demonstrado na Figura 16b.

Figura 16: Dimensões do corpo de prova para ensaio de compressão paralelos as fibras (a); Ensaio em prensa universal (b).



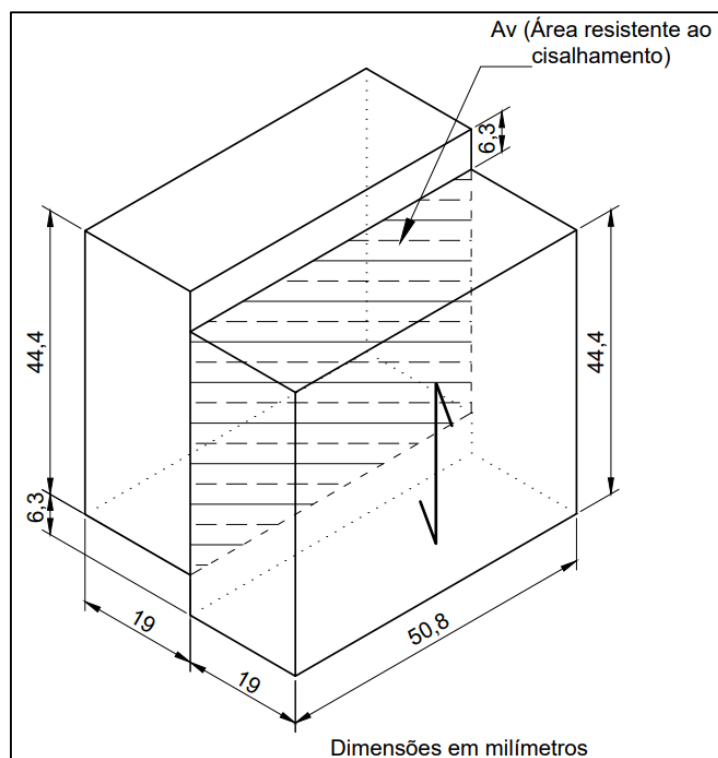
Fonte: Acervo do autor, 2020.

Ambos os experimentos foram realizados no laboratório de materiais de construção civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Toledo.

4.3.1. Definição da gramatura de adesivo

A resistência ao cisalhamento na lâmina de cola paralela as fibras de madeira laminada colada ($f_{gv,0}$), é expressa pela tensão de cisalhamento que pode atuar na lâmina de cola de um corpo de prova. A definição desta propriedade seguiu as recomendações da norma ASTM 905 (ASTM, 1998), adaptada, com dimensões e modelo do corpo de prova conforme Figura 17.

Figura 17: Dimensões e detalhamento do corpo de prova para análise de cisalhamento da linha de cola



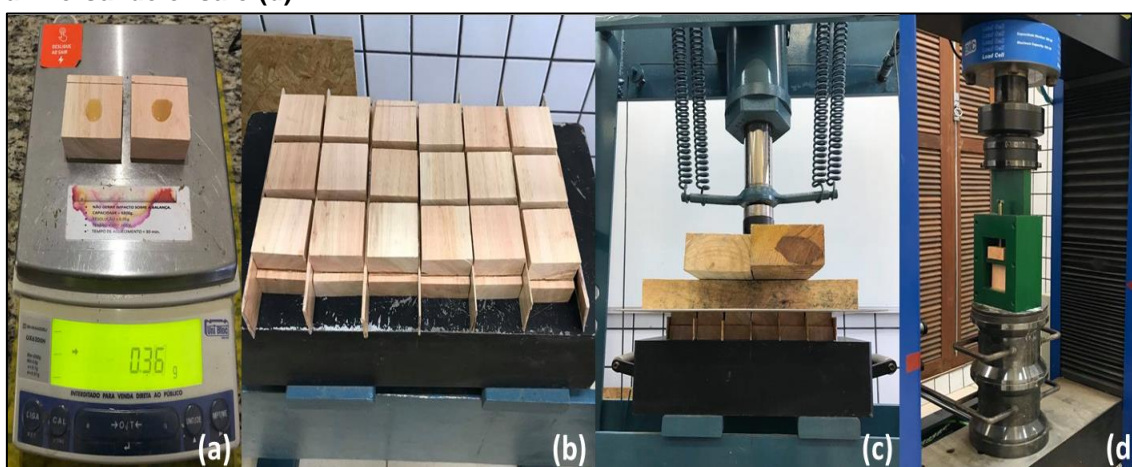
Fonte: Adaptada ASTM D 905 (ASTM, 1998).

A partir dos resultados deste ensaio foi definida a gramatura de adesivo que foi empregada para a elaboração dos modelos de análise de resistência à compressão da madeira laminada colada.

Três lotes com diferentes gramaturas de adesivo por metro quadrado (150, 200 e 250 g/m²) foram ensaiados, contendo cada lote 18 exemplares. A

Figura 18 ilustra o procedimento de montagem e ensaio dos corpos de prova, correspondentes à pesagem do adesivo, montagem dos corpos de prova, prensagem e ensaio de cisalhamento direto. A pressão utilizada no procedimento de prensagem foi correspondente a 1MPa, o tempo em aberto, correspondente ao tempo após o espalhamento do adesivo foi correspondente a aproximadamente 20 min.

Figura 18: Processo de montagem dos corpos de prova ilustrando a pesagem da quantidade de cola corresponde a gramatura em análise (a); Organização para o processo de prensagem (b); Prensagem dos copos de prova (c); Realização do ensaio em prensa universal de ensaio (d).



Fonte: Acervo do autor, 2020.

A definição da gramatura de adesivo aplicada aos corpos de prova deste trabalho, foi correspondente ao lote que apresentou o melhor desempenho no ensaio de cisalhamento da lâmina de cola paralela as fibras.

4.4. Microscopia óptica – Interface madeira-adesivo

O estudo da linha de cola foi realizado a partir da visualização da interface madeira-adesivo; nele, foram retiradas amostras do ensaio de cisalhamento da linha de cola para confrontar a efetividade da gramatura utilizada. Para as fotomicrografias foi utilizando um microscópio de luz transmitida por polarização Zeiss Axioscope 5 (Figura 19), sendo que as amostras foram transversalmente cortadas na direção da linha de cola, polidas com lixa d'água (gramatura 2000). As imagens geradas foram analisadas utilizando um programa computacional de análise de imagens.

Figura 19: Microscópio Zeiss Axioscope 5



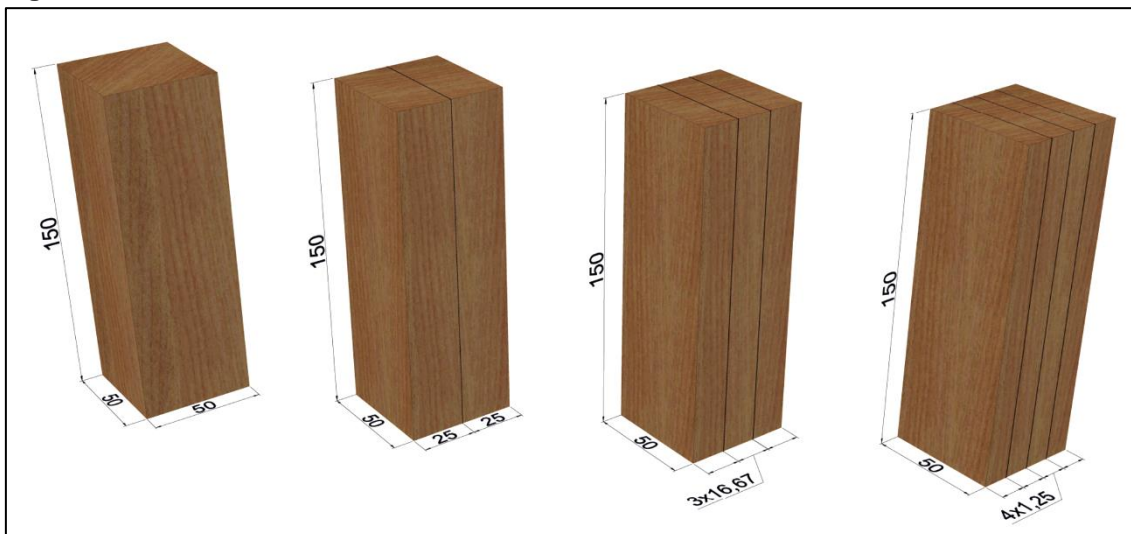
Fonte: Acervo do autor, 2021.

4.5. Resistência à compressão da madeira laminada colada

Os corpos de prova analisados nesse estudo foram montados com lâminas de madeira colada, nas dimensões de 5 cm x 5 cm x 15 cm, divididos em quatro tratamentos (Figura 20): A madeira serrada foi submetida à secagem em temperatura e umidade ambiente, de modo a atingir a umidade entre 10 e 20%.

- Maciço: composto por somente uma lâmina de madeira com espessura de 5 cm;
- Duas lâminas de madeira: composto por duas peças com espessura 2,5 cm;
- Três lâminas de madeira: composto por três peças com espessura 1,67 cm;
- Quatro lâminas de madeira: composto por quatro peças com espessura 1,25 cm.

Figura 20: Modelos de análise da madeira laminada colada

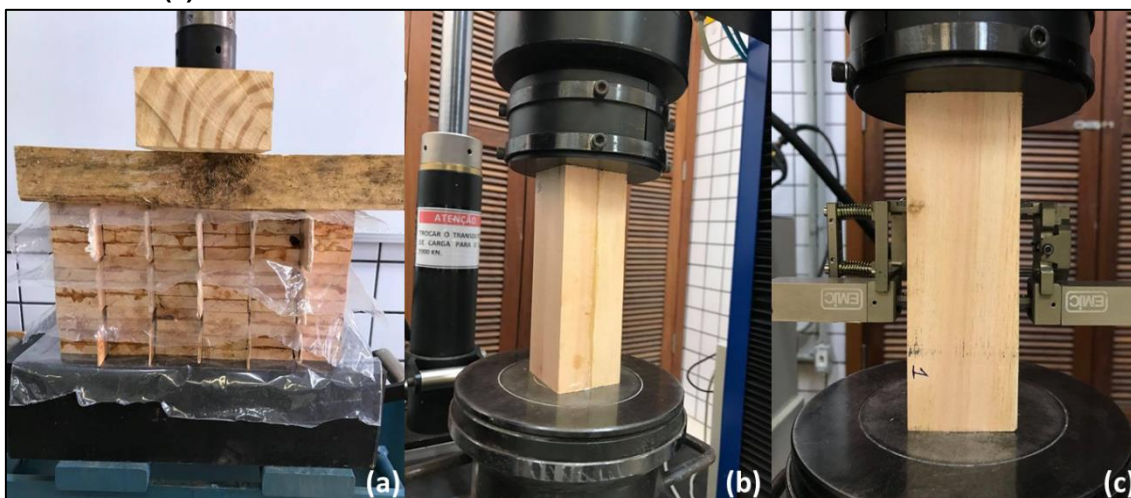


Fonte: Acervo do autor, 2020.

Para cada tratamento foram moldados 12 (doze) corpos de prova. No procedimento de colagem foi empregada a gramatura de adesivo de 150g/m², que apresentou o melhor desempenho no ensaio descrito no item 4.3.1, conforme resultados apresentados no item 5.8.

Na montagem dos corpos de prova para o ensaio de compressão o adesivo foi aplicado em uma das faces de madeira, sendo então submetidos à prensagem durante 24 horas a uma pressão constante de 1 MPa (Figura 21a).

Figura 21: Ilustração do procedimento de prensagem (a); Execução do ensaio de resistência em prensa universal (b); Demonstração da instrumentação de módulo de elasticidade (c).



Fonte: Acervo do autor, 2021.

Após o procedimento de prensagem dos corpos de prova formados por madeira laminada colada, estes foram dispostos em um local coberto e mantidos em equilíbrio higroscópico com o meio, para que o adesivo atingisse a cura completa após decorridos 7 dias.

O ensaio de compressão paralela foi realizado no laboratório de materiais da construção civil, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Toledo, utilizando uma máquina universal de ensaios com capacidade de 300 kN, com uma velocidade de carregamento de 10 MPa/min (Figura 21b). Para medir as deformações foram fixados aos corpos-de-prova dois extensômetros eletrônicos (Figura 21c), um de cada lado, com base de leitura de 10 cm, curso de 2 mm e sensibilidade de 0,5 µm (micrômetro).

Antes dos ensaios foram medidas as dimensões da seção transversal do corpo-de-prova e aferida a massa do corpo-de-prova os ensaios foram realizados com dois ciclos iniciais de carga e um final. Os ciclos iniciais se limitaram a 50% da estimativa da tensão de ruptura (obtida em ensaio prévio de outro corpo-de-prova), sendo a carga mantida constante durante 30 segundos nas tensões correspondentes a 10% e 50% da tensão última, como recomenda a NBR 7190 (ABNT, 1997), e determinado o módulo de elasticidade dos corpos de prova. No ciclo final (terceiro), cujo carregamento foi aumentado gradativamente até a ruptura, obteve-se os resultados de resistência última dos corpos de prova.

Após os ensaios foram anotadas a força de ruptura e os corpos de prova foram pesados novamente, sendo então submetidos à secagem em estufa para determinar o teor de umidade dos corpos de prova na data do ensaio. Quando necessário fez-se o ajuste para 12% conforme NBR 7190/97, segundo a equação 16.

$$f_{12\%} = f_{U\%} \left(1 + \left(\frac{3 + (U_{\%} - 12)}{100} \right) \right) \quad (16)$$

em que:

$f_{12\%}$ = valor da resistência no teor de 12% de umidade;

$f_{U\%}$ = valor da resistência encontrado no teor de umidade ensaiado;

$U_{\%}$ = umidade do corpo-de-prova no momento do ensaio.

4.6. Análise estatística

Com os resultados obtidos para cada ensaio foi verificada a normalidade da distribuição, por meio do teste proposto por Shapiro-Wilk. Em seguida foi aplicado o teste de Dixon para identificar se na amostra continha valores dispersos ou “outliers” utilizando o software R.

Para avaliar a variância dos tratamentos foi empregada análise de variância (ANOVA), e o Teste de Tukey-Kramer, para avaliar se existiu diferença significativa entre as médias dos tratamentos.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos na caracterização da madeira *Eucalyptus urograndis* e dos modelos colados com adesivo poliuretano a base de óleos vegetais.

5.1. Propriedades química da madeira

Considerando a importância dos constituintes químicos da madeira sobre as propriedades, produtos e processos, os valores médios obtidos a partir da caracterização química da madeira estudada, referente aos componentes macromoleculares, extrativos e cinzas e seus respectivos coeficientes de variação são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Caracterização química da madeira

Análises		Mínimo	Máximo	Valores Médios	Coef. de Variação
Químicas	Solubilidade em água quente (%)	5,051	5,555	5,272	4,485
	Solubilidade em água fria (%)	3,052	3,498	3,262	5,552
	Solubilidade em hidróxido de sódio, NaOH (%)	17,150	19,750	18,174	5,504
	Teor de extrativos totais (%)	2,623	4,269	3,357	14,196
	Teor de lignina Klason (%)	27,428	31,771	29,977	5,910
	Teor de lignina total (%)	28,981	33,148	31,530	5,086
	Teor de cinzas (%)	0,387	0,487	0,446	8,077
	Teor de holocelulose (%)	63,601	64,847	64,497	0,789
	Teor de α -celulose (%)	44,844	45,620	45,106	0,697
	Teor de hemicelulose (%)	18,993	20,003	19,391	2,643
	pH	4,630	4,850	4,745	1,319
	Condutividade térmica	80,800	82,300	81,610	0,674

Para o teor de extrativo totais (3,357%) observa-se que a espécie em análise apresenta um valor adequado à proposição de Sjöström (1981), que afirma que o teor desta variável normalmente é inferior a 10%. Ainda, o valor encontrado corrobora com Fengel e Wegener (1989), que mencionam uma faixa de variação para teor de extrativo em folhosas de $3 \pm 2\%$.

Queiroz (2004), também encontra valores de extrativos que variam de 2,73 – 3,45% para *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, enquanto Zanuncio et al. (2013) encontraram variações de 1,9 – 2,7% para a mesma espécie. Os valores obtidos também são levemente inferiores aos encontrados por Lima et al. (2007), que estudando a madeiras de clones de *Eucalyptus* encontraram valor médio de extrativos totais variando entre 5,54 e 4,79%.

A expressiva presença de teores de extrativos exerce forte influência sobre diversos usos industriais e pode ainda inviabilizar algumas aplicações, como a alteração e comprometimento da polimerização dos adesivos na indústria madeireira, comprometendo a qualidade final de produtos como painéis e madeira laminada colada. Ainda, as reações de polimerização e as reações entre adesivos e extrativos dependem não somente da quantidade, mas também do tipo de extrativo presente (HILLIS; BROWN, 1978; LIMA ET AL., 2007).

Em relação à análise de pH o resultado obtido (4,745) encontra-se dentro da faixa apresentada por Johns e Niazi (1980) e Trianoski (2010, 2012) que variam em torno de 3 a 6, sendo possível afirmar que a espécie não possui uma acidez excessiva.

Para a solubilidade em água fria observou uma baixa taxa de solubilidade (3,262%) apresentada pela espécie, no entanto o valor encontrado corrobora com os valores encontrados por Moreira (2016), o qual apresenta valores entre 3,397 e 4,658% para a mesma espécie, enquanto para o *Eucalyptus urophylla* o mesmo autor apresenta valores entre 2,073 e 3,868%. Ribeiro (2016), trabalhando com 12 espécies diferentes de eucalipto encontrou o valor de 3,33 % para o híbrido analisado neste estudo.

Considerando que a água fria solubiliza gomas, taninos, açúcares e corantes, altos teores de solubilidade indicariam valores consideráveis destes componentes na amostra, os quais poderiam desencadear reações com diferentes substâncias quando a madeira utilizada em processos industriais, o que não ocorre na espécie em análise (OLIVEIRA et al., 2005).

Já para a solubilidade em água quente observa-se um valor brandamente superior (5,272 %) ao encontrado em água fria, mas quando comparado com a faixa de valores (5,968 – 9,865 %) encontrada, em mesma análise e espécie, por Moreira (2016), nota-se que o valor obtivo foi levemente inferior. O mesmo autor expõe valores da mesma variável para *Eucalyptus*

urophylla, entre 2,630 e 5,601%, abrangendo o valor obtido. Oliveira et al. (2005) obtiveram valores entre 5,1% e 11,3% para espécies *Eucalyptus gumifera* e *Corymbia citriodora*, respectivamente.

Em relação aos componentes solúveis em NaOH a 1%, que determina o grau de ataque da madeira por fungos e outros agentes de deterioração (TAPPI 212 om-02, 2002), a espécie que apresentou solubilidade (18,174%) condizentes com os encontrados por Moreira (2016) que estão entre 15,829 e 19,289%. Trugilho et al. (2007), analisando a qualidade da madeira de clones de espécies e híbridos de eucalipto, encontraram valores para a espécie analisada neste estudo variando entre 21,26 e 21,89 %, conforme idades das amostras utilizadas.

A solução de NaOH extrai ou dissolve carboidratos de baixa massa molecular, principalmente hemiceluloses e celulose degradada. Assim, a solubilidade da madeira pelo NaOH 1% pode indicar o grau de degradação da celulose pelo ataque de fungos, aquecimento, luz, oxidação. Visualmente, não foram perceptíveis sinais de deterioração nas amostras, como manchas e outras injúrias. Segundo Trianoski (2010) o valor pode ser explicado devido à solubilização (degradação) da lignina e das hemiceluloses, o que pode aumentar a quantidade de componentes solúveis neste reagente, sem a madeira apresentar realmente a degradação.

