

UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
EM PROJETO E PROCESSOS DE  
FABRICAÇÃO

Área de concentração: Projeto e Processos de Fabricação

Dissertação de Mestrado

AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DO MÉTODO DE  
APLICAÇÃO E GRAMATURAS DE ADESIVO NA  
QUALIDADE DE COLAGEM DE PAINÉIS EDGE GLUED  
PANEL (EGP)

Dante Guilherme Lanhe

Passo Fundo

2023



CIP – Catalogação na Publicação

---

L287a Lanhe, Dante Guilherme  
Avaliação dos efeitos do método de aplicação e gramaturas de adesivo na qualidade de colagem de painéis edge glued panel (EGP) [recurso eletrônico] / Dante Guilherme Lanhe. – 2023.  
2 MB ; PDF.

Orientador: Prof. Dr. Charles Leonardo Israel.

Coorientador: Prof. Dr. William Haupt.

Dissertação (Mestrado em Projeto e Processos de Fabricação) – Universidade de Passo Fundo, 2023.

1. Processos de fabricação. 2. Indústria de móveis.  
3. Cisalhamento. 4. Resistência de materiais. 5. Spray.  
6. EGP (edge glued panel). I. Israel, Charles Leonardo, orientador. II. Haupt, William, coorientador. III. Título.

CDU: 684

**Dante Guilherme Lanhe**

**AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DO MÉTODO DE APLICAÇÃO E  
GRAMATURAS DE ADESIVO NA QUALIDADE DE COLAGEM DE  
PAINÉIS EDGE GLUED PANEL (EGP)**

Orientador: Prof. Dr. Charles Leonardo Israel

Coorientador: Prof. Dr. William Haupt

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Projeto e Processos de Fabricação da Universidade de Passo Fundo, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Projeto e Processos de Fabricação.

Passo Fundo  
2023

Dante Guilherme Lanhe

**AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DO MÉTODO DE APLICAÇÃO E  
GRAMATURAS DE ADESIVO NA QUALIDADE DE COLAGEM DE  
PAINÉIS EDGE GLUED PANEL (EGP)**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Projeto e Processos de Fabricação da Universidade de Passo Fundo, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Projeto e Processos de Fabricação.

Data de aprovação: 05 de julho de 2023

Os componentes da Banca Examinadora abaixo aprovaram a Dissertação:

Prof. Dr. Charles Leonardo Israel  
Orientador

Prof. Dr. William Haupt  
Coorientador

Prof. Dr. Leandro Dóro Tagliari  
Universidade de Passo Fundo

Prof<sup>a</sup>. Dra. Aline Dettmer  
Universidade de Passo Fundo

Prof<sup>a</sup>. Dra. Rosilani Trianoski  
Universidade Federal do Paraná

*Dedico esse trabalho a Deus, à Nossa Senhora Aparecida, à minha família e todos que me apoiaram nessa jornada.*

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, a Deus e Nossa Senhora Aparecida pela coragem e determinação, obtidas através da fé, que me permitiram encarar esse desafio e me ajudaram a persistir, sempre.

Aos meus familiares, amigos e colegas, por todo apoio e incentivo nesses dois anos de percurso, foram essenciais nos momentos difíceis e sempre solícitos quando necessária ajuda.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Charles Leonardo Israel, e ao meu coorientador, Prof. Dr. William Haupt, e à banca de avaliação, Prof. Dr. Leandro Dóro Tagliari, Prof<sup>a</sup>. Dra. Aline Dettmer e Prof<sup>a</sup>. Dra. Rosilani Trianoski, por todas as sugestões, críticas e dicas para melhoria e aprimoramento do trabalho.

Ao Programa de Pós-Graduação em Projeto e Processos de Fabricação e todos seus membros, por acreditar em mim como aluno e acolher o meu projeto de pesquisa.

À Universidade de Passo Fundo e as equipes dos laboratórios, por todo o auxílio e disponibilização de materiais e infraestrutura para a realização dos experimentos, além da flexibilidade financeira e de horários, tornando possível a realização do curso.

Ao SENAI do estado de Santa Catarina, especificamente à equipe do Laboratório de Tecnologia da Madeira e Mobiliário, pelo suporte técnico, auxílio nos experimentos e compreensão dos resultados.

À empresa em que foi realizada a pesquisa e a equipe responsável pelo suporte, pela disponibilização dos dados do processo estudado, além do incentivo aos estudos e ao apoio das áreas envolvidas na confecção das amostras.

E, em geral, a quem contribuiu para a conclusão dessa pesquisa, direta ou indiretamente.

*Estabeleça novos desafios, saia da sua zona de conforto, enfrente seus maiores medos. Desse modo a recompensa é só uma consequência.*  
*Mariana Mello Machado.*

## RESUMO

Com o aumento da demanda do mercado, que engloba os setores madeireiro e moveleiro, a indústria necessita de melhorias e inovações, principalmente em relação aos processos e redução de desperdícios, para que os níveis de produção se mantenham equivalentes a esse crescimento. Frente a isso, o alto consumo de adesivo de uma indústria do ramo moveleiro levou à necessidade e ao interesse do estudo de maneiras para diminuir esse consumo, através de mudanças no processo de colagem, porém, sem comprometer as propriedades mecânicas do material colado. A colagem é realizada para a formação de painéis EGP (*edge glued panel*) de *Pinus taeda* L., com uso do adesivo PVAc (acetato de polivinila) em gramatura média de 205 g/m<sup>2</sup>. Se usadas gramaturas menores, utilizando o método de aplicação atual (rolo), problemas de resistência mecânica começam a surgir. O objetivo desse trabalho foi estudar a viabilidade de aplicação de adesivo por outro método (spray) com gramaturas e, conseqüentemente, tempos de prensagem menores, a fim de avaliar a conservação das propriedades mecânicas dos painéis através de testes de cisalhamento e tração. Para isso, inicialmente, foram necessárias as caracterizações da madeira, do adesivo e do processo para especificar suas condições de trabalho. Em seguida, foram confeccionadas amostras na situação atual de colagem (gramatura de 205 g/m<sup>2</sup> e tempo de prensagem de 80 segundos), para a obtenção de resultados de referência nos testes, e nas situações propostas (gramaturas do adesivo de 125 g/m<sup>2</sup> e 80 g/m<sup>2</sup> e tempos de prensagem de 70 e 75 segundos), para a tentativa de atingir os valores de referência estabelecidos. Em relação às caracterizações, o encurvamento da madeira e a viscosidade do adesivo apresentaram valores médios acima do recomendado (5,21 mm e 8115,67 cP). Já sobre os resultados principais, foi possível concluir a possibilidade de substituição do método atual pelo proposto, com a utilização do spray em conjunto com gramatura do adesivo de 125 g/m<sup>2</sup> e os tempos de prensagem de 75 e 70 segundos, sem diferença estatística significativa para o método atual. Então, a confirmação da possibilidade de redução da quantidade de adesivo usada através de outro método de aplicação, sem a perda de resistência mecânica dos painéis, proporciona novas alternativas para o uso da proposta em larga escala. Para isso, cada processo deve ser estudado e todas suas particularidades devem ser consideradas para que a viabilização seja efetiva, abrangendo desde a área de custos até o que tange a parte de métodos e processos.

Palavras-chave: EGP, spray, resistência mecânica, cisalhamento, tração.



## ABSTRACT

With the general increase in market demand, which encompasses the wood and furniture sectors, the industry needs improvements and innovations, mainly in relation to processes and waste reduction, so that production levels remain equivalent to this growth. Faced with this, the high consumption of adhesive in a furniture industry led to the need and interest in studying ways to reduce this consumption, through changes in the bonding process, however, without compromising the mechanical properties of the bonded material. The collage is carried out to form EGP panels (edge glued panel) of *Pinus taeda* L., using PVAc adhesive (polyvinyl acetate) in an average weight of 205 g/m<sup>2</sup>. If lower weights are used, using the current application method (roller), mechanical strength problems begin to arise. The objective of this work was to study the feasibility of applying glue by another method (spray) with weights and, consequently, shorter pressing times, in order to evaluate the conservation of the mechanical properties of the panels through shear and traction tests. For this, initially, the characterization of the wood, the adhesive and the process were necessary to specify their working conditions. Then, specimens were made in the current situation of bonding (weight of 205 g/m<sup>2</sup> and pressing time of 80 seconds), to obtain reference results in the tests, and in the proposed situations (weight of the adhesive of 125 g/m<sup>2</sup> and 80 g/m<sup>2</sup> and pressing times of 70 and 75 seconds), in an attempt to reach the established reference values. Regarding the characterizations, the bending of the wood and the viscosity of the adhesive showed mean values above the recommended (5.21 mm and 8115.67 cP). As for the main results, it was possible to conclude that the current method could be replaced by the proposed one, using the spray together with an adhesive weight of 125 g/m<sup>2</sup> and pressing times of 75 and 70 seconds, with no statistically significant difference for the current method. So, the confirmation of the possibility of reducing the amount of adhesive used through another application method, without loss of mechanical strength of the panels, provides new alternatives for the use of the proposal on a large scale. For this, each process must be studied and all its particularities must be considered so that the viability is effective, ranging from the area of costs to what concerns the part of methods and processes.

Keywords: EGP, spray, mechanical resistance, shear, traction.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Principais tipos de junção adesiva vertical e horizontal de sarrafos.....	24
Figura 2 – Composição principal da árvore (a) e ilustração da estrutura de traqueídeos presente nas coníferas (b).....	26
Figura 3 – Exemplos de orientação normal das fibras (a) e da orientação com influência do nó (b).....	27
Figura 4 – Representação da anatomia microscópica de coníferas (a) e folhosas (b).....	28
Figura 5 – Representação das três direções ortogonais de simetria da madeira.....	32
Figura 6 – Representação das propriedades de tração e cisalhamento na colagem da madeira.....	42
Figura 7 – Representação da linha de cola em níveis.....	44
Figura 8 – Camadas presentes em juntas de madeira coladas, à esquerda, e a interação entre adesivo, camada celular e microfissuras da madeira, à direita.....	45
Figura 9 – Fluxograma de esquematização da parte experimental do trabalho.....	47
Figura 10 – Esquema de dimensionamento e direcionamento de amostras para os testes de cisalhamento e tração.....	49
Figura 11 – Representação gráfica do tratamento estatístico realizado com os dados obtidos nos experimentos.....	50
Figura 12 – Aplicação de adesivo pelo método atual (a), pelo proposto (b) e resultados visuais das aplicações (c).....	57
Figura 13 – Painel com linhas de cola (a) e esquema ilustrativo do corpo-de-prova obtido do painel (b).....	58
Figura 14 – Esquema ilustrativo do corpo-de-prova para teste de tração.....	59
Figura 15 – Pré-prensagem com grampos mecânicos (a), corpo-de-prova físico com fratura na linha de cola (b) e teste de tração na máquina universal de ensaios (c).....	60
Figura 16 – Relação entre densidade e porosidade da madeira.....	63
Figura 17 – Ilustração do procedimento de medição do encurvamento (acima) e do arqueamento (abaixo).....	66

Figura 18 - Representação gráfica dos comportamentos mais comumente observados de cada situação testada, relacionando Força de tração normal (kN) x Deslocamento (mm). Os dados para confecção dos gráficos foram obtidos pela mediana de todos os valores válidos para cada situação.....	73
Figura 19 – Detalhamento da região fraturada com comportamento comum entre SA, SP1 e SP2 (a) e comum entre SP3 e SP4 (b).....	75
Figura 20 – Ilustração comparativa do adesivo depositado pelos dois métodos de aplicação de adesivo (atual e proposto).....	80
Figura 21 – Medição da espessura da linha de cola.....	82

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Classificação, propriedades e aspectos dos principais materiais oriundos da colagem da madeira.....	22
Quadro 2 – Triagem do uso de adesivos, desde a indústria madeireira geral até a indústria moveleira.....	34
Quadro 3 – Comparação de características entre métodos de aplicação de adesivo.....	41
Quadro 4 – Vantagens e desvantagens da aplicação de adesivo por rolo e spray.....	41
Quadro 5 – Fatores que influenciam no desempenho da colagem de painéis de madeira.....	48
Quadro 6 – Comportamento físico da ruptura resultante nos corpos-de-prova para as cinco situações testadas.....	74

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores de variáveis independentes na situação atual e nas situações propostas.....	49
Tabela 2 – Resultados médios obtidos dos ensaios da madeira de <i>Pinus taeda</i> L. ....	62
Tabela 3 – Resultados médios obtidos dos ensaios do adesivo acetato de polivinila.....	66
Tabela 4 – Resultados médios obtidos para a gramatura do adesivo depositado.....	68
Tabela 5 – Resultados médios obtidos nos testes de cisalhamento e tração.....	70
Tabela 6 – Percentuais de falha da madeira para os testes de tração normal.....	74
Tabela 7 – Análise de variância entre as médias das situações dentro de cada teste realizado.....	77
Tabela 8 – Análise estatística comparativa entre situação atual e propostas, para os quatro testes realizados.....	78
Tabela 9 – Médias e desvios-padrão obtidos nas medições das linhas de cola, em mm.....	81

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIMCI	Associação Brasileira da Indústria de Madeira Processada Mecanicamente
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABPM	Associação Brasileira de Produtores de Madeira
ABTCP	Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel
ANOVA	Análise de Variância
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CHa	Cambissolo Húmico Alumínico
DIN	<i>Deutsche Institut für Normung</i>
EGP	<i>Edge Glued Panel</i>
EN	<i>European Norm</i>
FAO	<i>Food and Agriculture Organization</i>
IC	Intervalo de Confiança
LTMM	Laboratório de Tecnologia da Madeira e Mobiliário
MDF	<i>Medium Density Fibreboard</i>
MDP	<i>Medium Density Particleboard</i>
NBR	Norma Brasileira
OSB	<i>Oriented Strandboard</i>
PCL	Paineis Colados Lateralmente
pH	Potencial Hidrogeniônico
PMVA	Produtos de Maior Valor Agregado
PSF	Ponto de Saturação das Fibras
PVA	Àlcool Polivinílico
PVAc	Acetato de Polivinila
RLm	Neossolo Litólico Chernossolo
SA	Situação Atual
SENAI	Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial
SP	Situação Proposta
UNECE	<i>United Nations Economic Commission for Europe</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A_{g90}$	Área, $m^2$
Arq	Índice de arqueamento, %
Cin	Teor de cinzas, %
Ext	Teor de extrativos, %
Enc	Índice de encurvamento, %
$f_{gt,90}$	Força de resistência à tração normal, $N/m^2$
$F_{t90,máx}$	Força de tração, N
$I_1, I_2$	Espessura, mm
$I_g$	Inclinação da grã, %
$L_1, L_2$	Comprimento, mm
$m_{12}$	Massa, kg
$m_c, m_i, m_s, P_i, P_f$	Massa, g
Por	Índice de porosidade, %
Umi	Teor de umidade, %
$V_{12}$	Volume, $m^3$
X, Y	Altura da curvatura, mm
$\rho_0, \rho_{w.s}$	Densidade, $g/cm^3$
$\rho_{ap}$	Densidade aparente, $kg/m^3$

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>17</b>
<b>1.1 Objetivos.....</b>	<b>20</b>
1.1.1 Objetivo geral .....	20
1.1.2 Objetivos específicos .....	20
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>22</b>
<b>2.1 Colagem da madeira.....</b>	<b>22</b>
2.1.1 Considerações iniciais .....	22
2.1.2 <i>Edge Glued Panel</i> .....	23
<b>2.2 Propriedades que influenciam na colagem da madeira .....</b>	<b>25</b>
2.2.1 Considerações iniciais .....	25
2.2.2 Espécie utilizada – <i>Pinus taeda</i> L.....	25
2.2.3 Propriedades anatômicas da madeira.....	27
2.2.3.1 <i>Inclinação das fibras ou da grã</i> .....	27
2.2.3.2 <i>Índice de porosidade</i> .....	28
2.2.4 Propriedades físicas da madeira .....	29
2.2.4.1 <i>Rugosidade pós-processamento</i> .....	29
2.2.4.2 <i>Densidade ou massa específica</i> .....	30
2.2.4.3 <i>Teor de umidade</i> .....	30
2.2.4.4 <i>Estabilidade dimensional</i> .....	31
2.2.5 Propriedades químicas da madeira .....	32
2.2.6 Adesivo – acetato de polivinila (PVAc).....	33
2.2.7 Propriedades do adesivo .....	35
2.2.7.1 <i>Viscosidade</i> .....	35
2.2.7.2 <i>Tempo de gelatinização ou cura</i> .....	36
2.2.7.3 <i>Potencial hidrogeniônico (pH)</i> .....	37
2.2.7.4 <i>Teor de sólidos</i> .....	37
2.2.8 Parâmetros do processo de colagem.....	38
2.2.8.1 <i>Condições de prensagem</i> .....	38
2.2.8.2 <i>Gramatura ou taxa de espalhamento</i> .....	39
2.2.8.3 <i>Método de aplicação do adesivo</i> .....	40
<b>2.3 Propriedades mecânicas dos painéis EGP.....</b>	<b>41</b>



2.3.1 Linha de união ou linha de cola.....	43
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>46</b>
<b>3.1 Objeto de estudo e materiais .....</b>	<b>46</b>
<b>3.2 Procedimento metodológico.....</b>	<b>47</b>
3.2.1 Ensaio de caracterização das propriedades que influenciam na colagem da madeira ..	51
3.2.1.1 <i>Propriedades anatômicas da madeira</i> .....	51
3.2.1.2 <i>Propriedades físicas da madeira</i> .....	52
3.2.1.3 <i>Propriedades químicas da madeira</i> .....	53
3.2.1.4 <i>Propriedades do adesivo</i> .....	55
3.2.1.5 <i>Propriedades do processo</i> .....	56
3.2.2 Ensaio para avaliação das propriedades mecânicas dos painéis colados .....	58
3.2.2.1 <i>Cisalhamento da linha de cola</i> .....	58
3.2.2.2 <i>Tração normal à linha de cola</i> .....	59
3.2.2.3 <i>Mensuração e análise da linha de cola</i> .....	61
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>62</b>
<b>4.1 Caracterização da madeira.....</b>	<b>62</b>
<b>4.2 Caracterização do adesivo .....</b>	<b>66</b>
<b>4.3 Caracterização do processo de colagem .....</b>	<b>68</b>
<b>4.4 Avaliação da resistência da linha de cola por tração e cisalhamento .....</b>	<b>70</b>
<b>5 CONCLUSÃO.....</b>	<b>84</b>
<b>5.1 Recomendações para trabalhos futuros .....</b>	<b>85</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>87</b>

## 1 INTRODUÇÃO

De acordo com Sandberg (2016), pela crescente necessidade do mercado de desenvolver novos produtos tendo a madeira como matéria-prima, com maiores funcionalidades envolvendo desempenho, qualidade e sustentabilidade, são necessários: o aumento do volume de produção da madeira e a inovação e aprimoramento dos processos industriais envolvidos. O autor defende que devem ser criadas hipóteses de modificação e melhoria das propriedades da madeira bruta, sendo possível a formulação de produtos mais versáteis e consistentes e o melhor aproveitamento de resíduos do processamento.

Frente a isso, é relevante a apresentação de alguns dados referentes aos panoramas nacional e internacional. No Brasil, no ano de 2018, a produção de madeira serrada proveniente das áreas reflorestadas ou plantadas (8,1 milhões de hectares) foi de 7,84 milhões m<sup>3</sup>, “voltada tradicionalmente aos setores da construção civil, embalagens e movelaria, além de uma parcela representativa destinada às exportações” (ABIMCI, 2019, p. 81). No panorama internacional, especificamente sobre o ramo moveleiro, que utiliza, em sua maior parte, painéis como matéria-prima, a produção oriunda da América Latina representa até cerca de 7% do total importado por nação, considerando o ranking dos maiores países importadores (UNECE; FAO, 2021).

Ainda, dados como os de Funchal (2021) demonstram que a progressão da produção mundial de painéis de madeira sólida, no intervalo de 2000 a 2019, foi de aproximadamente 105%, com previsão ascendente. Mendes (2021) mostra a previsão do aumento aproximado de 6% na demanda brasileira para os próximos anos, principalmente da madeira serrada de Pinus, ocasionado por novos projetos industriais. Esses índices demonstram a necessidade do aumento da produção madeireira para o suprimento das carências do mercado.

Através de constatações de Bila (2014), já era possível observar esse crescimento, tornando notória a necessidade de pesquisas referentes à tecnologia madeireira para obter a melhoria contínua dos benefícios que a madeira e seus derivados oferecem, “através do levantamento de informações que possibilitem o aprimoramento técnico e o desenvolvimento de novas tecnologias que reduzam custos e utilizem da melhor forma as espécies madeireiras” (BILA, 2014, p. 12).

A partir de índices que demonstram que a indústria mundial madeireira é a maior usuária de adesivos e resinas, utilizando 70% do total produzido, conforme cita Sandberg (2016), e que “mais que 70% dos produtos derivados da madeira consomem algum tipo de

adesivo” (BIAZZON, 2016, p. 19), é possível notar a relevância do adesivo nos produtos fabricados utilizando a madeira como matéria-prima, dando enfoque às classes que o conceito de Produtos de Madeira de Maior Valor Agregado (PMVA) engloba.

Vista a relevância da madeira e dos seus subprodutos no mercado, é indispensável considerar para quais usos cada material é destinado, a fim de garantir uma boa performance. Leggate et al. (2022) destacam que a madeira, tanto bruta, quanto em subprodutos formados por juntas adesivas, pode oferecer bons níveis de propriedades como a rigidez, a dureza e altas resistências física e mecânica, independente para que uso será destinada. Nesse sentido, Rusakov et al. (2020) pontuam que os problemas de resistência da união adesiva (que implicam na deficiência dessas propriedades) são originados, principalmente, na madeira, no adesivo e no ambiente de processamento. Conforme vão sendo desenvolvidas melhorias para sanar esses problemas, os autores salientam que é sempre primordial manter ou aumentar as propriedades físicas e mecânicas citadas, para que seja garantido o desempenho ideal do material.

Em suma, nota-se a importância dos dizeres envolvendo: a inovação ou melhoria dos processos industriais; diferentes usos da madeira, a importância do adesivo para a fabricação de seus subprodutos e a manutenibilidade das suas propriedades físicas e mecânicas; e, o uso de métodos pelos quais seja possível a redução de custos e desperdícios. Por isso, esse trabalho tem por objetivo avaliar a manutenibilidade das propriedades mecânicas de painéis de madeira de *Pinus taeda* L. colados lateralmente pela redução do adesivo aplicado e do tempo de prensagem, possíveis graças à troca do método de aplicação do adesivo.

Como o trabalho, que ocorre em uma indústria de móveis, tem vistas à homologação da melhoria do processo, isso pode servir de base para outras empresas do ramo. O que torna possível a reprodutibilidade dos procedimentos presentes na pesquisa é a utilização de normas e especificações, indispensável em toda confecção que utilize madeira e derivados (ABIMCI, 2019). Qualquer melhoria replicável em organizações do mesmo setor se torna relevante, avaliando a existência numerosa desse tipo de empresa.

Relacionando a quantidade de empresas fabricantes de produtos de madeira com a variedade existente desses produtos, pode-se afirmar que é comum o surgimento de problemas em todas as etapas do seu processamento. A produção envolvendo madeira é complexa, pois envolve diversas etapas dependentes e possui muitas variáveis que influenciam na qualidade e desempenho do produto pronto.

Dos problemas citados, as suas principais naturezas são relacionadas ao comportamento natural da madeira e às condições de processamento impostas, referentes ao maquinário e aos materiais utilizados (RAIA; ROSA; FONTE, 2017). Dentro dessa abordagem, dentre os problemas observados na empresa em que esse trabalho foi desenvolvido, o índice do consumo de adesivo no processo de colagem de painéis e a taxa de empenamento da madeira são tratados como pontos críticos na busca por melhorias ou soluções, porém, destes, o primeiro se mostra mais fácil de trabalhar pela menor dependência de fatores naturais em comparação ao segundo.

O adesivo usado no processo, por especificações normativas de clientes, é o acetato de polivinila. As altas taxas de consumo na empresa estudada, na média aproximada de 60 toneladas/ano, geram preocupação pelo custo e pelo desperdício relacionado, aflorando a necessidade de ações que diminuam esse índice.

Considerando que o sucesso da colagem tem influência de muitos fatores, controláveis ou não, Frihart e Hunt (2021) sinalizam a variedade e as possibilidades envolvendo cada um deles, considerando que as particularidades de cada processo e de cada empresa devem convergir para um processo adequado. Ainda, é possível listar os principais fatores para a adequação correta do processo, citados por Dunky (2003) e Petrie (2021), e pesquisas relacionadas: a quantidade e formato físico do adesivo (CHIOZZA; PIZZO, 2016), o método de aplicação do adesivo (HOW et al., 2017), os requisitos de processamento (ENDO; TRIANOSKI; IWAKIRI, 2017), as características da madeira (DIAS, 2016), as condições ambientais de serviço (KOCAEFE; HUANG; KOCAEFE, 2015) e a resistência e estabilidade do produto colado (BARBOUTIS; KAMPIREDOU, 2021).

Desses fatores, os de possível alteração na empresa estudada são os que envolvem o adesivo, o seu método de aplicação e o processamento. A ideia inicial de reduzir o consumo aplicando menos adesivo com taxas de espalhamento do adesivo (gramaturas) menores do que a média aplicada não é suficiente, pois surgem defeitos de qualidade que desencadeiam a diminuição da resistência do painel, se mantido o método de aplicação convencional. Por isso, foi criada a hipótese de que, mudando o método de aplicação, o comportamento do painel, referentes às duas classes de defeitos citadas, poderia ser mantido, mesmo reduzindo a quantidade de adesivo aplicada, respeitando os limites mínimos de estabilidade dele. Isso implicaria, conseqüentemente, na diminuição do tempo de prensagem pois a resina levaria menos tempo para solidificar, ou seja, pela mudança de um fator é possível, ainda, melhorar o outro que está relacionado.

A escolha pelo método de aplicação por spray se baseia em definições sobre o histórico de sucesso do spray em outros tipos de materiais, em relação à adesão (FOTOVVATI; NAMDARI; DEGHANGHADIKOLAEI, 2019), à aplicabilidade em madeira (FRIHART; HUNT, 2021), e à formação da camada de adesivo de menor espessura e redução de desperdícios (DUNCAN et al., 2003; LIMA, 2016).

Em relação à possível consolidação do uso do spray, Albino, Mori e Mendes (2010) e Bila (2014) destacam que, com o aumento da taxa de fabricação de produtos de madeira, surge a necessidade de mais estudos sobre a interação do adesivo e da madeira, em relação à adesão, e as condições que a influenciam. Nesse sentido, Petrie (2021) destaca a importância da realização de testes em adesivos, principalmente quando há: a mudança do tipo de adesivo e/ou dos parâmetros do processo de adesivação; e, a necessidade de monitoramento da qualidade e confirmação da eficácia da colagem.

Em complemento, esse novo método de aplicação pode ser explorado em outras condições, ou seja, pode ser adequado a superfícies com diversos tipos de irregularidades. Ainda, com a possível validação dessa proposta de mudança no método de deposição de adesivo, é possível que outras empresas passem a aderir à ideia, parcial ou totalmente, obtendo ganhos equivalentes ou superiores, de acordo com a dimensão da melhoria idealizada.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo geral**

Avaliar o desempenho das propriedades mecânicas de painéis de madeira colados lateralmente em diferentes condições de colagem, com alteração no método de aplicação e na gramatura do adesivo.

### **1.1.2 Objetivos específicos**

- a) Caracterizar as propriedades que influenciam no desempenho da união adesiva para comparação com a faixa de valores indicada para cada propriedade;
- b) Testar a tração e o cisalhamento da linha de cola pela prática atual, com maior gramatura de adesivo e aplicação por rolo, para obter valores de referência;

- c) Repetir os testes de tração e cisalhamento da linha de cola pelas práticas propostas, com menor gramatura de adesivo e aplicação por spray, para verificar se há o alcance dos valores de referência;
- d) Avaliar se há a possibilidade de substituição da prática de colagem usual por uma ou mais práticas propostas com base nos testes de tração e cisalhamento.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA



### 2.1 Colagem da madeira


#### 2.1.1 Considerações iniciais

Através de constatações de APA (2019) e Frihart e Hunt (2021), a colagem da madeira, por possuir diversas técnicas e variada gama de oportunidades, permite o melhor aproveitamento do recurso madeireiro para beneficiamento, principalmente, em indústrias como a de materiais de construção e a moveleira, possibilitando a confecção de diferentes materiais. Nesse sentido, os autores destacam que os produtos originados da colagem da madeira mais usados são o painel de partículas orientadas (OSB), o compensado laminado (*plywood*), o painel de fibras (MDF), o painel de partículas (MDP) e os compósitos de madeira sólida.

Uma condição comumente vista, quando se fala em painéis colados de madeira, é a classificação equivocada sobre esse tipo de material, em que, por exemplo, painéis com colagem lateral, OSB, MDF, MDP e outros acabam sendo considerados como uma coisa só, porém cada um possui suas propriedades, usos e especificações particulares, expostas no Quadro 1.

Quadro 1 – Classificação, propriedades e aspectos dos principais materiais oriundos da colagem da madeira.

Material	Propriedades	Aspecto
Painel de partículas orientadas ( <i>oriented strandboard</i> )	Esse material é composto por fragmentos de madeira de geometria alongada (com dimensões que costumam variar de 80 a 150 mm de comprimento por 25 mm de largura), unidos por resina e dispostos em três camadas, com orientação intercalada. O OSB tem várias aplicações que vão de paredes (externas e internas) até pisos, devido às propriedades como: alta resistência estrutural, alto nível de rigidez e resistência à umidade, obtidas por meio de parâmetros como espécie da madeira, adesivo, tamanho da tira e temperatura e pressão da prensagem.	
Compensado laminado ( <i>plywood</i> )	É formado por um conjunto de lâminas de madeira de espécies com característica morfológica macia/maleável aderidas, com espessura individual variável de acordo com o destino e aplicação (comumente de 1,5 mm a 5 mm), decisão consequente das propriedades mecânicas como o módulo de elasticidade, módulo de ruptura e resistência ao cisalhamento em diferentes condições ambientais, sendo muito usado, principalmente, na construção civil.	

Material	Descrição	Aspecto físico
Painel de fibras ( <i>fibreboard</i> )	A definição para esse compósito é um material à base de madeira reconstituída, pós-processamento em desfibrador específico (em que as fibras originadas são menores do que os fragmentos encontrados em um painel de partículas), em que há a junção destes elementos com materiais aglutinantes, ceras e aditivos, através da combinação de temperatura e pressão elevadas. O resultado é o produto em formato de painel, com propriedades fundamentais como melhor usinabilidade, melhor adesão de acabamentos e resistência à umidade, o que justifica o amplo uso, desde ambientes internos a algumas aplicações estruturais específicas.	
Painel de partículas ( <i>particleboard</i> )	Diferenciando-se pelas condições menos severas de prensagem (em comparação ao painel de fibras) e por ser composto por partículas maiores, esse material é definido como um compósito fabricado, essencialmente, com o uso de madeira processada em tora, ligado por adesivo com distribuição feita de forma aleatória, isto é, sem deposição uniforme do aglutinante, e submetido a condições de temperatura e pressão controladas, sendo o MDP o mais conhecido. Essa condição, que acaba comprometendo a homogeneidade do compósito, reduz os índices de algumas propriedades do painel como, por exemplo, a resistência à umidade e o desempenho mecânico, o que torna a utilização desse tipo de compósito mais indicada a ambientes internos.	
Compósito de madeira sólida ( <i>solid wood composite</i> )	Para a confecção dessa gama de materiais (que se encontra dentro da classificação de PMVA), é utilizada, principalmente, a madeira serrada ( <i>lumber</i> ), produto final do processamento primário da madeira. São fabricados, em maior quantidade, pisos, molduras, portas e EGP, definidos pela colagem lateral de sarrafos (pedaços de madeira com dimensões predefinidas no processo), para a obtenção de painéis utilizados, com maior significância, na indústria moveleira.	

Fonte: adaptado de ABIMCI (2009), Ashori, Nourbakhsh e Karegarfard (2009), Martins (2011), Melo et al. (2014), Ormondroyd e Stefanowski (2015), Sandberg (2016), Lau (2017), Jia et al. (2019), Reis et al. (2019), Varanda et al. (2019), Lunguleasa et al. (2021), Yuan et al. (2021).

### 2.1.2 Edge Glued Panel

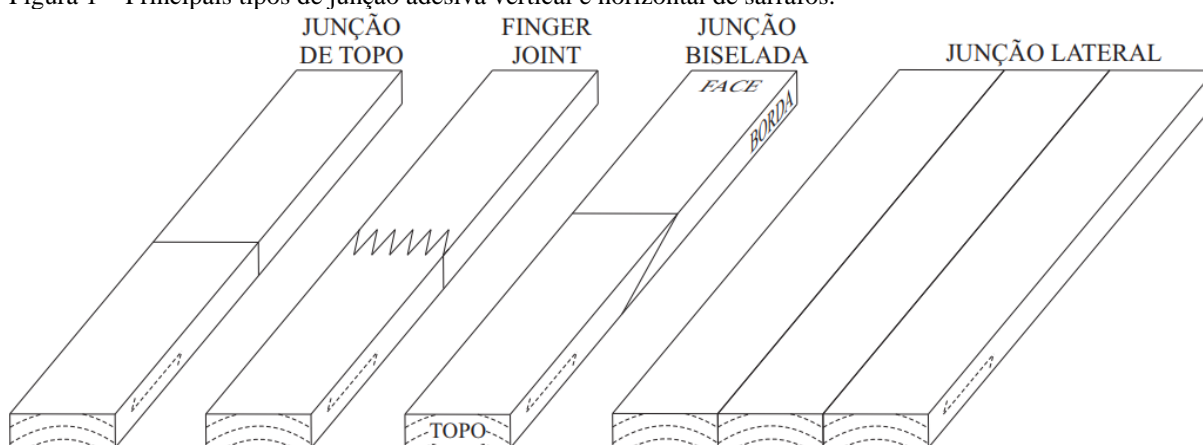
Conforme Bila (2014) e Mölleken (2017), o *Edge Glued Panel* (EGP) pode ser definido pela junção de sarrafos (pedaços retangulares de madeira sólida com dimensão variada) através da colagem com material adesivo e processamento específico, originando um painel de madeira.

Martins (2011) e Souza (2019) apontam que as principais junções utilizadas nos componentes de formação dos EGP são: junção simples longitudinal, de dedo com diferentes geometrias (*finger joint*) e biselada (para aumento de comprimento) e junção simples lateral



(para composição final do painel), conforme Figura 1. As autoras salientam que a diversidade de possibilidades para esse tipo de união foi desenvolvida com base nas características pretendidas do componente final, como dimensionamento e obtenção de propriedades mecânicas predeterminadas, com a variação da superfície de contato entre material e adesivo, e do processo, como a disponibilidade e variedade do maquinário e ferramentaria, visando o máximo reaproveitamento de material. Cabe destacar que esse trabalho não engloba a formação *finger joint*, focando apenas na junção lateral de sarrafos, sendo esses inteiros, sem colagem longitudinal.

Figura 1 – Principais tipos de junção adesiva vertical e horizontal de sarrafos.



Fonte: adaptado de Souza (2019).

Como anteriormente citado, o painel colado lateralmente é classificado como PMVA por utilizar, além da madeira serrada (*lumber*), pedaços menores oriundos do reaproveitamento do processamento de toras. Fagundes (2003) corrobora a relação entre a fabricação de EGP e sua condição de PMVA, ressaltando que “estes produtos [...] podem ter seus elementos pré-cortados por serrarias (sarrafos) e acabados em indústrias onde são emendados, colados e lixados ou então montados em placas, tais como os pisos elaborados a partir de pequenas peças de madeira” (FAGUNDES, 2003, p. 96).

Bila (2014) cita que a demanda das indústrias que utilizam a madeira serrada como material elementar cresceu consideravelmente nos últimos anos, com foco na de painéis, sendo necessário o desenvolvimento tecnológico dos procedimentos fabris, com a busca pela maior eficiência e menor tempo de produção, instigando a fabricação do produto pela colagem de borda. Nesse contexto, é indispensável, mercadológica e ecologicamente, que a madeira usada seja proveniente de espécies de crescimento acelerado, como *Pinus taeda* L.

(ENDO; TRIANOSKI; IWAKIRI, 2017), *Tectona grandis* L. f. (MÖLLEKEN, 2017) e tipos de eucaliptos e folhosas tropicais (MATTOS; GONÇALVES; CHAGAS, 2008).

## **2.2 Propriedades que influenciam na colagem da madeira**

### 2.2.1 Considerações iniciais

Martins et al. (2013) e Frihart e Hunt (2021) defendem que o comportamento da ligação adesiva na madeira, que é um material natural e de propriedades significativamente mutáveis pela influência do ambiente onde é processada, é difícil de ser totalmente compreendido, o que impede que soluções mais eficazes para a colagem sejam criadas ou que as existentes sejam rapidamente melhoradas. Porém, os autores convergem na definição de três principais características que implicam na qualidade e resistência da colagem, que são:

- a) a madeira, especialmente sua superfície, incluindo a interface entre superfície da madeira e a linha de ligação;
- b) o adesivo aplicado;
- c) os parâmetros do processo.

É importante explicar sobre os atributos citados para o melhor entendimento de cada um e como podem se relacionar na produção do EGP.

### 2.2.2 Espécie utilizada – *Pinus taeda* L.

Oliveira et al. (2006) destacam que, no Brasil, as indústrias que usam a madeira como matéria-prima, captam esse material em grandes volumes, do gênero *Pinus*, um dos mais abundantes do país, principalmente na região Sul. Zegarra (2011) cita que, dentre as espécies existentes, há o destaque para a espécie *Pinus taeda* L., originário dos Estados Unidos, pela maior representatividade, em números, em programas de reflorestamento, qualidade e produtividade.

Dias (2016) cita que o gênero de *Pinus* é segregado dentro da classe das coníferas ou *softwoods*, chegando a 1,50 m de diâmetro no tronco e 30 a 40 m de altura total. De acordo com a composição geral da árvore (Figura 2a) proposta por Coradin e Camargos (2002), as partes utilizadas na composição de materiais estruturais de madeira são as regiões do cerne e alburno. As autoras, ainda, destacam a presença de traqueídeos ou fibrotraqueídeos (com

formas expostas na Figura 2b) e seu arranjo linear em comparação com a composição das folhosas ou *hardwoods*, composta por vasos e arranjo irregular. Klock e Andrade (2013) defendem que a vantagem da estrutura de traqueídeos é importante para algumas propriedades do material, como por exemplo, mecânicas e de condução (tendo seu formato associado à característica macroscópica do tipo de madeira, que se relaciona com a condução do adesivo).

Figura 2 – Composição principal da árvore (a) e ilustração da estrutura de traqueídeos presente nas coníferas (b).



Fonte: adaptada de Taylor et al. (1978) e Leite (2005).

Oliveira et al. (2010) destacam que a qualidade da madeira é definida por parâmetros físicos e químicos relacionados a outras propriedades do material, que permitem definir a finalidade para a qual ela será escolhida e que influenciam fortemente no comportamento final de estruturas construídas. Harte (2009), ao classificar a madeira como um material com construção complexa por ser de origem natural, salienta que suas características são fortemente variáveis de acordo com as condições climáticas a que ela é exposta, e à carga e ao tratamento a que é submetida, englobando fatores referentes às propriedades mecânicas e anatômicas.

Frente a isso, Martins (2011), Bila (2014) e Bolgenhagen (2018) determinam que as propriedades da madeira que influenciam na colagem, mesmo que com níveis diferentes de importância, podem ser classificadas como: anatômicas, físicas e químicas.

## 2.2.3 Propriedades anatômicas da madeira

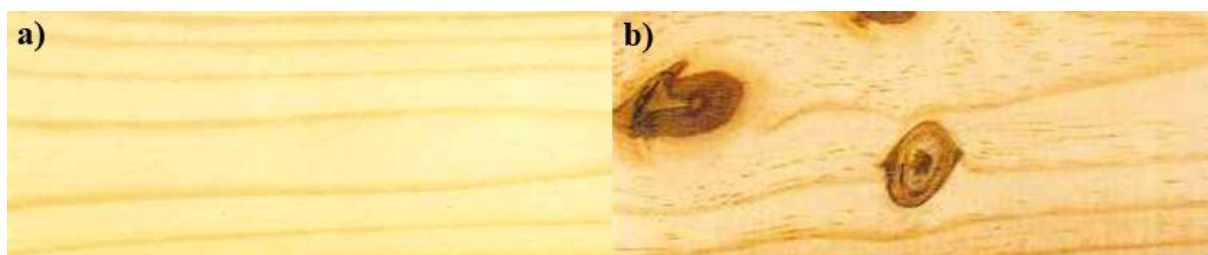
### 2.2.3.1 Inclinação das fibras ou da grã

Ritter (1990) conceitua essa propriedade como o desvio de alinhamento das fibras em relação à orientação paralela ao sentido longitudinal (comprimento) da árvore. O autor cita que a grã influencia fortemente no desempenho das propriedades mecânicas e a consequente resistência do material, sendo o maior nível de inclinação das fibras proporcional ao maior nível de deficiência da resistência e, ainda, esse fator colabora para a obtenção de irregularidades dimensionais pela mudança na absorção de umidade local. Essa inclinação pode apresentar variações também pela madeira ser considerada um material anisotrópico, ou seja, certa propriedade pode variar considerando diferentes regiões e orientações do material.

Davis (1997) e Biazzon (2016) defendem que, conforme a superfície é preparada (tratamento e processamento), podem emergir os nós (Figura 3), pior condição de desvio de ângulo das fibras dentre os defeitos naturais da madeira, ocasionando divergências na uniformidade do substrato. Green, Winandy e Kretschmann (1999) citam que as propriedades mecânicas têm desempenho menor com a presença de nós pelo deslocamento da madeira “limpa”, pela distorção das fibras envoltas, pela concentração de tensão oriunda da descontinuidade das fibras e por influências da secagem na preparação da madeira.

Em síntese, Dilik, Erdinler e Kurtoglu (2012) e Sütçü e Karagöz (2013) defendem que quanto menor a inclinação da fibra e a ausência de defeitos como os nós, melhor o comportamento da ligação adesiva, contanto que não nula. O estudo de Hass et al. (2009) apresentou maiores valores de resistência ao cisalhamento em juntas adesivas com ângulos de inclinação da grã menores que 30° com a utilização da madeira de *Fagus sylvatica* L., o que relaciona a tendência de menores ângulos serem mais favoráveis a melhor resistência da linha de cola.

Figura 3 – Exemplos de orientação normal das fibras (a) e da orientação com influência do nó (b).



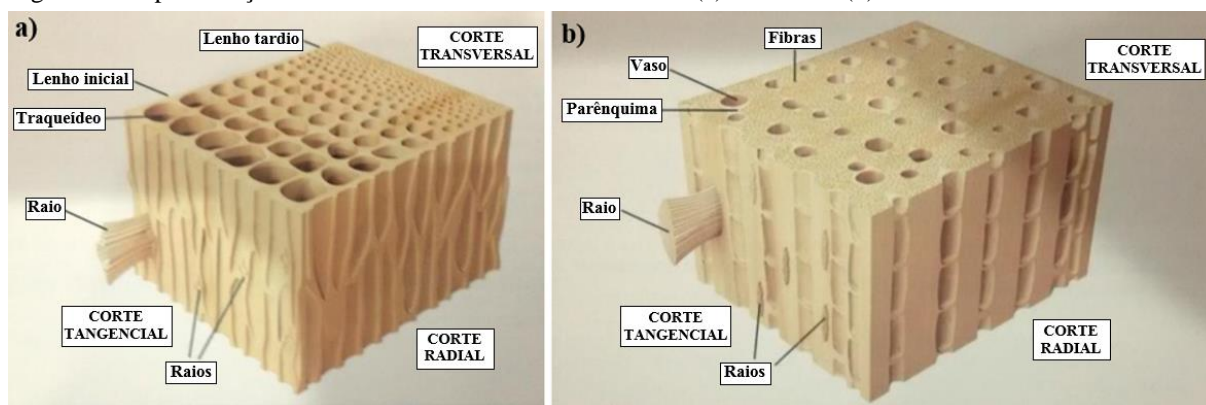
Fonte: ABPM (1991).

### 2.2.3.2 Índice de porosidade

É definida, por Costa (2006), como a parte referente ao vazio ou oco em relação ao volume total do material considerado e, de acordo com Frihart e Hunt (2021), se associa com o nível de penetração do adesivo, quando relacionada à colagem de madeira, em que é facilitada em espécies de menor densidade, devido à configuração consequente da anatomia da mesma, ocasionando em uma força de ligação mais alta. Iwakiri (2005) determina que essa facilidade de penetração, quando a porosidade é demasiada, pode resultar na linha de cola “faminta” ou insuficiente, o que acaba diminuindo o desempenho da junta adesiva.

Marra (1992) indica que a inclinação da grã, em conjunto com a porosidade, tem correlação com a fluidez da cola, pois é ela que determina a geometria do espaço por onde o adesivo flui. Paris e Kamke (2015) complementam, dizendo que a menor resistência ao escoamento do adesivo é no sentido longitudinal, abrangendo os traqueídeos longos e delgados que acompanham a fibra em madeiras de coníferas ou macias e os vasos de grande diâmetro nas folhosas ou madeiras duras, conforme anatomias ilustradas na Figura 4.

Figura 4 – Representação da anatomia de madeiras de coníferas (a) e folhosas (b).



Fonte: Adaptado de Gonzaga (2006 apud DIAS, 2016).

Frihart (2016) destaca que as juntas coladas de madeira, geralmente, são feitas com a madeira cortada no sentido radial-longitudinal ou transversal-longitudinal, pensando nas secções da árvore no sentido do comprimento do tronco (longitudinal). Isso faz com que a leve obliquidade dos traqueídeos ou vasos (paralelos ao substrato a ser colado) seja a mais próxima da ideal para a penetração equilibrada do adesivo e, conseqüentemente, acaba sendo um fator que favorece a colagem.

Com a pesquisa de Plötze e Niemz (2010), em que foram estudadas e mensuradas as porosidades de 24 espécies de madeira, foi possível observar um intervalo de valores em relação à porosidade de madeiras duras (*hardwoods*) e macias (*softwoods*). Para a primeira categoria de espécies, os valores nominais encontrados mantêm-se na faixa de 22,10% a 71,09%, com maior tendência de proximidade ao limite inferior. Já para a segunda categoria, a faixa de valores encontrada foi de 57,74% a 73,68%. A madeira de *Pinus sylvestris* L., dentro do gênero de Pinus e com características mais próximas ao *Pinus taeda* L., apresentou porosidade nominal de 69,71%.

## 2.2.4 Propriedades físicas da madeira

### 2.2.4.1 Rugosidade pós-processamento

A rugosidade superficial, definida por Kilic, Hiziroglu e Burdurlu (2006) e Magoss (2008) como a propriedade responsável pela caracterização ou dimensionamento das anomalias (picos e vales provenientes do processamento) e de um dos quesitos de qualidade da superfície de um material, é uma das principais condições que influenciam o processo de colagem e a resistência da junta adesiva (SÜTÇÜ, 2013; DARMAWAN et al., 2020) e seus diferentes níveis obtidos são oriundos da trabalhabilidade da madeira e dos parâmetros de usinagem impostos (SOUZA, 2019). Em complemento, Knorz et al. (2015) destacam que a rugosidade é fortemente influenciada pela espécie da madeira, caracterizada pela estrutura anatômica e resposta ao processamento, e pelo tipo e qualidade do processo de usinagem. Esse último comumente varia entre técnicas de aplainamento (mecanizadas), lixamento e corte com serra, o que influencia diretamente na penetração do adesivo e no desempenho da linha de cola, pelas diferentes rugosidades obtidas (SILVA, 2013).

Em relação à espécie da madeira utilizada, Rohumaa et al. (2021) destacam que madeiras macias com densidades semelhantes e submetidas ao mesmo processo podem apresentar diferentes índices de rugosidade, chegando até 24  $\mu\text{m}$ , dependendo da orientação da medição (tangencial, radial ou longitudinal). Já Araújo et al. (2019) encontraram, para espécies de madeira com maior densidade, rugosidades de até 11  $\mu\text{m}$ . Os autores ainda sugerem que, conforme o nível de irregularidade da superfície aumenta demasiadamente, a resistência da junta colada diminui proporcionalmente.

#### 2.2.4.2 *Densidade ou massa específica*

Também conhecida como massa específica, a densidade “constitui uma das propriedades físicas mais importantes da madeira, pois dela dependem a maior parte de suas propriedades físicas e tecnológicas, servindo na prática como uma referência para a caracterização tecnológica da madeira” (BILA, 2014, p. 24). Moreschi (2014, p. 9) complementa, definindo que “desconsiderando-se o teor de extrativos e de materiais estranhos à madeira, a densidade é um reflexo fiel da quantidade de matéria lenhosa por unidade de volume”. Frihart e Hunt (2021) salientam que a densidade é uma propriedade complexa, que varia em regiões da mesma planta e entre espécies, e que é muito importante para definição de outras características físicas e mecânicas. Os autores, ainda, explicam que madeiras duras, com maior densidade e paredes fibrosas mais espessas (conforme visto na Figura 4), possuem maior dificuldade de colagem pois essas propriedades limitam a penetração do adesivo no substrato da madeira.

De acordo com Moreschi (2014), a densidade, simbolizada de forma geral pela divisão entre massa e volume, tem duas classificações: a aparente, que é determinada considerando o teor de umidade da madeira e os espaços vazios presentes na estrutura; e, a real, que não inclui os espaços ocos, representando a densidade própria do material lenhoso, que não possui grandes variações entre espécies. É possível dividir a densidade em faixas, “onde se classifica madeiras de baixa densidade (denominadas também como macias) aquelas que apresentam valores abaixo de  $0,550 \text{ g/cm}^3$ , média densidade aquelas com densidade da madeira entre  $0,550$  e  $0,720 \text{ g/cm}^3$ , e madeiras pesadas ou de alta densidade aquelas com valores superiores a  $0,730 \text{ g/cm}^3$ ” (MELO et al., 1990; VALE et al., 2002; VALE et al., 2005; CORADIN et al., 2010; SILVEIRA et al., 2013 apud SILVA; VALE; MIGUEL, 2015, p. 65).

#### 2.2.4.3 *Teor de umidade*

“A influência do conteúdo de umidade da madeira na formação da ligação adesiva está relacionada com a quantidade e o ritmo de absorção do adesivo líquido pela madeira. Portanto, quanto menor o conteúdo de umidade da madeira, maior será a taxa de absorção, velocidade de cura e solidificação do adesivo” (IWAKIRI, 2005 apud BIAZZON, 2016). No entanto, Frihart e Hunt (2021) e Rindler, Hansmann e Konnerth (2019) salientam que teores de umidade muito baixos interferem na fluidez e penetração da cola, incidindo negativamente

sobre a força de adesão e que a umidade elevada oferece baixa taxa de penetração, ocasionando a linha de cola insuficiente e, nos dois casos, influenciando na capacidade de transferência na interfase adesivo-madeira.

Sterley (2012) e Guma (2013) recomendam que a colagem seja realizada em madeira seca e não verde, com teor de umidade no intervalo de 8 a 15%. Brashaw (2014) corrobora a informação, explicando que é importante manter a umidade da madeira abaixo de 20% para que não ocorra a deterioração das propriedades relacionadas da mesma. Essas propriedades englobam, além da resistência e qualidade da colagem, as condições mecânicas, a trabalhabilidade e suscetibilidade a fungos, segundo Moreschi (2014).

Szücs et al. (2015) comentam que, ao realizar a secagem da madeira para redução do teor de umidade, é necessária cautela para evitar danos físicos causados pela estabilidade (como o acúmulo de estresse, por exemplo), ou seja, quando a madeira perde umidade além do ponto de saturação das fibras (índice médio de 25% para madeiras), essa perda deve ser monitorada junto às condições climáticas locais, para que problemas de instabilidade não ocorram.

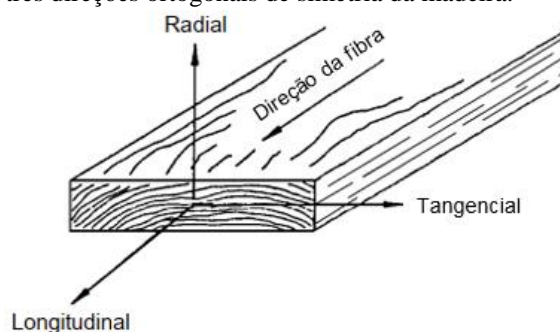
#### *2.2.4.4 Estabilidade dimensional*

O conceito de estabilidade representa as alterações físicas percebidas na madeira de acordo com o fenômeno da retratibilidade, definido como “a movimentação da madeira em decorrência da alteração do teor de umidade [...] quando há perda ou ganho de umidade abaixo do ponto de saturação das fibras (PSF)” (GUMA, 2013, p. 21).

Conforme definição de Harte (2009), a madeira pode ser classificada como ortotrópica por possuir três direções ortogonais de simetria (ilustradas na Figura 5): longitudinal, alinhada ao eixo do tronco da árvore e diretriz para orientação do grão; radial, encontrada ao longo do raio da seção transversal da árvore; e, a tangencial aos anéis de crescimento, sendo as duas últimas perpendiculares à direção da grã



Figura 5 – Representação das três direções ortogonais de simetria da madeira.



Fonte: adaptado de Green, Winandy e Kretschmann (1999).

Szücs et al. (2015) defendem que, como a madeira tem comportamentos divergentes conforme a orientação das fibras e dos anéis de crescimento, a retratibilidade tem índices variados para cada direção. Os autores, juntamente com Moreschi (2014), listam a torção, as rachaduras, o arqueamento, o empenamento e o encanoamento como alguns dos problemas que a retratibilidade pode causar se não for dada a devida importância (principalmente após a secagem) e se não for estabelecido o equilíbrio higroscópico (com a umidade do ar e a temperatura ambiente). Todas essas condições podem tornar a peça inutilizável para a colagem e, já em forma de painel, causar forças de compressão e tração na linha de cola, dependendo do caso, comprometendo a resistência e qualidade da junta adesiva.

Amparado (2008), no estudo sobre a madeira serrada para a confecção de EGP de *Eucalyptus saligna* Sm., encontrou valores de 21,96% de rachaduras, torção em 0,57% do material avaliado, e níveis médios de 3,92 mm/m, 3,56 mm/m e 1,62 mm/m para encurvamento, arqueamento e encanoamento, respectivamente, após o processo de secagem.

### 2.2.5 Propriedades químicas da madeira

Iwakiri (2005) determina que a madeira é quimicamente formada pelos componentes: celulose, polioses, lignina, teor de cinzas e teor de extrativos, sendo esses dois últimos os mais influentes no processo de colagem da madeira, juntamente com o pH do material, que é definido pelos extrativos, de acordo com Almeida (2013).