Das constituições químicas da madeira, o teor de extrativos é um dos principais parâmetros para efetivar uma boa colagem, possuir um baixo teor de extrativos, sejam eles solúveis ou não, como o encontrado neste estudo pode ser uma vantagem para realizar a colagem, tanto lateral quanto de topo ou de lamelas (Tsoumis, 1991). Neste trabalho foi determinado apenas o percentual de extrativos totais.

Quanto ao teor de cinzas (0,446%), o valor obtido em laboratório corrobora com a faixa 0,18 a 0,41 %, para a mesma espécie em estudo apresentada por Soares et al. (2014). Também Fengel e Wegener (1989), definem que compostos minerais, denominados cinzas, cujo teor corresponde a valores que variam de 0,1 a 1,0% do peso de matéria seca das madeiras de clima temperado, podendo atingir 5 % para as de clima tropical. Medeiros et al. (2016), analisando propriedades físicas e químicas da madeira juvenil de eucalipto, obtiveram valores entre 0,67 e 0,51 % para as espécies *Eucalyptus urograndis* e *Corymbia citriodora* respectivamente.

Estes valores são superiores aos encontrados por Morais, (2008) que, estudando clones de *Eucalyptus* encontrou valores entre 0,12 e 0,50%. Já Moulin et al. (2015), estudando clones *Eucalyptus* em diferentes espaçamentos, obtiveram valores médios variando entre 1,29 e 1,48% para a mesma variável em análise.

O baixo teor de cinzas é um bom indicativo para aplicação desta madeira como combustível. Pois, em aplicações como energia, indica-se a escolha de madeiras de baixo teor de inorgânicos já que, quando presentes em percentual elevado, favorecem a produção de alto teor de resíduos na combustão (BARCELLOS et al., 2005), o que não é objetivo deste estudo.

A holocelulose é o constituinte com maior proporção na madeira de *E. urograndis* totalizando (64,497%), sabe-se que quanto maior o teor de holocelulose, maior a higroscopicidade da madeira, uma vez que a celulose e a hemicelulose são as maiores responsáveis por essa propriedade (SKAAR, 1972). No entanto, o conteúdo de holocelulose obtido está na mesma faixa encontrada em madeiras de maior idade em híbridos de *E. urophylla* x *E. grandis*. Ferreira et al. (2006) encontraram valores entre 64,4 e 70,3% para a mesma variável em árvores entre 7 e 9 anos, enquanto Gomide et al. (2005), obtiveram valores entre 64,5 e 70,2% aos 7 anos de idade.

Ao avaliarem um híbrido natural de *Eucalyptus urophylla*, com 7 anos de idade, Andrade et al. (2010) encontraram valores médios de 28,2 e 66,6% para lignina total e holocelulose, respectivamente. Nota-se similaridade nos valores obtidos neste estudo com a literatura, mesmo sendo de espécies díspares e ainda considerando que são de procedência e idades distintas.

A espécie apresentou teor de lignina total, 31,530%, superior ao obtido por Sansígolo e Ramos (2011), que avaliaram madeira de *Eucalyptus grandis* aos 4 anos de idade, encontrando teores médios de lignina entre 22,8% e 23,8%, também Silva et al. (2005) encontraram cerca de 23,78% de lignina, em madeira de eucalipto com 10 anos, e Barreiros et al. (2007) obtiveram teor de lignina de 24% em madeira de *Eucalyptus grandis*, cinco anos após o plantio.

Ainda Gomide et al. (2005), Santana (2009) e Medeiros et al. (2016) obtiveram valores variando entre 26,70% e 31,7%, o que demonstra similaridade com o valor obtido neste estudo, ambos trabalhos analisaram a mesma espécie definida como objeto de análise nesta dissertação.

Trianoski (2012) verifica que analisando a composição química das espécies *Pinus taeda* e *Tectona grandis* para a colagem com o adesivo PU, é esperado que quanto maior o teor de extrativos totais menor será a adesão do adesivo na madeira, devido a presença de ácidos graxos e estes dificultarem a adesão química com o adesivo. Em contrapartida, quanto maior o teor de lignina maior será a chance de uma adesão química mais resistente entre o adesivo e madeira.

Os resultados deste estudo reforçam a ideia de que a madeira no sistema de curta rotação possui valores próximos aos citados na literatura para o sistema convencional de ciclo longo o que faz com que a madeira possa ser destinada para os mais diversos fins, assim como o uso em procedimento de colagem, a exemplo, em madeira laminada colada.

5.2. Propriedades do adesivo

Na Tabela 4 são apresentados os valores médios das propriedades do adesivo utilizado na colagem da madeira de eucalipto.

Tabela 4: Valores médios das propriedades dos adesivos

<i>Propriedades do Adesivo</i>	
Viscosidade (mPas ou cp)	4.488,18
Teor de Sólidos (%)	96
pH (componente A)	1,11
pH (componente B)	4,28
pH (mistura)	5,35
Tempo de Trabalho (min)	26
Gel Time (segundos)	198

O tempo de trabalho indica a maleabilidade, ou seja, vida útil do adesivo, após o preparo, até a fase de gel, quando atinge a máxima viscosidade. Verificou-se que o adesivo apresentou tempo de trabalho igual a 26 minutos. As proporções entre o polioliol e o endurecedor (isocianato), determinam a rigidez ou elasticidade da linha de cola formada, e irão definir a fácil trabalhabilidade para o espalhamento do adesivo na madeira.

Um índice mais elevado de isocianato na estequiometria leva à obtenção de uma linha de cola mais rígida, além de favorecer substratos que contenham grupos hidroxila, como madeira, enquanto um excesso de polioliol resulta em linha

de cola mais elástica (VILAR, 2002). Este fato está diretamente ligado à viabilidade de se trabalhar com o adesivo, antes de sua polimerização ou cura. Notou-se que o adesivo possui um tempo de trabalho reduzido, ou seja, a reação de polimerização entre o polioli e endurecedor foi rápida, o que embaraçou o espalhamento e fluidez do adesivo na madeira durante o processo de colagem.

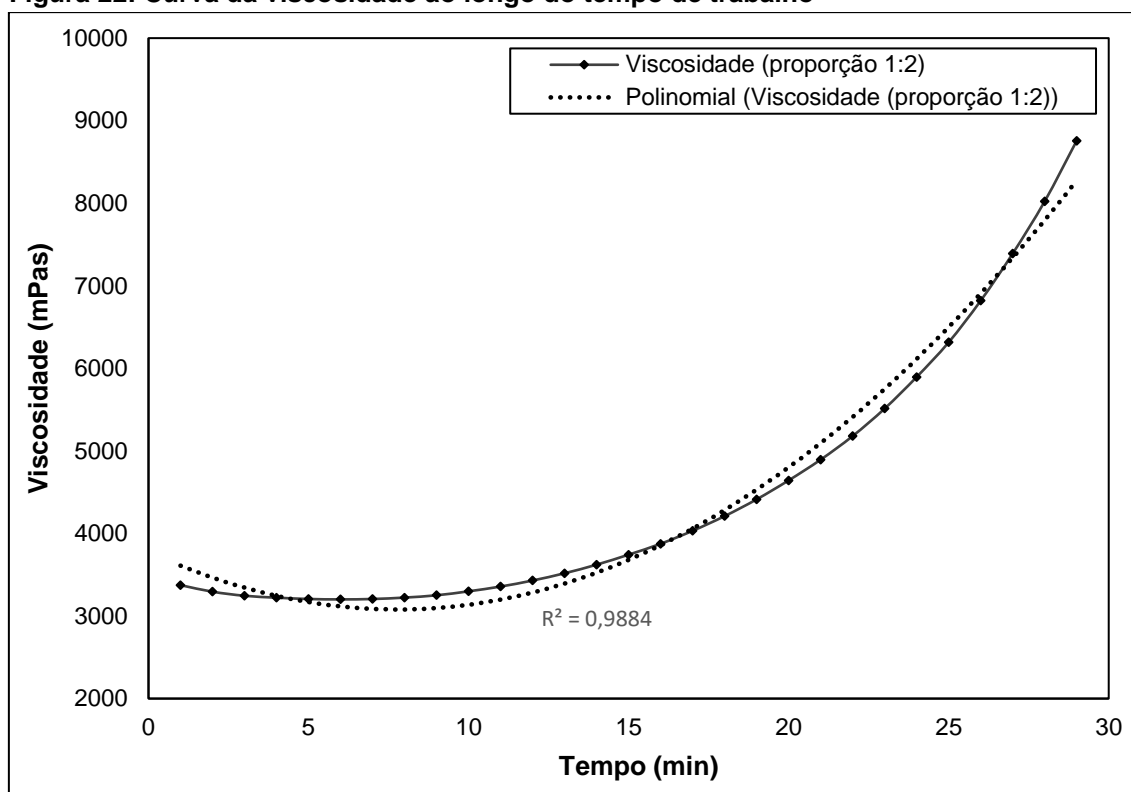
A viscosidade também está relacionada ao grau de fluidez do adesivo, pois uma viscosidade muito elevada prejudica a molhabilidade, a distribuição uniforme do adesivo sobre a madeira e a permeabilidade do adesivo. A viscosidade média obtida para as amostras foi de 4.488,18 cp, conforme Tabela 4. Iwakiri et al. (2014) analisando características de vigas laminadas coladas encontrou para uma emulsão de poliuretano e isocianato viscosidade Brookfield de 5.500 cp.

Já Santiago et al. (2018) utilizando adesivos naturais a base de taninos e ureias para a colagem de eucaliptos, obtiveram valores entre 1.044,66 e 3.387,70 cp para os diferentes tipos de adesivos analisados. Ainda, Bianche et al. (2017), avaliando o cisalhamento da linha de cola de *Eucalyptus* sp. colado com diferentes adesivos, obtiveram viscosidade entre 250 e 9.000 cp para os adesivos analisados.

O adesivo objeto de estudo deste trabalho apresentou viscosidade elevada e reação rápida de polimerização, resultando em um menor tempo de trabalho, dificultando durante a colagem o seu espalhamento na madeira, ocorrendo provavelmente uma pré-polimerização do adesivo, o que pode influenciar na resistência na linha de cola.

Ainda é importante destacar na análise da viscosidade ao longo do tempo, como demonstra a Figura 22, um aumento considerável da viscosidade após 20 minutos do processo de polimerização do adesivo, em que a viscosidade passa de 4.643,1 cp e atinge 6.819,54 cp aos 26 minutos, definidos como o tempo de trabalho do adesivo. Ainda o adesivo alcança aos 29 minutos uma viscosidade de 8.757,13 cp, o que pode comprometer a molhabilidade do material e afetar a característica de ocupar os interstícios dos substratos promovendo a ligação entre eles.

Figura 22: Curva da viscosidade ao longo do tempo de trabalho



Fonte: Acervo do autor, 2020.

De acordo com Jesus (2000), elevada viscosidade compromete a profundidade de penetração do adesivo no interior do aderente, uma vez que a fluidez do adesivo tem importância para que a penetração ocorra de forma adequada, sendo que a falta ou excesso de penetração produz uma linha de cola deficiente, colaborando para o enfraquecimento da junta.

Durante o processo de polimerização entre os grupos do isocianato e hidroxila, ocorrem reações paralelas formando poliuretanas e poliureias, composto com excelentes propriedades mecânicas. Contudo, estas reações paralelas ocorre a liberação de CO_2 acarretando a formação de bolhas (VILAR, 2002; AZEVEDO 2009). Na análise microscópica da interface de ligação foi possível evidenciar a formação dessas bolhas de CO_2 , como será discutido adiante, o que dificulta o processo de prensagem, pois torna possível uma movimentação entre as lamelas dos corpos de prova, o que pode acarretar a formação de defeitos e baixa de resistência.

O teor de sólidos (96%) no adesivo estudado foi superior ao encontrado por Bianche (2014), que obteve o valor de 91% para um poliuretano a base de óleo de mamona. Oliveira (2016), obteve valor de sólidos de 75% para

poliuretano de origem vegetal, valor menor do que o obtido nestes estudos, enquanto Soares et al. (2017) apresentaram 98,8% para teor de sólidos em poliuretano a base de óleo de mamona. Esta variável é uma propriedade de grande importância na colagem e pode ser entendida como a quantidade de sólidos do adesivo que forma a linha de cola. O alto teor de sólidos pode contribuir para maior resistência na linha de cola.

Para o pH, observa-se que um dos componentes do adesivo possui pH ácido. Oliveira (2016) constatou valor de pH 6,00 na análise de poliuretano, similar ao encontrado neste estudo. Nota-se que o pH permaneceu dentro da faixa estabelecida pela literatura, reduzindo possíveis reações entre extrativos e o adesivo, evitando o comprometendo o procedimento de adesão. No entanto o processo de formação de espuma, ou seja, a formação de microbolhas de ar conforme supracitado foi evidenciada mesmo com o valor de pH não estando aos extremos da faixa descrita em literatura.

5.3. Análise termogravimétrica, calorimetria exploratória e difratograma de raio-X da madeira

Os eventos térmicos observados para a serragem de *Eucalyptus urograndis*, Figura 23, descreve estágios de desidratação, degradação térmica e calcinação. O primeiro evento, próximo a 53 °C, refere-se à desidratação das moléculas de água presente na estrutura da madeira com uma perda de massa de aproximadamente 30%.

De acordo Randriamantena et al. (2009), na faixa de temperatura compreendida entre 100 e 200 °C a perda de massa é mínima, para a amostra analisada obteve 0,47%. Essa faixa é limitada pela temperatura inicial de degradação térmica dos componentes da madeira, denominada zona de estabilidade térmica.

O segundo evento, em torno de 234 °C, é referente a degradação térmica da hemicelulose (PEREIRA et al., 2013), com aproximadamente 24% de perda de massa.

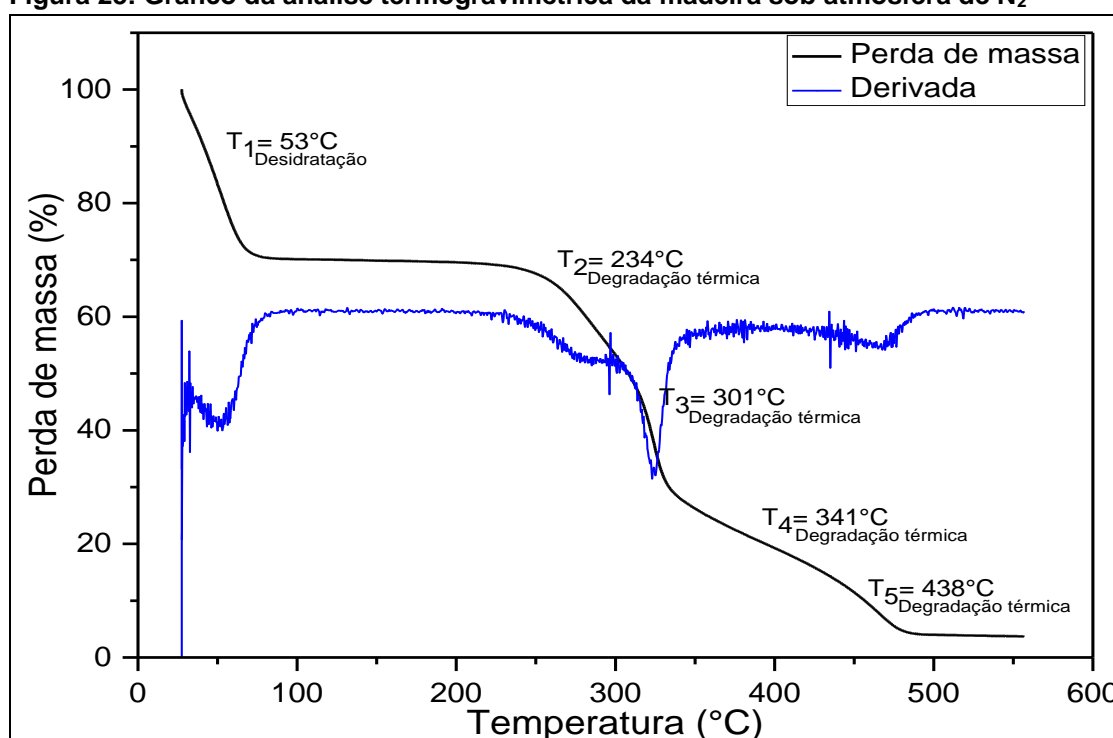
A degradação térmica da celulose ocorre posterior á da hemicelulose como observado no terceiro evento térmico, por volta de 341°C (PEREIRA et al., 2013), com uma perda de massa de 34%. Conforme descrito por Liao (2003), a

temperatura de degradação da celulose ocorre posteriormente à degradação térmica das hemiceluloses, tal evento deve-se a maior quantidade de energia necessária para a despolimerização da cadeia de celulose e a quebra de seus monômeros.

A combinação de hemicelulose com celulose é chamada de holocelulose (SANTOS et al, 2001; Klock, et al., 2013). De acordo com a Tabela 3 o valor obtido para a amostra foi de aproximadamente 64% o que corrobora com a degradação térmica dos somatórios dos eventos dois e três. A diferença encontrada entre os valores, pode ser explicada pela presença de resíduos de lignina que sofrem degradação em uma ampla faixa de temperatura (160 a 900°C) (YANG et al., 2007).

O quarto e quinto evento térmico, 341 °C e 438 °C respectivamente, correspondem à degradação de aproximadamente 32% em massa da amostra, o que corrobora com a massa de lignina descrita na Tabela 3. O termograma descreve que os eventos térmicos acontecem até a temperatura máxima de 480 °C. Conforme (SHEN et al., 2019), após esta temperatura observa-se a calcinação dos resíduos presentes na estrutura da madeira. Para a amostra obteve-se o valor de aproximadamente 0,5% que corresponde ao teor de cinzas descrito na Tabela 3.

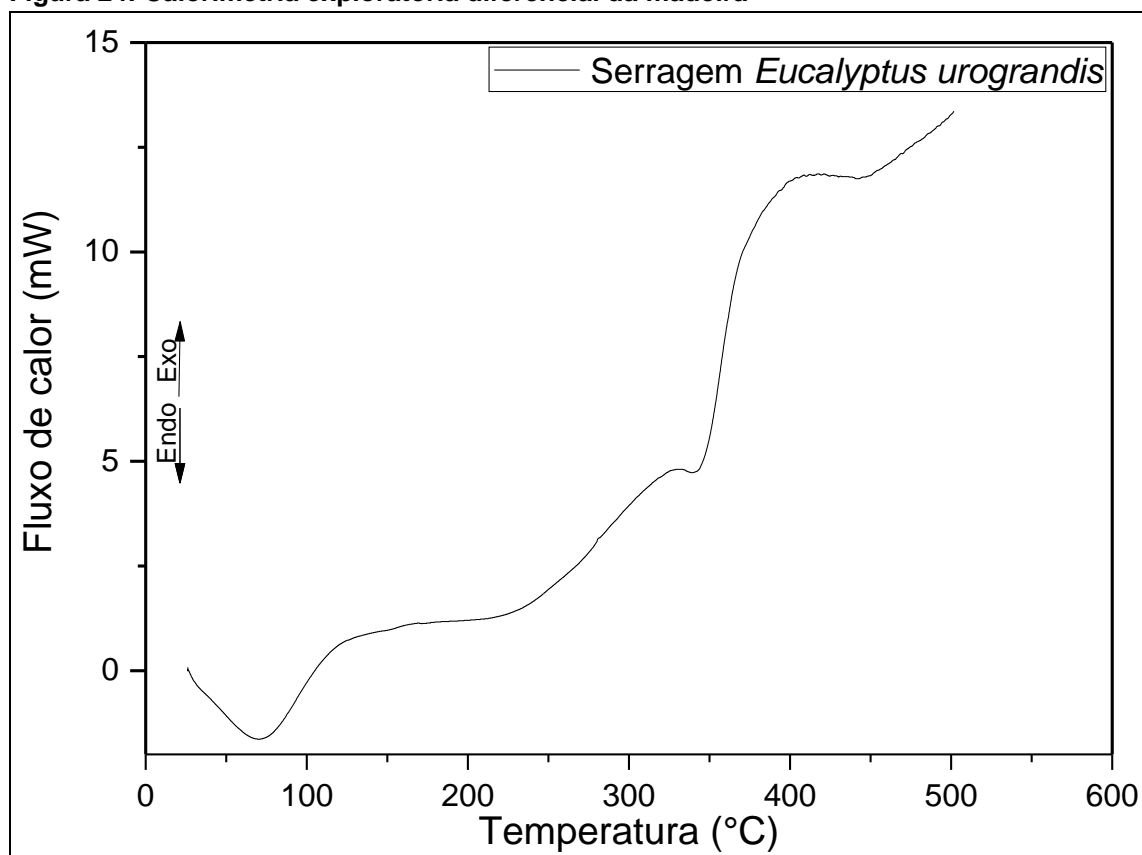
Figura 23: Gráfico da análise termogravimétrica da madeira sob atmosfera de N₂



Fonte: Acervo do autor, 2020.

A Figura 24 apresenta a curva de calorimetria exploratória diferencial (DSC), para a serragem de *Eucalyptus urograndis*. O primeiro evento endotérmico em aproximadamente 70°C, corresponde a perda de água, que inicialmente absorve energia para sua secagem e posterior ruptura das ligações presentes em seus componentes estruturais, passando então, a liberar energia assim que os compostos de degradação se formam (OLIVEIRA 2003). Corroborando com os dados de degradação térmicas obtidos na análise termogravimétrica, os eventos endotérmicos em 325 °C e 441 °C são respectivos à decomposição da hemicelulose e celulose.

Figura 24: Calorimetria exploratória diferencial da madeira

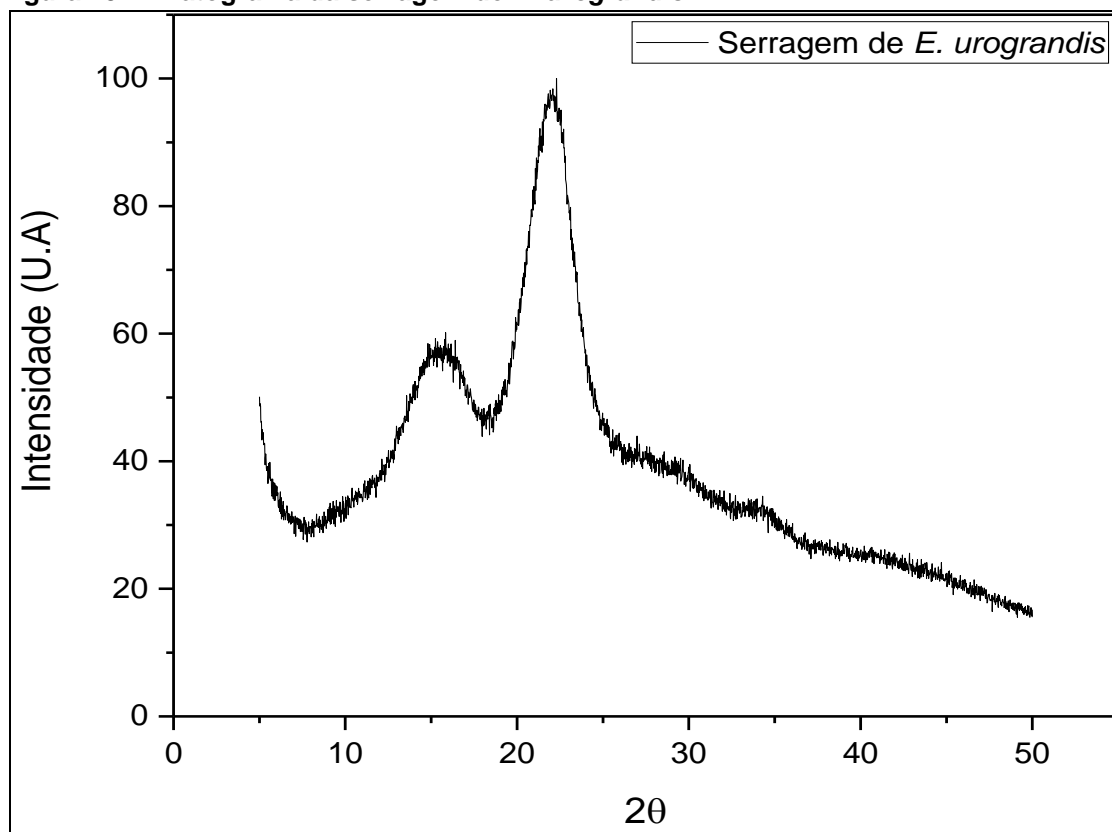


Fonte: Acervo do autor, 2020.

O difratograma da serragem de *E. urograndis*, Figura 25, descreve o comportamento polimórfico do material, corroborando como descrito no item 3.7.2. O pico de $2\theta = 15^\circ$, sugere que este comportamento esteja atrelado a grande parcela de celulose existente no estado polimorfo de celulose I β (FRENCH, 2014). Observa-se também comportamento típico de materiais

semicristalino, o pico em $2\theta = 22^\circ$ que é atribuído ao plano de rede (002) da celulose I (PRADO et al., 2017).

Figura 25: Difratograma da serragem de *E. urograndis*



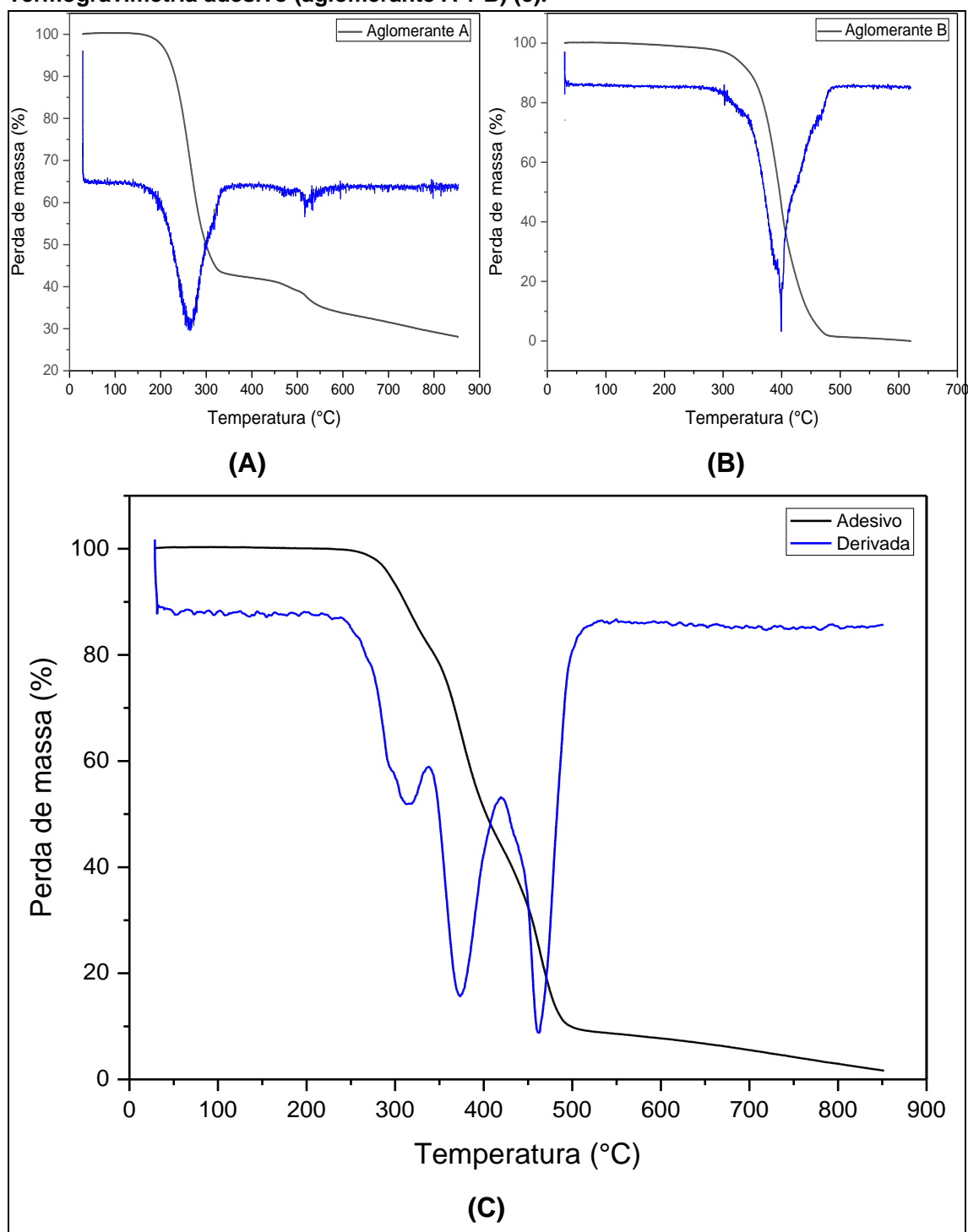
Fonte: Acervo do autor, 2020.

5.4. Análise termogravimétrica, difração de raio-X e FTIR do adesivo

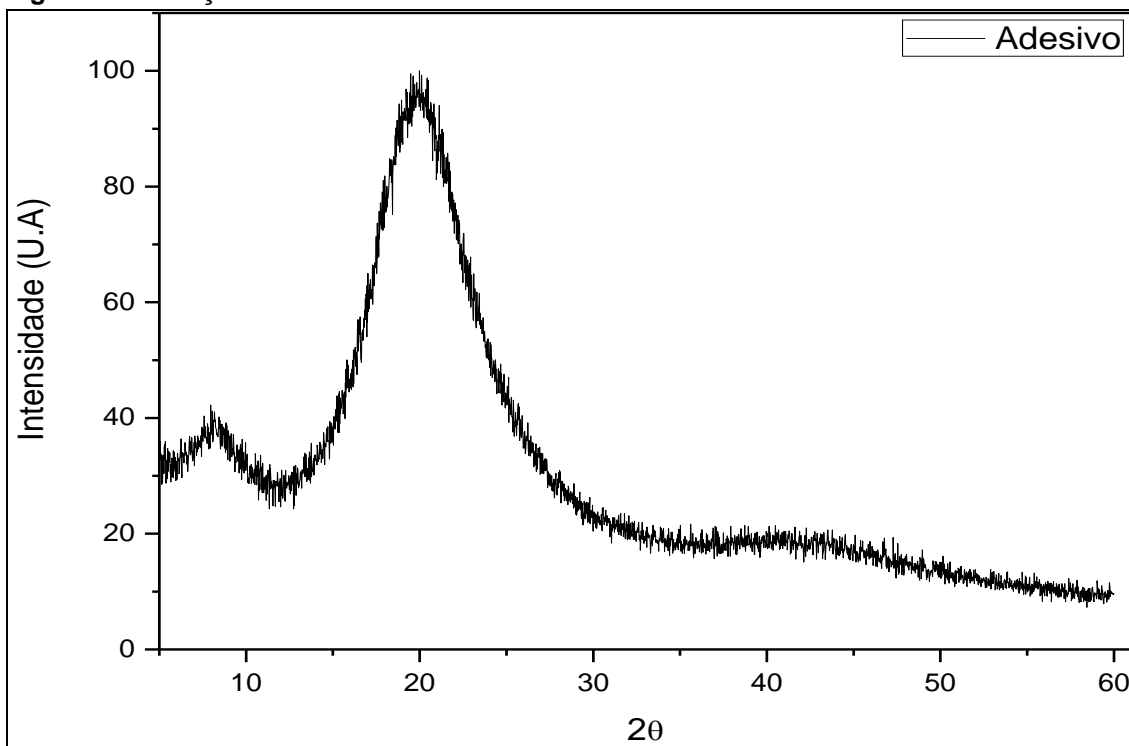
Para o termograma do aglomerante A, isocianato di ou polifuncional, o evento térmico observado em aproximadamente 260°C (Figura 26a), refere-se à degradação das ligações uretanas da estrutura química, atribuído à fase rígida (HERRERA et al., 2002). O aglomerante B, polioli de base natural, observa-se um único evento térmico em 400°C (Figura 26b), atribuída à degradação das cadeias de polioli (COSTA et al., 2017).

A junção dos aglomerantes A e B, resulta em um aumento na estabilidade térmica do composto, como observado no termograma (Figura 26c). Este aumento proporcionou um acréscimo na faixa de temperatura de decomposição das ligações uretanas, de 260°C para 315°C e das ligações das cadeias de polioli, de 401°C para 465°C (CARVALHO et al., 2014).

Figura 26: Termogravimetria aglomerante A (a); Termogravimetria aglomerante B (b); Termogravimetria adesivo (aglomerante A + B) (c).

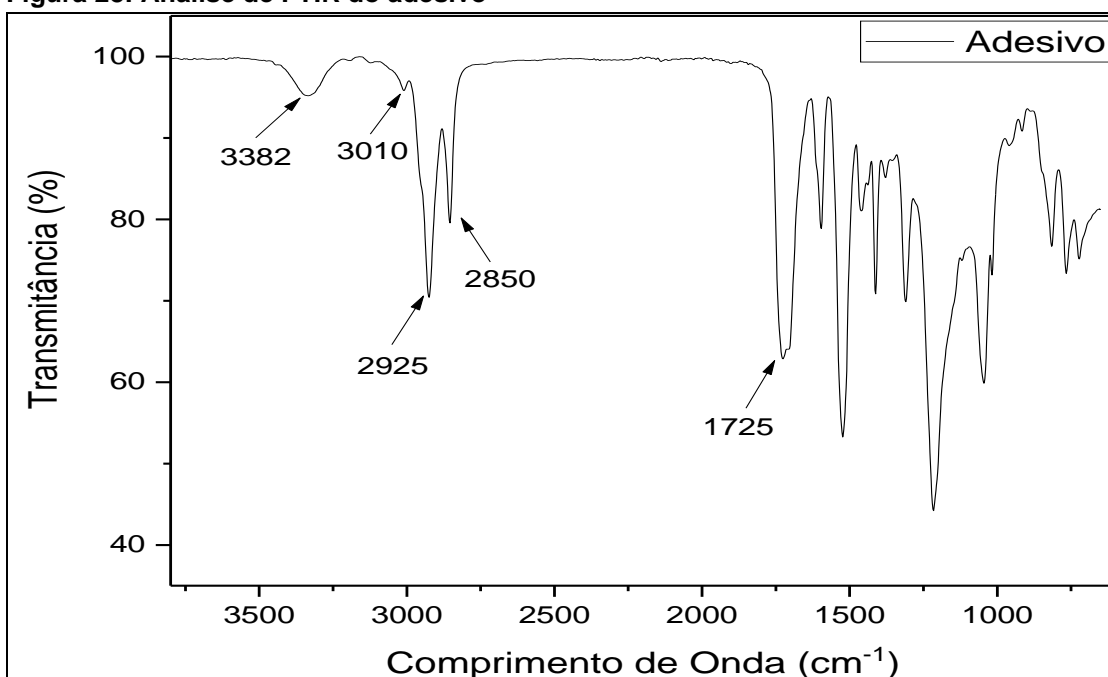


Fonte: Acervo do autor, 2021.

Figura 27: Difração de raio-x do adesivo

Fonte: Acervo do autor, 2021.

As análises de DRX permitem avaliar o comportamento cristalográfico da amostra. A Figura 27 descreve que o adesivo apresenta um comportamento cristalino. Segundo Yang (2003), o pico cristalino em 20° deve-se ao empilhamento dos segmentos rígidos aos quais contém os anéis aromáticos.

Figura 28: Análise de FTIR do adesivo

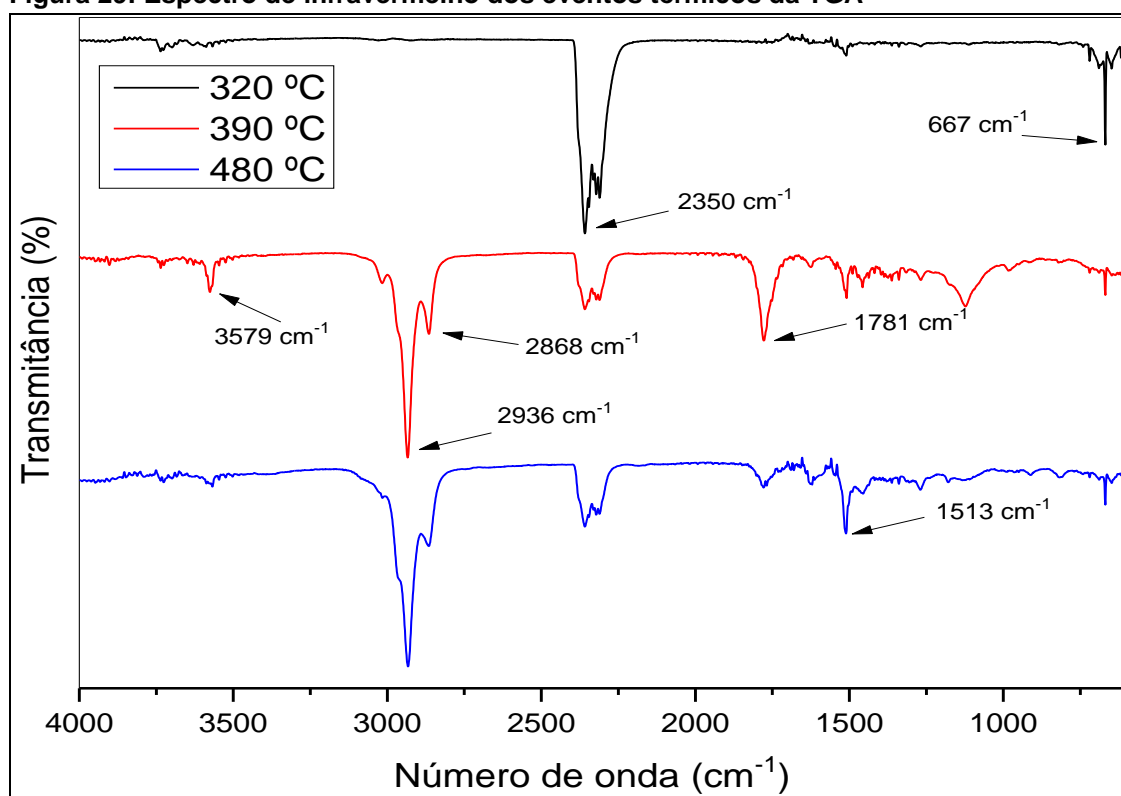
Fonte: Acervo do autor, 2021.