Em relação ao teor de extrativos, Albino, Mori e Mendes (2012) e Almeida (2013) explicam que a quantidade, a presença ou ausência e o seu tipo podem afetar na ligação adesiva, principalmente quando ocorre a migração dos mesmos para a superfície, através do trabalho da madeira em temperatura acima do normal, inativando a mesma e comprometendo o contato adesivo-substrato. Pelos estudos dos autores, é possível estabelecer um intervalo

identificável aproximado para o nível de teor de extrativos, de 3,5 a 14%. Bockel et al. (2017) listam os problemas que a existência ou excesso de extrativos na madeira podem causar, que envolvem a secagem, acabamento da superfície e o processo de colagem, além da diminuição da resistência do material e piora em outras propriedades mecânicas como, por exemplo, o módulo de ruptura, conforme Green, Winandy e Krestchmann (1999).

A dependência do teor de extrativos para formulação do pH da madeira e a condição de migração deles é corroborada por Iwakiri (2005), em que o autor destaca a mudança nos níveis do pH (comumente encontrados na faixa de 3 a 6) em regiões diferentes da madeira, considerando o interior e a superfície. Isso acarreta a alteração nas condições da colagem: pela possibilidade de interferência na cura do adesivo, através das reações químicas, comprometendo a coesão e resistência adequadas; e, pelo pré-endurecimento da cola, impedido a fluidez, umectação e penetração do material ligante no substrato da madeira.

Em relação ao teor de cinzas, Iwakiri (2005) destaca que o nível ideal é abaixo de 0,5%. Caso contrário, pode influenciar a formulação do pH e nas propriedades de trabalhabilidade do material, devido a presença de sílica e outros minerais, que colaboram para a formação de irregularidades na superfície a ser colada pela reação aos processos de usinagem e semelhantes.

#### 2.2.6 Adesivo – acetato de polivinila (PVAc)

Dentro das soluções citadas anteriormente, Dunky (2003) reforça que as inovações presentes na indústria requerem o melhoramento dos adesivos usados e suas aplicações, salientando que o que se busca são: adesivos com tempo de cura/gelatinização reduzidos; de maior abordagem; e, conforme Dinte e Sylvester (2018) complementam, de menor custo. Uma evidência dessa inovação, citada por Muthike e Githiomi (2011) e Petrie (2021), é a diversidade existente de material ligante para a produção de painéis, com componentes primários de origem natural ou sintética, conforme demonstrado no Quadro 2.

Quadro 2 – Triagem do uso de adesivos, desde a indústria madeireira geral até a indústria moveleira.

Adesivos mais usados na indústria madeireira		Adesivos indicados para móveis	Principais adesivos usados na indústria moveleira
Naturais	Minerais inorgânicos compostos Proteína animal Proteína de soja	Acetato de polivinila Epoxy	Acetato de polivinila
Sintéticos	Acetato de polivinila Derivados processados da celulose Emulsão polimérica de isocianato Epoxy Fenol-formaldeído Fenol-resorcinol-formaldeído Hot melt Isocianato Melamina-ureia-formaldeído Poliuretano Ureia-formaldeído	Emulsão polimérica de isocianato Hot melt Isocianato Melamina-ureia-formaldeído Proteína animal Ureia-formaldeído	

Fonte: adaptado de Dunky (2003), Stoeckel, Konnerth e Gindl-Altmutter (2013), Iwakiri et al. (2015), Almeida, Cunha e Rios (2017), Lau (2017), Frihart e Hunt (2021) e Petrie (2021).

Como pode-se perceber, há a preferência por adesivos produzidos com constituintes sintéticos, pela melhor prática de manipulação e adequação dos elementos a fim de alterar as propriedades desejadas. Dos dois adesivos mais usados nas condições citadas pelos autores, o aplicado no processo objeto de estudo é o acetato de polivinila, principalmente pelas condições de trabalho e pelas questões normativas impostas por clientes.

O PVAc é uma substância adesiva termoplástica, em que o amolecimento por aumento de temperatura não altera suas propriedades químicas e, em consequência, não cria barreiras para obtenção das características buscadas para a variedade de usos a que é submetida (KABOORANI; RIEDL; 2015; PETRIE, 2021). Em contrapartida, o adesivo possui propriedades como baixa resistência a temperaturas muito altas, à deformação permanente (quando exposto a cargas por um longo período) e à umidade ambiente (PIZZI, 1983 apud ENDO; TRIANOSKI; IWAKIRI, 2017). Ainda, os autores citam como características competitivas do uso do PVAc e que o fizeram ser um dos adesivos mais comuns para madeira: a boa adesão, a tolerância a outros materiais, a resistência a seco, baixo custo, facilidade e simplicidade do uso e seus métodos de aplicação e o baixo dano ao meio ambiente.

A possibilidade de acréscimo de aditivos no PVAc, dentre outros métodos que envolvem o processamento do EGP propriamente dito, fornece, dentre outros benefícios, o aumento de flexibilidade, aderência na formação da película durante a cura, aumento de resistência à temperatura ambiente, à tração e à umidade e maior estabilidade (FRIHART; HUNT, 2021).

Com essas adequações e obtenção de melhores propriedades, é possível que o PVAc tenha uma classificação mais ampla dentro do espectro da norma DIN EN 204 (2016), que divide os adesivos da classe D1 à D4, com base na taxa de umidade e no ambiente em que a peça que contém o PVAc com aditivos está inserida, o que acaba aumentando a gama de possibilidades dentro da indústria, de acordo com Endo, Trianoski e Iwakiri (2017). Chiozza e Pizzo (2016) corroboram esse posicionamento, explanando que o acetato de polivinila *in natura* admite, geralmente, as classificações D1 e D2, nas quais as propriedades são de alcance limitado, sendo possível complementá-lo com aditivos, adequando-o a classes superiores.

Em complemento, através de constatações de Iwakiri (2005), Bianche (2014) e Dias (2016), é possível definir que as principais propriedades do adesivo que mais influenciam na qualidade da colagem são a viscosidade, o tempo de gelatinização ou tempo de cura, o pH e teor de sólidos. Para Tout (2000), a caracterização do adesivo é fundamental para a melhor observação de quais propriedades podem ser melhor exploradas, quais as combinações das mesmas que geram as melhores condições de uso e, conseqüentemente, é possível obter maiores índices de eficiência.

## 2.2.7 Propriedades do adesivo

### 2.2.7.1 Viscosidade

Iwakiri (2005) e Almeida (2009) definem a viscosidade como a taxa de impedimento aplicada ao material no escoamento entre camadas de um material, oriunda do atrito entre moléculas do adesivo e entre adesivo e superfície do material, sob grande influência da temperatura, em diferentes intensidades conforme cada adesivo. Estudos puderam indicar resultados da qualidade da colagem (FONTE; TRIANOSKI, 2015), da força de adesão (IŽDINSKÝ et al., 2021) e da resistência ao cisalhamento (WANG et al., 2012) com o intervalo aproximado de viscosidade de 2200-6500 cP (centipoise).

Marra (1992) e Kim et al. (2007) corroboram a influência da temperatura, destacando que a viscosidade em maiores níveis oferece dificuldade no espalhamento pela pouca fluidez e menor penetração do adesivo no substrato da madeira, ocasionando a linha de cola espessa e resistência da linha de cola em nível insuficiente, ao passo que uma baixa viscosidade implica na maior penetração do adesivo, o que pode causar o enfraquecimento da colagem por falta de

cola. Essas duas hipóteses causam problemas de qualidade de colagem, por isso, é importante controlar as condições ambientais junto com a viscosidade, sem tornar o adesivo deficiente de compostos que auxiliam nas suas propriedades fundamentais. Nesse sentido, Kim et al. (2007) destacam que o tipo e a quantidade de aditivos extras colocados no adesivo afetam muito a sua viscosidade, sendo necessário o equilíbrio entre todos os compostos, junto às condições externas.

#### *2.2.7.2 Tempo de gelatinização ou cura*

Lei e Frazier (2015) destacam que a cura ou endurecimento do adesivo é o processo fundamental para a formulação de uma ligação resistente, se tratando de adesivos aplicados em madeira, e que fatores como quantidade de aditivos (principalmente catalisadores), processamento de prensagem, pH, grau de polimerização e temperatura ambiente, podem influenciar no adesivo sólido final.

Tout (2000) e Hass et al. (2012) destacam que os adesivos com base aquosa solidificam pela perda de água (através da evaporação), obtendo-se a aglutinação das gotículas até formar uma película de adesivo, fortemente relacionada com a pressão de prensagem. Nesse sentido, Almeida (2009) cita que o tempo de trabalho ou cura deve ser equilibrado, isso é, que não necessite um tempo de prensagem muito grande (quando a cura é demorada) ou que não seja rápido ao ponto de haver dificuldade de espalhamento nas superfícies pela breve polimerização. Em complemento, Petrie (2021) reforça que os pontos de concentração de tensão na camada adesiva, a tensão relacionada às diferentes temperaturas de trabalho do adesivo e da madeira e o estresse causado pela mudança na anatomia do adesivo podem ser considerados três dos motivos para a redução da resistência da junta adesiva.

É possível confirmar essas citações com a definição de Bustos et al. (2003), que relata que o conjunto de fatores tipo de adesivo, tempo de cura e tempo e pressão de prensagem influenciam diretamente na resistência de junções coladas. Os tempos de 89 a 180 segundos (alta frequência) e de 45 minutos a 7 dias (prensa fria) utilizados com diferentes adesivos corroboram essa afirmação (ENDO; TRIANOSKI; IWAKIRI, 2017; LAU, 2017; BOLGENHAGEN, 2018).

### 2.2.7.3 *Potencial hidrogeniônico (pH)*

O controle do potencial hidrogeniônico (pH), aqui dito como o índice que permite verificar o nível de acidez ou basicidade de uma solução aquosa, é imprescindível no controle do adesivo para qualidade da aderência, pois é possível monitorar o tempo que leva para ocorrer as reações e como elas acontecem, além de ser um fator que pode definir a viabilidade e quais os melhores usos para tal adesivo, conforme Marra (1992). Iwakiri (2005) estabelece um intervalo aceitável para o pH de adesivos de madeira em geral, que pode variar entre 2,5 a 11, para não ocasionar a degradação das fibras do material e a inibição das reações de gelatinização da cola, influenciando, conseqüentemente, na penetração adequada no material a ser aderido, prejudicando a resistência da junção.

Iždinský et al. (2021) consideram que o desempenho da colagem não altera significativamente quando o pH da madeira e do adesivo, cada um com seu intervalo de uso, são mantidos em índices semelhantes. Em complemento, Iwakiri et al. (2019) e Barboutis e Kamperidou (2021), dentro da faixa indicada anteriormente, citam que é possível obter melhores resultados mais facilmente com o pH em níveis mais próximos do limite inferior, embora possa não haver diferença significativa usando níveis altos, dependendo muito de qual tipo de madeira se está trabalhando.

### 2.2.7.4 *Teor de sólidos*

Bandel (1991 apud ENDO; TRIANOSKI; IWAKIRI, 2017) defende que a velocidade de formação da película adesiva originada da deposição do adesivo no substrato da madeira está estritamente ligada com a quantidade ou o percentual de sólidos que compõem o adesivo, ou seja, a película demora mais a ser formada ao passo que o teor de sólidos é menor, pois o tempo de evaporação da parte líquida para iniciar a cura é maior.

Os sólidos presentes no adesivo aqui discutidos são as partes resinosas (BIANCHE, 2014), do material que de fato farão a ligação entre as superfícies da madeira, visto que o PVAc, por exemplo, é uma emulsão em água. Marra (1992) destaca que é possível, com o teor de sólidos em níveis suficientes, aumentar a resistência e a tensão necessária para a ruptura da ligação, através da obtenção de novas propriedades e ligações coesivas, oriunda da cura do adesivo.

Estudos sobre o PVAc envolvendo a manutenibilidade da estabilidade da junta adesiva (CHIOZZA; PIZZO, 2016), da força de adesão (IŽDINSKÝ et al., 2021) e de cisalhamento (ENDO; TRIANOSKI; IWAKIRI, 2017) sugerem um intervalo de teor de sólidos de aproximadamente 48 a 52%.

## 2.2.8 Parâmetros do processo de colagem

Através dos estudos de Petrie (2021), Harding (2010) e Martins (2011), é possível triar algumas das principais condições do processo de colagem que influenciam na qualidade e resistência da linha de cola. São elas: as propriedades da prensagem; a gramatura ou taxa de espalhamento do adesivo; e, o seu método de aplicação. A Industrieverband Klebstoffe (2016) e Puragbola et al. (2020) salientam a importância da parametrização dessas condições, considerando-as imprescindíveis para a garantia do desempenho da linha de cola.

### 2.2.8.1 Condições de prensagem

Frihart e Hunt (2021) e Yusoh et al. (2021) definem a prensagem como a característica do processo que fornece as variáveis necessárias para a resistência da ligação de duas superfícies, pelo fato de proporcionar o contato entre a madeira e o material ligante e a consequente penetração dele nos poros do substrato. Deve ser mantida até a solidificação ou secagem do adesivo e precisa estar alinhada também com a gramatura do mesmo, caso contrário, o esforço exagerado na pressão pode acarretar em uma linha de cola “faminta” ou insuficiente e em danos na superfície da madeira, refletindo nas condições de resistência e qualidade da junta adesiva.

Iwakiri (2005) salienta a existência da prensagem a frio e a quente (ou alta frequência), sendo a última geralmente mais usada para painéis de madeira pela capacidade de a temperatura do processamento favorecer a polimerização ou solidificação do adesivo através da evaporação acelerada do seu componente solvente. Além disso, o autor destaca como parâmetros importantes para a prensagem: a pressão utilizada, para a consolidação do painel e intensificação da interação adesivo-substrato; e, o tempo, que depende, principalmente, da temperatura do processo, da espessura do painel e da quantidade de resina depositada.

Kairi (2000) indica que boas linhas de cola são obtidas usando valores para a pressão de prensagem acima dos 0,6 MPa (6,12 kgf/cm<sup>2</sup>), salientando a necessidade de equipamentos

hidráulicos para isso, visto que técnicas mais baratas como as pneumáticas ou com uso de fixadores mecânicos não alcançam esses valores. Harding (2010) sugere que, para madeiras macias, sejam usadas pressões no intervalo de 0,7 MPa a 1,05 MPa (7,14 a 10,71 kgf/cm<sup>2</sup>), corroborando as informações citadas anteriormente. Em relação ao tempo, Endo, Trianoski e Iwakiri (2017) indicam o tempo de 3 minutos para a prensagem em alta frequência e dentro do intervalo de 40 minutos até 1 hora para a prensagem frio, com possibilidade de ultrapassagem dessa faixa, dependendo do caso, para adesivos como o EPI e o PVAc.

#### *2.2.8.2 Gramatura ou taxa de espalhamento*

Marra (1992) defende que a quantidade de adesivo aplicada nas superfícies que serão aderidas, definida aqui pela gramatura ou taxa de espalhamento, é um dos principais fatores para promover a qualidade e resistência da linha de cola. Como todas as propriedades, a gramatura em seu nível ideal deve ser estabelecida a partir de parâmetros que envolvem as características da madeira a ser aderida, do processo de colagem e dos fatores externos, particulares em cada caso.

Bandel (1991) cita que a gramatura em níveis baixos pode diminuir o tempo de prensagem e de processo, porém irá desfavorecer a resistência da linha de cola e, em consequência, do painel, pela aderência insuficiente e a falta de adesivo penetrado. Já quando aplicada em níveis altos, além do excesso de custos gerados pelo desperdício, ocorrerá a mesma perda das propriedades mecânicas, dessa vez pela dificuldade de interação entre os dois substratos da madeira, condição proveniente da aplicação do adesivo em níveis aceitáveis. Em complemento, Vick (1999) destacam que a quantidade de adesivo necessária para aplicação dependerá, principalmente, da espécie da madeira, qualidade do acabamento, teor de umidade, tipo de adesivo, condições climáticas, tempo de montagem e aplicação do adesivo em uma ou ambas as peças que serão coladas. Estudos com objetivo de avaliar a resistência das juntas coladas obtiveram resultados satisfatórios utilizando o intervalo de 150 a 250 g/m<sup>2</sup> de adesivo (IWAKIRI et al., 2015; ALMEIDA; CUNHA; RIOS, 2017; BIANCHE et al., 2017).



### 2.2.8.3 Método de aplicação do adesivo

O objetivo da escolha de um método de aplicação de cola, independente de qual seja, tem por finalidade a distribuição uniforme, em quantidade adequada, do adesivo na área em que é pretendida a fixação de dois substratos, utilizando da pressão do processo para a fluidez correta do material ligante, conforme Frihart e Hunt (2021).

Vick (1999) e How et al. (2017) citam que os métodos de aplicação, que devem ser adequados ao tipo de adesivo, podem ser divididos em: aplicação manual, com a utilização de pincel, escova, extrusora manual e pistola de spray; e, aplicação automatizada, que contempla o espalhador de rolo e técnicas de pulverização. Destes, Petrie (2021) salienta que as técnicas que utilizam a pulverização são relevantes em relação a outros pelo custo reduzido. Dentre os benefícios desse método estão: maior eficiência na aplicação da resina, a redução do tempo de secagem pela evaporação facilitada, a capacidade de alcance de regiões inacessíveis por outros métodos e menores índices de desperdício. Duncan et al. (2003) afirmam que a eficiência desse tipo de uso, que é baseado no princípio de atomização (dispersão de um material em gotículas), pode ser muito alta em adesivos emulsivos e acrescidos de materiais solventes como o PVAc, e que essa condição depende também das configurações aplicadas no equipamento, levando em consideração os diferentes mecanismos adaptáveis do spray.

A comparação entre a aplicação de adesivo por spray e por rolo automatizado, método comumente utilizado em empresas de grande porte, pode ser feita com base em relatos de How et al. (2017), com ênfase no PVAc (INDUSTRIEVERBAND KLEBSTOFFE, 2016), em que é realçado que os dois métodos estão entre os indicados para espalhamento em substratos de borda e que o rolo se mostra: mais eficiente em grandes quantidades, porém com mais desperdício (se tratado de forma inadequada); dispendioso para níveis menores de produção, além de possuir limitações como dimensionamento de peça (dependendo de como é inserida na máquina); e, limitado ao uso apenas em superfícies com planas. Petrie (2021) define as principais condições para escolha de um método e, conforme o Quadro 3, a pulverização pode apresentar diversos comportamentos dentro de cada condição, o que corrobora a sugestão de Duncan et al. (2003) para que sejam feitos mais estudos e testes que provem o nível de eficiência da aplicação por spray.

Quadro 3 – Comparação de características entre métodos de aplicação de adesivo.

Forma física do adesivo	Método de aplicação	Viscosidade	Habilidade do operador	Taxa de produção	Custo do equipamento	Uniformidade do espalhamento	Perda de material
Líquida	Rolo manual ou pincel	Baixa a média	Baixa	Baixa	Baixo	Ruim	Baixa
	Rolo automatizado	Baixa	Média	Alta	Alto	Boa	Baixa
	Pulverização	Baixa à alta	Média à alta	Média à alta	Médio à alto	Boa	Baixa à alta
	Revestimento por cortina de partículas	Baixa	Média	Alta	Alto	Boa à excelente	Baixa
Pastosa	Massa ou pasta	Alta	Baixa	Baixa à média	Baixo	Razoável	Baixa à alta
Pó	Preparo seco ou úmido	-	Média	Baixa	Alta	Ruim à razoável	Baixa
	Filme seco	-	Média à alta	Baixa à alta	Baixa à alta	Excelente	Baixa

Fonte: adaptado de Petrie (2021).

Ainda, Lima (2016) sumariza as definições de Iwakiri (2005) no Quadro 4, destacando as vantagens e desvantagens dos dois métodos de aplicação, a fim de oferecer uma diretriz orientadora, dentre todas as envolvidas, para a possível escolha de um dos métodos, focando na proposta desenvolvida nesse trabalho.

Quadro 4 – Vantagens e desvantagens da aplicação de adesivo por rolo e spray.

	Método de aplicação do adesivo	
	Rolo	Spray
Vantagens	Aplicação simultânea de adesivo nas duas faces da lâmina.	Controle da gramatura e recuperação adequada do adesivo e sua reutilização.
Desvantagens	Limpeza e recuperação de adesivo, resultando em maior consumo de adesivo. Falha na distribuição do adesivo em lâmina com superfície irregular e rugosa: Maior dificuldade no controle de aplicação do adesivo.	Esse sistema apresenta o inconveniente quando à alteração do fluxo de aplicação, devido a redução na viscosidade do adesivo em épocas de baixa temperatura. Os aplicadores normalmente possuem dispositivos de aquecimento do adesivo com a temperatura na faixa de 32 a 38°C, para manter a viscosidade adequada.

Fonte: adaptado de Lima (2016).

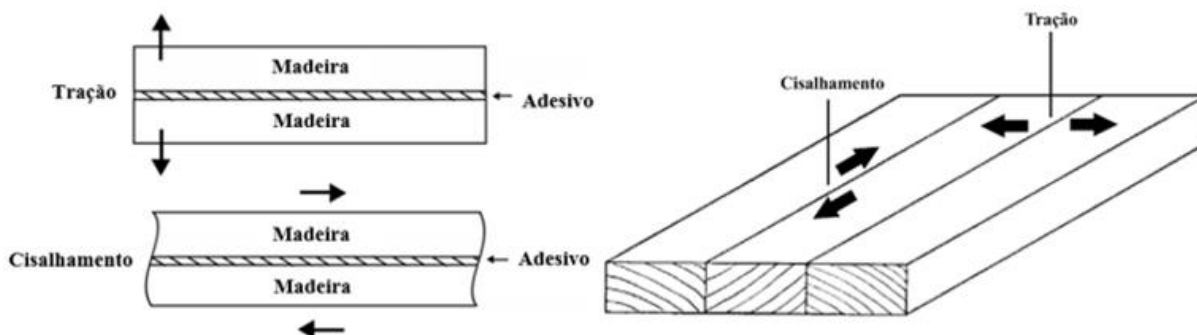
### 2.3 Propriedades mecânicas dos painéis EGP

De acordo com Guma (2013), a definição das propriedades mecânicas de um material é utilizada para a obtenção de valores de carga suportados quando o mesmo é submetido a forças de natureza externa. Green, Winandy e Krestchmann (1999) citam que de todas as propriedades mecânicas conhecidas, as mais usadas para definir a resistência, quando se trata da madeira, são: o módulo de ruptura na flexão, a tensão máxima de compressão e tração e a força máxima de cisalhamento.

Conforme Pazetto (2009) e Moreschi (2014), a tração, em conjunto com a compressão, definem o módulo de elasticidade, explicado pela divisão entre a tensão ou força aplicada e a deformação consequente, delimitando o quanto o material deforma com a capacidade de voltar ao seu estado normal, sem ter deformação irreversível. Já a flexão estática define o módulo ou limite de ruptura, que se explica pelo valor máximo de tensão que o espécime é submetido até a ruptura completa e, o cisalhamento exprime a força máxima de deslizamento entre substratos até a ruptura total.

Se tratando da avaliação juntas adesivas e sua relevância para especificação de variáveis relacionadas a níveis de resistência, fadiga, fluidez e estresse (FRIHART; HUNT, 2021), definições dos autores em conjunto a Vick (1999) e Fogaça (2014) consideram como as propriedades mais importantes de serem mensuradas: o cisalhamento, avaliado paralelamente à linha de cola; e, a tração e a flexão, normais à linha de cola. Porém, como esse trabalho avalia apenas a colagem lateral de sarrafos nos EGP, sem a presença de emendas *finger joint*, a flexão não se aplica nesse caso, sendo assim, o estudo é baseado nas duas avaliações ilustradas na Figura 6.

Figura 6 – Representação das propriedades de tração e cisalhamento na colagem da madeira.



Fonte: adaptado de Vick (1999) e Frihart e Hunt (2021).

É possível obter como parâmetros iniciais os valores definidos para tração em estudos como o de Bolgenhagen (2018), que obteve tensão média de ruptura na tração de linha de cola entre 18,1 e 33,92 kgf/cm<sup>2</sup> com o adesivo de emulsão polimérica de isocianato e madeiras de *Pinus elliottii* Engelm. e *Pinus taeda* L. e, como o de Amparado (2008), que obteve valores médios de 12,44 a 37,60 kgf/cm<sup>2</sup> para emendas usando o PVAc e madeira de *Eucalyptus saligna* Sm. Para o cisalhamento, em espécies com densidades mais elevadas, Iwakiri et al. (2015) avaliaram um intervalo aproximado entre 100 a 140 kgf/cm<sup>2</sup> utilizando PVAc em diferentes gramaturas. Ainda, em relação a condições específicas para o teste de cisalhamento,

a norma ASTM D 5751-99 (2005) determina valores mínimos de 47,8, 31,8 e 23,9 kgf/cm<sup>2</sup> para os testes a seco, à alta temperatura e por imersão em água, respectivamente.

Por fim, Frihart e Hunt (2021) salientam a importância da padronização determinada por normas e especificações em relação a esses valores, mas consideram possível o desenvolvimento de testes com condições equivalentes pelas empresas que fabricam produtos que utilizam essas condições. Em relação às normas que determinam as diretrizes para testes das propriedades da junta adesiva, as normas ABNT NBR 7190, ASTM D 5751, ASTM D 5572, EN 13353 e EN 13354 e suas vertentes são as mais comumente usadas (IWAKIRI et al., 2015; LAU, 2017; BOLGENHAGEN, 2018).

### 2.3.1 Linha de união ou linha de cola

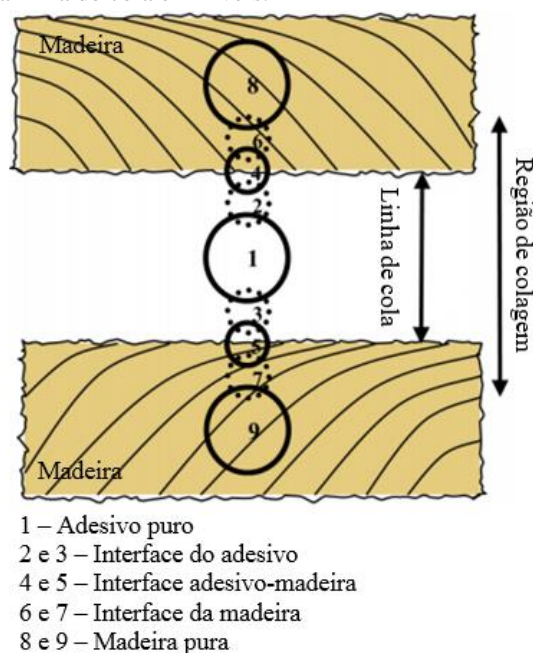
Dentre as teorias de adesão existentes listadas por Puragbola et al. (2020), as que podem traduzir o fenômeno na madeira, em maior importância e agindo conjuntamente, de acordo com Frihart e Hunt (2021), são: o intertravamento mecânico, onde a superfície porosa e rugosa e com o acabamento ideal proporcionam a melhor ancoragem entre substratos; a teoria do molhamento, em que a capacidade do adesivo de fluir influencia a penetração no substrato e favorece a atração entre moléculas da madeira e da cola; e, a teoria de adesão química, que explica o comportamento da ligação intermolecular do material ligante, promovendo os fenômenos de adesão e coesão, que serão tratados a seguir. Nesse sentido, Haubrich, Gonçalves e Tonet (2007) definem, em síntese, a ordem dos acontecimentos que formam o processo de colagem, contemplando:

- a) umectação dos substratos pela aplicação do adesivo;
- b) penetração do adesivo no material;
- c) perda de umidade;
- d) cura ou gelatinização.

Maloney (1986 apud FRIHART; HUNT, 2021) e Marra (1992) definem a ligação entre substratos da madeira e adesivo em níveis, conforme a Figura 7, que interagem entre si e são fundamentais para a boa qualidade da junta adesiva. O nível 1 e os níveis 8 e 9 correspondem, respectivamente, ao adesivo (1) e à madeira (8 e 9), sem a influência entre os dois materiais. Os níveis 2 e 3 representam a camada limite do adesivo que pode ter influência dos substratos (com tendência ao início da cura/solidificação) e do fenômeno adesivo da coesão, que significa a interação intermolecular no adesivo. A região da adesão é representada

pelos níveis 4 e 5 e é onde há a maior interação entre o substrato da madeira e o adesivo e a região em que as teorias de adesão acontecem em conjunto, conforme citado anteriormente. Por fim, os níveis 6 e 7 podem ser entendidos como as células do material modificadas pela pré preparação para efetuar a colagem.

Figura 7 – Representação da linha de cola em níveis.

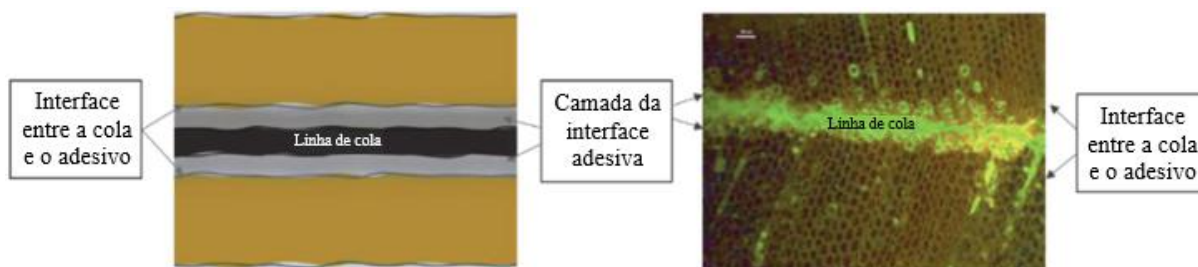


Fonte: adaptado de Frihart e Hunt (2021).

A região de interfase (Figura 7), que envolve os níveis 4, 5, 6 e 7, representa a área de transferência de tensão e sua “composição estrutural da interfase, seu volume e forma, ditarão a magnitude das concentrações de tensão e, por fim, terão um impacto significativo no desempenho da ligação” (KAMKE; LEE, 2007, p. 205). Em complemento, Ülker (2016, p. 271) destaca que “a geometria da região de interfase varia conforme resultado de muitos fatores, como anatomia da madeira, permeabilidade, porosidade, viscosidade da resina, superfície, energia, pressão de consolidação e outros”.

Kamke et al. (2014) também afirmam que a região da interfase é fundamentada no preenchimento de espaços vazios presentes no material a ser aderido pelo adesivo até o contato com a parede celular, o que pode ser traduzido, conforme Albino, Mori e Mendes (2010) e Ülker (2016), pela difusão do material ligante na madeira e pelo escoamento (que alteram o formato e a proximidade à superfície na comparação entre madeiras macias e duras), que consiste na entrada de adesivo nos poros da madeira, ilustrada na Figura 8.

Figura 8 – Camadas presentes em juntas de madeira coladas, à esquerda, e a interação entre adesivo, camada celular e microfissuras da madeira, à direita.



Fonte: Shirmohammadi e Leggate (2021).

É notável a ênfase aplicada sobre a forma da linha de cola, especificamente em sua espessura, que Tout (2000) e Kairi (2000) recomendam estar entre 0,1 mm até 0,3 mm, de forma geral, com dependência principal do tipo de adesivo e da espécie da madeira, com risco de influenciar as propriedades mecânicas do então painel colado, em caso de extrapolação desse intervalo. É possível corroborar esses valores através de estudos sobre a espessura da linha de cola, como o de Kurt (2006), relacionado ao uso de um tipo de fenol-resorcinol-formaldeído em abeto-fino, em que houve a diminuição considerável da resistência ao cisalhamento com espessura maior de 0,25 mm e o de Shirmohammadi e Leggate (2021), que avalia a manutenibilidade do fenol-formaldeído em *Pinus taeda* L., mesmo com valores ligeiramente menores que 0,1 mm. Nesse sentido, Petrie (2021) sugere métodos para manutenção da espessura da linha de cola para um valor constante, que incluem: o ajuste da viscosidade do adesivo (IWAKIRI, 2005; KIM et al., 2007), aplicação da pressão pré-calculada (HARDING, 2010; ENDO; TRIANOSKI; IWAKIRI, 2017) e o uso de equipamentos especificamente destinados à aplicação do adesivo (KAIRI, 2000; LIMA, 2016).

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Objeto de estudo e materiais

O processo estudado foi o de colagem lateral de sarrafos de madeira (peças com formato retangular, de comprimento, largura e espessura predefinidos) com aplicação de adesivo por rolo e prensagem à alta frequência, para a confecção de painéis colados lateralmente.

A espécie da madeira utilizada para a realização da pesquisa foi a *Pinus taeda* L., de qualidade Extra pela norma ABNT NBR 11700:1991, com idade entre 18 e 20 anos e proveniente de reflorestamento. A região de cultivo, situada na cidade de Esmeralda/RS tem como características: altitude aproximada de 900 metros, precipitação média anual de 1800 mm, solo classificado como Cambissolo Húmico Alumínico (CHa) e Neossolo Litólico Chernossolo (RLm) e clima predominantemente subtropical (BINNI AGROFLORESTAL, 2019).

Foi selecionado, de forma aleatória, um lote de 50 sarrafos de dimensões brutas de 1250 mm (comprimento) x 50 mm (largura) x 26 mm (espessura) como amostra para as caracterizações e testes de cisalhamento, submetido ao mesmo processo antecedente à colagem que normalmente é feito. Ainda, foi escolhido também um lote aleatório de 15 sarrafos de dimensões brutas de 1250 mm (comprimento) x 65 mm (largura) x 26 mm (espessura), especificamente para o teste de tração, com intuito de oferecer resultados fieis à norma aplicada, que será citada posteriormente.

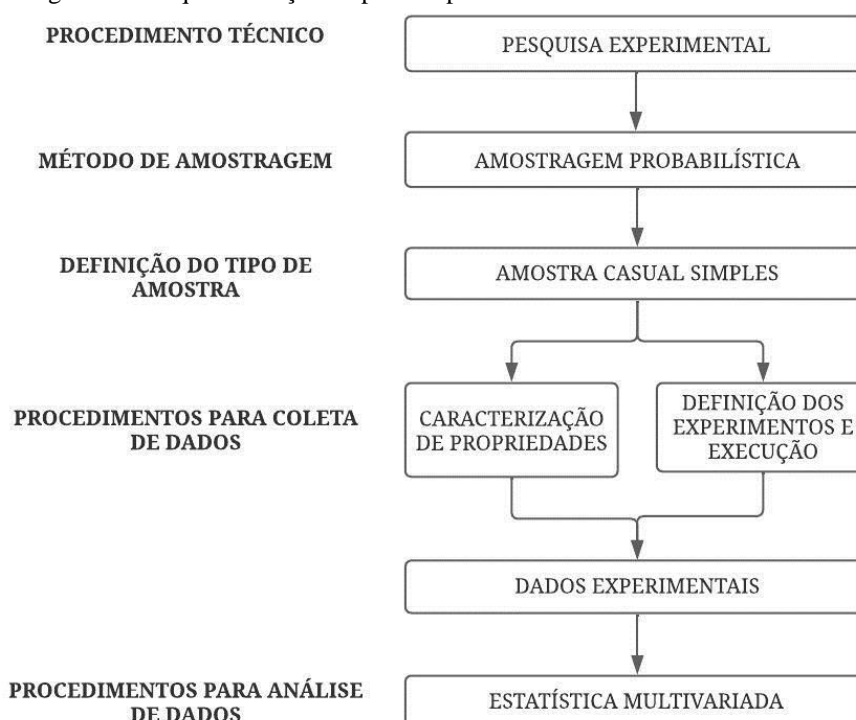
O adesivo utilizado foi o acetato de polivinila (PVAc), indicado para colagem lateral de sarrafos e emendas *finger joint* em prensas a frio e à alta frequência, e classificado como D3 pela norma DIN EN 204 (2016). Para melhor maleabilidade do adesivo, foi acrescido o limite máximo de 3% de água, conforme recomendações do fabricante.

As matérias-primas citadas foram as escolhidas para a realização da pesquisa pois, além de o gênero *Pinus* ser o segundo mais usado no Brasil para fins de beneficiamento (atrás apenas do Eucalipto), ele é comum no segmento moveleiro, que contempla o processo estudado. Em consequência, como o PVAc é compatível com esse tipo de madeira, acaba sendo usado em larga escala e igualmente importante para estudo.

### 3.2 Procedimento metodológico

A Figura 9 ilustra o esquema das etapas da parte experimental do trabalho e suas classificações, envolvendo: o procedimento técnico aplicado; a definição do método de amostragem e do tipo de amostra; e, os procedimentos de coleta e análise de dados para obtenção dos resultados a serem discutidos.

Figura 9 – Fluxograma de esquematização da parte experimental do trabalho.



Fonte: elaborada pelo autor (2022).

Essa pesquisa denomina-se experimental por envolver o tratamento de diversas variáveis e o levantamento de hipóteses em torno do objeto de estudo. Ainda, para tornar os resultados mais fieis a realidade, os materiais e amostras utilizados nos experimentos foram escolhidos de forma aleatória dentro do ambiente delimitado pela pesquisa, nesse caso, o processo e os materiais utilizados.

Conforme demonstrado, foram coletados dados em dois momentos. Inicialmente, foi realizada a caracterização dos fatores que influenciam no desempenho da colagem para a comparação com os valores citados na literatura. Caracterizar as propriedades dos materiais envolvidos é importante para averiguar se há divergência entre os resultados obtidos nos experimentos e os valores recomendados. Caso um ou mais valores estejam fora do intervalo ideal, esse fator pode influenciar nos resultados principais do trabalho, servindo como



informação auxiliar para a discussão final. No Quadro 5 estão listados os fatores (propriedades) por tipo, descrição, se é possível a caracterização e sua natureza.

Quadro 5 – Fatores que influenciam no desempenho da colagem de painéis de madeira.

Tipo		Descrição	Caracterizável	Natureza
Controláveis	Ajustados	Método de aplicação do adesivo	Sim	Qualitativa
		Gramatura do adesivo		
		Tempo de prensagem		
	Constantes	Pressão de prensagem		
		Viscosidade do adesivo		
		Teor de sólidos do adesivo		
		pH do adesivo		
		Tempo de gelatinização do adesivo		
		Teor de umidade da madeira		
		Rugosidade pós-processamento da madeira		
Não controláveis	Densidade da madeira			
	Porosidade da madeira			
	Inclinação das fibras ou da grã da madeira			
	Estabilidade dimensional da madeira			
	pH da madeira			
	Teor de cinzas da madeira			
	Teor de extrativos da madeira			

Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Para todas as propriedades, quando caracterizáveis, foram realizados ensaios com base em normas e/ou procedimentos sugeridos por autores. Os procedimentos foram conduzidos nos laboratórios de Ensaio Mecânicos, de Conformação, de Metalografia, de Metrologia e de Alimentos do Instituto de Tecnologia da Universidade de Passo Fundo e no Laboratório de Tecnologia da Madeira e Mobiliário (LTMM) do SENAI, localizado no município de São Bento do Sul/SC. Os procedimentos de caracterização do adesivo foram realizados em triplicata (BIAZZON, 2016), os ensaios de teor de extrativos, teor de cinzas, e pH da madeira foram executados em duplicata (ALMEIDA, 2009; SILVA, 2018) e o restante dos ensaios foi realizado com cinco corpos-de-prova cada. Os resultados das caracterizações foram analisados estatisticamente pelo *software* Minitab 18. Inicialmente, foram retirados os *outliers* estatísticos com auxílio do Teste de *Outlier* e, em seguida, foi feito o cálculo das médias e dos respectivos desvios-padrão.

No segundo momento, foram avaliadas as propriedades mecânicas de tração e cisalhamento dos painéis colados de madeira na situação de fabricação atual e nas situações

propostas, com alteração no método de aplicação da cola, na gramatura aplicada de adesivo e no tempo de prensagem (fatores classificados como ajustados no Quadro 5), para a verificação se as situações propostas atingem os valores de referência encontrados na situação atual. A Tabela 1 resume as características da prática atualmente utilizada e das práticas propostas.

Tabela 1 – Valores de variáveis independentes na situação atual e nas situações propostas.

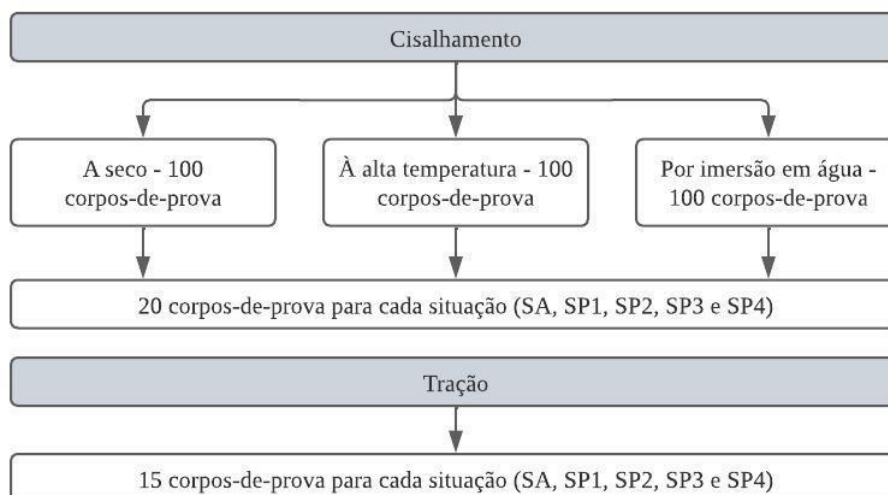
Variáveis/condição do processo	Situação atual	Situações propostas			
Método de aplicação	Aplicação por rolo	Aplicação por spray			
Gramatura média do adesivo (g/m <sup>2</sup> )	205	125		80	
Tempo de prensagem (s)	80	75	70	75	70
Denominação	SA	SP1	SP2	SP3	SP4

Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Os valores de 125 g/m<sup>2</sup> e de 80 g/m<sup>2</sup> foram determinados com base nos resultados da caracterização da gramatura do adesivo e os valores de 75 s e 70 s foram determinados dentro do intervalo entre o tempo utilizado atualmente (80 s) e o tempo mínimo para solidificação da cola, obtido na caracterização do tempo de gelatinização do adesivo. Esses procedimentos serão descritos posteriormente.

A organização e quantificação dos corpos-de-prova utilizados para os ensaios de cisalhamento e tração são demonstradas na Figura 10.

Figura 10 – Esquema de dimensionamento e direcionamento de amostras para os testes de cisalhamento e tração.



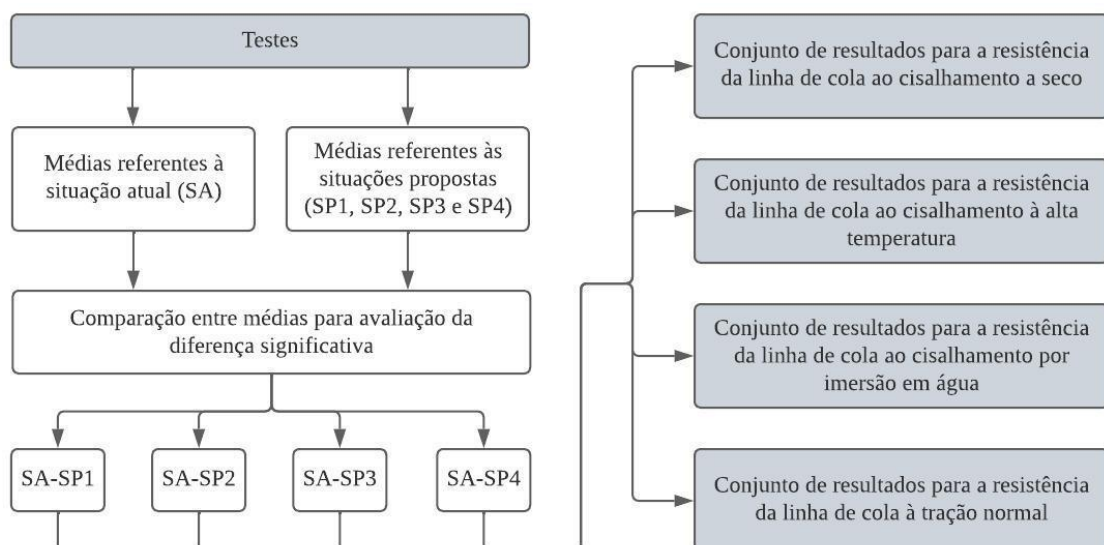
Fonte: elaborada pelo autor (2022).

Em relação ao tratamento dos dados, inicialmente, foram retirados os *outliers* estatísticos com o auxílio de valores de referência adotados pela empresa baseados em relatórios históricos. Ainda, cabe destacar que, como o intuito dos testes é avaliar a resistência da linha de cola às solicitações de força, os valores de ensaios de tração e cisalhamento em que o corpo-de-prova teve fratura na madeira antes da linha de cola foram representados pelo índice de percentual de falha da madeira.

A análise estatística da parte dos testes de cisalhamento e tração foi feita, inicialmente, com a obtenção das médias e desvios-padrão para cada condição testada, para fins de comparação com resultados da literatura. Em seguida, foi feita a análise de variância ANOVA, para verificar a existência ou não de diferença significativa entre as médias dentro de cada condição testada (cisalhamento a seco, à alta temperatura, por imersão em água e tração normal). Por fim, para a realização das análises estatísticas comparativas específicas entre SA e SPn, foram utilizados os testes simultâneos de Tukey ao grau de confiança de 95%, os quais consideram a diferença entre duas médias comparadas para traçar um intervalo de confiança (IC) que, se não conter zero, indica a diferença significativa entre as médias. Toda a análise foi realizada pelo *software* Minitab 18.

Para cada combinação de variáveis independentes, foi adotada uma denominação (SA, SP1, SP2, SP3, SP4 e SP5). Como o intuito foi avaliar a diferença significativa entre as situações propostas (SPn) em relação à situação atual (SA), houve somente a comparação entre SA e cada uma das SP, não sendo analisada a relação entre duas ou mais situações propostas. A Figura 11 esquematiza as análises estatísticas realizadas.

Figura 11 – Representação gráfica do tratamento estatístico realizado com os dados obtidos nos experimentos.



Fonte: elaborada pelo autor (2022).

### 3.2.1 Ensaios de caracterização das propriedades que influenciam na colagem da madeira

#### 3.2.1.1 *Propriedades anatômicas da madeira*

##### a) Inclinação das fibras ou da grã

Para a mensuração da inclinação da grã ou da fibra, foram seguidas as diretrizes da norma ABNT NBR 12297:1991. Para tal, foram confeccionadas cinco amostras de madeira sem a presença de imperfeições que influenciasses na orientação da grã, de dimensões 650 mm x 50 mm x 26 mm, sendo utilizadas as bordas para o ensaio, visto que é a parte que é colada na confecção de painéis. A norma nomeia a inclinação da grã como  $I_g$ , o comprimento e a espessura totais da peça (em milímetros) como  $L_1$  e  $I_1$  e, os parciais, usados para o cálculo, como  $L_2$  e  $I_2$ . É possível obter, em índice percentual, o valor de  $I_g$  pela Equação 1.

$$I_g(\%) = \frac{I_2}{L_2} * 100 \quad (1)$$

O comprimento de 650 mm das amostras foi definido pelo fato de a dimensão  $L_2$  ser inválida em amostras menores. As dimensões dos resultados extraídas das amostras foram obtidas com a utilização de uma trena.

##### b) Grau de porosidade

A porosidade da madeira foi determinada a partir do procedimento sugerido por Varivodina et al. (2010). Foram confeccionadas cinco amostras de medidas 30 mm x 20 mm x 20 mm e submetidas à secagem em estufa por dez horas, a  $103 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ . Em seguida, foram pesadas para obtenção da densidade da madeira totalmente seca ( $\rho_0$ ), a partir da relação massa/volume ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) dos valores medidos. Após a obtenção de todos os valores, foram aplicados na Equação 2, para obtenção do índice percentual de porosidade (Por), com valor de 1,53 considerado para  $\rho_{w,s}$ , conforme Ugolev (1986 apud VARIVODINA et al., 2010).

$$\text{Por}(\%) = \left[ 1 - \frac{\rho_0}{\rho_{w,s}} \right] * 100 \quad (2)$$

### 3.2.1.2 Propriedades físicas da madeira

#### a) Rugosidade pós-processamento

Para a mensuração da rugosidade média da madeira  $R_a$ , em micrômetros, pela norma ABNT NBR 4287:2002, foram usadas cinco amostras de medidas 200 mm x 50 mm x 26 mm, em que foram usadas as bordas para o ensaio, que é a parte utilizada no processo de colagem. Os espécimes foram submetidos a leituras no rugosímetro digital, sendo duas no sentido longitudinal e duas no sentido radial, conforme orientações da norma. O leitor percorreu uma distância de 4,8 mm em cada leitura, à velocidade de 0,5 mm/s. O equipamento usado foi o da marca Mitutoyo, modelo SJ-410.

#### b) Densidade aparente

Para a caracterização da densidade da madeira, foram necessárias cinco corpos-de-prova de madeira, de dimensões 50 mm x 30 mm x 20 mm. Seguindo as diretrizes da norma da norma ABNT NBR 7190:1997, as amostras foram inicialmente mensuradas e pesadas, para depois os valores serem aplicados na Equação 3.

$$\rho_{ap} = \frac{m_{12}}{V_{12}} \quad (3)$$

O cálculo utiliza  $\rho_{ap}$  como densidade aparente (considerada com teor de umidade na faixa de 12%),  $m_{12}$  como a massa da amostra, em quilogramas, e  $V_{12}$  como o volume, em metros cúbicos, todas as variáveis com teor de umidade aproximado a 12%. Para a exposição dos resultados, o valor foi convertido para a unidade  $\text{g/cm}^3$ .

#### c) Teor de umidade

Para a quantificação do teor de umidade pela norma ABNT NBR 7190:1997, foram usados cinco espécimes de madeira, de medidas 50 mm x 30 mm x 20 mm. Inicialmente, as amostras foram pesadas para determinação da massa inicial ( $m_i$ ), em gramas. Em seguida, foram encaminhadas para a câmara de secagem, submetidas à temperatura de  $103 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ . A cada seis horas, os espécimes foram pesados novamente, até que a massa variasse 0,5% em

relação à medida anterior, sendo essa nomeada de massa seca ( $m_s$ ), também em gramas. Os valores foram aplicados na Equação 4, que determina o percentual do teor de umidade ( $U_{mi}$ ).

$$U_{mi}(\%) = \frac{m_i - m_s}{m_s} * 100 \quad (4)$$

#### d) Estabilidade dimensional

Para a caracterização da estabilidade referente aos defeitos oriundos da retratibilidade, foram utilizadas as diretrizes da norma ABNT NBR 12297:1991, para quantificação dos índices de arqueamento e encurvamento da madeira, que são os que representam as maiores causas de reprovação de peças. Foram selecionados os cinco com maiores defeitos de estabilidade aparentes aceitáveis no processo de colagem para avaliação, visto que os com estabilidade severa são descartados ainda no início do processo. Os sarrafos, de dimensões 1250 mm x 50 mm x 26 mm, foram colocados em uma face plana para a mensuração dos defeitos em comparação com a sua condição normal. As Equações 5 e 6 representam o grau de encurvamento ( $Enc$ ) e de arqueamento ( $Arq$ ), respectivamente.

$$Enc(\%) = \left( \frac{X}{L_1} \right) * 100 \quad (5)$$

$$Arq(\%) = \left( \frac{Y}{L_1} \right) * 100 \quad (6)$$

Nos dois casos, o  $L_1$  representa o comprimento real da peça na condição normal, em milímetros, e o  $X$  e o  $Y$  representam a distância entre o ponto mais alto do arco em relação ao plano, também em milímetros, respectivamente para o encurvamento e para o arqueamento. As dimensões foram obtidas com auxílio de uma trena.

### 3.2.1.3 Propriedades químicas da madeira

#### a) Teor de extrativos

Foi utilizada adequação à norma ABTCP M3/69 para a determinação do teor de extrativos da madeira em etanol/tolueno. Inicialmente, conforme procedimento indicado por Zaque et al. (2021), a serragem usada para os ensaios foi submetida à estufa por 12 horas a  $103 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$  até ficar totalmente seca.

Em seguida, foi montado um cartucho com papel permeável (VALE et al., 2017) com capacidade para 1,3 g de serragem seca, que, após tarado, foi preenchido com serragem e inserido em 150 ml da solução etanol/tolueno (1:2). O conjunto, em duplicata, foi submetido a aquecimento e refluxo no extrator do tipo soxhlet por seis horas, sendo filtrado e obtido o novo peso após nova secagem. Os resultados foram obtidos pela Equação 7.

$$\text{Ext}(\%) = \left( \frac{P_i - P_f}{P_f} \right) * 100 \quad (7)$$

Ext é o teor de extrativos em índice percentual,  $P_i$  representa a massa anterior ao ensaio, em gramas, e  $P_f$  representa a massa após o ensaio, também em gramas.

#### b) pH

O pH da madeira foi mensurado com readequação, usando um pHmetro, conforme sugerido por Almeida (2009), da marca Tecnal, modelo Tec-5. No ensaio, realizado em duplicata, foram depositadas cinco gramas de serragem totalmente seca em 150 ml de água destilada, submetidos à agitação (sob refluxo) por aproximadamente 20 minutos. Em seguida, o eletrodo foi colocado na mistura, até que houvesse a estabilização do valor do pH indicado no equipamento.

#### c) Teor de cinzas

Para a determinação do teor de cinzas da madeira, em duplicata, foram usados dois gramas de serragem totalmente seca, que foram depositados em um cadinho de porcelana (após tarado) e, em seguida, incinerados. Após, foram levados à mufla e submetidos a 600 °C por 12 horas. Por fim, as cinzas já em temperatura ambiente e mantidas secas foram pesadas novamente. Para obter o teor de cinzas, a norma ASTM D 1102-84 (2007) que foi a diretriz do ensaio determina a utilização da Equação 8.

$$\text{Cin}(\%) = \frac{m_c}{m_s} * 100 \quad (8)$$

Cin determina o índice percentual do teor de cinzas da madeira,  $m_c$  a massa de cinzas obtida após o ensaio, em gramas, e  $m_s$  a massa da serragem seca, também em gramas, obtida antes da realização do ensaio.

#### 3.2.1.4 Propriedades do adesivo

##### a) Viscosidade

Para a mensuração da viscosidade do adesivo, foram utilizadas três amostras de 500 ml cada. Foi realizado o procedimento pela norma ASTM D 2196-18e1 (2018), a qual analisa as propriedades reológicas de materiais não newtonianos por viscosímetro rotacional tipo Brookfield, sendo utilizado o modelo RVT analógico. Foram usados *spindles* introduzidos no adesivo, sendo testadas combinações entre os tamanhos 05, 06 e 07 (de *spindle*) com velocidades de rotação de 5, 10, 20, 50 e 100 rpm, promovendo leituras de resultados na unidade cP.