O espectro de infravermelho auxilia na identificação das bandas características de funções orgânicas presentes na amostra. A Figura 28 apresenta bandas características de compósitos de óleo de mamona, em 3.382 cm^{-1} banda referente as interações OH, em 3010 cm^{-1} referente a estiramentos C=C do poliuretano, em 2.925 cm^{-1} e 2.850 cm^{-1} devido ao estiramento simétrico e assimétrico C-H respectivamente, e em 1.725 cm^{-1} referente à carbonilas de éster (PAVIA, et al., 2014; JEANNE, 2009).

5.5. Análise dos gases evoluídos (EGA)

O infravermelho (Figura 29) dos gases desprendidos nas três temperaturas, relacionadas às derivadas do termograma (dTg), Figura 26c, item 5.3.

Figura 29: Espectro de infravermelho dos eventos térmicos da TGA



Fonte: Acervo do autor, 2021.

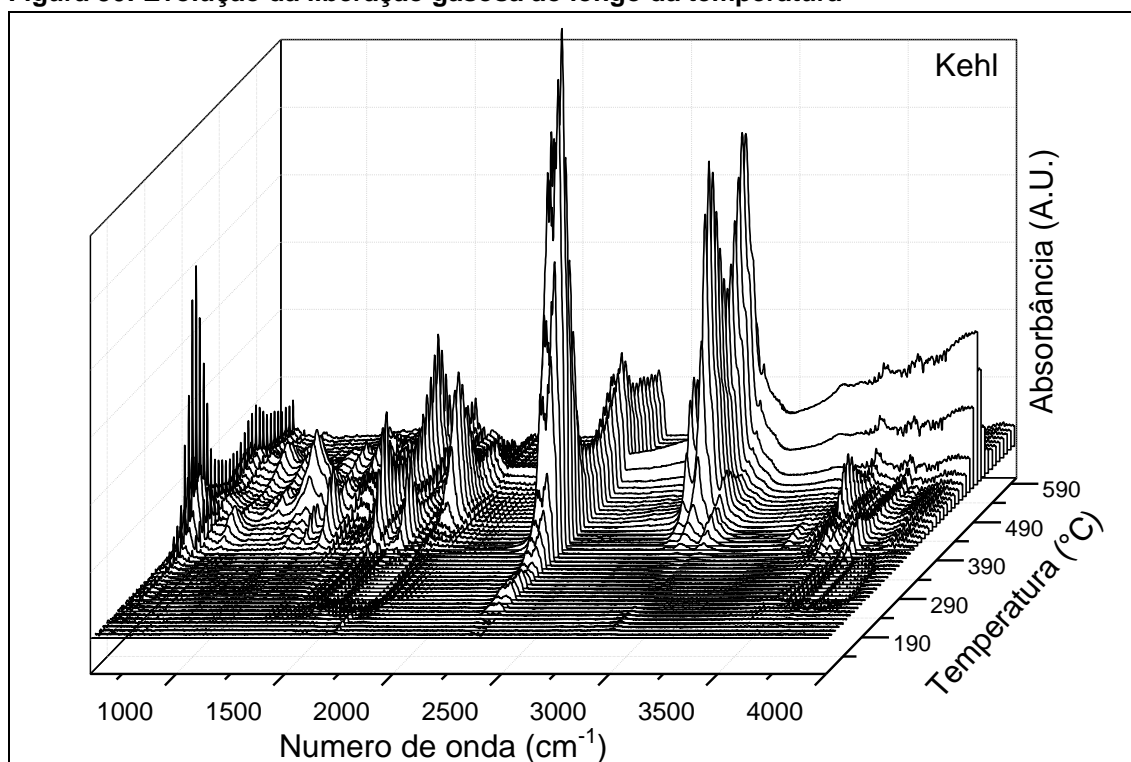
O primeiro evento térmico que ocorre aos 320 °C , apresenta uma banda de 667 cm^{-1} e outra de forte intensidade em 2350 cm^{-1} , as quais, são causados pelo dióxido de carbono (CO_2), a intensidade da banda diminui de acordo com o

aumento da temperatura, corroborando com a temperatura máxima de degradação destes grupamentos (MAGNUSSON, R.; NYHOLM, S.; ASTOT, C 2012; LOPES, 2014; PAVIA, et al., 2014)

A banda em 1.781 cm^{-1} denota do estiramento de carbonilas ($-\text{C}=\text{O}$), já as bandas em 2.868 e 2.936 cm^{-1} correspondem ao estiramento simétricos do carbono sp^3 ($-\text{CH}-$), já a última banda do espectro referente a temperatura de $390\text{ }^\circ\text{C}$, em 3.579 cm^{-1} é atribuído as amins secundárias ($-\text{NH}-$) (CARVALHO et al., 2009; LOPES, 2014; PAVIA, et al., 2014)

Já o espectro em $480\text{ }^\circ\text{C}$ apresenta eventos em menor e maior intensidade correspondentes ao das temperaturas já supracitadas, destacando-se a banda em 1.513 cm^{-1} referente a deformação angular simétrica, de amida secundárias ($-\text{NH}_2$) (CARVALHO et al., 2009; LOPES, 2014; PAVIA, et al., 2014). A Figura 30 demonstra a evolução dos espectros ao longo de todo o procedimento de análise de termogravimetria da amostra.

Figura 30: Evolução da liberação gasosa ao longo da temperatura



Fonte: Acervo do autor, 2021.

Ainda como é possível verificar nas Figura 29 e Figura 30, que não há liberação tóxica provocada pelo gás cianeto de hidrogênio (HCN), uma vez que este apresenta um espectro característico com bandas duplas em 3.300 cm^{-1} .

Também, a ausência de bandas na região de 2.000 – 2.300 cm^{-1} confirma que todos os grupos isocianato estiveram envolvidos na reação (CARVALHO et al., 2009; PAVIA, et al., 2014).

5.6. Propriedades físicas e mecânicas da madeira

Na Tabela 5 são apresentados os valores médios das propriedades físicas da madeira de *Eucalyptus urograndis*.

Tabela 5: Propriedades físicas da madeira²

Madeira	Estabilidade dimensional (%)			Den. Ap. (g/cm^3)	Den. Bás. (g/cm^3)	Coef. de Anisotropia
	Retração					
	ϵ_{long}^1	ϵ_{rad}	ϵ_{tg}			
<i>Eucalyptus urograndis</i>	Máx.	1,20	5,13	8,82	0,586	1,72
	Mín.	0,07	1,95	1,65	0,426	
	Méd.	0,54 ³	3,33	2,93	0,500a	
	Desv.					
	Pad.	0,002	0,008	0,010	0,042	

¹ ϵ_{long} retração longitudinal; ϵ_{rad} retração radial; ϵ_{tg} retração tangencial; ²Análise realizada com 54 corpos de prova. ³Médias seguidas de mesma letra, na coluna, não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey a 5% de significância.

Conforme supracitado a colagem da madeira e a densidade se relacionam com a permeabilidade, que influenciam na penetrabilidade do adesivo na madeira (IWAKIRI, 2005). Uma menor densidade da madeira facilita a penetração do adesivo na madeira, podendo em alguns casos, se o adesivo for pouco viscoso, resultar em linha de cola faminta.

No entanto, o resultado da densidade básica (Tabela 5), para a espécie em estudo corroboram com o descrito por Aparecida de Sá et al. (2010), em que estudando a absorção de superfície de painéis compensados, encontraram densidade básicas para as madeiras de *Eucalyptus* sp. 0,560 g/cm^3 . Gonzalez et al. (2014), analisando a densidade da madeira ao longo do tronco de *Eucalyptus urograndis*, obtiveram valor sendo 0,510 g/cm^3 .

Medeiros et al. (2016), analisando as propriedades físicas e químicas da madeira juvenil, obtiveram para a mesma espécie analisada neste estudo densidade básica variando de 0,460 g/cm^3 a 0,490 g/cm^3 na base e topo, respectivamente. Tal fato pode ser justificado pela idade do povoamento

avaliado, já que indivíduos mais velhos tendem a apresentar maior densidade devido à elevada cernificação da madeira, o que as torna mais estáveis dimensionalmente (MALO 2015; MEDEIROS et al., 2016).

Quanto aos valores de retração linear, não houve diferença entre os indivíduos. No entanto, observou-se valores médios de retração radial, tangencial e longitudinal de 3,33%, 2,93% e 0,54%, respectivamente, os quais são inferiores ao encontrados por Oliveira, Tomazello Filho e Fiedler (2010) para *E. urophylla* 7,9%, 15,3% e 0,3% para as retrações radial, tangencial e longitudinal, respectivamente com idade aproximada de 16 anos.

Eleotério et al. (2015) determinaram e compararam a densidade básica e aparente a 12% de umidade e os coeficientes de contração radial, tangencial e volumétrico de cinco espécies e um híbrido de eucalipto. As amostras de Eucalipto foram retiradas de árvores com 14 anos. Os valores médios de retração radial e tangencial obtidos foram de 4,1% e 7,1%, respectivamente.

Medeiros et al. (2016) também avaliaram os coeficientes de retratibilidade do *E. urograndis*, encontrando valores de 1,09%, 4,17% e 8,56% para longitudinal, radial e tangencial respectivamente, aproximando-se mais dos valores obtidos neste trabalho.

A madeira retrai ou incha em resposta as mudanças de umidade, essas mudanças na dimensão são influenciadas por diversos fatores, como temperatura, extrativos, tratamento químico, orientação anatômica e tipo de madeira. A retração longitudinal é de magnitude inferior ao radial, devido a orientação das microfibrilas de celulose presentes na parede celular, o que corrobora com os resultados obtidos neste estudo (HILL, 2007).

A umidade da madeira foi avaliada durante a realização deste trabalho. Inicialmente, quando montada a pilha de secagem, a umidade das peças de madeira não foi medida, pois estas se encontravam recém cortadas. Decorridos 14 dias de secagem natural, foi realizada a primeira medição da umidade de algumas peças utilizadas no estudo, e notou-se pequena redução com o passar dos dias, portanto, aproximadamente 112 dias foram suficientes para que a pilha chegasse no teor de umidade de equilíbrio com o ambiente (Tabela 6). Decorridos 206 dias notou-se que, de maneira geral, houve homogeneidade entre as amostras quanto à secagem da madeira.

Tabela 6: Umidade da madeira

Madeira		Umidade 14 dias (%) ¹	Umidade 36 dias (%) ¹	Umidade 112 dias (%) ¹	Umidade 149 dias (%) ²	Umidade 196 dias (%) ²	Umidade 206 dias (%) ²
<i>Eucalyptus urograndis</i>	Máx.	96,614	63,671	12,910	13,051	14,121	13,182
	Mín.	34,687	33,056	11,988	11,946	12,081	11,779
	Méd.	67,836 ^{a3}	47,184 ^b	12,430 ^c	12,454 ^c	12,871 ^c	12,464 ^c
	Desv. Pad.	17,331	7,659	0,242	0,286	0,597	0,274

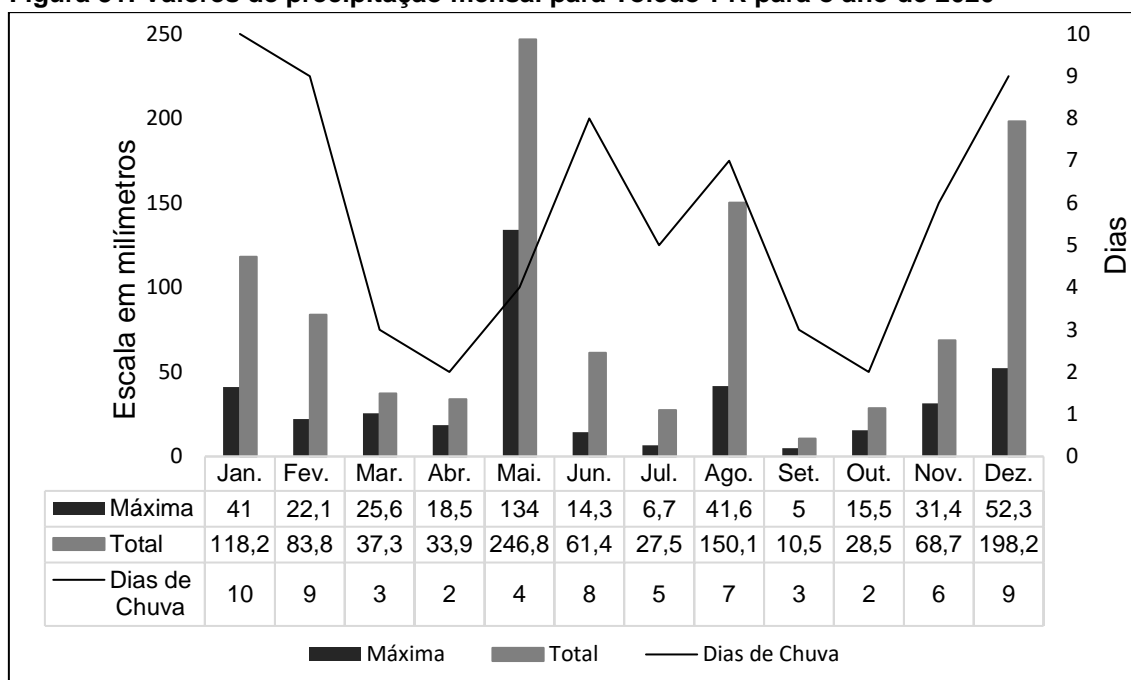
¹Análise realizada com 54 corpos de prova. ²Análise realizada com 20 corpos de prova. ³Médias seguidas de mesma letra, na coluna, não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey a 5% de significância.

A umidade da madeira depende de condições atmosféricas, sendo, portanto, um parâmetro dependente das variações sazonais da temperatura e da umidade relativa do ar da região. Esses elementos meteorológicos podem variar diariamente.

Nesse sentido, nota-se que a umidade das peças (Tabela 6) permaneceu praticamente constante e relativamente baixa a partir de 112 dias, isso corrobora com os dados climatológicos apresentados pelos SIMEPAR (2020) para o ano de 2020, em que o volume de chuva foi abaixo das médias mensais dos anos anteriores, favorecendo que as temperaturas médias fossem ligeiramente superiores à média, definindo com um ano mais seco, o que justifica os valores de umidade permanecerem homogêneos ao longo de dias.

A Figura 31 comprova de forma ilustrativa os dados de precipitação ao longo do ano fornecido pelo Instituto das Águas do Paraná, apêndice 1, para o município de Toledo-PR, corroborando com os relatórios do SIMEPAR (2020). Verifica-se um precipitado anual de 1.064,9 mm, com um mês de máxima precipitação chegando a 246,6 mm correspondente a maio e um mês de mínima de 10,5 mm correspondendo ao mês de outubro.

Figura 31: Valores de precipitação mensal para Toledo-PR para o ano de 2020



Fonte: Acervo do autor, 2021.

5.7. Cisalhamento paralelo as fibras da madeira *Eucalyptus urograndis*

O ensaio de resistência ao cisalhamento paralelo as fibras da madeira, foi conduzido conforme as recomendações da NBR 7190 (ABNT, 1997) e o resultado médio é apresentado na Tabela 7.

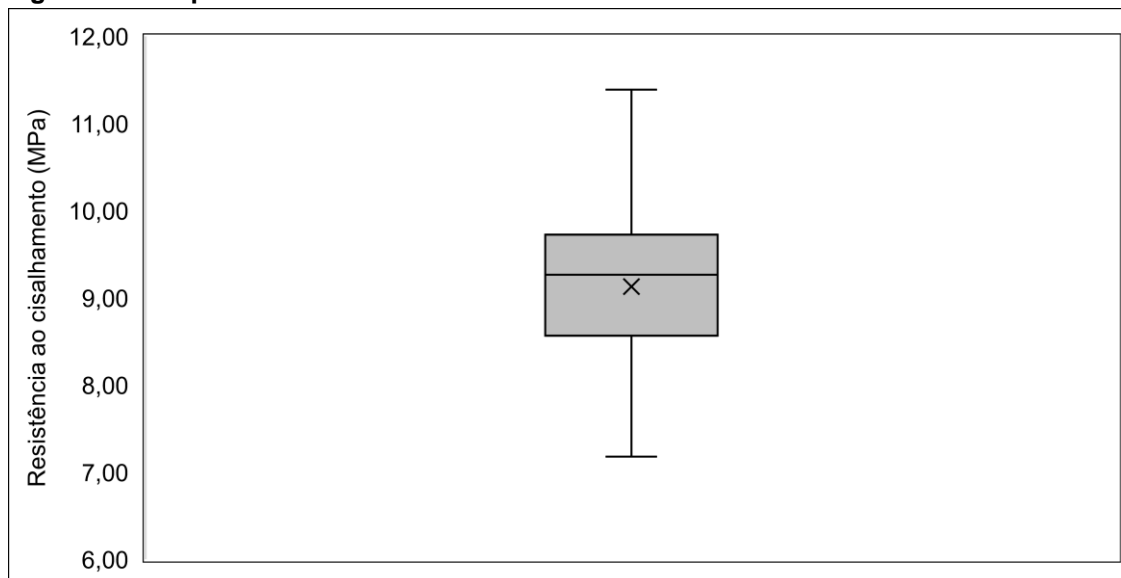
Tabela 7: Cisalhamento paralelo as fibras

Madeira	Resistencia ao Cisalhamento médio (MPa)	Máximo (MPa)	Mínimo (MPa)	Desvio Padrão
<i>Eucalyptus urograndis</i>	9,131	11,39	7,18	0,991

Após a obtenção dos resultados, realizou-se o teste de normalidade de Shapiro-Wilk para atestar o comportamento das análises, que resultou em um valor-P = 0,272. Admitindo o grau de 95% de confiança, comprovou-se que as amostras analisadas apresentam distribuição normal. Em seguida, utilizou-se o Teste de Dixon visando a exclusão de possíveis outliers (Figura 32). Para a resistência ao cisalhamento obteve-se Q-calculado = 0,299; utilizando os

parâmetros de Rorabacher (1991) para uma amostragem de 18 corpos de prova com confiabilidade de 95% temos o valor crítico limítrofe Q-crítico 0,356.

Figura 32: Boxplot da resistência de cisalhamento da madeira



Fonte: Acervo do autor, 2021.

Lobão et al. (2004) analisando as características das propriedades físico-mecânicas das madeiras de eucalipto obteve valor médio para a resistência ao cisalhamento paralelo as fibras na ordem de 8,7 MPa, próximo ao obtido neste estudo, enquanto Matos e Molina (2016) obtiveram valores médios de 9,93 MPa para espécie de *Eucalyptus saligna*. Pereira et al. (2017), avaliando as propriedades das madeiras secas de *Eucalyptus urograndis*, obtiveram valor médios na ordem de 10,30 MPa. Junior et al. (2019), analisando a qualidade da madeira juvenil do híbrido *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* verificou a resistência ao cisalhamento paralelo as fibras sendo 5,09 MPa.

A norma NBR 7190 (ABNT, 1997) apresenta valores médios das propriedades de resistência da madeira para diversas espécies. Para o híbrido *Eucalyptus urograndis*, estudado nesse trabalho, não há essas informações, entretanto, podem ser observados essas informações para as espécies *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*. Para o *Eucalyptus grandis*, a norma estabelece valor médio de resistência ao cisalhamento paralelo as fibras 7,0 MPa. Para o *Eucalyptus urophylla*, a norma estabelece um valor médio de resistência ao cisalhamento paralelo as fibras de 8,3 MPa, valor pouco menor do que o encontrado nesse trabalho.