##### b) Tempo de gelatinização

Para a realização desse procedimento (em três repetições), foram utilizadas amostras do adesivo, de um grama cada. Essas foram depositadas em dois tubos de ensaios com bastões de vidro e, após a pesagem da cola, foram mergulhados em um béquer com aproximadamente 80 ml de glicerina aquecida por uma placa aquecedora a 150°C. O adesivo foi levemente agitada pelo bastão até a cura, sendo cronometrado o tempo, porém à temperatura de 150 °C o adesivo queimou, então o procedimento foi repetido com a redução de gradativa de 10 °C, até a conclusão do experimento utilizando 120 °C. O ensaio foi realizado seguindo as diretrizes orientadas por Almeida (2009).

##### c) pH

A mensuração do pH foi realizada com a utilização de um pHmetro da marca Digimed, modelo DM-51. O ensaio foi realizado em triplicata, onde o eletrodo foi inserido em amostras do adesivo, de aproximadamente 80 ml, e foi aguardada a estabilização indicada no



equipamento. O ensaio foi realizado seguindo as diretrizes orientadas por Danielli et al. (2021).

d) Teor de sólidos

O ensaio foi realizado com base na norma ABNT NBR 8877:2020 utilizando três amostras da cola, de 600 ml cada. Foi realizada, inicialmente, a pesagem das amostras em uma balança analítica, na condição pura ou úmida. Em seguida, elas foram submetidas à evaporação em estufa de circulação natural de ar por três horas em temperatura de  $103 \pm 2$  °C e pesadas novamente, na condição seca. Pela subtração dos pesos, em gramas, da primeira condição pelos pesos da segunda e posterior conversão em índice percentual, foi possível obter os teores de sólidos das amostras.

### 3.2.1.5 Propriedades do processo

a) Condições de prensagem

O tempo e a pressão de prensagem, foram classificados como caracterizáveis por serem valores quantitativos, porém, como aqui são valores programados, não houve procedimento específico para caracterização. A pressão de prensagem média foi mantida constante em 47,5 kgf/cm<sup>2</sup>, acima do que é normalmente praticado, e o tempo foi ajustado conforme descrito no planejamento experimental, alternando entre 70, 75 e 80 segundos.

b) Gramatura ou taxa de espalhamento do adesivo

Para medição da gramatura do adesivo depositado na madeira, foram confeccionadas 15 amostras, de dimensões 200 mm x 50 mm x 26 mm (comprimento, largura e espessura, respectivamente), com as mesmas características físicas e de processamento dos sarrafos normalmente usados para a colagem. Em seguida, conforme a Figura 12, foram taradas e submetidas à aplicação do adesivo em uma das bordas:

- a) cinco pelo método atual (rolo), com gramatura média de 205 g/m<sup>2</sup> e aplicação automática, com tempo médio de aplicação de 1,6 segundos por metro;
- b) cinco pelo método proposto (spray), com gramatura média de 80 g/m<sup>2</sup> e aplicação manual, com tempo médio de aplicação de 3,2 segundos por metro;

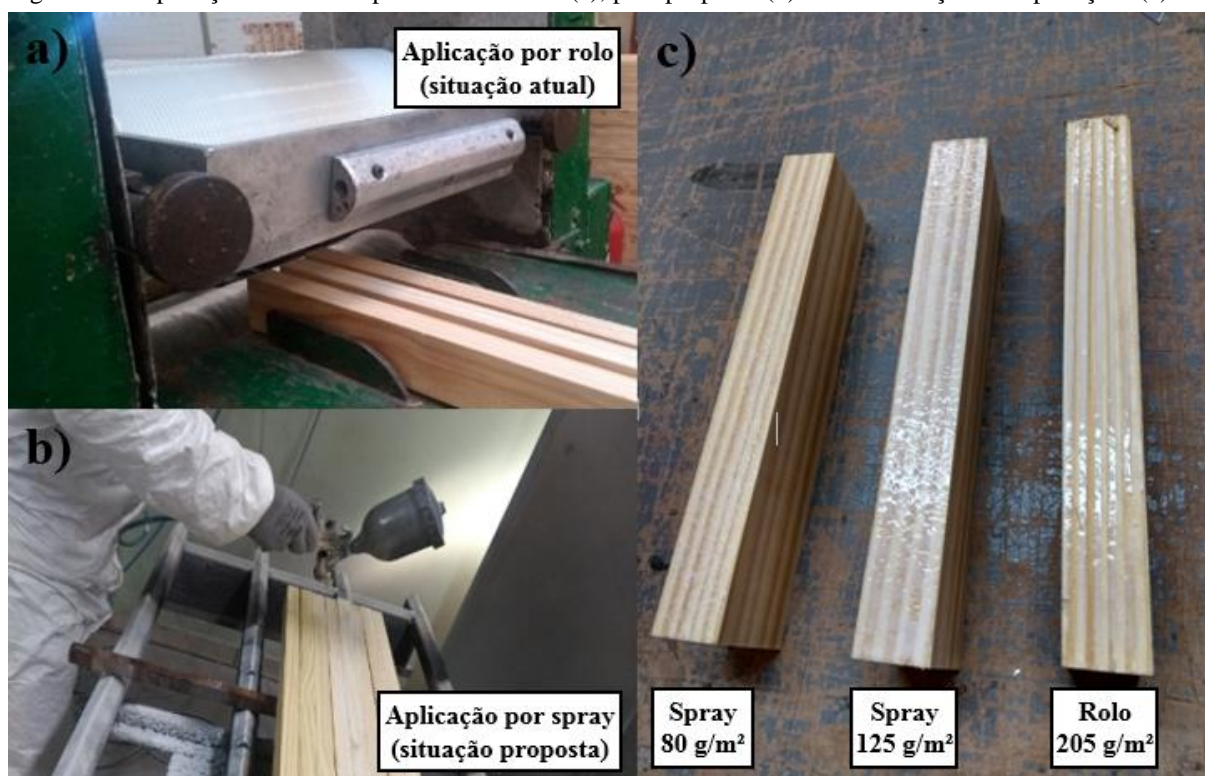
c) cinco pelo método proposto (spray), com gramatura média de  $125 \text{ g/m}^2$  e aplicação manual, com tempo médio de aplicação de 4,8 segundos por metro.

Cabe destacar que, na tentativa de aplicação do adesivo por spray no tempo de 1,6 segundos, igual à aplicação atual, obteve-se a gramatura média de  $42 \text{ g/m}^2$ , o que não é praticado em nenhuma pesquisa consultada, por isso foi aumentado o tempo para chegar em gramaturas já utilizadas na literatura.

Para a aplicação do spray foi utilizada uma pistola de gravidade Anest Iwata, do modelo W-400-182G, com bico de diâmetro 1,8 mm, pressão de aplicação de 2 bar e vazão de 320 ml/min. O controle da gramatura foi realizado pelo monitoramento do tempo de aplicação em conjunto com as propriedades da pistola indicadas pelo fabricante, com o intuito de garantir o maior nível de uniformidade possível

Pela subtração dos valores dos espécimes com e sem o adesivo depositado, em gramas, obteve-se apenas quantidade de adesivo na região a ser colada, sendo necessário o cálculo com base em um  $\text{m}^2$  para conversão de unidade para  $\text{g/m}^2$ .

Figura 12 – Aplicação de adesivo pelo método atual (a), pelo proposto (b) e a visualização das aplicações (c).



Fonte: elaborada pelo autor (2022).

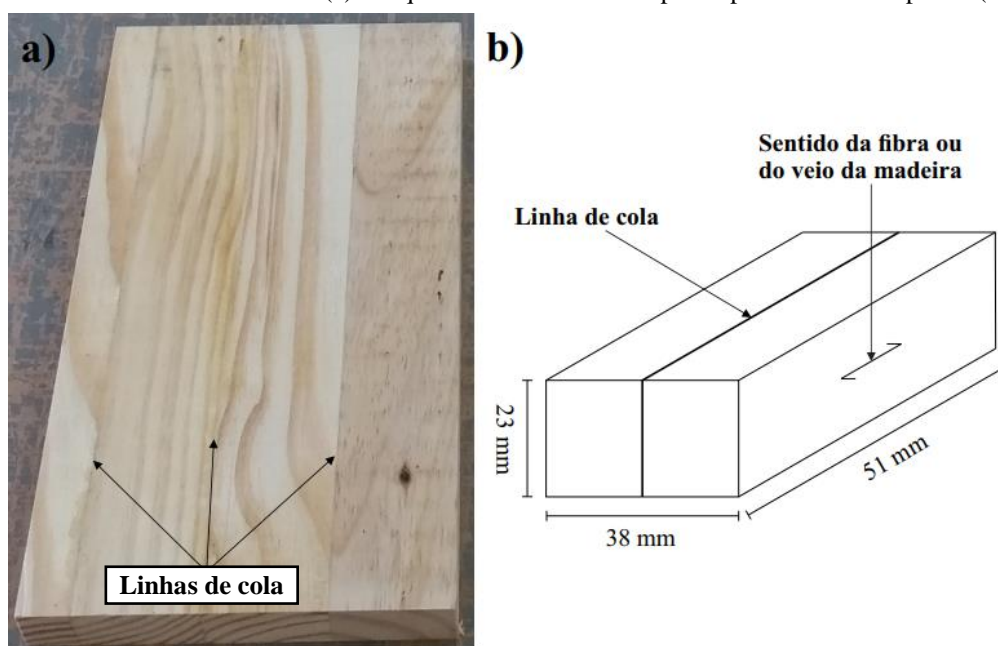
### 3.2.2 Ensaio para avaliação das propriedades mecânicas dos painéis colados

#### 3.2.2.1 Cisalhamento da linha de cola

Para avaliação das propriedades mecânicas dos painéis colados, tanto para o cisalhamento, quanto para a tração, foram realizados ensaios em amostras considerando a colagem na situação atual e nas situações propostas, conforme citado anteriormente. Em todas as condições, os painéis que deram origem aos corpos-de-prova foram submetidos à prensagem de alta frequência, em que somente a linha de cola aquece até a gelatinização completa, à pressão média de  $47,5 \pm 7,5$  kgf/cm<sup>2</sup>.

Em relação à força de cisalhamento da linha de cola, foram confeccionados painéis de madeira de 300 mm x 160 mm x 26 mm, compostos de três sarrafos de 50 mm de largura, um de 10 mm e três linhas de cola, conforme Figura 13a. As situações de processamento e a quantidade de amostras para cada situação foram descritas na Figura 10.

Figura 13 – Painel com linhas de cola (a) e esquema ilustrativo do corpo-de-prova obtido do painel (b).



Fonte: elaborada pelo autor (2022).

Para realização dos testes conforme especificação da norma ASTM D 5751-99 (2005), foram extraídas dos painéis de cada situação de fabricação os corpos-de-prova de dimensões aproximadas de 51 mm x 38 mm x 23 mm, com uma linha de cola no centro, conforme Figura 13b.

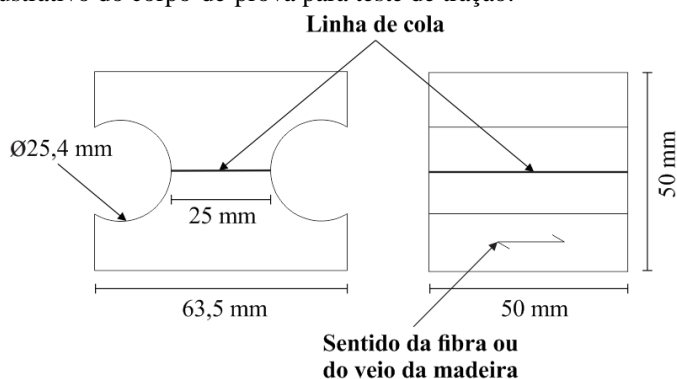
Em seguida, os corpos-de-prova foram testados em três condições de cisalhamento: a seco, em que os espécimes são inicialmente expostos à temperatura ambiente até que atinja o teor de umidade entre 8% e 10%; por exposição à alta temperatura, que há o preaquecimento das peças a  $104\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; e, por imersão em água, em que os corpos-de-prova são, primeiramente, submersos em água em temperatura ambiente (entre  $19\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) por quatro horas e depois secos em estufa elétrica a  $41\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ , repetindo por mais duas vezes. Para cada condição, é testada a força de cisalhamento após os espécimes terem sido submetidos a ela.

Para a aplicação da força de cisalhamento, foi utilizada uma máquina universal de ensaios da marca EMiC, para a obtenção dos valores em cada condição.

### 3.2.2.2 Tração normal à linha de cola

Da mesma forma que nos ensaios de cisalhamento, os ensaios de tração foram realizados em amostras provenientes do processo atual de colagem e das situações propostas, com vistas à comparação de resultados. A quantidade de amostras, confeccionadas de acordo com a Figura 14, e situações de processo a que foram submetidas, foram demonstradas na Figura 10.

Figura 14 – Esquema ilustrativo do corpo-de-prova para teste de tração.



Fonte: adaptado de ABNT NBR 7190:1997 (1997).

A norma utilizada para a realização do procedimento foi a ABNT NBR 7190:1997, a qual determina que os corpos-de-prova sejam submetidos a forças normais à linha de cola e contrárias entre si, por equipamento previamente projetado. Os resultados dos ensaios devem ser aplicados à Equação 9, que determina a resistência da linha de cola à tração ( $f_{gt,90}$ ):

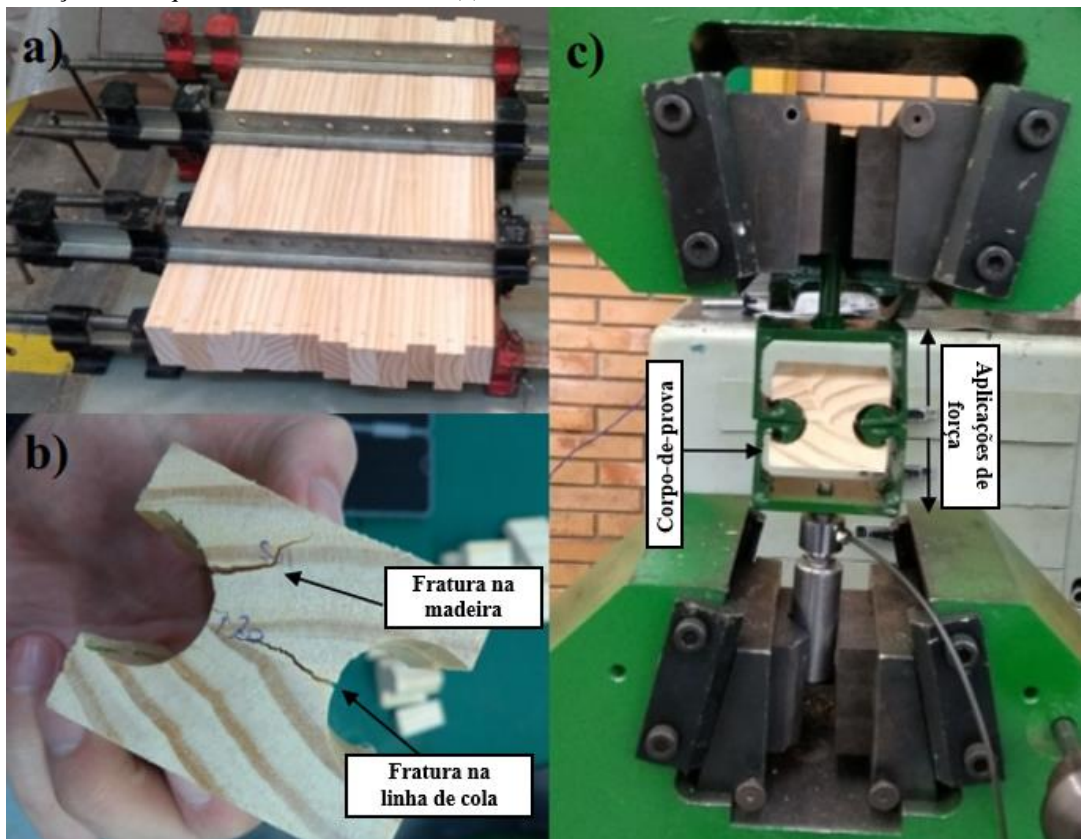
$$f_{\text{et},90} = \frac{F_{t90,\text{máx}}}{A_{g90}} \quad (9)$$

$F_{t90,\text{máx}}$  indica a maior força de tração aplicada à amostra, em newtons, e  $A_{g90}$  é a área correspondente à da linha de cola, em metros quadrados. Para padronização de unidades, os valores de tração foram convertidos em kgf/cm<sup>2</sup>.

Para a confecção das amostras para o teste de tração, foi necessária a pré-prensagem dos sarrafos colados (antes da prensagem em alta frequência) utilizando grampos mecânicos, para ser possível o transporte das peças até a prensa (Figura 15a). Ainda, como particularidade do ensaio, para a avaliação da tração com maior confiabilidade em relação ao processo de colagem estudado, as amostras foram confeccionadas com orientação das fibras da madeira rotacionadas em 90° em relação ao que a norma indica (Figura 15b).

O ensaio foi realizado com o uso da máquina universal de ensaios da marca Schenck Trebel (Figura 15c).

Figura 15 – Pré-prensagem com grampos mecânicos (a), corpo-de-prova físico com fratura na linha de cola (b) e teste de tração na máquina universal de ensaios (c).



Fonte: elaborada pelo autor (2022).

### *3.2.2.3 Mensuração e análise da linha de cola*

Conforme sugerido por Shirmohammadi e Leggate (2021), para a obtenção da espessura da linha de cola, foi utilizada a microscopia óptica através do equipamento da marca Zeiss, modelo Axio Scope A1 com faixa de ampliação de 50-1000x. Para cada uma das cinco condições de colagem estudadas, foi usado um painel conforme já ilustrado na Figura 13a e, nele, foram escolhidos três pontos em três regiões de cada linha de cola, totalizando 27 leituras por painel, utilizando a ampliação de 200x.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Caracterização da madeira

Na Tabela 2 é possível observar os valores médios obtidos nos ensaios para as principais propriedades da madeira que influenciam no processo de colagem, citadas na bibliografia. Os resultados serão discutidos em uma ordem que fique clara a interligação entre cada um, com base nos valores recomendados pela literatura.

Tabela 2 – Resultados médios para a caracterização da madeira de *Pinus taeda* L.

Propriedade	Diretriz de ensaio	Valores médios	Valores recomendados
Inclinação das fibras ou da grã (%)	ABNT NBR 12297:1991 (ALMEIDA, 2014)	4,37 ± 1,05 (≅ 4°)*	< 30°
Porosidade (%)	(VARIVODINA et al., 2010)	71,43 ± 0,59	57,74-73,68%
Rugosidade superficial longitudinal - Ra (µm)	ABNT NBR 4287:2002 (ARAUJO et al., 2019)	3,61 ± 0,54	< 24 µm
Rugosidade superficial radial - Ra (µm)		5,39 ± 0,84	
Densidade aparente (g/cm <sup>3</sup> )	ABNT NBR 7190:1997 (SOUZA, 2019)	0,436 ± 0,03	< 0,550 g/cm <sup>3</sup>
Umidade (%)	ABNT NBR 7190:1997 (DIAS, 2016)	12,54 ± 0,12	8-15%
Estabilidade – Encurvamento (%)	ABNT NBR 12297:1991 (ALMEIDA, 2014)	0,42 ± 0,24 (≅ 5,21 mm)*	Média de 3,92 mm/m
Estabilidade – Arqueamento (%)		0,18 ± 0,04 (≅ 2,19 mm)*	Média de 3,56 mm/m
Teor de extrativos por etanol/tolueno (%)	ABTCP M3/69 (ZAQUE et al., 2021)	6,02 ± 0,56	3,5-14%
pH	(ALMEIDA, 2009)	5,22 ± 0,11	3-6
Teor de cinzas (%)	ASTM D 1102-84 (2007) (SILVA, 2018)	0,36 ± 0,02	< 0,5%

Fonte: elaborada pelo autor (2023). (\*) - Valores convertidos em grandezas físicas mensuráveis.

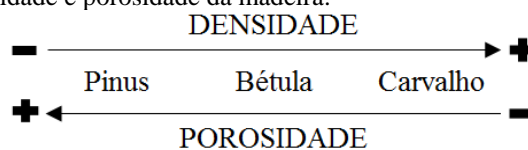
Em relação à umidade da madeira, o valor médio obtido fica próximo aos encontrados pelos autores e dentro do recomendado, na faixa de 8-15%. A pesquisa de Bomba et al. (2014b), que utilizou índices de umidade de 8%, 12% e 20% para a madeira de *Fagus sylvatica* L., concluiu que o aumento do teor de umidade foi proporcional à diminuição da força de tração, tendo variação de 16,96 MPa (8%) para 10,75 MPa (20%) para o adesivo PVAc e de 14,20 MPa (8%) para 11,62 MPa (20%) para o adesivo poliuretano. Herrera-Díaz et al. (2017) complementam, afirmando que o teor de umidade deve ser estabilizado no intervalo de 8% a 10% para melhor performance das propriedades mecânicas.

Para a densidade da madeira, com o valor encontrado de 0,436 g/cm<sup>3</sup>, pode-se considerar o *Pinus taeda* L. de baixa densidade. Pesquisas como a de Vivian et al. (2020), que

apresenta a densidade aparente do *Pinus taeda* L. de 0,427 g/cm<sup>3</sup>, confirma essa hipótese e, de forma geral, a classifica como macia ou *softwood*. Mustefaga et al. (2019) demonstram a diferença de densidade aparente entre as espécies de *Pinus taeda* L. e *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham., sendo 0,320 e 0,410 g/cm<sup>3</sup>, respectivamente. Isso pode ocorrer pela diferença na espessura da parede celular e consequente diferença nas dimensões dos poros, o que contribui para diferenciação anatômica de madeiras consideradas leves, médias ou pesadas. Para a colagem, esse fator pode influenciar na combinação entre a espécie da madeira e o tipo de adesivo utilizado.

A porosidade média mensurada de 71,43% para o *Pinus taeda* L. é semelhante ao valor nominal de 71,20% encontrado por Varivodina et al. (2010) para a madeira de Pinus, validando o estudo em outras regiões de cultivo, como sugerido pelos autores. Ainda, vale ressaltar que foram obtidos valores de 61,30% e 49,50% para as madeiras de Bétula e Carvalho, respectivamente, sendo possível estabelecer a relação entre porosidade e densidade (Figura 16), auxiliada por Crang, Lyons-Sobalski e Wise (2018).

Figura 16 – Relação entre densidade e porosidade da madeira.



Fonte: elaborada pelo autor (2023).

Em contrapartida, Plötze e Niemz (2010) não consideram como geral essa relação, salientando que, além da quantidade dos poros, seu tamanho e a espessura da parede celular é um fator influente para definição dessa propriedade. Os autores encontraram uma pequena diferença entre valores nominais (que considera a densidade invariável para o cálculo) e valores obtidos por experimento prático, podendo concluir que, tanto a densidade, quanto a porosidade, não são exatamente as mesmas considerando a região da árvore estudada. Ainda, o valor de porosidade nominal encontrado pelos autores, de 69,71% para a madeira de *Pinus sylvestris* L., também ficou próximo ao obtido no ensaio.

A inclinação média da grã aqui medida, considerando 90° como 100% ou inclinação máxima (perpendicular) e não considerando a presença de defeitos, aproxima-se dos 4°. Como as estruturas porosas ou com vasos tendem a acompanhar a direção das fibras da madeira (FRIHART, 2016), a inclinação da grã está diretamente ligada com a penetração do adesivo no substrato da madeira. Estudos como o de Furuno et al. (1983 apud KAMKE; LEE, 2007) demonstram que o nível de inclinação da grã ou da fibra é significativo na resistência



ao cisalhamento, sendo a inclinação de 5° em relação ao substrato a que apresentou melhores valores de resistência. Follrich et al. (2007) obtiveram melhores resultados de resistência ao cisalhamento em juntas coladas da madeira *Picea abies* (L.) Karst. com as inclinações da grã próximas ao limite inferior, de 10° e 20°.

Kamke e Lee (2007) e Frihart (2016) complementam que defeitos como: a inclinação demasiada em conjunto com a porosidade elevada ou a presença de defeitos (como os nós, por exemplo) pode provocar fluidez em excesso ou deficiente, comprometendo o desempenho e a resistência da colagem.

Para o teor de extrativos, inicialmente, é importante considerar que há a possibilidade de migração dos extrativos da árvore (cerne, onde há a concentração maior de óleos e impurezas) até a superfície, passando pelo alburno. Essa diferença de concentração de extrativos pode ser vista no estudo de Moreira, Fazon e Ribeiro (2016), em que os ensaios detectaram a diferença média de 35% de extrativos presentes no cerne e no alburno nas espécies *Eucalyptus urograndis* (híbrido), *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake e *Tectona grandis* L. f.

O valor obtido aqui de 6,02% se mantém dentro do intervalo sugerido pela literatura, de 3,5 a 14%. No trabalho de Bianche (2014), com a caracterização da propriedade utilizando também o método com solução etanol/tolueno, foi obtido o teor de extrativos de 5,52% para a madeira de *Pinus* sp. Ainda, conforme Fonte e Trianoski (2015), vale ressaltar que não é só a quantidade dos extrativos, mas também a sua natureza, que influencia no comportamento da madeira, em toda a cadeia de processamento (comprometendo desde a secagem até colagem).

Sobre o teor de cinzas, Fonte e Trianoski (2015) encontraram o valor de 0,49% para a espécie *Tectona grandis* L. f., beirando o limite máximo sugerido pela literatura de 0,5%. Na análise dos valores para a propriedade em dez espécies de madeiras amazônicas, Silva (2018) percebeu uma discrepância entre valores, em que foram obtidas para três delas índices muito superiores, de 3,36%, 3,43% e 4,03%, e para as outras, valores próximos ao recomendado. A autora conclui que a diferença pode ser em relação à região de origem da madeira, em que são admitidos limites de 0,5% para madeiras de florestas temperadas e 5% para madeiras de florestas tropicais. O valor obtido nos ensaios, de 0,36%, condiz com o recomendado, visto que o *Pinus taeda* L. tem origem estadunidense, onde predominam as florestas temperadas.

Para medição do pH, é necessário, inicialmente, considerar a região da árvore, pois são os extrativos que definem o nível de pH. O índice médio obtido, de 5,22 para a madeira, fica dentro do intervalo indicado por Iwakiri (2005), que compreende a faixa de 3 a 6,

considerando a medição na região do alburno. Outros estudos como o de Iwakiri et al. (2016) e Geffert, Geffertova e Dudiak (2019) apresentam valores médios de pH para a madeira de *Pinus* próximos a 4,5. Além disso, é possível observar que a maioria das madeiras, tanto *softwoods*, quanto *hardwoods*, mantém o pH abaixo de 6, sendo possível denominar a madeira como um material predominantemente ácido.

Os índices de rugosidade obtidos nos ensaios situam-se dentro do recomendado pela literatura. Zhong, Ng e Hiziroglu (2018), pelo dimensionamento no sentido longitudinal, obtiveram rugosidades médias Ra de 4,02, 6,24 e 7,13  $\mu\text{m}$  para as espécies de *Pinus resinosa* Aiton, *Quercus rubra* L. e *Palaquim* sp., respectivamente, o que coincidiu com a ordem crescente das respectivas densidades. Ainda, os autores perceberam que a maior rugosidade, dentre as outras propriedades influentes, contribuiu para a redução da resistência ao cisalhamento de juntas coladas, havendo diferença significativa em comparação às três espécies.

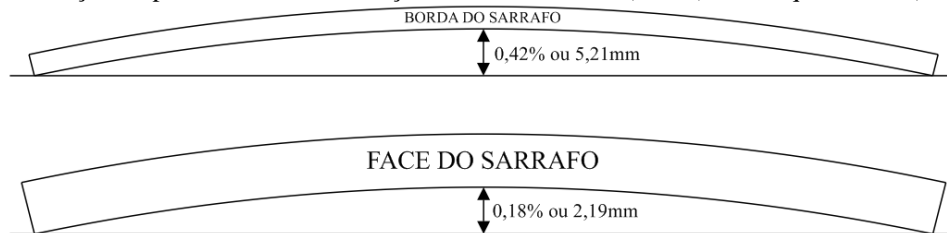
Em contrapartida, Jankowska (2020) obteve valores variantes de rugosidade Ra entre 1,54 a 11,04  $\mu\text{m}$  na orientação radial e entre 1,16 e 7,43  $\mu\text{m}$  na orientação tangencial para madeiras predominantemente consideradas como pesadas, com densidade superior. A autora destaca que o índice de rugosidade pode coincidir com a densidade, porém, o diâmetro dos vasos (e não traqueídeos, no caso de madeiras pesadas) tem maior influência sobre a rugosidade final, concluindo que o acabamento da superfície do substrato da madeira depende, além do equipamento utilizado, da organização anatômica do material, visto que, se trata de um material anisotrópico. Em complemento, o estudo de Bolgenhagen (2018) comprova que o lixamento como tratamento superficial da madeira oferece melhores acabamentos em comparação com a usinagem mecânica, contanto que sejam usados instrumentos adequados para evitar o fechamento dos poros e a consequente interrupção do transporte do adesivo pela estrutura da madeira. Assim, esse processo contribui para a eliminação de grandes marcas de relevo e favorece a resistência da linha de cola na colagem.

Os valores encontrados para o encurvamento e arqueamento (esquematizados na Figura 17) são próximos aos encontrados por Amparado (2008). Em relação ao primeiro, foram encontrados resultados levemente acima do recomendado. Para essa propriedade, valores pequenos indicam que as peças encurvadas podem ser aplainadas e reutilizadas, caso a diminuição da espessura não prejudique o resultado final (AMPARADO, 2008). Caso contrário, como o principal fator para a instabilidade física da madeira é a perda da umidade

oriunda da secagem, os parâmetros desse processo (velocidade, temperatura e outros) devem ser revistos para que os índices sejam reduzidos ao máximo.

Já o arqueamento, quando mensurado em altos níveis, inviabiliza totalmente o uso, porém, o valor médio aqui obtido fica inferior ao considerado pelo autor como não acentuado.

Figura 17 – Ilustração do procedimento de medição do encurvamento (acima) e do arqueamento (abaixo).



Fonte: elaborada pelo autor (2023).

Com o estudo de Bergman, Simpson e Turk (2010), em que foi executada a secagem da madeira após a mesma estar colada em forma de painel EGP para a espécie *Pinus ponderosa* Douglas ex P. Lawson & C. Lawson, foi possível corroborar a influência da secagem no comportamento físico do painel, que apresentou diminuição da qualidade da madeira, além de falhas de ligação adesiva influenciadas pela incompatibilidade entre adesivo e madeira muito úmida e pelas tensões criadas nas regiões de união. Nesse sentido, Herrera-Díaz et al. (2019) salientam que, mesmo após estar em formato de painel, a madeira precisa ser mantida em condições ambientais controladas pelo potencial higroscópico dela.

## 4.2 Caracterização do adesivo

Dentre todas as propriedades do adesivo, as que mais influenciam no desempenho da colagem de madeira são a viscosidade, o tempo de gelatinização ou cura, o pH e o teor de sólidos. Após realização dos ensaios, foi possível obter os valores médios para cada propriedade (Tabela 3), e discuti-los posteriormente.

Tabela 3 – Resultados médios obtidos dos ensaios do adesivo acetato de polivinila.

Propriedade	Diretriz de ensaio	Valores médios	Valores recomendados
Viscosidade (cP)	ASTM D 2196-18e1 (2018) (BRENCHLEY, 2021)	8115,67 ± 462,22	2200-6500 cP
Tempo de gelatinização (s)	(ALMEIDA, 2009)	66 ± 2,65	< 180 s
pH	(DANIELLI et al., 2021)	3,06 ± 0,46	2,5-11
Teor de sólidos (%)	ABNT NBR 8877:2020 (MELO et al., 2022)	49,41 ± 0,21	48-52%

Fonte: elaborada pelo autor (2023).

Sobre a viscosidade, o ideal é que haja uma relação proporcional entre a propriedade percebida no adesivo e a porosidade da madeira, se tratando da colagem. Essa relação compreende a possibilidade de aplicação de adesivos com viscosidades mais elevadas em madeiras com maior porosidade (menor densidade) por não necessitar tanta fluidez, visto que há mais espaço livre para escoamento da cola. Isso pode ser corroborado pela comparação entre os estudos de Chiozza e Pizzo (2016) e Hass et al. (2009), em que houve a utilização do adesivo PVAc e madeira de *Fagus sylvatica* L. (alta densidade). O primeiro apresentou menores resistências de cisalhamento da linha de cola (2,5-8,5 N/mm<sup>2</sup>) utilizando adesivo de alta viscosidade (média aproximada de 13250 ± 4500 cP) em relação ao segundo (11,5-13 N/mm<sup>2</sup> com viscosidade de 6900 cP e 13,5-15 N/mm<sup>2</sup> com viscosidade de 2380 cP).

Nesse sentido, os valores de viscosidade recomendados, na faixa de 2200-6500 cP, poderiam apresentar valores inferiores aos esperados para propriedades de resistência se aplicados na madeira de *Pinus taeda* L., que contém densidade baixa. Assim, o valor obtido nos ensaios pode ser capaz de oferecer melhor compatibilidade com o nível de porosidade da estrutura de madeiras com baixa e média densidade. Em complemento, estudos como o de Bu et al. (2019) retratam alterações de concentração dos componentes para otimizar a viscosidade do PVAc, demonstrando as diversas possibilidades que esse adesivo contempla.

Se tratando do tempo de gelatinização ou cura do adesivo, o tempo médio obtido aqui, mesmo menor, é coerente com o que é apresentado, visto que utiliza a tecnologia de prensagem de alta frequência, elevando apenas a temperatura da linha de cola para evitar o aquecimento e consequentes desvios de comportamento da madeira. Tout (2000) destaca que, em condições naturais, o adesivo tende a ter o tempo de cura elevado, o que torna o processo de colagem improdutivo. Em estudos como os de Almeida (2009) e Bomba et al. (2014a) é possível perceber a possibilidade de redução do tempo de cura dos adesivos para alguns segundos, respectivamente, com a aplicação de técnicas de prensagem combinadas ao controle de temperatura (FONTE; TRIANOSKI, 2015), tornando-o controlável para a obtenção de diferentes níveis de propriedades de resistência, como flexão e tração-cisalhamento. Isso acontece graças à solidificação do adesivo ocorrer pela extração do solvente ou uso de catalisador, dependendo do adesivo (CHIOZZA; PIZZO, 2016).

Com relação ao pH médio medido, ele se encontra dentro do intervalo de 2,5 a 11 sugerido por Iwakiri (2005). Corroborando o grande intervalo possível para uso (considerando as particularidades e o destino de aplicação de cada adesivo), o estudo de Barboutis e

Kamperidou (2021) considerou, para o PVAc, o intervalo de 3 a 8 no índice de pH para avaliar a força de adesão, com resultados sem diferença significativa.

O teor de sólidos médio mensurado se encontra dentro do intervalo sugerido para colagem em geral (48-52%) e levemente acima, considerando apenas o PVAc (46-49%). Estudos como o de Barboutis e Kamperidou (2021), em que se utiliza variações do PVAc com teores de sólidos diferentes para teste de resistência ao cisalhamento da junta colada e, os de Bila (2014) e Iwakiri et al. (2019), em que são comparados os desempenhos da linha de cola pelo cisalhamento, utilizando o PVAc e a emulsão polimérica de isocianato, demonstram que a variação percentual do teor de sólidos para os casos estudados, mantendo-se na faixa de 42-52%, não compromete significativamente nos resultados.

### 4.3 Caracterização do processo de colagem

Os valores médios da gramatura de adesivo depositada pelos dois métodos de aplicação analisados são demonstrados na Tabela 4. Em seguida, há a comparação com valores recomendados.

Tabela 4 – Resultados médios obtidos para a gramatura do adesivo depositado.

Propriedade	Condição	Valores médios	Valores recomendados
Gramatura do adesivo (g/m <sup>2</sup> )	Atual	205 ± 11,08	150-250 g/m <sup>2</sup>
	Spray (aplicação em menor tempo)	80 ± 11,45	
	Spray (aplicação em maior tempo)	125 ± 9,53	

Fonte: elaborada pelo autor (2023).

Inicialmente, é necessário destacar que as gramaturas em spray fazem parte do método proposto, porém foram também mensuradas juntamente à caracterização do método atual para avaliar se ficariam abaixo da gramatura atualmente utilizada, ou seja, alinhadas ao intuito da pesquisa.

A faixa de valores utilizada para a taxa de gramatura do adesivo em estudos é de 150 a 250 g/m<sup>2</sup>, tendendo a valores mais próximos ao limite superior para usos em escala produtiva. O valor médio mensurado para a gramatura no processo de colagem atual se mantém dentro da faixa recomendada. Uma condição que pode influenciar a gramatura a ser utilizada pode ser o tipo de adesivo, como demonstra o estudo de Trianoski, Iwakiri e Bonduelle (2020), em que foram utilizadas gramaturas de 150 e 200 g/m<sup>2</sup> para o PVAc e de 200 e 300 g/m<sup>2</sup> para o

resorcinol-formaldeído para a colagem de espécies da madeira de Eucalipto, sem diferença significativa nos resultados de cisalhamento das juntas coladas, o que confirma que cada um precisa de aplicação em uma quantidade indicada.

A taxa de deposição do adesivo pode ser menor sem comprometer a junta colada, o que pode ser visto no trabalho de Mölleken (2017), que ao utilizar o adesivo de poliuretano em gramaturas de 120, 160 e 180 g/m<sup>2</sup> para as madeiras de *Pinus taeda* L. e *Tectona grandis* L. f., concluiu que a diminuição da gramatura não teve influência negativa na resistência na linha de cola para a produção de EGP.

Com as constatações de Lima (2016), referentes à percepção de diferentes resultados de testes envolvendo a colagem de madeira com alteração do método de aplicação do adesivo, pode-se levantar a hipótese de que as novas gramaturas médias propostas podem oferecer condições de desempenho mecânico e resistência dentro do aceitável.

Em relação às condições de prensagem, Hänsel et al. (2021) destacam que o controle e a garantia do tempo e da pressão de prensagem e sua distribuição equalizada são imprescindíveis para o favorecimento de uma junta adesiva de qualidade. Ainda, os autores citam que o tipo de produto proveniente e o tipo de material utilizado podem ser fatores de alterações dos parâmetros de prensagem.

Endo, Trianoski e Iwakiri (2017), ao testar a resistência ao cisalhamento em EGP confeccionados com a madeira de *Pinus taeda* L. com diferentes sistemas de prensagem, concluíram que não houve diferença significativa nos resultados. No trabalho, foram aplicados 3 minutos com alta frequência e 45 minutos com prensagem normal, a 0,69 MPa. Assim, pode-se concluir que cada tipo de prensagem necessita de um tempo ideal para apresentar as melhores condições de resistência e desempenho da junta colada.

O processo estudado utiliza 4,5 MPa de pressão média e um minuto e 20 segundos de tempo, em prensagem de alta frequência, o que pode ser considerado alto em comparação a outras pesquisas. Trabalhos como o de Bustos et al. (2003 apud MARTINS, 2011) exemplificam a utilização de maiores forças de prensagem (semelhantes ao praticado pela empresa) em tempos de prensagem de poucos segundos. Através disso, é possível notar uma lógica utilizada entre os fatores pressão e tempo de prensagem, em que valores mais altos para o primeiro são usados em conjunto com menores valores do segundo como forma de compensação. Contudo, o excesso do primeiro pode causar o esmagamento da superfície a ser colada e a falta do segundo pode ocasionar a não solidificação do adesivo, comprometendo a qualidade da colagem.

#### 4.4 Avaliação da resistência da linha de cola por tração e cisalhamento

A primeira análise a ser feita é referente as médias obtidas para a resistência da linha de cola à tração normal e ao cisalhamento. A média e desvio padrão dos testes estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Resultados médios obtidos nos testes de cisalhamento e tração.

Variáveis/condição do processo	Situação atual	Situações propostas					Diretriz de ensaio
	Aplicação por rolo	Aplicação por spray					
Gramatura média do adesivo (g/m <sup>2</sup> )	205	125			80		
Tempo de prensagem do painel (s)	80	75	70	75	70		
Tratamento	SA	SP1	SP2	SP3	SP4		
Resistência ao cisalhamento	Teste à seco (kgf/cm <sup>2</sup> )	103,74 ± 4,40	115,34 ± 7,69	98,20 ± 4,62	87,75 ± 7,90	79,70 ± 10,96	ASTM D 5751-99 (2005) (BOLGENHAGEN, 2018)
	Teste à alta temperatura (kgf/cm <sup>2</sup> )	42,43 ± 3,81	46,15 ± 2,30	37,75 ± 1,93	30,62 ± 4,50	26,03 ± 7,27	
	Teste por imersão em água (kgf/cm <sup>2</sup> )	38,28 ± 3,57	41,22 ± 5,91	40,69 ± 3,03	21,41 ± 5,34	16,26 ± 3,68	
Resistência à tração normal (kgf/cm <sup>2</sup> )	14,12 ± 0,80	13,76 ± 2,18	13,63 ± 1,57	10,97 ± 2,15	10,34 ± 1,16	ABNT NBR 7190:1997 (BOLGENHAGEN, 2018)	

Fonte: elaborada pelo autor (2023).

Em relação ao cisalhamento, é indispensável salientar que é o principal teste no qual as emendas coladas de madeira são submetidas quando o intuito é testar a sua resistência e desempenho. Inicialmente, cabe a comparação com a norma ASTM D 5751-99 (2005), que determina valores mínimos para aprovação de 47,8 kgf/cm<sup>2</sup> (à seco), 31,8 kgf/cm<sup>2</sup> (à alta temperatura) e 23,9 kgf/cm<sup>2</sup> (por imersão em água). Então, pelos valores normativos, apenas SA, SP1 e SP2 superam os limites mínimos estabelecidos.

Comparando com resultados da literatura, das condições testadas nesse trabalho, as médias das situações SA e SP1 ficaram dentro do intervalo proposto por Iwakiri et al. (2015), considerando o teste a seco. A situação SP2 obteve valores próximos ao intervalo.

Os estudos encontrados sobre cisalhamento da linha de cola foram feitos com base na observação de diversas propriedades. Bolgenhagen (2018), com as condições de processamento destacadas anteriormente, obteve resultados no intervalo de 87,22 a 149,36

kgf/cm<sup>2</sup>, alternando conforme ajuste de tamanho de sarrafo, teor de umidade e processamento mecânico, e variando para valores menores e maior do os encontrados nas diferentes combinações aqui impostas. Isso corrobora a compreensão de que a colagem depende de muitos fatores de diferentes naturezas.

Os resultados da pesquisa de Yusoh et al. (2021) demonstraram a relação entre madeira de maiores densidades (menor porosidade) e a taxa de espalhamento da cola, em que as espécies com densidade de 434 e 480 kg/m<sup>3</sup> obtiveram melhores índices de resistência ao cisalhamento com gramatura de 300 g/m<sup>2</sup>, enquanto que as espécies com densidades de 700 e 770 kg/m<sup>3</sup> tiveram melhor comportamento com a gramaturas menores. Como as densidades menores são mais porosas, o adesivo flui mais facilmente, diminuindo a quantidade na superfície aderida. Se a gramatura maior fosse aplicada nas outras espécies, uma menor quantia de adesivo iria penetrar, fazendo com que a espessa camada de adesivo interferisse na conexão adesivo-substrato.

Martins (2011), ao avaliar a propriedade com madeira de *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cabbage e adesivos PVAc e poliuretano, variando a pressão de prensagem (a frio) de 0,7 a 1,0 MPa com duração de 360 e 90 minutos, obteve maiores valores com o segundo adesivo e a maior pressão de prensagem, chegando à média de 117,6 kgf/cm<sup>2</sup>. Considerando que foi realizada a prensagem a frio, a pressão pode ser considerada um fator importante, mesmo quando ocorre a cura natural do adesivo e não acelerada, como na prensagem por alta frequência.

Utilizando os tipos de prensagem como uma das variáveis controláveis, Endo, Trianoski e Iwakiri (2017) encontraram os intervalos de 51,3 a 57,4 kgf/cm<sup>2</sup> para teste a seco, 33,45 a 73,1 kgf/cm<sup>2</sup> em imersão e climatização e 6,75 a 21,85 kgf/cm<sup>2</sup> somente em imersão (ciclo triplo). Sobre esses valores apresentados (relativamente baixos) e considerando a gramatura utilizada para o PVAc, de 200 g/m<sup>2</sup>, que é a indicada para a madeira de *Pinus taeda* L., pode-se criar conclusões acerca da insuficiência da pressão de prensagem usada (7 kgf/cm<sup>2</sup>). Os tempos de prensagem com uso da prensagem a frio (45 minutos) e à alta frequência (3 minutos) proverem resultados semelhantes indicam que os dois processos são eficazes, contanto que aplicados nos limites adequados. Outra pesquisa com um comportamento semelhante é a de Bianche (2014), em que, na prensagem, realizada a frio por 24 horas, foi aplicada a pressão de 12 kgf/cm<sup>2</sup>. Os resultados obtidos indicaram resistência ao cisalhamento a seco no intervalo de 45,9 a 48,5 kgf/cm<sup>2</sup> e na condição úmida de 2,3 a 3,7 kgf/cm<sup>2</sup>, utilizando gramaturas do adesivo PVAc de 150 a 250 g/m<sup>2</sup> na madeira de *Pinus*.



Os adesivos de acetato de polivinila se mostram, em sua maioria, pouco resistentes à umidade e ao calor. Por isso, para cada utilização, há uma classificação estabelecida pela norma DIN EN 204 (2016) que engloba as denominações D1 à D4, as quais representam as condições em que o adesivo pode ser exposto. Barboutis e Kamperidou (2021) comprovaram a existência dessa diferença entre denominações, submetendo a união da madeira de *Fagus sylvatica* L. com várias formulações de PVAc classificadas como D3 e obtendo resultados no intervalo de 117 a 134,4 kgf/cm<sup>2</sup> e sem diferença significativa entre as condições dos testes de cisalhamento realizados pela norma DIN EN 204 (2016). Esse comportamento corrobora apenas os resultados do cisalhamento a seco obtido nessa pesquisa, ou seja, para as condições que envolvem condições ambientais diversificadas, os resultados aqui mensurados são inferiores. A explicação para esse comportamento pode estar tanto nas diferenças de parâmetros aplicados nas duas normas quanto para o não atendimento real das propriedades do adesivo classificado como PVAc.

Em relação à tração normal, as médias aqui obtidas se encontram abaixo do valor recomendado pela norma (40,8 kgf/cm<sup>2</sup>) e dos valores obtidos em trabalhos como os de Biazzon (2018) e Bolgenhagen (2018). O primeiro autor, ao utilizar a madeira de *Pinus elliottii* Engelm. e adesivo poliuretano aplicado por pincel com gramatura de 200 g/m<sup>2</sup>, aliadas à prensagem a frio (por grampos) por 4 horas à 28,13 N.m, obteve resultados de, aproximadamente, 22 kgf/cm<sup>2</sup> para a colagem em superfície plana. O que pode ter influenciado na maior força de tração normal foi a colagem com duração de horas e feita a frio, em comparação com o tempo inferior a dois minutos e por alta frequência, utilizados pelo processo atual. A prensagem por maior tempo favorece a melhor relação entre interface do adesivo-madeira, porém se torna improdutiva em processos com bastante volume de peças.

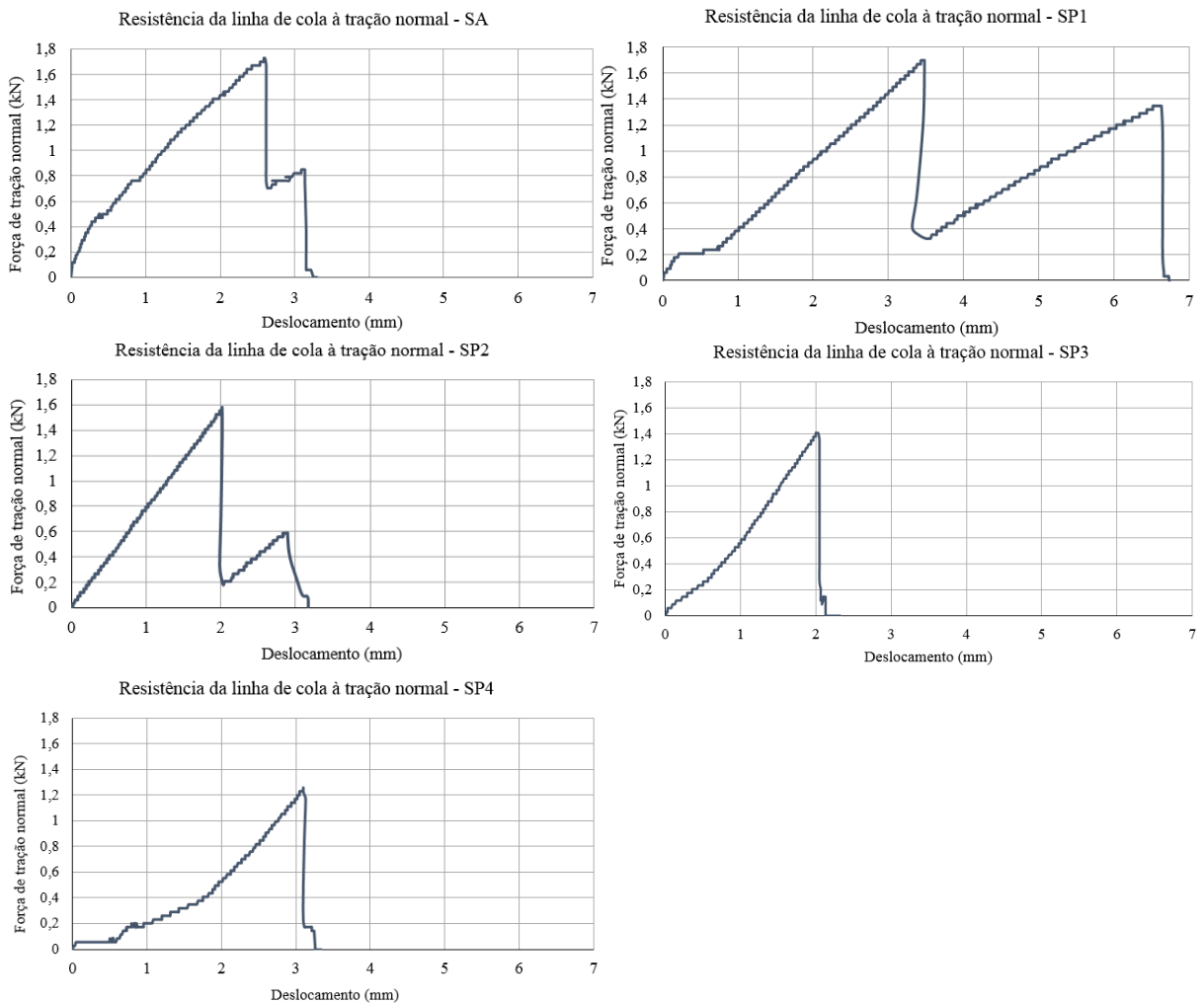
O segundo autor, ao utilizar gramatura de 220 g/m<sup>2</sup>, prensagem em alta frequência em ciclos de 89 segundos a 4 MPa, madeira de *Pinus* e, como adesivo, a emulsão polimérica de isocianato aplicada por rolo, obteve valores absolutamente superiores em todas as condições ajustadas, no intervalo de 19,74 kgf/cm<sup>2</sup> a 33,92 kgf/cm<sup>2</sup> (tamanho de ripa, teor de umidade e processo de acabamento da madeira). Isso pode ser consequência da combinação entre maior gramatura, porém mantida dentro do intervalo recomendado, com o adesivo utilizado, que possui melhor comportamento em juntas adesivas de madeira (IWAKIRI et al., 2015).

Testes com menores níveis de gramatura do adesivo também foram realizados, como a pesquisa de Becker (2011), que obteve valores máximos de tração normal à linha de cola no intervalo de 6,9 a 16,1 kgf/cm<sup>2</sup>, considerando os maiores valores de gramatura (130 g/m<sup>2</sup>),

tempo de prensagem (90 segundos) e pressão de prensagem (4 kgf/cm<sup>2</sup>), com a utilização da madeira de *Pinus elliottii* Engelm. e adesivo PVAc. Pode-se perceber que o intervalo de valores ficou mais próximo aos encontrados nessa pesquisa pois as duas primeiras propriedades foram usadas a níveis semelhantes.

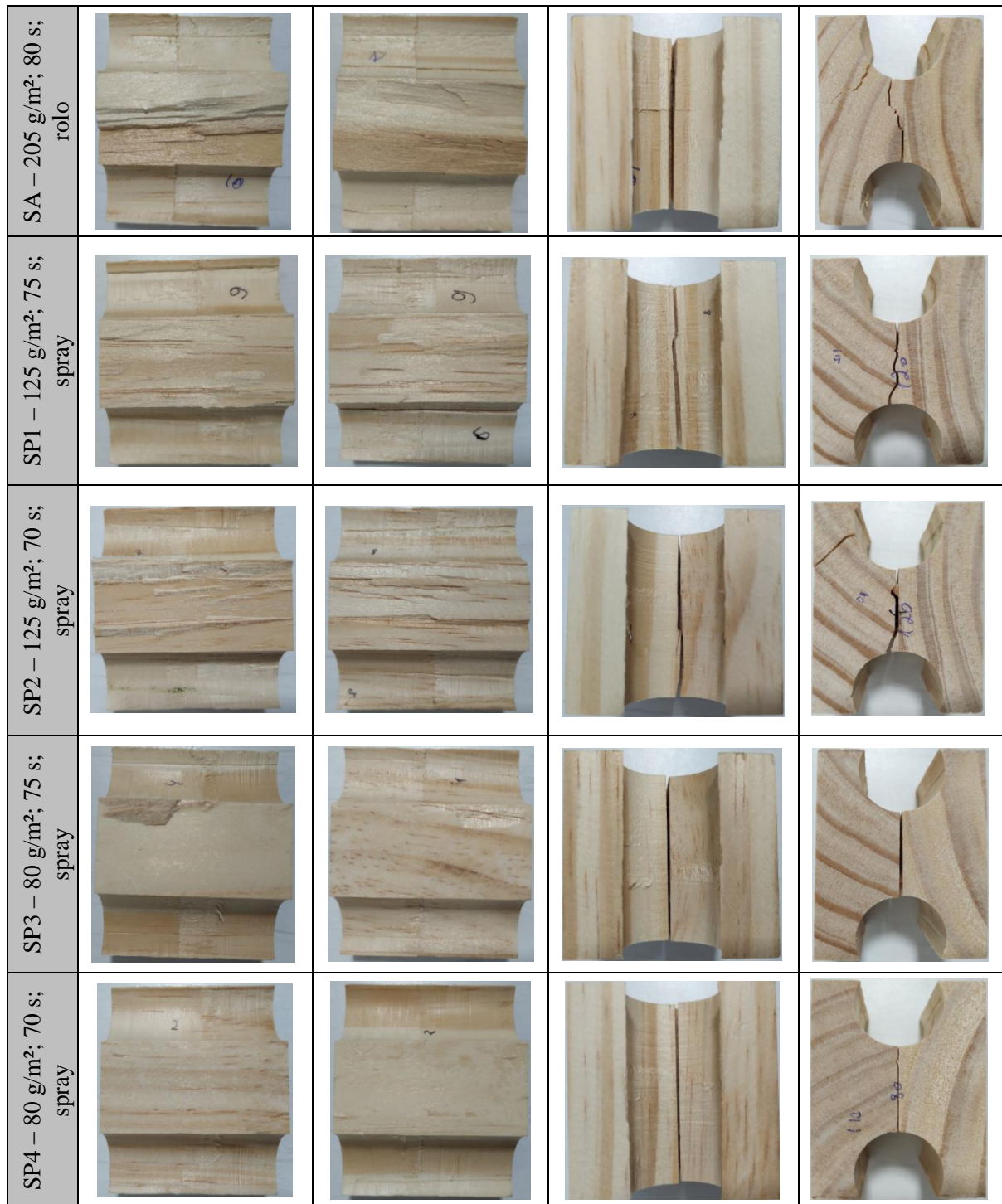
Em alinhamento a esses experimentos realizados com variação no nível de tais propriedades e com as constatações de Biazzon (2018), é possível atrelar as médias resultantes dos testes realizados nesse trabalho com o comportamento físico e a consequente geometria da região rompida. A seguir, na Figura 18 e no Quadro 6 e respectivamente, estão dispostas imagens representando os comportamentos mais comumente observados dos corpos-de-prova em cada situação testada e a interpretação gráfica dos mesmos.