É importante ressaltar que a norma NBR 7190 (ABNT, 1997) disponibiliza valores das propriedades mecânicas de indivíduos adultos, e a madeira avaliada nesse trabalho foi oriunda de indivíduos jovens, com 6 anos, e o valor da resistência ao cisalhamento paralelo as fibras já está bem próximo as espécies mais adultas.

5.8. Cisalhamento da linha de cola em relação a gramatura de adesivo

O ensaio de cisalhamento da linha de cola foi conduzido conforme as recomendações da norma ASTM 905-98, e os resultados médios são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8: Cisalhamento da linha de cola

Madeira	Gramatura do adesivo (g/m ²)	Resist. ao Cisalhamento (MPa)	Máx. (MPa)	Mín. (MPa)	Desvio Padrão	Umidade a. e. ¹	Umidade p. e. ²
<i>Eucalyptus urograndis</i>	150	9,075a ³	10,530	7,540	0,846	12,51	12,66
	200	6,479b	7,610	5,010	0,792	12,57	12,68
	250	7,685c	10,100	6,340	1,102	12,69	12,76

¹ Umidade antes de ensaio. ² Umidade pós o ensaio. ³ Médias seguidas de mesma letra, na coluna, não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey a 5% de significância.

Assim como no teste de cisalhamento paralelo as fibras da madeira, para a análise da resistência do cisalhamento da linha de cola foi realizado o teste de normalidade de Shapiro-Wilk para atestar o comportamento dos resultados. Admitindo o grau de 95% de confiança, comprovou-se que as amostras analisadas apresentam distribuição normal. Em seguida, utilizou-se o Teste de Dixon visando a exclusão de possíveis outliers.

Conjuntamente com a análise da resistência da linha de cola investigou-se a capacidade de adesão de cada gramatura do adesivo adotado. Observa-se que a gramatura de 150 g/m² teve um melhor desempenho, pois promoveu uma maior resistência ao cisalhamento na linha de cola (Tabela 8), ainda podemos perceber que a mesma gramatura apresentou uma amplitude moderada dentro dos demais tratamentos analisados.

Segundo a ASTM D-2559 (2012a), quando se utiliza madeira através de juntas coladas para fins estruturais, a sua resistência ao cisalhamento deve ser

praticamente semelhante à encontrada para a madeira maciça. O que corrobora com o valor obtido para a gramatura de 150g/m² (Tabela 7 e Tabela 8). Também uma ligação eficiente ocorre quando a madeira quebra juntamente com o adesivo, e a força de ligação da junta colada é igual à da madeira maciça, ilustrado pela Figura 33 (FRIHART; HUNT, 2010).

Figura 33: Eficiência da linha de cola; (a) Linha de cola com rompimento na madeira; (b) Linha de cola com quebra juntamente da madeira e adesivo; (c) Linha de cola em que apenas o adesivo rompeu.



Fonte: Acervo do autor, 2021.

Segundinho et al. (2015), analisando a resistência da linha de cola de madeiras de reflorestamento, obtiveram para *Eucalyptus sp* valores que variavam de 5,07 a 8,47 MPa, utilizando um adesivo bicomponente de base não natural com gramatura de 300-500 g/m², colados também a uma pressão de 1 MPa, inferiores aos valores obtidos neste estudo.

Bianche et al. (2017) avaliando o cisalhamento na linha de cola de *Eucalyptus sp.* colado com diferentes adesivos e diferentes gramaturas, obtiveram valores de resistência variando entre 4,23 e 8,26 MPa para as diferentes gramaturas e adesivos. Nota-se que o valor obtido neste estudo se encontra acima da faixa de resistência obtida pelos autores. Ainda, neste mesmo estudo quando se compara apenas com os adesivos de base natural observa-se que o valor obtido neste estudo é 15% superior ao obtido pelos autores.

Oliveira (2016) analisando a interação da espécie de madeira com o tipo de adesivo na qualidade de madeira laminada colada, obteve valor de 4,73 MPa para a madeira de *Eucalyptus sp.*, utilizando o adesivo poliuretano, comparando com o resultado conquistado neste estudo percebe-se um valor acima do obtido pelo autor.

Iwakiri et al. (2013) avaliaram a qualidade das juntas coladas de madeira de *Eucalyptus benthamii* utilizando adesivos PVA, com gramatura de

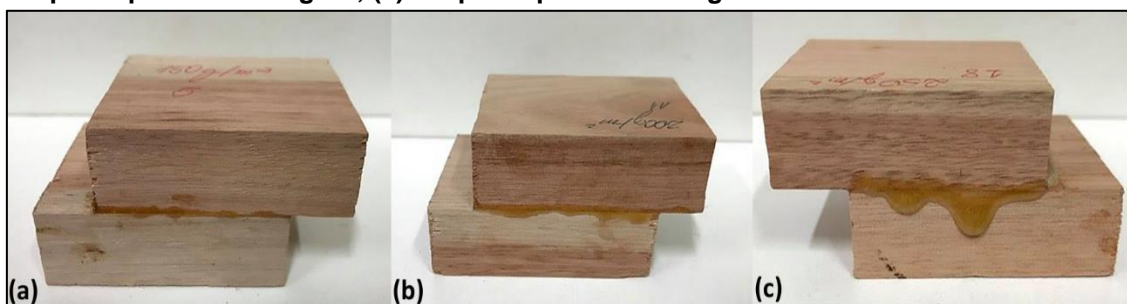
400 g/m² (superfície dupla) e pressão de 1 MPa, e resorcinol, com gramatura de 200 g/m² (superfície dupla) e pressão de 1 MPa. Os autores obtiveram valores médios para a resistência ao cisalhamento seco de 8,46 MPa, demonstrando uma similaridade com o valor de resistência obtido neste estudo.

Bianche (2014) estudou a interface madeira-adesivo e a resistência de juntas coladas com diferentes adesivos. A espécie analisada foi o *Eucalyptus* sp, utilizando gramaturas de 150, 200 e 250 g/m², e pressão de 12 kgf/cm², onde foram obtidos valores médios para resistência ao cisalhamento na condição seca de 7,04 MPa utilizando o adesivo poliuretano de mamona.

Vários fatores da madeira de eucalipto podem influenciar nos resultados, tais como: pH, tipos de extrativos da madeira, penetração do adesivo (características anatômicas e densidade da madeira), viscosidade e teor de sólidos do adesivo, tempo e pressão durante a prensagem.

Embora alguns destes parâmetros já tenham sido abordados neste trabalho, e os valores obtidos tenham sido satisfatórios quando comparado aos encontrados em literatura, ainda identificou-se a formação de CO₂ durante o processo de colagem e o extravasamento da cola pelas bordas (Figura 34), o que pode ter deixado a linha de cola não tão eficaz para determinada gramatura de adesivo utilizada, ou seja, tornando-se contraproducente.

Figura 34: Extravasamento do adesivo pelas bordas; (a) Corpo de prova de 150 g/m²; (b) Corpo de prova de 200 g/m²; (c) Corpo de prova de 250 g/m².



Fonte: Acervo do autor, 2021.

Plaster et al. (2008) avaliando juntas coladas da madeira serrada de *Eucalyptus* sp. verificaram dificuldades na adesão de madeiras com altas densidades. Segundo os autores, a madeira com tais características apresenta menor penetração do adesivo, bem como uma perda maior do adesivo pelas bordas da peça a ser colada, ocasionando uma linha de cola menos eficaz.

A inhomogeneidade do lenho inicial e tardio, e a pequena proximidade entre estas duas zonas na superfície da madeira, são precursoras de dificuldades no procedimento de colagem da madeira. A estrutura diferenciada dos lenhos inicial e tardio em termos de densidade e permeabilidade da madeira pode causar problemas em relação à penetração do adesivo, resultando em uma linha de cola espessa, o que pode justificar o fato de a gramatura de adesivo com 200g/m² exibir uma resistência inferior à de 250 g/m².

No entanto esta situação pode ser contornável pela alteração no processo estequiométrico de proporção dos componentes do adesivo, alterando para uma maior ou menor viscosidade, porém, este processo é de difícil praticidade, devido à grande variabilidade resultante de diferentes planos de corte para obtenção de elementos de madeira (ALBUQUERQUE; LATORRACA, 2005).

Ainda, a menor resistência obtida para a gramatura de 200 g/m² pode ser justificada devido à expressiva presença de microbolhas de CO₂ na linha de cola, tornando-a possivelmente menos eficaz, conforme pode ser ilustrado pela imagem de microscopia ótica (Figura 35C-D).

Também é possível notar que a umidade do material antes do ensaio não houve significativa variabilidade entres os lotes testados, o que não comprometeria a penetrabilidade do adesivo no substrato ocasionando deficiência devido a essa variável. Ainda assim, outras propriedades anatômicas da matéria-prima, que não foram objeto de análise deste trabalho, podem ter influenciado para o ocorrido.

Observou-se por meio da microscopia ótica que o adesivo de mamona penetrou nos vasos da madeira de eucalipto nas cavidades celulares, o que pode ter contribuído para maior adesão (Figura 35). A profundidade de penetração adesiva na madeira pode ter ajudado na resistência demonstrada (LAY; CRANLEY 1994, PIZZI 1994; OLIVEIRA 2020).

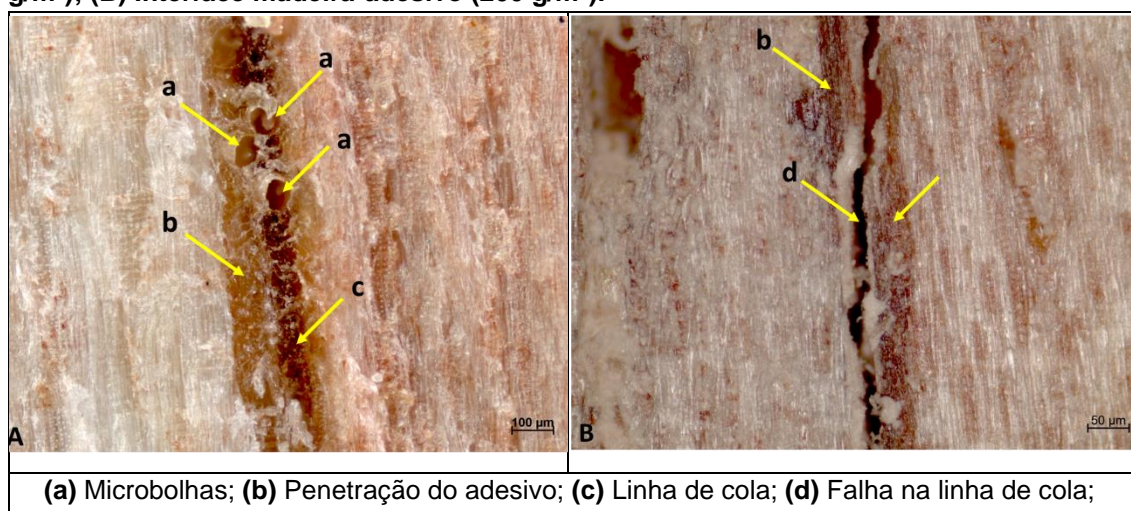
5.9. Interface madeira-adesivo

A Figura 35 mostra a interface madeira-adesivo das juntas coladas com adesivo de base vegetal na madeira de *Eucalyptus urograndis*. Por meio das micrografias foi possível distinguir o adesivo, de coloração marrom avermelhada, na estrutura anatômica da madeira.

A Figura 35A demonstra a superfície antes do polimento, em que, percebe-se a rugosidade na região das fibras da madeira e do adesivo, e ainda, as cavidades da linha de cola não se encontram preenchidas com o resíduo do polimento. Fica evidente, conforme representado pela seta (b), uma penetrabilidade do adesivo a estrutura celular da madeira, além disso, a linha de cola apresenta uma uniformidade, ou seja, ela possui a mesma espessura ao longo da interface, característica essa, notada em todas as gramaturas testadas.

Esta observação em que a parede celular com contato do adesivo apresenta coloração mais escura, correspondente a coloração do adesivo, quando comparada com as paredes celulares sem adesivo, também foram observadas por Konnerth, et al., 2008. Autores como Tsoumis (1991), Marra (1992), Albino (2010), Oliveira (2020) relatam a penetração do adesivo nos componentes estruturais da madeira. Embora comprovada a eficiência na adesão e resistência, já analisadas no item 5.8, na gramatura do adesivo de 150 g/m² identificou-se também a formação de algumas microbolhas, porém em menor quantidade (Figura 35A).

Figura 35: Interface madeira-adesivo (linha de cola) ;(A) Interface madeira-adesivo (150 g/m²); (B) Interface madeira-adesivo (200 g/m²).

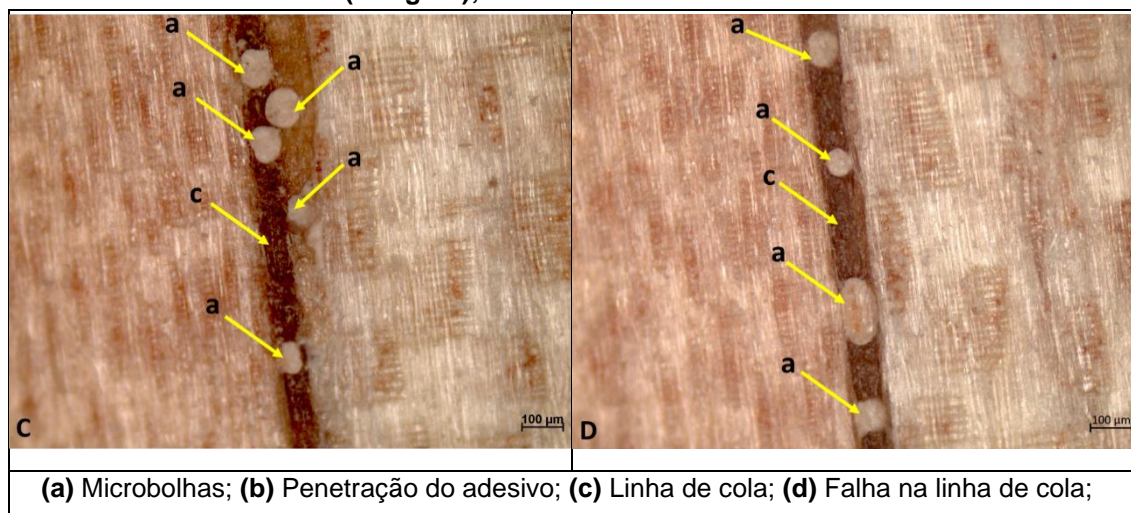


Fonte: Acervo do autor, 2021.

A Figura 35B foi analisada antes do polimento, demonstrando características da superfície similar a Figura 35A, podemos observar a presença

de uma falha na linha de cola, em que o adesivo penetra as fibras da estrutura anatômica da madeira quase que completamente, tornando a linha de cola ineficiente.

Figura 36: Interface madeira-adesivo; (C) Interface madeira-adesivo (200 g/m²); (D) Interface madeira-adesivo (200 g/m²);

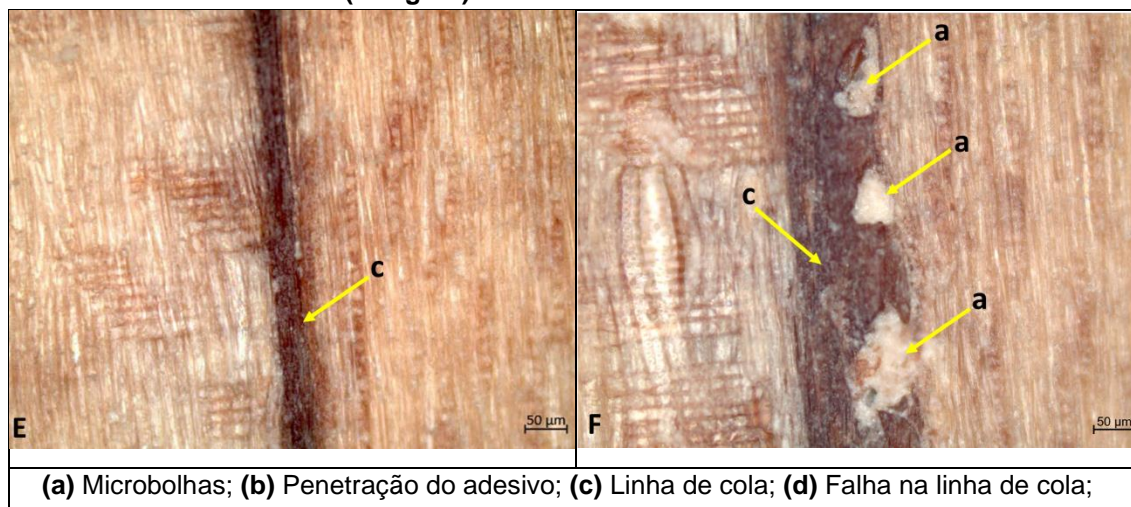


Fonte: Acervo do autor, 2021.

Já nas Figura 36C e 36D podemos perceber a intensidade de microbolhas formadas na linha de cola, fragilizando-a. Identifica-se ainda que não há o entumecimento das fibras da estrutura celular da madeira pelo adesivo, o que justifica a resistência das peças coladas com a gramatura 200 g/m² serem inferiores às demais.

A Figura 37E representa uma linha de cola operacional, ou seja, mais eficaz, constata-se uma breve impregnação do adesivo nas fibras da madeira e uma uniformidade com uma espessura constante ao longo da interface, ainda, observa-se que não há falhas evidentes, o que corrobora com a resistência atingida pelas peças coladas com a gramatura de 150 g/m². Quando o conjunto adesivo-substrato encontra condições ideais de superfície e estrutura microscópica, o produto criado a partir desta colagem deve ter características iguais ou superiores às da soma das características individuais dos materiais a partir dos quais foi feita, o que foi observado neste conjunto (CHANDLER et al., 2005; ALBINO et al., 2012; BIANCHE et al., 2017; OLIVEIRA, 2020).

Figura 37: Interface madeira-adesivo; (E) Interface madeira-adesivo (150 g/m²); (F) Interface madeira-adesivo (250 g/m²).



Fonte: Acervo do autor, 2021.

Para a gramatura de 250 g/m² representado pela Figura 37F, observa-se uma linha de cola mais espessa, também há evidências de microbolhas, esta linha mais espessa pode ter ocasionado um escorregamento das peças de forma mais elástica, o que manteve a resistência significativa.

5.10. Análise de resistência a compressão de peças coladas

Para análise da resistência à compressão paralela às fibras foram montados corpos de prova nas dimensões de 5 cm x 5 cm x 15 cm, divididos em quatro tratamentos, conforme o número de lâminas variando entre uma e quatro. A gramatura de adesivo para a colagem das lâminas foi definida de acordo com o desempenho apresentado no ensaio de cisalhamento da linha de cola, sendo adotado 150 g/m².

Os resultados médios da resistência à compressão são apresentados na Tabela 9. Assim como para os demais testes, para a análise da resistência a compressão, foi realizado o teste de normalidade de Shapiro-Wilk para atestar o comportamento dos resultados. Admitindo o grau de 95% de confiança, comprovou-se que as amostras analisadas apresentam distribuição normal. Em seguida, utilizou-se o Teste de Dixon visando a exclusão de possíveis outliers.