Figura 18 - Representação gráfica dos comportamentos mais comumente observados de cada situação testada, relacionando Força de tração normal (kN) x Deslocamento (mm). Os dados para confecção dos gráficos foram obtidos pela mediana de todos os valores válidos para cada situação.



Fonte: elaborada pelo autor (2023).

Quadro 6 – Imagens dos corpos-de-prova de tração rompidos.



Fonte: elaborado pelo autor (2023).

Tabela 6 – Percentuais de falha da madeira para os testes de tração normal.

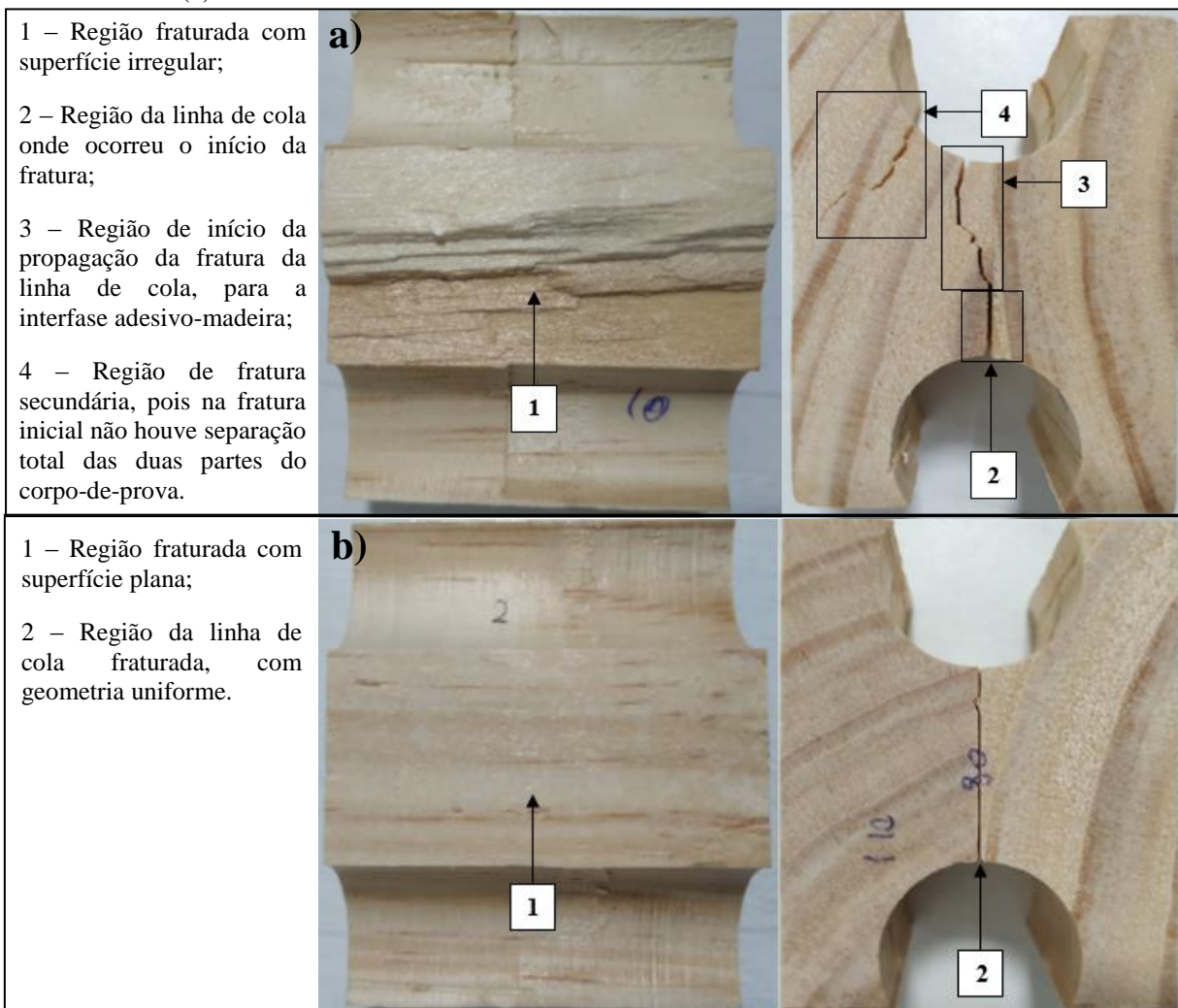
SA – 205 g/m <sup>2</sup> ; 80 s; rolo	SP1 – 125 g/m <sup>2</sup> ; 75 s; spray	SP2 – 125 g/m <sup>2</sup> ; 70 s; spray	SP3 – 80 g/m <sup>2</sup> ; 75 s; spray	SP4 – 80 g/m <sup>2</sup> ; 70 s; spray
54%	47%	60%	27%	27%

Fonte: elaborado pelo autor (2023).

Pelo que foi demonstrado nas imagens, de forma geral, as situações SA, SP1 e SP2 apresentaram comportamento diferente de SP3 e SP4. Nas três primeiras, em ordem decrescente, é perceptível a dispersão da ruptura originada na linha de cola para a região da interfase adesivo-madeira, onde o adesivo penetra e acontece o fenômeno da colagem, conforme detalhado na Figura 19a.

Em SP3 e SP4, ocorre um comportamento diferente, em que não há a propagação da fratura, limitando-se apenas à linha de cola (Figura 19b). Isso pode ser explicado pela baixa quantidade de adesivo aplicada, não havendo conteúdo suficiente para a penetração no substrato da madeira e para o vínculo entre os dois substratos.

Figura 19 – Detalhamento da região fraturada com comportamento comum entre SA, SP1 e SP2 (a) e comum entre SP3 e SP4 (b).



Fonte: elaborada pelo autor (2023).

Novosel et al. (2022) destacam que a fratura desejável para esse tipo de teste deve apresentar a propagação para além do substrato da madeira, representando indícios de boa adesão. Esse fenômeno, denominado de falha dominante, indica que a força de adesão é maior que a resistência de coesão na superfície da madeira a ser aderida. O percentual de falha da madeira (Tabela 6) maior em SA, SP1 e SP2 (maiores gramaturas) podem ser usados para representar, numericamente, essa característica.

Entende-se, então, que a combinação gramatura e tempo de prensagem influenciam fortemente na penetração do adesivo no substrato da madeira. O método de aplicação não foi o fator de maior influência nesse caso, pois todas as situações propostas utilizaram o spray e houve diferença entre os conjuntos SP1 e SP2 (maior gramatura) e SP3 e SP4 (menor gramatura).

Pela visualização gráfica, a divergência de comportamento representada nas imagens pôde ser corroborada. Nos comportamentos SA, SP1 e SP2, é possível perceber duas linhas crescentes, a primeira maior que a segunda, e as duas com uma queda repentina após atingir um pico, até a total ruptura do espécime. Isso pode ser traduzido pela ruptura parcial originada na linha de cola e alastrada pela região da união, mas sem separação total das duas partes do corpo-de-prova, já que a interfase adesivo-madeira está comprometida. Após esse resultado parcial, a força aplicada pelo equipamento diminui drasticamente, até voltar a aumentar. O outro pico da reta crescente é representado pela fratura da madeira, na região demonstrada no Quadro 6. O trajeto até o outro pico pode ser entendido como o esforço necessário para fraturar a madeira, sendo, nesse caso, menor que o esforço necessário para alcançar a ruptura total da região da linha de cola.

Nos gráficos de SP3 e SP4 a curva apresenta apenas um pico, que pode ser entendido como a ruptura total da linha de cola e a separação por completo das duas partes do corpo-de-prova. Isso é consequência da menor resistência da linha de cola à tração normal em comparação com as outras situações. Em complemento, é pertinente complementar que o deslocamento não teve relação direta entre as situações testadas, variando sem dependência de alguma propriedade estudada.

Ainda, em relação aos valores médios encontrados nas cinco situações, as três primeiras ficam na faixa de 1,6 kN enquanto que as duas últimas variam de 1,2 a 1,4 kN, comprovando as piores condições em SP3 e SP4. Vale ressaltar que os valores aqui tratados são relacionados ao experimento de tração normal considerando apenas a relação força e deslocamento, sem envolver a área da linha de cola como listado anteriormente.

Para a discussão dos resultados referente à possibilidade de uso de uma ou mais situações propostas como substituta à atual, inicialmente, foi realizada a comparação entre as médias dentro de cada tipo de teste (três variações de cisalhamento e tração normal), para averiguar a existência ou não de diferença significativa entre as médias (SA, SP1, SP2, SP3 e SP4).

Tabela 7 – Análise de variância entre as médias das situações dentro de cada teste realizado.

	Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-p
Resistência ao cisalhamento à seco	Situações	4	6142,852	1535,713	27,193	0,000
	Erro	35	1976,638	56,475		
	Total	39	8119,491			
Resistência ao cisalhamento à alta temperatura	Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-p
	Situações	4	2191,297	547,824	28,311	0,000
	Erro	35	677,247	19,350		
	Total	39	2868,543			
Resistência ao cisalhamento por imersão em água	Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-p
	Situações	4	4471,608	1117,902	56,485	0,000
	Erro	35	692,688	19,791		
	Total	39	5164,296			
Resistência à tração normal	Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-p
	Situações	4	74,842	18,710	6,769	0,001
	Erro	25	69,098	2,764		
	Total	29	143,940			

Fonte: elaborado pelo autor (2023).

Conforme dados da Tabela 7, os resultados de  $p < 0,05$  (nível de significância de 95%) para todos os testes realizados indicam que, entre as médias de SA, SP1, SP2, SP3 e SP4 para cada tipo de teste, há diferença significativa. Percebida essa diferença, já é possível afirmar que uma ou mais situações propostas (SPn) não serão possíveis substitutas à situação atual.

Para chegar à conclusão de qual das situações propostas podem ser substitutas à atual, as análises estatísticas estão dispostas na Tabela 8, onde estão representados os quatro tipos de ensaio realizados (cisalhamento em três condições e tração normal à linha de cola) e as respectivas comparações estatísticas de cada situação proposta (SPn) com a situação atual (SA). Para cada comparação, há um intervalo de confiança (IC), ilustrado pelas linhas horizontais azuis, que determina a faixa provável que o valor estatístico obtido da comparação pode estar, ao considerar determinado grau de probabilidade ou confiança. Caso haja a intercepção entre esse intervalo e a linha vertical verde, significa que não há diferença significativa entre os valores comparados, representando graficamente o indicado nas colunas p.

Tabela 8 – Análise estatística comparativa entre situação atual e propostas, para os quatro testes realizados.

Resistência ao cisalhamento à seco				
	Situações comparadas	Diferença de médias	IC de 95%	P
	SP1 - SA	11,60	(0,78; 22,41)	0,030
	SP2 - SA	-5,54	(-16,36; 5,27)	0,585
	SP3 - SA	-15,99	(-26,81; -5,18)	0,001
SP4 - SA	-24,04	(-34,85; -13,22)	0,000	
Resistência ao cisalhamento à alta temperatura				
	Situações comparadas	Diferença de médias	IC de 95%	p
	SP1 - SA	3,72	(-2,61; 10,05)	0,453
	SP2 - SA	-4,68	(-11,01; 1,65)	0,231
	SP3 - SA	-11,80	(-18,13; -5,47)	0,000
SP4 - SA	-16,40	(-22,73; -10,07)	0,000	
Resistência ao cisalhamento por imersão em água				
	Situações comparadas	Diferença de médias	IC de 95%	p
	SP1 - SA	2,94	(-3,46; 9,35)	0,679
	SP2 - SA	2,41	(-3,99; 8,81)	0,814
	SP3 - SA	-16,87	(-23,27; -10,47)	0,000
SP4 - SA	-22,02	(-28,42; -15,61)	0,000	
Resistência à tração normal				
	Situações comparadas	Diferença de médias	IC de 95%	p
	SP1 - SA	-0,37	(-3,18; 2,46)	0,995
	SP2 - SA	-0,49	(-3,31; 2,34)	0,986
	SP3 - SA	-3,15	(-5,97; -0,33)	0,023
SP4 - SA	-3,79	(-6,60; -0,97)	0,005	

Fonte: elaborado pelo autor (2023). As análises foram realizadas com grau de confiança de 95%, ou seja, valores de  $p \leq 0,05$  indicam diferença significativa entre os valores comparados.

De início, na comparação entre as situações propostas e a atual (Tabela 8), para validação de uma proposta alternativa nos valores de cisalhamento a seco, nota-se a média da SP1 e seu intervalo à direita da linha vertical delimitada em zero. Isso significa uma diferença significativa, porém, como a média contempla um valor maior que SA, esse se torna válido. Ainda, a SP2 valor de  $p > 0,05$ , o que indica semelhança estatística e talvez a possibilidade de uso da situação proposta. Da mesma maneira ocorre para os outros dois testes de cisalhamento (a seco e à alta temperatura) e o de tração normal à linha de cola, que confirmam a semelhança significativa em comparação à situação atual (SA).

Com essas constatações, é possível estabelecer a relação entre os resultados numéricos obtidos e as propriedades modificadas para a realização dos testes. Nota-se a maior influência da gramatura do adesivo aplicada em relação ao tempo de prensagem demonstrada pelo melhor comportamento de SP1 e SP2, mas, essa última propriedade também tem seu grau de importância. Isso pôde ser observado pela semelhança significativa apontada entre as médias de SP2 e SP3 no teste de cisalhamento a seco e entre os valores encontrados em SP1, SP2 e SP3 no teste de tração normal, em que somente a combinação do maior tempo de prensagem com a menor gramatura foi capaz de obter esse alcance estatístico.

Outro ponto pertinente de discussão é a superação ou aproximação (no caso da tração) do resultado médio da situação atual, mesmo sendo utilizadas gramaturas e tempos de prensagem menores do que os comumente utilizados na literatura. Por essa condição, entende-se que o método de aplicação de cola, que foi outra propriedade modificada, também tem significativa influência sobre os resultados.

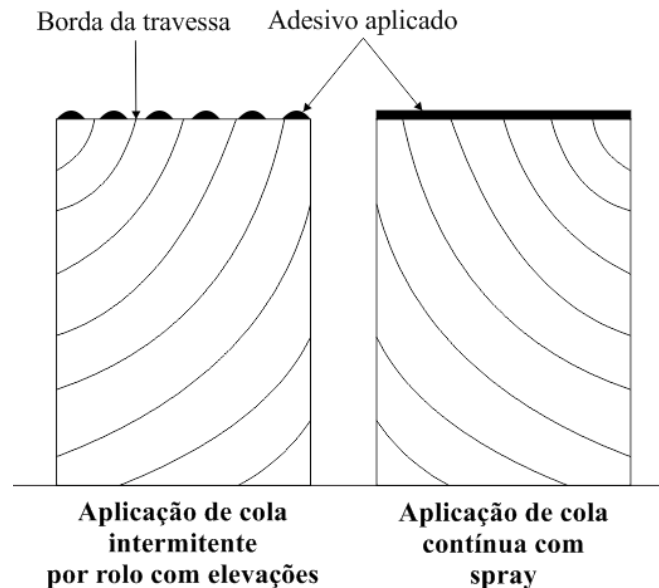
Dentre as pesquisas consultadas, são diversos os métodos de aplicação de adesivo utilizados, o que pode ter relação com a praticidade proveniente de cada um. Foram relatados desde métodos mais comuns nesse tipo de processo, envolvendo spray, pincel e rolo (LIMA, 2016; HAZIR; KOC, 2021), até utilizações menos recorrentes (quando considerada a velocidade de produção como fator decisório), como aplicação por bisnaga, imersão e espátula (MARTINS, 2011; KLÄUSLER et al., 2014).

Em sua pesquisa sobre a qualidade da colagem de EGP, Amparado (2008) salienta que o método de aplicação por pincel foi escolhido para a garantia do espalhamento da resina em toda a superfície do substrato da madeira a ser fixado. Nesse sentido, a razão da existência da variedade observada de procedimentos para espalhamento do adesivo pode ser: o fornecimento de uma camada menos espessa de cola, a viscosidade elevada e a maleabilidade do adesivo, disponibilidade de ferramentas e maquinário, dentre outros.



Essa necessidade da deposição de adesivo em toda a superfície a ser colada, de maneira uniforme e sem excesso, corroborada por Marra (1992 apud IWAKIRI et al., 2021), desperta a discussão da comparação entre os dois métodos aqui testados, ilustrados na Figura 20.

Figura 20 – Ilustração comparativa do adesivo depositado pelos dois métodos de aplicação de adesivo (atual e proposto).



Fonte: elaborada pelo autor (2023).

O procedimento atual adotado pela empresa implica na deposição do adesivo por um rolo levemente dentado, o que acaba resultando na aplicação desigual do adesivo, em relação à espessura da camada. O que acaba espalhando o material até a formação da camada adesiva é o processo de prensagem, porém, se não houver adesivo suficiente para a distribuição uniforme em toda a superfície, irão surgir regiões deficientes de material ligante que, conseqüentemente comprometerão o desempenho mecânico da união. Esse fenômeno pode explicar a ineficiência do uso de menores gramaturas de adesivo mantendo o processo de aplicação atual.

Nesse sentido, pesquisas como as de Bekhta, Niemz e Sedliacik (2012) e Tong, Bohm e Song (2013) enfatizam as qualidades da aplicação do spray como: a versatilidade em relação à cobertura de substratos, a facilidade de adaptação à diversas condições e custo relativamente baixo. Por isso, os autores recomendam que esse método seja estudado com mais detalhamento para que seja cada vez mais aprimorado.

Em complemento, um fator que pode estar relacionado à essa possível falha no espalhamento é o comportamento do adesivo em alta temperatura, conforme citam Stoeckel, Konnerth e Gindl-Altmutter (2013). O PVAc, assim como outros adesivos que utilizam a água como solvente, tendem a solidificar mais rapidamente pela perda desse solvente, que é mais intensa em trabalhos a alta temperatura, como a prensagem por alta frequência. Essa propriedade pode acarretar a pré-gelatinização, ou seja, a solidificação do adesivo antes do tempo, prejudicando formação da camada de adesivo uniforme e, conseqüentemente, a resistência da junta adesiva.

Interligadas a isso estão as propriedades do adesivo, como o teor de sólidos e a viscosidade, em que, o nível utilizado na primeira, juntamente com outras propriedades, fornecerá a característica da segunda. Como percebido nos testes realizados, a viscosidade é fornecida acima do nível recomendado pelo próprio fabricante, o que indica a maior dificuldade de derramamento pela superfície. O ajuste dessa propriedade, conforme corroborado por Paris e Kamke (2015), sem o comprometimento dos demais componentes do material, poderia oferecer melhores condições para a uniformização da camada adesiva pelo melhor espalhamento da cola, tanto para o método citado (rolo) quanto para os outros. Esse ajuste deve ser feito com avaliação de cada situação em particular, devido aos inúmeros processos de colagem de madeira existentes.

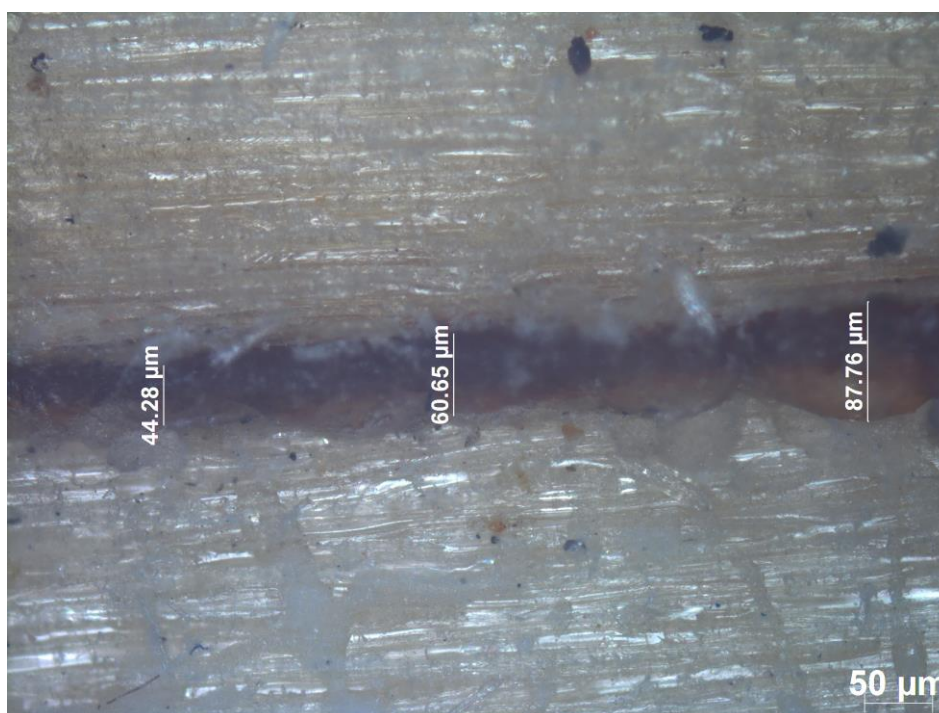
Como resultado complementar do estudo da colagem de madeira, foi realizada a análise da linha de cola para averiguar o seu comportamento. Para isso, foram efetuadas medidas aproximadas (Tabela 9) do espaço entre os substratos da madeira que foram fixados, a fim de determinar a espessura aproximada da linha de cola, conforme método demonstrado na Figura 21.

Tabela 9 – Médias e desvios-padrão obtidos nas medições das linhas de cola, em mm.

SA	SP1	SP2	SP3	SP4
0,047 ± 0,017	0,053 ± 0,021	0,078 ± 0,024	0,061 ± 0,025	0,050 ± 0,016

Fonte: elaborada pelo autor (2023).

Figura 21 – Medição da espessura da linha de cola.



Fonte: Laboratório de Metalografia da Universidade de Passo Fundo (2022).

De acordo com a abordagem sobre os fenômenos que podem existir na colagem de madeira citados por Frihart e Hunt (2021) e devido à complexidade do estudo desse processo, que envolve muitas variáveis, é possível sintetizar a colagem como um resultado de vários desses fenômenos.

Conforme citado pelos autores, a fixação entre substratos da madeira ocorre nas regiões transitórias entre adesivo e madeira (destacadas como 4, 5, 6 e 7 na Figura 7). Dentre as teorias citadas (ÜLKER, 2016; SHIRMOHAMMADI; LEGGATE, 2021), respectivamente, a do intertravamento ocorre na superfície de contato entre adesivo e madeira onde há a rugosidade (regiões 4 e 5) e a do molhamento abrange, além dessas, as regiões 6 e 7, através da penetração do adesivo pelos poros. Em complemento, nas regiões 1, 2 e 3 ocorrem os processos de coesão e adesão do adesivo pelas interações intermolecular e com o substrato. Ainda, levando em conta as propriedades dinâmicas da madeira, as regiões 8 e 9 podem apresentar variações nos níveis de componentes, relacionando o interior e o substrato (IWAKIRI, 2005), o que pode colaborar também para o bom desempenho da colagem. Em suma, não há uma única teoria que explique a colagem da madeira, vistas todas as influências que podem existir, sendo necessárias melhores técnicas de avaliação (HASS et al., 2012).

Em relação aos valores de espessura da linha de cola, encontrados aqui vão ao encontro dos demonstrados por Shirmohammadi e Leggate (2021) utilizando a madeira de

*Pinus taeda* L. e adesivo, ligeiramente inferiores a 0,1 mm. É possível comparar, também, a estudos como o de Kurt (2006), em que, ao utilizar madeira de densidade média e o adesivo sintético fenol-resorcinol-formaldeído, obteve valores de resistência ao cisalhamento (na faixa de 70 kgf/cm<sup>2</sup>) com diferença significativa em situações onde a linha de cola apresentou espessura maior de 0,25 mm. Nota-se que cada adesivo possui relações diferentes com cada tipo de substrato, podendo haver diferenças na espessura de linha de cola adequada.

As dimensões aqui obtidas não apresentam diferenças significativas entre elas, mas encontram-se em um intervalo válido pela literatura. O método utilizado não permite avaliar a exata espessura da linha de cola, isto é, não considera, por exemplo, a presença de picos e vales originados por tratamentos de superfície e por características anatômicas. Por isso, a espessura aqui obtida pode ser considerada como aproximada.

Ainda, ao avaliar a linha de cola da madeira de *Pinus* com o adesivo PVAc, Bianche (2014) percebeu o decréscimo da espessura da linha (de 0,128 mm para 0,024 mm) conforme o aumento da gramatura do adesivo (150 g/m<sup>2</sup> para 250 g/m<sup>2</sup>), o que pode significar a velocidade elevada da cura do adesivo pela menor quantidade depositada e diminuição da penetração no substrato, ocasionando a espessura elevada, o que vai ao encontro da pesquisa de Kamke e Lee (2007). Com o aumento da taxa de espalhamento, o adesivo não cura tão rápido, consegue trabalhar, e a penetração é maior, o que pode explicar linha com menor espessura, aliada também às condições de prensagem adotadas, conforme cita a autora.

Em outra pesquisa, ao aumentar a densidade da madeira de seringueira (*Hevea brasiliensis* (Willd. ex A. Juss.) Müll. Arg.) por compressão mecânica (diminuindo, conseqüentemente, a porosidade) e aplicando o lixamento como tratamento superficial, Meethaworn, Srivaro e Khongtong (2022), perceberam as maiores espessuras da linha de cola (0,065-0,08 mm) com lixamentos de menor grão, decrescendo até valores na faixa de 0,02 mm. Ao mesmo tempo, os melhores resultados de resistência ao cisalhamento (150-225 kgf/cm<sup>2</sup>) ocorrem em superfícies tratadas com lixas de grão intermediário, em que a linha de cola tem espessura média variante de 0,03 mm a 0,06 mm e há o molhamento equilibrado do substrato a ser colado. Isso confirma a hipótese da relação entre diferentes variáveis para o êxito do processo de colagem.