Diferentemente do que ocorreu com as amostras de cisalhamento da linha de cola, em que, obtivemos teores de umidade praticamente constante e

dentro do que especifica a NBR 7190/97 para a condição padrão de referência, não ocorreu para os modelos de corpos de prova propostos como objeto de estudo deste trabalho, pois obtivemos uma pequena volubilidade nas umidades.

Tabela 9: Compressão paralela a linha de cola dos modelos propostos

Madeira	Modelos de análise	Res. Comp. (MPa)	Máx. (MPa)	Mín. (MPa)	Desvio Padrão	Umidade a. e. ¹	Umidade p. p.e. ²
<i>Eucalyptus urograndis</i>	Maciço	35,74	31,42	38,77	2,90	16,78	16,07
	Duas lâminas	44,24	37,18	50,83	4,81	13,91	12,88
	Três lâminas	42,87	38,63	46,58	2,86	17,04	14,10
	Quatro lâminas	43,22	40,66	47,62	2,24	12,55	11,78

¹ Umidade antes de ensaio. ² Umidade pós o ensaio. ³ Médias seguidas de mesma letra, na coluna, não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey a 5% de significância.

Então, como ainda prevê a mesma norma, para a caracterização das propriedades de resistência de um dado lote, em que os resultados apresentem variabilidade nos teores de umidade para a madeira, contidos no intervalo de 10 a 20%, devem ser apresentados valores de resistência corrigidos para a umidade padrão de 12%, descrito no item 4.5, e assim o fizemos, conforme ilustra a Tabela 10.

Tabela 10: Resistência a compressão paralela as fibras corrigidas

Madeira	Modelos de análise	Res. Comp. (MPa)	Res. Comp. Corrigida (MPa)
<i>Eucalyptus urograndis</i>	Maciço	35,74	40,10a
	Duas lâminas	44,24	45,41b ¹
	Três lâminas	42,87	45,57b
	Quatro lâminas	43,22	42,93b

¹ Médias seguidas de mesma letra, na coluna, não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey a 5% de significância.

Nota-se que não houve efeito significativo da interação entre o número de lâminas de madeira com a resistência nas peças de madeira laminada colada na condição estudada (Tabela 10). Como houve apenas uma estreita diferença

na resistência mecânica entre as quantidades de lâminas dos corpos de prova procedeu-se então a uma análise comparativa entre elas.

Para investigar a influência do número de lâminas na MLC na obtenção da resistência a compressão, foi utilizada a análise de variância (ANOVA), com 5% de significância (α), considerando como nula a equivalência entre tratamentos, hipótese (H_0), e não-equivalência como a alternativa hipótese (H_1). O valor de P abaixo do nível de significância implica rejeitar o H_0 , aceitando-o de outra forma.

Tabela 11: Análise de Variância ANOVA para os tratamentos

Fonte de Variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-P	F crítico
Entre grupos	34,883	2,000	17,441	1,398	0,261	3,285

É possível notar que os valores mecânicos das propriedades dos feixes da madeira laminada colada variam pouco de uma condição experiencial para outra. A Tabela 11 apresenta um resumo da comparação entre os três modelos propostos de corpos de prova. Observa-se uma tendência de aumento na resistência com a redução do número de lâminas de cada corpo de prova, mas sem uma definição clara de um padrão para essa diferença (Tabela 10).

Ao comparar os valores médios de resistência determinada nas juntas coladas com aquele obtido na madeira sólida, por exemplo, nota-se que, há diferença entre o testemunho sólido e os tratamentos propostos, e ainda percebe-se, que a relação entre esses valores foi aproximadamente de 11% para a madeira laminada de *Eucalyptus urograndis* (Tabela 10).

Analisando a espessura lamelar em peças de madeira laminada colada, Icimoto et al., 2016, concluiu que o número de linhas de cola ou a espessura das lâminas de madeira que compõe a peça de MLC, não influencia na resistência da peça, resultado similar obtido neste estudo.

Faria et al., 2019 analisando o número de lâminas no comportamento mecânico da madeira laminada colada de *Toona ciliata* produzido com adesivo poliuretano vegetal, obteve o mesmo resultado, em que peças com menor número de lâminas apresentaram maiores valores médios.

Também Marquardt et al., 2019, estudando a resistência à flexão de vigas de madeira laminada colada com diferentes espessuras de lâminas

verificou que estatisticamente, apesar da diferença das médias, as vigas de madeira laminada colada apresentam o mesmo comportamento, independentemente da espessura das lâminas de madeira da espécie *Pinus Elliottis*, comportamento semelhante ao encontrado neste estudo.

Aplicou-se ainda uma análise de variância (ANOVA) com 5% de significância, conforme já supracitado, para estudar o efeito da volubilidade da umidade, conforme Tabela 12. O valor-p indica a variância entre as umidades, no entanto, o impacto na resistência final não foi significativo, conforme já demonstrado na Tabela 11.

Tabela 12: Análise de Variância ANOVA para a umidade

Fonte de Variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-P	F crítico
Entre grupos	41,879	2	20,940	122,351	5,450E ⁻¹⁶	3,285

Cabe ainda mencionar que um baixo teor de umidade pode causar uma excessiva absorção da água do adesivo, que assim, este fica com dificuldade de se movimentar e penetrar na madeira, por outro lado uma madeira muito úmida pode não absorver o adesivo, por isso o Ross et al., (2010) indica uma faixa de 6-14% de umidade para madeiras coladas. O teor de umidade dos tratamentos estava dentro da faixa mencionada, o valor que fica ligeiramente acima é justamente o maciço, que não se utiliza do adesivo.

PROPERZI et al. (2003) menciona que adesivos tradicionais não apresentam bons desempenhos acima da faixa de 12 a 14%, caso contrário, segundo os autores acima dessa faixa é necessário um grande tempo de prensagem (de 4 a 7 dias) para que se tenha uma boa adesão. E o tempo de prensagem para umidade mencionada pelos autores foi atingido neste trabalho.

6. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi desenvolvido um programa experimental para avaliar a utilização de madeira de *Eucalyptus urograndis* com aproximadamente 6 anos de idade, proveniente de floresta plantada, e adesivo a base de óleos vegetais para produção de peças comprimidas de madeira laminada colada, com base nos resultados obtidos podem ser estabelecidas as seguintes conclusões:

As análises químicas da madeira desenvolvidas neste estudo demonstram que teor de extrativos não influenciou a qualidade da colagem em relação a resistência ao ensaio de cisalhamento e dos modelos propostos.

O fator de pH permaneceu dentro das faixas definidas pela literatura, não apresentando uma acidez capaz de comprometer a colagem, os demais componentes avaliados pelos diferentes métodos também se enquadraram nos padrões da literatura e pouco poderiam comprometer a utilização da espécie em estruturas de MLC. Desta forma, os resultados reforçam a ideia de que a madeira no sistema de curta rotação possa ser destinada para os mais diversos fins, porém para a idade das árvores utilizadas neste estudo devemos compreender as limitações das espessuras das lâminas capazes de se obter, uma vez que o diâmetro das árvores não é grandioso.

O adesivo apresentou alto teor de sólidos, e esta variável contribui para a resistência da linha de cola, o pH permaneceu dentro das comparações feitas com a literatura, mas evidenciamos a formação de microbolhas, mesmo o pH não estando em faixas extremas. Com a análise da viscosidade, foi capaz de compreender o comportamento da proporção utilizada neste trabalho (1:2) ao longo do tempo, e assim assimilar o tempo de trabalho. No entanto, o tempo de trabalho do adesivo utilizado é acelerado, o que pode comprometer a maior molhabilidade e umectação.

As análises térmicas dos materiais demonstram que os componentes de forma isolada são eficientes ao uso, e em caso de carbonização, não há a liberação de gases tóxicos, conforme análise de gases evoluídos.

Os valores de estabilidade dimensional (contrações da madeira) e de coeficiente de anisotropia do clone de eucalipto estudado indicaram que a

secagem da madeira requer cuidados para evitar problemas como rachaduras e empenamentos.

O processo de colagem, considerando todos os parâmetros analisados foi bem-sucedido. A gramatura do adesivo de 150 g/m² pode ser considerada satisfatória, para *Eucalyptus urograndis*, a resistência da junta colada possui similaridade com a resistência ao cisalhamento da madeira. As rupturas dos corpos de provas ocorreram na madeira e a maioria das rupturas foram mistas, mostrando que a interação adesivo/madeira foi satisfatória.

A espessura das lâminas é o fator que determina o número de linhas de colagem num elemento de madeira laminada colada, conseqüentemente qualquer alteração neste valor influi diretamente sobre o consumo de cola e sobre o custo do produto, por isso, a utilização de 250 g/m² decorre em desperdício de adesivo, pois, há aumento do custo percentual do adesivo no custo final das estruturas coladas, e não influenciando na resistência da peça montada.

Considerando a interação entre as variáveis em estudo, os valores médios mais elevados de resistência a compressão paralela foram determinados nas peças coladas de *Eucalyptus urograndis*, em comparação com o testemunho sólido.

A partir dos ensaios mecânicos realizados nesta pesquisa conclui-se a viabilidade de MLC da espécie estudada, uma vez que os resultados dos ensaios realizados apresentaram uma equivalência estatística nas combinações entre os tratamentos, as combinações, mostram que o tratamento pode ser utilizado independente da combinação.

Assim, com base nas características gerais, o gênero estudado é indicado para a produção de madeira serrada e materiais engenheirados de madeira aplicados a construção civil.

7. REFERÊNCIAS

ABNT-ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15315: **Tintas para construção civil - Método de ensaio de tintas para edificações não industriais - Determinação do teor de sólidos**. ABNT, 2005.

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

AICHER, Simon; HEZEL, Jürgen; STAPF, Gordian. **Mechanical and glued joints in glulam of ultra-high efficiency**. World, v. 15, p. 19, 2012.

ALBINO, Vanessa Cristina do Sacramento; MORI, Fábio Akira; MENDES, Lourival Marin. **Influência das características anatômicas e do teor de extrativos totais da madeira de Eucalyptus grandis W. Hill ex Maiden na qualidade da colagem**. Ciência Florestal, v. 22, n. 4, p. 803-811, 2012.

ALBUQUERQUE, Carlos Eduardo C. de; LATORRACA, João Vicente de F. **Influência das características anatômicas da madeira na penetração e adesão de adesivos**. Floresta e Ambiente, v. 7, n. único, p. 158-166, 2012.

ALMEIDA, D. H. et al. **Tenacidade da madeira como função da densidade aparente**. Revista Árvore, Viçosa, v. 38, n. 1, p. 203-207, 2014.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. (2012a). D-2559: **Standard specification for adhesives for bonded structural wood products for use under exterior exposure conditions**. West Conshohocken, Annual Book of ASTM Standards, 15p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. D 905: **Standard test method for strength properties of adhesive bonds in shear by compression loading**. Pennsylvania, 2013.

AMMANN, Samuel et al. **Quality assessment of glued ash wood for construction engineering**. European journal of wood and wood products, v. 74, n. 1, p. 67-74, 2016.

AMOAH, M.; KWARTENG, F. O.; DADZIE, P. K. **Bending properties and joint efficiency of some tropical hardwoods finger-jointed in green and dry states**. J Indian Acad. Wood Sci. Bangalore, v. 11 n. 1, p. 57-64, June 2014.

ANDRADE, C. R. et al. **Calibrações NIRS para três propriedades químicas da madeira de Eucalyptus urophylla**. Cerne, v.16, p.9-14, 2010.

ANDREJOW, Gisela Maria Pedrassani et al. **Planalto Norte Catarinense: considerações sobre o setor florestal e a eucaliptocultura**. Desenvolvimento Regional em debate: DRd, v. 8, n. 2, p. 143-168, 2018.

ANSHARI, Buan et al. **Experimental Study on Structural Behaviour of Glulam Beams Prestressed by Compressed Wood**. Wood Research Journal, v. 2, n. 1, p. 54-61, 2017.

APARECIDA DE SÁ, V. et al. **Absorção de superfície de painéis compensados**. Cerne, Lavras, v.16, Suplemento, p.53-57, jul.2010.

ASTM AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. D 1084-97: **Standard Test Methods for Viscosity of Adhesives**. Philadelphia, 1997, 5 p.

AZAMBUJA, M. A. **Estudo experimental de adesivos para fabricação de madeira laminada colada: avaliação da resistência de emendas dentadas, da durabilidade e de vigas**. 2006.125p. Tese (Doutorado Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

AZAMBUJA, M. A., DIAS, A. A., **Eficiência do adesivo poliuretano à base de óleo de mamona na colagem de emendas dentadas para espécies pinus e eucalipto**. 2006. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA – EBRAMEM, 10. São Pedro -São Paulo. Anais...EBRAMEM 2006.

BAKAR, Suhaimi Abu et al. **Factors affecting ultimate strength of solid and glulam timber beams**. Malaysian Journal of Civil Engineering, v. 16, n. 1, 2004.

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.

BASSA, A. et al. **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.

BATISTA, D. C. et al. **Densidade básica e retratibilidade da madeira de clones de três espécies de Eucalyptus**. Ciência Florestal, v.20, n.4, p. 665-674, 2010.

BATISTA, D. C. et al. **Effect of the Brazilian thermal modification process on the chemical composition of Eucalyptus grandis juvenile wood - part 1: cell wall polymers and extractives contents**. Maderas. Ciencia y Tecnologia, v.18, n.2, p.273-284, 2016.

BAYATKASHKOLI, Ali et al. **Effects of layer arrangements on bending strength properties of laminated lumber made of poplar (*Populus nigra* L.)**. Scientific Research and Essays, v. 6, n. 29, p. 6116-6119, 2011.

BERGLUND, Lars; ROWELL, Roger M. **Wood composites**. Handbook of wood chemistry and wood composites. Boca Raton, Fla.: CRC Press, 2005: pages 279-301., 2005.

BERTOLA, A. **Eucalipto – 100 anos de Brasil – “Falem mal, mas continuem falando de mim!”**. Curvelo: V&M Florestal Ltda., 2013, 91p.

BIANCHE, Juliana Jerásio et al. **Cisalhamento na linha de cola de *Eucalyptus* sp. colado com diferentes adesivos e diferentes gramaturas**. Floresta e Ambiente, v. 24, 2017.

BIANCHE, Juliana Jerásio. **Interface madeira-adesivo e resistência de juntas coladas com diferentes adesivos e gramatura**. 2014. 98 f. Tese (Doutorado em Manejo Florestal; Meio Ambiente e Conservação da Natureza; Silvicultura; Tecnologia e Utilização de) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2014.

BILA, N. F et al. **Avaliação da qualidade de juntas coladas de seis espécies de madeiras tropicais da Amazônia**. FLORESTA, v. 46, n. 4, p. 455-464, 2017.

BONDUELLE, Ghislaine Miranda et al. **Análise da massa específica e da retratibilidade da madeira de *Tectona grandis* nos sentidos axial e radial do tronco**. Floresta, v. 45, n. 4, p. 671-680, 2015.

BOWYER, J. L.; SHMULSKY, R.; HAYGREEN, J. G. **Forest products and wood science: an introduction**. Ames-Iowa: 2007. Blackwell Publishing. 558p.

BRAND, M. A.; **Energia e biomassa florestal**. Rio de Janeiro, Interciência, 131 p., 2010.

BRISCHKE, C. et al. **Natural durability of timber exposed above ground - a survey**. Drvna Industrija, v 64, n.2, p.113-129, 2013.

BRISOLA, S.H. DEMARCO, D. **Análise anatômica do caule de *Eucalyptus grandis*, *E. urophylla* e *E. grandis* x *urophylla*: desenvolvimento da madeira e sua importância para a indústria**. Scientia Forestalis, v.39, p.317-330, 2011.

BURGER, L. M.; RICHTER, H. G. **Anatomia da madeira**. São Paulo: Nobel, 1991.154 p.

CANGEMI, J.M.; SANTOS, A.M.; CLARO NETO, S. **Poliuretano: de travesseiros a preservativos, um polímero versátil**. Química e Sociedade. São Paulo. v. 31, n.3, 2009.

CARNEIRO, A. C. O. **Efeito da hidrólise ácida e sulfitação de taninos de *Eucalyptus grandis* w. hill ex maiden e *Anadenanthera peregrina* sp., nas propriedades dos adesivos**. 2006,

182 p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2006.

CARVALHO, A. M. et al. **Correlações da altura e diâmetro com as tensões de crescimento em árvores de *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus urophylla***. Revista *Árvore*, v.34, n.2, p. 323-331, 2010.

CARVALHO, A. M. **Valorização da madeira do híbrido *Eucalyptus grandis* através da produção conjunta de madeira serrada em pequenas dimensões, celulose e lenha**. 2000. 128 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.

CARVALHO, J. E.; CHIERICE, G. O.; CLARO NETO, S. **Caracterização térmica do poliuretano derivado de óleo vegetal utilizado para confecção de dispositivo de assistência ventricular**. Brazilian Journal of Thermal Analysis, v. 3, n. 1-2, p. 16-19, 2014.

CARVALHO, Sabrina M. et al. **Caracterização de poliuretano baseado em polioli sintetizado a partir de glicerol e hexametileno diisocianato**. In: Anais do 10º Congresso Brasileiro de Polímeros, Foz do Iguaçu. 2009.

CEPELKA, Martin; MALO, Kjell Arne. **Review on on-site splice joints in timber engineering**. In: COST Timber Bridge Conference—CTBC 2014. 2014. p. 1.

CHANDLER, Jermal G.; BRANDON, Rishawn L.; FRIHART, Charles R. **Examination of adhesive penetration in modified wood using fluorescence microscopy**. In: ASCSpring 2005 Convention and Exposition: April 17-20, Columbus, OH. [Bethesda, Md.: Adhesive and Sealant Council, 2005]: 10 p.2005.

CLARO NETO, S. **Caracterizações físico-químicas de um poliuretano derivado de óleo de mamona utilizado para implantes ósseos**, Tese (Doutorado), Instituto de Química de São Carlos, USP, São Carlos, p. 123, 1997.

COSTA TIENNE, D. L. **Qualidade da adesão de juntas coladas expostas a condições de serviço externo e interno**. 2006. 55 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais e Florestais) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2006.

COSTA, A.P.O et al. **Síntese e Caracterização de Compósitos de Poliuretanas obtidas com Polioli-Soja/TDI/Cargas Minerai**s. Revista Virtual de Química, v. 9, n. 4, p. 1434-1448, 2017.

DABA, M. **The *Eucalyptus* Dilemma: The Pursuit for Socio-economic Benefit versus Environmental Impacts of *Eucalyptus* in Ethiopia**. Journal of Natural Sciences Research. v.6, n.19, p. 127-137, 2016.

DE FREITAS, Danilo Leão et al. **Estabilidade dimensional da madeira de clones de *Eucalyptus* spp.** Scientia Agraria Paranaensis, v. 15, n. 4, p. 435-439.2016.

DE OLIVEIRA, Rafael GE et al. **Analysis of glue line and correlations between density and anatomical characteristics of *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* glulam.** Maderas. Ciencia y tecnología, v. 22, n. 4, p. 495-504, 2020.

DIAS, Fabricio Moura; LAHR, Francisco Antonio Rocco. **Alternative castor oil-based polyurethane adhesive used in the production of plywood.** Materials Research, v. 7, n. 3, p. 413-420, 2004.

ELEOTÉRIO, J. R. et al. **Massa específica e retratibilidade da madeira de seis espécies de eucalipto cultivadas no litoral de Santa Catarina.** Floresta, Curitiba, v. 45, n. 2, p. 329 - 336, abr./jun. 2015.

EVANGELISTA, W.V.; SILVA, J. de C.; VALLE, M.L.A.; XAVIER, B.A. **Caracterização anatômica quantitativa da madeira de clones de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. e *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake.** Scientia Forestalis, v.38, p.273-284, 2010.

FARIA, Douglas Lamounier et al. **Number of laminae on the mechanical behavior of glued laminated timber (glulam) of *Toona ciliata* produced with vegetable polyurethane adhesive.** Ciência e Agrotecnologia, v. 43, 2019.

FENGEL, D., WEGENER, G. **Wood - chemistry, ultrastructure, reactions.** Berlin: Walter de Gruyter, 1989. 613p.

FERREIRA, C. R.; FANTINI JUNIOR, M.; COLODETTE, J. L.; GOMIDE, J. L.; CARVALHO, A. M. M. L. **Avaliação tecnológica de clones de eucalipto: parte 1 - qualidade da madeira para produção de celulose Kraft.** Scientia Forestalis, Piracicaba, n. 70, p. 161-170, abr. 2006.

FIORELLI, Juliano; DIAS, Antonio Alves. **Fiberglass-reinforced glulam beams: mechanical properties and theoretical model.** Materials Research, v. 9, n. 3, p. 263-269, 2006.

FREDERICO, P. G. U. **Efeito da região e da madeira de eucalipto nas propriedades do carvão vegetal.** 2009. 85 f. (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2009.

FREITAS, Paola de Castro e et al. **Efeito da disponibilidade hídrica e da aplicação de potássio e sódio nas características anatômicas do lenho juvenil de *Eucalyptus grandis*.** Rev. Árvore, Viçosa, v. 39, n. 2, p. 405-416, abr. 2015. Disponível em <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S010067622015000200405&lng=pt&nr m=iso>.Acessos em 17 abr. 2020. <https://doi.org/10.1590/0100-67622015000200020>.

FRENCH, Alfred D. **Idealized powder diffraction patterns for cellulose polymorphs**. Cellulose, v. 21, n. 2, p. 885-896, 2014.

FRIHART, Charles R.; HUNT, Christopher G. **Adhesives with wood materials: bond formation and performance**. Wood handbook: wood as an engineering material: chapter 10. Centennial ed. General technical report FPL; GTR-190. Madison, WI: US Dept. of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2010: p. 10.1-10.24., v. 190, p. 10.1-10.24, 2010.

GALLIO, E.; et al. **Caracterização Tecnológica da Madeira de *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage**. Revista Scientia Agraria Paranaensis, vol. 15, n. 3, p. 244-250. (2016) <http://dx.doi.org/10.18188/1983-1471/sap.v15n3p244-250>.

GALVÃO, A.P.M.; JANKOWSKY, I.P. **Secagem racional da madeira**. São Paulo, SP: Nobel. 108p. 1985.

GAO, Shanjun; ZHANG, Lina. **Molecular weight effects on properties of polyurethane/nitrokonjac glucomannan semiinterpenetrating polymer networks**. Macromolecules, v. 34, n. 7, p. 2202-2207, 2001.

GARCIA, A.; RECH, M. **Adesivos para a madeira e móveis**. Revista da madeira. Ed 128. 2011. Disponível em: <http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=1547&subject=Adesivos&title=Adesivos%20para%20a%20madeira%20e%20m%C3%93veis>. Acesso em: 03/06/2021.

GASTON, Christopher W. **Visual wood product trends in North American nonresidential buildings**. Forest Products Journal, v. 64, n. 3, p. 107-115, 2014.

GOLDSCHIMID, O. **Ultraviolet spectra**. In: SARKANEN, K. V.; LUDWIG, C. H. Lignins: occurrence, formation, structure and reactions. New York: John Wiley & Sons, 1971. p. 241-266.

GOMES, Leticia Dias; GOMES, Julia Dias; HACKENBERG, Ana Mirthes. **Avaliação do desempenho termoenergético da madeira laminada colada (MLC) como alternativa bioclimática em cobertura residencial**. Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental, v. 9, n. 1 esp, p. 345-362, 2020.

GOMIDE, J. L.; COLODETTE, J. L. **Qualidade da madeira**. In: BORÉM, A. (Ed.). Biotecnologia florestal. Viçosa-MG: 2007. p. 25-54.

GOMIDE, J.L.; COLODETTE, J.L.; OLIVEIRA, R.C.; SILVA, C. M. **Caracterização tecnológica, para produção de celulose, da nova geração de clones de *Eucalyptus* do Brasil**. Revista Árvore, Viçosa, v.29, n.1, p.129-137, 2005.

GONÇALEZ, Joaquim Carlos et al. **Wood Fiber size and density relationship along the stem of *Eucalyptus urograndis***. Scientia Forestalis, Piracicaba, v. 42, n. 101, p. 81-89, mar. 2014.

GOSSELIN, Annie et al. **Main motivations and barriers for using wood in multi-story and non-residential construction projects**. BioResources, v. 12, n. 1, p. 546-570, 2017.

HERRERA, M.; MATUSCHEK, G.; KETTRUP, A. **Thermal degradation of thermoplastic polyurethane elastomers (TPU) based on MDI**. Polymer degradation and stability, v. 78, n. 2, p. 323-331, 2002.

HERZOG, Thomas et al. **Holzbau atlas**. Walter de Gruyter, 2013.

HILL, Callum AS. **Wood modification: chemical, thermal and other processes**. John Wiley & Sons, 2007.

HILLIG, E. **Qualidade de chapas aglomeradas estruturais, fabricadas com madeiras de pinus, eucalipto e acácia negra, puras ou misturadas, coladas com tanino-formaldeído**. 2000. 96 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 2000.

HILLIS, W. E.; BROWN, A. G. **Eucalyptus for wood production**. Melbourne: CSIRO, 1978. 434p.

ICIMOTO, Felipe Hideyoshi et al. **Influence of lamellar thickness on strength and stiffness of glued laminated timber beams of Pinus oocarpa**. International Journal of Materials Engineering, v. 6, n. 2, p. 51-55, 2016.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES – IBÁ. **Relatório IBÁ 2019**. Brasília: 80p. Disponível em: < <https://www.iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/iba-relatorioanual2019.pdf> >. Acesso em: 15 abril. 2020.

INMET, In. **Instituto nacional de meteorologia**. 2020. Disponível em: < <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisClimatologicas> > Acesso em: 29 abril. 2020.

IWAKIRI, S. (Ed.). **Painéis de madeira reconstituída**. Curitiba: FUPEF, 2005. 247 p.

IWAKIRI, S.; SILVA, L. S. da; TRIANOSKI, R.; BONDUELLE, G. M.; ROCHA, V. Y.; **Avaliação da potência de utilização da madeira de *Schizolobium amazonicum* “Paricá” e *Cecropia hololeuca* “Embaúba” para produção de painéis cimento-madeira**. Cerne, Lavras, v. 18, n. 2, p. 303308, abr./jun. 2012d.

IWAKIRI, Setsuo et al. **Características de vigas laminadas coladas confeccionadas com madeira de teca (*Tectona grandis*)**. Floresta e Ambiente, v. 21, n. 2, p. 269-275, 2014.

JESUS, José Manoel Henriques de. **Estudo do adesivo poliuretano à base de mamona em madeira laminada colada (MLC)**. 2000. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

JOHNS WE & NIAZI KA. 1980. **Effect of pH and buffering capacity of wood on the relation time of urea formaldehyde resin.** Wood and Fiber Science 12: 255-263.

JUÍZO, C. G. F. **Aproveitamento de costaneiras em serraria de Eucalipto para produção de painéis EGP.** 2015. 101 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

JUNIOR, Laércio Serenine et al. **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.

KLITZKE, R. J. **Secagem da madeira.** In: **Tecnologias aplicadas ao setor madeireiro.** Visconde do Rio Branco: Suprema Gráfica e Editora Ltda., 2007, v. 1, p. 271-366.

KLOCK, U.; ANDRADE, AS de. **Química da madeira.** rev. Curitiba: **Universidade Federal do Paraná**, 2013.

KNORZ, Markus et al. **Influence of surface preparation methods on moisture-related performance of structural hardwood-adhesive bonds.** International Journal of Adhesion and Adhesives, v. 57, p. 40-48, 2015.

KONNERTH, Johannes et al. **Adhesive penetration of wood cell walls investigated by scanning thermal microscopy (SThM).** 2008.

KONNERTH, Johannes et al. **Survey of selected adhesive bonding properties of nine European softwood and hardwood species.** European Journal of Wood and Wood Products, v. 74, n. 6, p. 809-819, 2016.

LAROCA, C.; MATOS, J. **Habitação social e design como oportunidades para o setor.** Revista da madeira, n. 77, 2003.

LATORRACA, J. V. F.; ALBUQUERQUE, C. E. C. **Colagem varia de acordo com as propriedades da madeira.** Revista da Madeira, v. 15, n. 88, p. 28-32, 2005.

LIAO, Y. F. **Mechanism study of cellulose pyrolysis.** Tese (PósDoutorado) ZheJiang University, HangZhou, China, 2003.

LIMA, C. K. P. **Avaliação da qualidade de juntas coladas da madeira de clones de Eucalyptus.** 2006. 89 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras.

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

LOBÃO, Moisés Silveira et al. **Caracterização das propriedades físico-mecânicas da madeira de eucalipto com diferentes densidades**. Revista Árvore, v. 28, n. 6, p. 889-894, 2004.

LOPES, Gabriel Hoyer. **Síntese de poliuretano termoplástico modificado com POSS via extrusão reativa**. 2014.

LOPES, M. C. **Espectroscopia no infravermelho próximo aplicada a classificação de painéis colados lateralmente de madeira de Pinus taeda L.** 2008. Tese (Doutorado) – UFPR, Curitiba, 2008.

LUO N.; QIAN J.; CUPPS J.; WANG Y.; ZHOU B.; ARMBRUSTER L.; FRENKEL P. **Natural Oil Polyol of High Reactivity for Rigid Polyurethanes**. BioBased Technologies®, 2008.

MAGNUSSON, R.; NYHOLM, S.; ÅSTOT, C. **Analysis of hydrogen cyanide in air in a case of attempted cyanide poisoning**. Forensic science international, v. 222, n. 1-3, p. e7-e12, 2012.

MALIK, Manjeet; KAUR, Raminder. **Mechanical and thermal properties of castor oil-based polyurethane adhesive: effect of TiO₂ filler**. Advances in Polymer Technology, v. 37, n. 1, p. 24-30, 2018.

MALLO, Maria Fernanda Laguarda; ESPINOZA, Omar. **Awareness, perceptions, and willingness to adopt cross-laminated timber by the architecture community in the United States**. Journal of Cleaner Production, v. 94, p. 198-210, 2015.

MAPA [Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento]. **Plano Nacional de Desenvolvimento de Florestas Plantadas**. Brasília, DF: MAPA, 2018. Disponível em: < <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/politica-agricola/outras-publicacoes/plano-nacional-de-desenvolvimento-de-florestas-plantadas.pdf/view> > Acesso:15/04/2020.

MARKSTRÖM, Emilia et al. **Swedish architects view of engineered wood products in buildings**. Journal of Cleaner Production, v. 181, p. 33-41, 2018.

MARQUARDT, Lucas et al. **Análise da resistência à flexão de vigas de madeira laminada colada com diferentes espessuras de lâminas**. Revista Técnico-Científica de Engenharia Civil Unesc-CIVILTEC, v. 1, n. 2, p. 42-56, 2019.

MARRA, F.S. **Technology of wood bonding – principles in practice**. Van Nostrand Reinhold, New York. 453p. 1992.

MATOS, Gabriela da Silva; MOLINA, Julio Cesar. **Resistência da madeira ao cisalhamento paralelo às fibras segundo as normas ABNT NBR 7190: 1997 e ISO 13910: 2005**. Matéria (Rio de Janeiro), v. 21, n. 4, p. 1069-1079, 2016.

MATTOS, B. D. et al. **Variação axial da densidade básica da madeira de três espécies de gimnospermas**. Revista Brasileira de Ciências Agrárias, v.6, n.1, p. 121-126, 2011.

MELO, Rafael Rodolfo. **Radial and longitudinal variation of Pinus taeda L. wood basic density in different ages**. Revista de Ciências Agrárias Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences, v. 58, n. 2, p. 192-197, 2015.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE/SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO - MMA/SFB. **Florestas do Brasil em resumo - 2019: dados de 2013- 2018**. Brasília: MMA, 2019, 212p. Disponível em: < <http://www.florestal.gov.br/documentos/publicacoes/4261-florestas-do-brasil-em-resumo-digital/file> >. Acesso em: 15 abril. 2020.

MOKFIENSKI, A.; GOMIDE, J. L.; COLODETTE, J. L.; OLIVEIRA, R. C. **Importância da densidade e do teor de carboidratos totais da madeira de eucalipto no desempenho da linha de fibra**. In: COLÓQUIO INTERNACIONAL SOBRE CELULOSE KRAFT DE EUCALIPTO, 2003, Viçosa. Anais... Viçosa: 2003. p. 15-2

MOODY, R. C.; LIU, J. Y. **Glue structural members**. In: Wood handbook: wood as an engineering material. Madison, WI: Department of Agriculture - Forest Service - Forest Products Laboratory, 1999. chap. 11, p. 124.

MOORE, R. K. et al. **The effect of polarity of extractives on the durability of wood**. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON WOOD, FIBER, AND PULPING. 18, 2015, Vienna, Proceedings. Vienna: ISWFPC, 2015, 4p.

MORAIS, P. H. D. **Efeito da idade da madeira de eucalipto na sua química e palpabilidade, e branqueabilidade e propriedades físicas da polpa**. 2008. Dissertação (Mestrado em Agroquímica) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008.

MOREIRA, J. M. M. A. P. et al. **Importância e Desempenho das Florestas Plantadas No Contexto do Agronegócio Brasileiro**. Floresta, Curitiba, v. 47, n. 1, p. 85 - 94, jan./mar. 2017.

MORI, C. L. S. O. et al. **Caracterização da madeira de angico-vermelho (Anadenanthera peregrina (Benth) Speng) para confecção de móveis**. Brasil Florestal, Brasília, v. 22, n. 77, p. 29-36, 2003.

MOULIN, J. C., ARANTES, M. D. C., VIDAURRE, G. B., PAES, J. B., CARNEIRO, A. C. O. **Efeito do espaçamento, da idade e da irrigação nos componentes químicos da madeira de eucalipto**. Revista Árvore, Viçosa, v. 39, n. 1, p. 199-208, 2015.

MUTLU, Hatice; MEIER, Michael AR. **Castor oil as a renewable resource for the chemical industry**. European Journal of Lipid Science and Technology, v. 112, n. 1, p. 10-30, 2010.

NADIR, Yashida; NAGARAJAN, Praveen. **The behavior of horizontally glued laminated beams using rubber wood**. Construction and Building Materials, v. 55, p. 398-405, 2014.

OLIVEIRA, Elisabeth de. **Características anatômicas, químicas e térmicas da madeira de três espécies de maior ocorrência no semi-árido nordestino**. 2003. 122f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2003.

OLIVEIRA, J. T. S. et al. **Caracterização da madeira de sete espécies de eucaliptos para a construção civil: 1- avaliações dendrométricas das árvores**. Scientia Forestalis, n. 56, p. 113-124, dez. 1999.

OLIVEIRA, J.T.S. **Caracterização da madeira de eucalipto para a construção civil**. 1997. 2v. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) -Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, São Paulo, SP, 1997.

OLIVEIRA, José Tarcísio da Silva; SILVA, José de Castro. **Radial variation of shrinkage and specific gravity in Eucalyptus saligna Sm. wood**. Revista Árvore, v. 27, n. 3, p. 381-385, 2003.

OLIVEIRA, S. L. **Interação da espécie de madeira e do tipo de adesivo na qualidade da madeira laminada colada**. 2016. 123 p. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) -Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2016.

PANSHIN, A. J.; DE ZEEUW, C. **Textbook of wood technology: structure, identification, properties and uses of the commercial woods of the United States and Canada**. 4. ed. New York: McGraw-Hill, 1980. 722 p.

PAVIA, Donald L. et al. **Introduction to spectroscopy**. Nelson Education, 2014.

PEREIRA, Bárbara Luísa Corradi et al. **Estudo da degradação térmica da madeira de Eucalyptus através de termogravimetria e calorimetria**. 2013.

PEREIRA, João Marcelo Soares et al. **Avaliação de propriedades mecânicas da madeira de Eucalyptus urograndis secos**. Revista Univap, v. 22, n. 40, p. 717, 2017.

PETRAUSKI, A. **Comportamento de ligações adesivas e avaliação experimental de tesouras de telhados feitas de laminado colado em madeira de Eucalyptus grandis**. 1999. 128 p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG

PFEIL, W., PFEIL, M., **Estruturas de madeira**, 6ª ed., Rio de Janeiro, LTC, 2003.

PIZZI, Antonio; MITTAL, Kashmiri L. **Handbook of adhesive technology**. CRC press, 2017.

PRADO, Ney Robson Taironi do et al. **Strength improvement of hydroxypropyl methylcellulose/starch films using cellulose nanocrystals**. *Cerne*, v. 23, n. 4, p. 423-434, 2017.

PRATA, J. G.; **Estudo da viabilidade tecnológica do uso de espécies de pinus tropicais para produção de painéis colados lateralmente (Edge Glued Panels – EGP)**. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

PROPERZI, M.; PIZZI, A.; UZIELLI, L. **Comparative wet wood glueing performance of different types of Glulam wood adhesives**. *Holz als Roh-und Werkstoff*, v. 61, n. 1, p. 77-78, 2003.

QUEIROZ, S. C. S. et al. **Influência da densidade básica da madeira na qualidade da polpa kraft de clones híbridos de *Eucalyptus grandis* w. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake**. *Revista Árvore*, Viçosa, v. 28, n. 6, p. 901-909, nov./dez. 2004.

QUINI, J.G. **Adesivos estruturais uretânicos aplicados a combinações de compósitos, plásticos e metais**. 2011, 141p. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear-Materiais) -Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Autarquia associada à Universidade de São Paulo, São Paulo. 2011.

RANDRIAMANANTENA, T. et al. **Thermal behaviour of three woods of Madagascar by thermogravimetric analysis in inert atmosphere**. In: HIGH-ENERGY PHYSICS INTERNATIONAL CONFERENCE, 4., 2009, Madagascar. Anais: Madagascar: 2009.

REINPRECHT, L. **Wood deterioration, protection, and maintenance**. Chichester: John Wiley Blackwell, 2016, 376p

REIS, M. S., CARNEIRO, C. M. R., GALVÃO, A. P. M., SOBRAL Filho, M., PAIXÃO, J. C., LISBOA, C. D. J., SIQUEIRA, J. D. P. **Adesão e Adesivos para Madeira – Teorias de Adesão e a Natureza das Colagens com Madeira**. Série Técnica. Ministério da Agricultura, Laboratório de Produtos Florestais, 22p. Brasília, DF. 1982.

REJMÁNEK, M.; RICHARDSON, D. M. *Eucalypts*. In: **Encyclopedia of biological invasions**. Simberloff, D.; Rejmánek, M. (Eds.). Berkeley: University of California Press, 2011, p. 203-209.

RIBEIRO, Alfredo S. et al. **Study of strengthening solutions for glued-laminated wood beams of maritime pine wood**. *Construction and Building Materials*, v. 23, n. 8, p. 2738-2745, 2009.

RIBEIRO, Y. B. **Solubilidade da madeira de *Eucalyptus* por meio da espectroscopia no infravermelho próximo**. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2016.

RODRIGUES, Érica de Alvarenga Crespo et al. **Seleção de clones de Eucalyptus para as propriedades físicas da madeira avaliadas em árvores no campo.** Cerne, v. 14, n. 2, p. 147-152, 2008.

RORABACHER, David B. **Statistical treatment for rejection of deviant values: critical values of Dixon's " Q" parameter and related subrange ratios at the 95% confidence level.** Analytical Chemistry, v. 63, n. 2, p. 139-146, 1991.

ROSS, Robert J. et al. **Wood handbook: wood as an engineering material.** USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, General Technical Report FPL-GTR-190, 2010: 509 p. **1 v.**, v. 190, 2010.

ROWELL, Roger M. et al. **Cell wall chemistry. Handbook of wood chemistry and wood composites**, v. 2, 2005.

SANTANA, W. M. S. **Crescimento, produção e propriedades da madeira de um clone de Eucalyptus grandis e E. urophylla com enfoque energético.** 2009. 91 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2009.

SANTAROSA, E. et al. **Transferência de tecnologia florestal: cultivo de eucalipto em propriedades rurais: diversificação da produção e renda.** 1.ed. Colombo: Embrapa Florestas, 2014.

SANTIAGO, Sabrina Barros et al. **Colagem de madeira de eucalipto com adesivos naturais.** Matéria (Rio de Janeiro), v. 23, n. 3, 2018.

SANTOS, G. A. et al. **Adaptabilidade de híbridos multiespécies de Eucalyptus ao estado do Rio Grande do Sul.** Árvore, v.37, n.4, p.759-769, 2013.

SANTOS, I.D. **Influência dos teores de lignina, holocelulose e extrativos na densidade básica e contração da madeira e nos rendimentos e densidade do carvão vegetal de cinco espécies lenhosas do cerrado.** Brasília: Universidade de Brasília, 2008. 57p. Dissertação de Mestrado.

SEGUNDINHO, P. G. A. et al. **Characterization of gluedlaminated timber from Eucalyptus sp. produced with resorcinol-phenol-formaldehyde and polyurethane adhesives.** Ciência da Madeira, 9(2):123-133, 2018.

SEGUNDINHO, P. G. A. et al. **Glued laminated timber (GLULAM) with Acacia mangium and structural adhesives.** Scientia Forestalis, 43(107):533-540, 2015.

SEGUNDINHO, P. G. A., ZANGIÁCOMO, A.L., CARREIRA, M.R., *et al.*, “**Avaliação de vigas de madeira laminada colada de cedrinho (*Erismia uncinatum* Warm.)**”, *Cerne*, v. 19, n. 3, pp. 441-449, jul.-set. 2013.

SETTE JR, C. R. *et al.* **Efeito da idade e posição de amostragem na densidade e características anatômicas da madeira de *Eucalyptus grandis***. *Árvore*, v.36, n.6, p.1183-1190, 2012.

SHEN, YuanHua *et al.* **Spectral and thermal analysis of *Eucalyptus* wood drying at different temperature and methods**. *Drying Technology*, 2019.

SILVA, J. C. **Eucalipto: manual prático do fazendeiro florestal produzindo madeira com qualidade**. 3. ed. Viçosa: UFV, 2011. 106p.

SIMEPAR. **Boletim climatológico.2020**. Disponível em: <http://www.simepar.br/prognozweb/simepar/timeline/boletim_climatologico > Acesso em: 28 de fev. de 2021.

SJÖSTRÖM. E. **Wood Chemistry fundamentals and applications**. New York. Academic Press. 223p. 1981.

SKAAR, C. **Water in wood**. Syracuse: Syracuse University Press, 1972. 218p.

SOARES J. D., Reis M. F. de C., Lopes C. B. da S., Costa L. J., Freitas T. P., Santos L. C., Donato D. B., Carneiro A. de C. O., **Desempenho de diferentes adesivos poliuretanos na linha de cola da madeira de *Eucalyptus* sp**. In: Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia da Madeira – CBCTEM. 2017. Florianópolis – SC. Anais...2017.

SOARES, V. C., Bianchi, M. L., Trugilho, P. F., Pereira, A. J., & Höfler, J.. **Correlações entre as propriedades da madeira e do carvão vegetal de híbridos de eucalipto**. *Revista Árvore*, v. 38, n. 3, p. 543-549, 2014.

STACKPOLE, D.J. *et al.* Genetic variation in the chemical components of *Eucalyptus globulus* wood. **G3: Genes, Genomes, Genetics**, v. 1, n.2, p. 151-159, 2011.

STAMM, A. J. **Wood and cellulose science**. The Ronald Press Company – New York, 1964, 549p.

ST-PIERRE, B.; BEAUREGARD, R.; MOHAMMAD, M.; BUSTOS, C. **Effect of moisture content and temperature on tension strength of finger jointed black spruce lumber**. *For Prod J* 55(2):9–16, 2005.

SUN, Lan Juan et al. **A novel direct synthesis of polyol from soybean oil**. Chinese Chemical Letters, v. 23, n. 8, p. 919-922, 2012.

TECHNICAL ASSOCIATION OF PULP AND PAPER INDUSTRY - TAPPI TEST METHODS.

- T203 cm-99. **Alpha-, beta- and gamma-cellulose in pulp**. Test Methods 2004-2005. TAPPI Press. Atlanta USA, 1999.
- T204 cm-97. **Solvent extractives of wood and pulp**. Test Methods 2004-2005. TAPPI Press. Atlanta USA, 1997.
- T207 cm-99. **Water solubility of wood and pulp**. Test Methods 2004-2005. TAPPI Press. Atlanta USA, 1999.
- T211 om-02. **Ash in wood, pulp, paper and paperboard: combustion at 525°C**. Test Methods 2004-2005. TAPPI Press. Atlanta USA, 2007.
- T212 om-02. **One percent sodium hydroxide solubility of wood and pulp**. Test Methods 2004-2005. TAPPI Press. Atlanta USA, 2002.
- T222 om-02. **Acid-insoluble lignin in wood and pulp**. Test Methods 2004-2005. TAPPI Press. Atlanta USA, 2006.
- T252 om-02. **pH and electrical conductivity of hot water extracts of pulp, paper, and paperboard**. Test Methods. TAPPI Press. 2002
- T257 cm-02. **Sampling and preparing wood for analysis**. Test Methods 2002. TAPPI Press. April 24, 2012.
- T264 cm-97. **Preparation of wood for chemical analysis**. Test Methods 2004-2005. TAPPI Press. Atlanta USA, 1997.

TEIXEIRA, Camila M. et al. **Caracterização Química de Resíduos de Eucalyptus sp. de Floresta de Curta Rotação para a Produção de Bioenergia**. Revista virtual de química, v. 8, n. 5, 2016.

THE SKYSCRAPER CENTER, **Mjøstårnet**. Disponível em: < <https://www.skyscrapercenter.com/building/mjostarnet/26866>> Acesso em: 17 abril de 2020.

THE UNIVERSITY OF BRITISH COLUMBIA, **Student Residence – Vancouver**. Disponível em: < <https://vancouver.housing.ubc.ca/residences/brock-commons/> > Acesso em: 17 abril de 2020

TORRES, P. M. A. et al. **Caracterização físico-mecânica da madeira jovem de Eucalyptus camaldulensis para aplicação na arquitetura rural**. Floresta e Ambiente, v.23, n.1, p.109-117, 2016.

TRIANOSKI R. 2010. **Avaliação do potencial de espécies florestais alternativas, de rápido crescimento, para produção de painéis de madeira aglomerada**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal). Curitiba: UFPR. 262p.

TRIANOSKI R. 2012. **Avaliação da qualidade da madeira de espécies de Pinus tropicais por meio de métodos convencionais e não destrutivos**. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal). Curitiba: UFPR. 554p.

TRUGILHO, P. F., BIANCHI, M. L., Rosado, S. D. S., & Lima, J. T. **Qualidade da madeira de clones de espécies e híbridos naturais de Eucalyptus**. Scientia Forestalis, v. 73, p. 55-62, 2007.

TRUGILHO, Paulo Fernando; LIMA, José Tarcísio; MENDES, Lourival Marin. **Influência da idade nas características físico-químicas e anatômicas da madeira de Eucalyptus saligna**. Cerne, v. 2, n. 1, p. 94-111, 1996.

TSOUMIS, George et al. **Science and technology of wood: structure, properties, utilization**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1991.

TUNG, E.S.C.; FREITAS, M.L.M.; FLORSHEIM, S.M.B.; LIMA, I.L. de; LONGUI, E.L.; SANTOS, F.W.; MORAES, M.L.T. de; SEBBENN, A.M. **Varição genética para caracteres silviculturais e anatômicos da madeira em progênies de *Myracrodruon urundeuva* (Engler) Fr.** Allem. Scientia Forestalis, v.38, p.499-508, 2010.

VALERO, Manuel F. et al. **Simultaneous interpenetrating polymer networks of polyurethane from pentaerythritol–modified castor oil and polystyrene: structure–property relationships**. Journal of the American Oil Chemists' Society, v. 86, n. 4, p. 383-392, 2009.

VIDAURRE, Graziela Baptista et al. **Propriedades da madeira de reação**. Floresta e Ambiente, v. 20, n. 1, p. 26-37, 2013.

VILAR, W.D. **Química e tecnologia dos poliuretanos**, 3 ed., Vilar Consultoria, 2002. Disponível em:< <http://www.poliuretanos.com.br>>. Acesso em: 18/12/2020.

VILUMA, Antra; GABRENAS, Arnoldas. **Glulam in Architecture of Latvia and Lithuania**. Architecture and Urban Planning, v. 15, n. 1, p. 59-66, 2019.

VITAL, B. R.; CARNEIRO, A. C. O.; PEREIRA, B. L. C. **Qualidade da madeira para fins energéticos**. In: SANTOS, F.; COLODETTE, J. L.; QUEIROZ, J. H. Bioenergia e Biorrefinaria: cana-de-açúcar e espécies florestais. Viçosa-MG: 2013. p. 321354.



YANG, H.; YAN, R.; CHEN, H.; LEE, D. H.; ZHENG, C. **Characteristics of hemicellulose, cellulose, and lignin pyrolysis**. Fuel, v. 86, n. 12, p. 1781-1788, 2007. DOI: 10.1016/j.fuel.2006.12.013.

YANG, Jae Heung et al. **Comparison of thermal/mechanical properties and shape memory effect of polyurethane block-copolymers with planar or bent shape of hard segment**. Polymer, v. 44, n. 11, p. 3251-3258, 2003.

ZANUNCIO, Antônio José Vinha et al. **Composição química da madeira de eucalipto com diferentes níveis de desbaste**. Ciência Florestal, v. 23, n. 4, p. 755-760, 2013.

ZHANG, Lina; ZHOU, Qi. **Effects of molecular weight of nitrocellulose on structure and properties of polyurethane/nitrocellulose IPNs**. Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics, v. 37, n. 14, p. 1623-1631, 1999.

8. ANEXOS

		Secretaria do Meio Ambiente e Recursos Hídricos										
AGUASPARANÁ - Instituto das Águas do Paraná												
Sistema de Informações Hidrológicas - SIH												
Alturas diárias de precipitação (mm)												
2020												
Estação:	TOLEDO	Código:	02453059	Entidade:	AGUASPARANÁ							
Município:	Toledo	Instalação:	01/04/1979	Extinção:								
Tipo:	PPr	Bacia:	Paraná 3	Sub-bacia:	1							
Altitude:	517,864 m	Latitude:	24° 40' 35"	Longitude:	53° 42' 37"							
DIA	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
01	13,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0
02	0,0	5,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
03	19,3	4,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	39,5
04	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	28,6
05	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	7,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
06	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	14,3	5,5	0,0	0,0	0,0	0,0	31,0
07	41,0	10,7	0,0	18,5	0,0	1,9	6,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
08	0,5	0,0	4,0	0,0	0,0	0,0	6,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
09	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,4	0,0
11	13,7	22,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	27,8	0,0
12	2,8	6,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0
13	0,0	0,0	0,0	0,0	29,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
14	0,0	0,0	0,0	15,4	0,0	6,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	22,1
15	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	33,0	3,0	13,0	0,0	0,0
16	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	36,0	0,0	0,0	2,5	0,0
17	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	15,0	0,0	0,0	0,0	52,3
18	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	10,4	0,0	0,0	1,3	0,0
19	0,0	6,1	25,6	0,0	0,0	0,0	0,0	41,6	0,0	0,0	31,4	4,0
20	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	11,1	0,0	0,0	0,0	0,0
21	0,0	9,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
22	0,0	0,0	0,0	0,0	134,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
23	0,0	0,0	0,0	0,0	83,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
24	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
25	0,0	4,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
26	0,0	15,0	0,0	0,0	0,0	7,0	5,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
27	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	12,0	0,0	0,0	0,0	15,5	0,0	0,0
28	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,5	0,0	2,5	0,0	0,0	4,5
29	0,0	0,0	7,7	0,0	0,0	2,5	0,0	0,0	5,0	0,0	0,0	0,0
30	16,0	-	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,3	14,2
31	0,0	-	0,0	-	0,0	-	0,0	0,0	-	0,0	-	0,0
Valores mensais												
DIA	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
TOTAL	118,2	83,8	37,3	33,9	246,8	61,4	27,5	150,1	10,5	28,5	68,7	198,2
TOT. CONS.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MÁXIMA	41,0	22,1	25,6	18,5	134,0	14,3	6,7	41,6	5,0	15,5	31,4	52,3
DIAS CHUVA	10	9	3	2	4	8	5	7	3	2	6	9
Valores anuais												
366 dias observados	68 dias de chuva			Máxima: 134,0				Total: 1064,9				

Dados de análise de resistência ao cisalhamento paralelo as fibras da madeira de *Eucalyptus urograndis*

Corpo de Prova	Área (mm²)	Força Máxima (N)	Resistência Cisalhamento (MPa)
CP 1	2550,09	23628,11	9,27
CP 2	2509,97	25225,30	10,05
CP 3	2465,40	27729,29	11,39
CP 4	2525,00	21690,88	8,59
CP 5	2515,00	20794,39	8,27
CP 6	2515,02	23669,33	9,41
CP 7	2509,97	22154,58	8,83
CP 8	2469,84	23978,46	9,71
CP 9	2520,03	24411,25	9,69
CP 10	2504,98	17991,58	7,18
CP 11	2505,00	24895,56	9,94
CP 12	2515,02	24596,73	9,78
CP 13	2525,06	21443,57	8,49
CP 14	2530,08	18455,28	7,29
CP 15	2499,90	23329,28	9,33
CP 16	2525,06	23051,06	9,13
CP 17	2505,00	21907,27	8,75
CP 18	2495,00	23102,59	9,26

Dados de análise de resistência a compressão paralela as fibras da madeira de *Eucalyptus urograndis* - Maciço

Corpo de Prova	Área (mm ²)	Força Máxima (N)	Resistência Cisalhamento (MPa)
CP 1	2500,02	87175,68	34,87
CP 2	2500,36	78561,16	31,42
CP 3	2500,28	82384,11	32,95
CP 4	2499,86	92894,65	37,16
CP 5	2499,97	96923,70	38,77
CP 6	2500,12	81704,02	32,68
CP 7	2500,06	90277,32	36,11
CP 8	2499,85	96769,13	38,71
CP 9	2500,21	97408,00	38,96
CP 10	2500,01	97325,57	38,93
CP 11	2499,98	96099,34	38,44
CP 12	2499,83	97418,30	38,97

Dados de análise de resistência a compressão paralela as fibras da madeira de *Eucalyptus urograndis* – Duas lâminas de madeira

Corpo de Prova	Área (mm ²)	Força Máxima (N)	Resistência Cisalhamento (MPa)
CP 1	2520,02	127084,8	50,43
CP 2	2525,35	107908,2	42,73
CP 3	2540,10	126446	49,78
CP 4	2626,55	97655,31	37,18
CP 5	2534,92	102714,8	40,52
CP 6	2565,29	107434,2	41,88
CP 7	2525,06	128424,4	50,86
CP 8	2535,13	111545,7	44,00
CP 9	2661,11	114853,5	43,16
CP 10	2555,44	113359,3	44,36
CP 11	2565,30	116079,7	45,25
CP 12	2565,49	104466,6	40,72

Dados de análise de resistência a compressão paralela as fibras da madeira de *Eucalyptus urograndis* – Três lâminas de madeira

Corpo de Prova	Área (mm²)	Força Máxima (N)	Resistência Cisalhamento (MPa)
CP 1	2651,27	120871,24	45,59
CP 2	2529,82	112349,46	44,41
CP 3	2625,40	106486,23	40,56
CP 4	2525,23	117625,34	46,58
CP 5	2474,43	108948,99	44,03
CP 6	2514,87	97954,14	38,95
CP 7	2646,13	102220,18	38,63
CP 8	2629,69	116337,28	44,24
CP 9	2529,56	108341,03	42,83
CP 10	2624,93	105837,05	40,32
CP 11	2593,85	107722,76	41,53
CP 12	2618,53	97016,43	37,05

Dados de análise de resistência a compressão paralela as fibras da madeira de *Eucalyptus urograndis* – Quatro lâminas de madeira

Corpo de Prova	Área (mm²)	Força Máxima (N)	Resistência Cisalhamento (MPa)
CP 1	2509,90	119521,36	47,62
CP 2	2488,69	104425,34	41,96
CP 3	2523,66	109072,64	43,22
CP 4	2520,05	114183,66	45,31
CP 5	2516,90	102714,80	40,81
CP 6	2474,36	106249,23	42,94
CP 7	2488,83	110329,79	44,33
CP 8	2572,31	104590,20	40,66
CP 9	2546,99	107228,15	42,10
CP 10	2464,77	121808,95	49,42
CP 11	2473,99	121942,91	49,29
CP 12	2459,85	100509,64	40,86

ANOVA: fator único - PARA OS TRATAMENTOS**RESUMO**

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
2lam	12	530,870	44,239	18,092
3lam	12	504,720	42,060	9,067
4lam	12	528,520	44,043	10,269

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	34,883	2	17,441	1,398	0,261	3,285
Dentro dos grupos	411,711	33	12,476			
Total	446,593	35				

ANOVA: fator único - PARA UMIDADE**RESUMO**

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Umidade (%) 2	12	153,531	12,794	0,321
Umidade (%) 3	12	168,054	14,004	0,082
Umidade (%) 4	12	136,387	11,366	0,110

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	41,879	2	20,940	122,351	5,450E ⁻¹⁶	3,285
Dentro dos grupos	5,648	33	0,171			
Total	47,527	35				

ANOVA: fator único - PARA TRATAMENTOS**RESUMO**

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
Maciço	12	437,970	36,498	8,009
2lam	12	530,870	44,239	18,092
3lam	12	504,720	42,060	9,067
4lam	12	528,520	44,043	10,269

ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	469,605	3	156,535	13,780	0,0000018	2,816
Dentro dos grupos	499,814	44	11,359			
Total	969,420	47				