## 5 CONCLUSÃO

Em relação às caracterizações realizadas, inicialmente, para o adesivo, apenas a viscosidade apresentou valores divergentes do intervalo estabelecido. O elevado valor encontrado, mesmo com a diluição máxima permitida, pode ser o causador de problemas de fluidez e penetração insuficiente do adesivo no substrato da madeira. Entretanto, algumas pesquisas apresentaram boas condições de colagem com valores altos para a viscosidade, o que aumenta as condições possíveis de uso do adesivo.

Para a madeira, em contrapartida às outras propriedades mensuradas para o material, apenas o encurvamento, diferentemente do arqueamento, apresentou um valor ligeiramente maior que o indicado, possivelmente pelo tratamento inadequado no processo de secagem antecedente à colagem e pela anisotropia do material.

Quanto às propriedades do processo, a única caracterizada foi a gramatura, que, pelo método atual, respeita o indicado pela maioria dos autores. Tanto essa propriedade, quanto o método de aplicação do adesivo, foram considerados comuns ao seu uso. As alterações propostas, com constatações semelhantes já documentadas, interligam-se ao objetivo principal do trabalho.

É importante salientar, se tratando das condições de prensagem, o alto valor utilizado para a pressão de prensagem, que pode ser explicado pela compensação do pequeno tempo de prensagem, ou seja, o primeiro pode ter esse valor para suprir o segundo, em razão da agilidade do processo.

Sobre a resistência ao cisalhamento, apenas os valores médios encontrados em SA, SP1 e SP2 superaram os limites mínimos normativos. Em avaliação conjunta com os valores de tração, foram encontrados valores próximos e equivalentes aos já documentados, considerando as particularidades e o foco de cada pesquisa.

Em síntese, dentre as situações propostas, SP1 e SP2 foram as que obtiveram as melhores médias nos quatro testes realizados, ou seja, a variável gramatura foi mais influente para a determinação dos resultados do que o tempo de prensagem. Esse comportamento pôde ser visualizado no estudo da geometria da região da ruptura nos corpos-de-prova do teste de tração, onde foi perceptível a melhor interação entre adesivo e substrato da madeira.

Na comparação estatística entre as situações propostas e a atual (valores de referência), foi possível perceber a ausência de diferença significativa entre SA e SP1 e SA e SP2, isto é, as duas situações propostas podem ser utilizadas como substitutas à situação atual. Como SP2

tem o tempo de prensagem menor (70 segundos), essa poderia ser escolhida para substituição efetiva pelo menor tempo de processamento. Para efetivação da substituição do método de aplicação, seria necessário todo o estudo para adequação e melhoramento do maquinário, equipamentos e materiais, além da avaliação das condições de processamento para garantir a maior eficiência do novo processo.

Um fator que teve forte influência para esses resultados foi o espalhamento do adesivo por toda a superfície, oriundo da aplicação por spray. O método atual, que contempla a aplicação intermitente por rolo aliado às propriedades do processo e do adesivo, pode colaborar para a aplicação incorreta ou insuficiente da cola, resultando na deficiência da linha de cola, se o adesivo for aplicado em menores quantidades.

Os valores médios das espessuras da linha de cola mensuradas permanecem na faixa indicada pelos autores, mesmo tendo a variação de processamento em todas as amostras analisadas. Apenas com as mensurações físicas realizadas, não é possível chegar a uma diferença perceptível entre todas as situações.

## **5.1 Recomendações para trabalhos futuros**

Na literatura existente sobre o processo de colagem de madeira, são citados inúmeros fatores que influenciam no desempenho da união adesiva. Por isso, para servir de orientação para os pesquisadores da área e para os demais profissionais interessados, além de enriquecer a literatura, estudos para a definição de uma ordem de importância entre esses fatores seriam de grande valia.

Em relação ao método de aplicação de cola, que foi o foco principal dessa pesquisa, há poucos trabalhos que tratem esse fator como importante para o processo de colagem, muitas vezes nem citado. Pelo que foi percebido aqui, ele pode ser importante, dados os resultados da pesquisa. Novos trabalhos comparando diferentes métodos de aplicação de adesivo seriam indispensáveis para ajudar a compreender a importância desse fator.

Para complementar as pesquisas sobre esses diferentes meios de aplicação, novas pesquisas sobre infraestrutura devem ser desenvolvidas, com informações sobre: cálculos de custos e viabilidade financeira envolvidos para a implantação de um novo método ou para a comparação entre dois ou mais; cálculos e esquemas de métodos e processos, para quantificar tempos, eficiências e índices de melhoria; equipamentos e automatização necessários; e, sobre dificuldades enfrentadas com todos os recursos envolvidos.

Em específico, sobre a aplicação de adesivo por spray, a literatura carece de pesquisas sobre esse assunto, tendo mais conteúdo sobre cobertura de superfícies e revestimentos. Relacionando com madeira, as pesquisas se limitam à investigação do spray em colagem de chapas, do tipo multilaminadas, pois esse método tem melhor comportamento em maiores superfícies, porém, como qualquer outro tipo de aplicação, pesquisas mais abrangentes devem ser desenvolvidas para melhor compreensão desse método.

## REFERÊNCIAS

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 4287**: Especificações geométricas do produto (GPS) – Rugosidade: método do perfil-termos, definições e parâmetros da rugosidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2002.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190**: Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8877**: Adesivos – Determinação do teor de sólidos. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11700**: Madeira serrada de coníferas provenientes de reflorestamento para uso geral – Classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 1991.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12297**: Madeira serrada de coníferas provenientes de reflorestamento para uso geral – Medição e quantificação de defeitos. Rio de Janeiro: ABNT, 1991.
- ABTCP - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA TÉCNICA DE CELULOSE E PAPEL. **Normas técnicas**. São Paulo: ABTCP, 1974.
- ABPM – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE MADEIRA. **Catálogo de normas de madeira serrada de Pinus**. Caxias do Sul: Spectrum Comunicação, 1991.
- ABIMCI – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE MADEIRA PROCESSADA MECANICAMENTE. **Estudo setorial 2009 ano base 2008**. Curitiba: ABIMCI, 2009.
- \_\_\_\_\_. **Estudo setorial 2019 ano base 2018**. Palmas: Gráfica e Editora Kayganguê, 2019.
- ALBINO, V. C. do S.; MORI, F. A.; MENDES, L. M. Estudo da interface madeira-adesivo de juntas coladas com resorcinol-formaldeído e madeira de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 87, p. 509-516, set. 2010.
- \_\_\_\_\_. 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**, Santa Maria, v. 22, n. 4, p. 803-811, out./dez. 2012.
- ALMEIDA, C. C. F. de; CUNHA, A. B. da; RIOS, P. D. Avaliação da qualidade da colagem de topo da madeira de *Cupressus lusitanica* Mill. para a produção de painéis colados lateralmente. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 45, n. 113, p. 9-19, mar. 2017.
- ALMEIDA, V. C. **Efeito da adição de carga e extensor nas propriedades do adesivo uréia-formaldeído e dos compensados de Pinus e Paricá**. 2009. 86 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2009.



\_\_\_\_\_. **Avaliação do potencial de uso de resíduos de madeira tropical para produção de painéis colados lateralmente – EGP**. 2013. 123 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

ALMEIDA, O. C. P. de. **Classificação de tábuas de madeira usando processamento de imagens digitais e aprendizado de máquina**. 2014. 120 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2014.

AMPARADO, K. de F. **Qualidade da madeira serrada e dos painéis colados lateralmente obtidos de um plantio de *Eucalyptus saligna* Smith visando o segmento moveleiro**. 2008. 47 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais e Florestais / Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais) – Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2008.

APA – THE ENGINEERED WOOD ASSOCIATION. **Engineered wood: construction guide**. Washington: APA, 2019.

ARAUJO, R. D. de. et al. Surface roughness of edge glued panels (EGP) of amazon managed species. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 43, p. 1-8, 2019.

ASHORI, A.; NOURBAKHSI, A.; KAREGARFARD, A. Properties of Medium Density Fiberboard based on bagasse fibers. **Journal of Composite Materials**, Thousand Oaks, v. 43, n. 18, p. 1927-1934, jul. 2009.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D1102-84 (2007)**: Standard test method for ash in wood. Pennsylvania: ASTM, 2007.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D2196-18e1 (2018)**: Standard test methods for rheological properties of non-newtonian materials by rotational viscometer. Pennsylvania: ASTM, 2005.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D5751-99 (2005)**: Standard specification for adhesives used for laminate joints in nonstructural lumber products. Pennsylvania: ASTM, 2005.

AVRAMIDIS, G. et al. Accelerated curing of PVAc adhesive on plasma-treated wood veneers. **European Journal of Wood and Wood Products**, Berlin, v. 69, n. 2, p. 329-332, 2010.

BANDEL, A. **Adhesivos y tecnología del encolado en la industria de la madera**. Milano: Rib&s, 1991.

BARBOUTIS, I.; KAMPERIDOU, V. Shear strength of beech wood joints bonded with commercially produced PVAc D3 adhesives. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, Oxford, v. 105, p. 102774, mar. 2021.

BECKER, J. L. **Influência das variáveis do processo de colagem na resistência da ligação adesiva de painéis EGP**. 2011. 59 f. Monografia (Bacharel em Engenharia Industrial Madeireira) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

BEKHTA, P.; NIEMZ, P.; SEDLIACIK, J. Effect of pre-pressing of veneer on the glueability and properties of veneer-based products. **European Journal of Wood and Wood Products**, Berlin, v. 70, p. 99-106, set. 2012.

BERGMAN, R. D.; SIMPSON, W. T.; TURK, C. Evaluating warp of 2 by 4s sawn from panels produced through green gluing dimension lumber from small ponderosa pine logs. **Forest Products Journal**, LaGrange, v. 60, n. 1, p. 57-63, 2010.

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

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

BIAZZON, J. C. **Influência da velocidade de avanço no aplainamento da madeira sobre o desempenho de colagem com adesivos à base de poliacetato de vinila**. 2016. 177 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica / Processos de Fabricação) – Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2016.

\_\_\_\_\_. **Análise da resistência da área de colagem na produção de painéis sarrafeados empregando-se adesivo poliuretano**. 2018. 107 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica / Processos de Fabricação) – Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2018.

BILA, N. F. **Avaliação da qualidade de juntas coladas de seis espécies de madeiras tropicais da Amazônia**. 2014. 74 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal / Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

BINNI AGROFLORESTAL. **Resumo público de manejo florestal: Fazenda São Geraldo – Esmeralda/RS**. Canoas: RDK Logs, 2019. Disponível em: <<http://www.binniagroflorestal.com.br/resumo2.pdf>>. Acesso em: 15 jun. 2022.

BOCKEL, S. et al. Influence of wood extractives on two-component polyurethane adhesive for structural hardwood bonding. **The Journal of Adhesion**, Philadelphia, v. 94, n. 10, p. 829-845, dec. 2017.

BOLGENHAGEN, A. **Avaliação comparada dos parâmetros que influenciam na colagem lateral de painéis de madeira de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda***. 2018. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos) – Universidade da Região de Joinville, Joinville, 2018.

BOMBA, J. et al. Strength increase pattern in joints bonded with PVAc adhesives. **BioResources**, Raleigh, v. 9, n. 1, p. 1027-1037, 2014a.

BOMBA, J. et al. Influence of moisture content on the bond strength and water resistance of bonded wood joints. **BioResources**, Raleigh, v. 9, n. 3, p. 5208-5218, 2014b.

BRASHAW, B. Sounding, probing, moisture content, and resistance drilling techniques. In: WHITE, R. H.; ROSS, R. J. (Eds.). **Wood and timber condition assessment manual**. 2. ed. Madison: U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2014. p. 5-12.

BRENCHLEY, T. **Viscosity measurements using a multiple frequency matching layer viscometer**. 2021. Tese (Doutorado) – Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Sheffield, Sheffield, 2021.

BU, F. et al. Effects of the preparation conditions and reinforcement mechanism of polyvinyl acetate soil stabilizer. **Polymers**, Basel, v. 11, n. 3, p. 506-520, mar. 2019.

BUSTOS, C. et al. Structural performance of finger-jointed black spruce wood lumber with different joint configurations. **Forest Products Journal**, LaGrange, v. 53, n. 9, p. 72-76, 2003.

CHIOZZA, F.; PIZZO, B. Innovation in poly(vinyl acetate) water resistant D3 glues used in wood industry. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, Oxford, v. 70, p. 102-109, out. 2016.

CORADIN, V. T. R.; CAMARGOS, J. A. A. **A estrutura anatômica da madeira e princípios para a sua identificação**. Brasília: LPF, 2002.

COSTA, V. E. **Caracterização físico-energética da madeira e produtividade de reflorestamentos de clones de híbridos de *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla***. 2006. 99 f. Tese (Doutorado em Agronomia / Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2006.

CRANG, R.; LYONS-SOBASKI, S.; WISE, R. Wood: economics, structure, and composition. In: \_\_\_\_\_. **Plant Anatomy: a concept-based approach to the structure of seed plants**. Cham: Springer Nature Switzerland, 2018. p. 509-551.

DANIELLI, D. et al. Application of *Myrcia splendens* tannins in the composition of urea-formaldehyde adhesive for sustainable wood bonding. **Research, Society and Development**, Vargem Grande Paulista, v. 10, n. 12, p. e370101220543, set. 2021.

DARMAWAN, W. et al. Influence of surface roughness of ten tropical woods species on their surface free energy, varnishes wettability and bonding quality. **Pigment & Resin Technology**, Bingley, v. 49, n. 6, p. 441-447, abr. 2020.

DAVIS, G. The performance of adhesive systems for structural timbers. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, Oxford, v. 17, n. 3, p. 247-255, 1997.

DIAS, R. R. **Avaliação da influência de variáveis na produção de batentes de painel EGP de *Pinus taeda***. 2016. 119 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica / Materiais) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016.

DILIK, T.; ERDINLER, S.; KURTOGLU, A. Edge glued wood panel technology and an assessment on the development of edge glued wood panel industry. **American Journal of Applied Sciences**, Mesa, v. 9, n. 10, p. 1625-1635, 2012.

DINTE, E.; SYLVESTER, B. Adhesives: applications and recent advances. In: ÖZER, H. (Ed.). **Applied adhesive bonding in science and technology**. London: IntechOpen, 2018. p. 141-156.

DUNCAN, B. et al. **A review of adhesive bonding assembly processes and measurement methods**. Teddington: NPL, 2003. (NPL Report MATC(A)135).

DUNKY, M. Adhesives in the wood industry. In: PIZZI, A.; MITTAL, K. L. (Eds.). **Handbook of adhesive technology**. 2. ed. New York: Marcel Dekker, 2003. p. 872-941.

ENDO, C.; TRIANOSKI, R.; IWAKIRI, S. Produção de EGP com diferentes adesivos PVAc e sistemas de prensagem. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 24, p. 1-9, ago. 2017.

EUROPEAN STANDARDS. **DIN EN 204**: Classification of thermoplastic wood adhesives for non-structural applications. 2016.

FAGUNDES, H. A. V. **Diagnóstico da produção de madeira serrada e geração de resíduos do processamento de madeira de florestas plantadas no Rio Grande do Sul**. 2003. 173 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil / Inovação na Edificação) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

FOGAÇA, A. P. **Determinação da qualidade de colagem e desempenho mecânico de painéis EGP comerciais**. 2014. 56 f. Monografia (Bacharel em Engenharia Industrial Madeireira) – Universidade Estadual Paulista, Itapeva, 2014.

FONTE, A. P. N.; TRIANOSKI, R. Efeito da gramatura sobre a qualidade de colagem lateral da madeira de *Tectona grandis*. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Lages, v. 14, n. 3, p. 224-233, nov. 2015.

FOTOVVATI, B.; NAMDARI, N.; DEGHANGHADIKOLAEI, A. On coating techniques for surface protection: a review. **Journal of Manufacturing and Materials Processing**, Basel, v. 3, n. 1, p. 28-49, mar. 2019.

FRIHART, C. R. Adhesive penetration of wood and its effect on bond strength. In: ANNUAL MEETING, 39, 2016, San Antonio. **Proceedings...** San Antonio: The Adesion Society, 2016. pág. irregular.

FRIHART, C. R.; HUNT, C. G. Adhesives with wood materials: bond formation and performance. In: FOREST PRODUCTS LABORATORY. **Wood handbook** – Wood as an engineering material. Madison: U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2021. pág. irregular. (General Technical Report FPL-GTR-282).

FOLLRICH, J. et al. Effect of grain angle on shear strength of glued end grain to flat joints of defect-free softwood timber. **Wood Science and Technology**, Berlin, v. 41, n. 6, p. 501-509, abr. 2007.

FUNCHAL, M. Comportamento da produção e comércio mundial de produtos florestais. **O Papel**, Itaim Bibi, p. 22-28, mar. 2021.

GEFFERT, A.; GEFFERTOVA, J.; DUDIÁK, M. Direct method of measuring the pH value of wood. **Forests**, Basel, v. 10, n. 10, p. 852-860, set. 2019.

GREEN, D. W.; WINANDY, J. E.; KRETSCHMANN, D. E. Mechanical properties of wood. In: FOREST PRODUCTS LABORATORY. **Wood handbook** – Wood as an engineering material. Madison: U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1999. pág. irregular. (General Technical Report FPL-GTR-113).

GUMA, R. L. **Propriedades tecnológicas da madeira de *Tetrorchidium rubrivenium* Poeppig & Endlicher**. 2013. 62 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal / Tecnologia de Produtos Florestais) – Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2013.

HÄNSEL, A. et al. Selected previous findings on the factors influencing the gluing quality of solid wood products in timber construction and possible developments: a review. **Wood Material Science and Engineering**, Alnarp, v. 17, n. 3, p. 230-241, may 2021.

HARDING, V. **Glues and gluing wood**. Baton Rouge: LSU Agricultural Center, 2010. (Publication No. 2587).

HARTE, A. Introduction to timber as an engineering material. In: FORDE, M. (Ed.). **ICE manual of construction materials: fundamentals and theory; metals and alloys**. London: Institute of Civil Engineers Publisher, 2009. p. 708-716.

HASS, P. et al. Influence of growth ring angle, adhesive system and viscosity on the shear strength of adhesive bonds. **Wood Material Science and Engineering**, Alnarp, v. 4, n. 3-4, p. 140-146, set. 2009.

HASS, P. et al. Adhesive penetration in beech wood: experiments. **Wood Science and Technology**, Berlin, v. 46, p. 243-256, 2012.

HAUBRICH, J. L.; GONÇALVES, C.; TONET, A. Adesivos vinílicos apresentam soluções para madeira. **Revista da Madeira**, Curitiba, v. 103, p. 66-70, 2007.

HAZIR, E.; KOC, K. H. Evaluation of wood-based coating performance for ultraviolet roller and conventional air-atomization processes. **Maderas. Ciencia y Tecnología**, Concepción, v. 23, n. 12, p. 1-10, 2021.

HERRERA-DÍAZ, R. et al. Effect of wood drying and heat modification on some physical and mechanical properties of Radiata Pine. **Drying Technology**, United Kingdom, v. 36, n. 5, p. 537-544, ago. 2017.

HOW, S. S. et al. **Factors influencing the quality of wood adhesion – part 2: glue spreading**. Kepong: Forest Research Institute Malaysia, 2017. (Timber Technology Bulletin No. 78).

INDUSTRIEVERBAND KLEBSTOFFE. **Dispersion wood glues**. Düsseldorf: Technische Kommission Holzklebstoffe, 2016. (TKH Technical Briefing Note 3).

IWAKIRI, S. **Painéis de madeira reconstituída**. Curitiba: FUPEF, 2005.

IWAKIRI, S. et al. Produção de painéis aglomerados com misturas de seis espécies de madeiras da Amazônia e *Pinus taeda*. **Floresta**, Curitiba, v. 46, n. 2, p. 259-267, jun. 2016.

IWAKIRI, S. et al. Resistência das juntas coladas de madeiras de *Inga alba* (SW) Willd e *Swartzia recurva* Poepp. **Cerne**, Lavras, v. 21, n. 3, p. 457-463, set. 2015.

IWAKIRI, S. et al. The use of *Eucalyptus camaldulensis* and *Eucalyptus urophylla* wood in the production of edge glued panels. **Floresta**, Curitiba, v. 49, n. 2, p. 317-324, abr./jun. 2019.

IWAKIRI, S. et al. Avaliação dos efeitos do adesivo, gramatura e pressão na qualidade de painéis EGP de *Eucalyptus badjensis*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 49, n. 129, p. e3437, mar. 2021.

IŽDINSKÝ, S. et al. Bonding of selected hardwoods with PVAc adhesive. **Applied Sciences**, Basel, v. 11, n. 1, p. 67-81, dez. 2019.

JANKOWSKA, A. Understanding of surface roughness of wood based on analysis its structure and density. **Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW, Forestry and Wood Technology**, Warsaw, n. 111, p. 27-31, 2020.

JIA, L. et al. Life cycle assessment of plywood manufacturing process in China. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, Basel, v. 16, n. 11, p. 2037-2046, jun. 2019.

KABOORANI, A.; RIEDL, B. Mechanical performance of polyvinyl acetate (PVA)-based biocomposites. In: MISRA, M.; PANDEY, J.; MOHANTY, A. (Eds.). **Biocomposites: design and mechanical performance**. Cambridge: Woodhead Publisher, 2015. p. 347-364.

KAIRI, M. Schraubenverleimungen erlauben neue möglichkeiten im ingenieurholzbau. In: INTERNATIONALES HOLZBAU-FORUM, 1, 2000, Garmisch-Partenkirchen. **Proceedings...** Garmisch-Partenkirchen: INTERNATIONALES HOLZBAU-FORUM, 2000. pág. irregular.

KAMKE, F. A; LEE, J. N. Adhesive penetration in wood – a review. **Wood and Fiber Science**, Hanover, v. 39, n. 2, p. 205-220, 2007.

KAMKE, F. A. et al. Methodology for micromechanical analysis of wood adhesive bonds X-ray computed tomography and numerical modeling. **Wood and Fiber Science**, Hanover, v. 46, n. 1, p. 15-28, 2014.

KILIC, M.; HIZIROGLU, S.; BURDURLU, E. Effect of machining on surface roughness of wood. **Building and Environment**, London, v. 41, n. 8, p. 1074-1078, ago. 2006.

KIM, S. et al. Characteristics on non-plasticizer PVAc resin for wood products. **Journal of the Korean Wood Science and Technology**, Berlin, v. 35, n. 2, p. 61-68, 2007.

KLÄUSLER, O. et al. Improvement of tensile shear strength and wood failure percentage of 1C PUR bonded wooden joints at wet stage by means of DMF priming. **European Journal of Wood and Wood Products**, Berlin, v. 72, n. 3, p. 343-354, fev. 2014.

KLOCK, U.; ANDRADE, A. S. de. **Química da madeira**. 4. ed. rev. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2013.

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

KOCAEFE, D.; HUANG, X.; KOCAEFE, Y. Dimensional stabilization of wood. **Current Forestry Reports**, Switzerland, v. 1, n. 3, p. 151-161, jun. 2015.

KURT, R. Effect of glue line thickness on shear strength of wood-to-wood joints. **Wood Research**, Bratislava, v. 51, n. 1, p. 59-66, 2006.

LAU, P. C. **Produção de painéis de colagem lateral – EGP com madeira de *Populus deltoides***. 2017. 87 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal / Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

LEGGATE, W. et al. Barriers to the effective adhesion of high-density hardwood timbers for glue-laminated beams in Australia. **Forests**, Basel, v. 13, n. 7, p. 1038-1053, jul. 2022.

LEI, H.; FRAZIER, C. E. Curing behavior of melamine-urea-formaldehyde (MUF) resin adhesive. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, Oxford, v. 62, p. 40-44, out. 2015.

LEITE, M. R. M. **Caracterização das costaneiras da madeira de eucalipto para uso na indústria moveleira**. 2005. 73 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais / Análise e Seleção de Materiais) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Belo Horizonte, 2005.

LIMA, R. R. M. de. **Comparação de métodos de colagem para madeira de *Pinus* sp.** 2016. 39 f. Monografia (Bacharel em Engenharia Florestal) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Dois Vizinhos, 2016.

LUNGULEASA, A. et al. Influence of the strand characteristics on the properties of oriented strand boards obtained from resinous and broad-leaved fast-growing species. **Applied Sciences**, Basel, v. 11, n. 4, p. 1784-1796, fev. 2021.

MAGOSS, E. General regularities of wood surface roughness. **Acta Silvatica et Lignaria Hungarica**, Sopron, v. 4, p. 81-93, 2008.

MARRA, A. A. **Technology of wood bonding**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1992.

MARTINS, S. A. **Adequação tecnológica da madeira de *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cabbage para a produção de painéis colados lateralmente (PCL)**. 2011. 114 f.

Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Departamento de Engenharia Florestal, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2011.

MARTINS, S. A. et al. Bonding behavior of *Eucalyptus benthamii* wood to manufacture edge glued panels. **Maderas. Ciencia y Tecnología**, Concepción, v. 15, n. 1, p. 79-92, 2013.

MATTOS, R. L. G.; CHAGAS, F. B. das; GONÇALVES, R. M. Painéis de madeira no Brasil: panorama e perspectivas. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, n. 27, p. 121-156, 2008.

MEETHAWORN, B.; SRIVARO, S.; KHONGTONG, S. High-performance adhesive joint made from densified wood. **Polymers**, Basel, v. 14, n. 3, p. 515-526, jan. 2022.

MELO, R. R. de. et al. Physical and mechanical properties of particleboard manufactured from wood, bamboo and rice husk. **Materials Research**, São Carlos, v. 17, n. 3, p. 682-686, maio 2014.

MELO, S. F. de. et al. Utilização de adesivo PVA com reforço de lignina para a produção de painéis de *Eucalyptus* spp. tratado termicamente. In: OLIVEIRA, R. J. da. **Engenharia florestal: contribuições, análises e práticas em pesquisa**. Guarujá: Editora Científica Digital, 2022. p. 274-290.

MENDES, J. B. Contexto e tendências do mercado da madeira. In: WORKSHOP EMBRAPA FLORESTAS/APRE, 8, 2021, [s.l.]. **Anais...** Brasília: Embrapa, 2021. pág. irregular.

MÖLLEKEN, R. E. **Aplicação do adesivo poliuretano derivado do óleo de mamona na obtenção de painéis de madeira colados lateralmente**. 2017. 77 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica e de Materiais / Engenharia de Materiais) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

MOREIRA, E. L.; FAZION, H.; RIBEIRO, E. S. Variação dos teores de extrativos de três espécies florestais. **Biodiversidade**, Cuiabá, v. 15, n. 2, p. 163-172, 2016.

MORESCHI, J. C. M. **Propriedades da madeira**. 4. ed. rev. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2014.

MUSTEFAGA, E. C. et al. Caracterização físico-mecânica da madeira juvenil de Pinus. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 47, n. 123, p. 472-481, set. 2019.

MUTHIKE, G. M.; GITHIOMI, J. K. **Choice and utilization of adhesives in wood gluing: guidelines for users of wood adhesives**. Nairobi: Kenya Forestry Research Institute, 2011.

NOVOSEL, A. et al. Analysis of bonding mechanisms of various implants and adhesives in laminated oak-wood elements. **Polymers**, Basel, v. 14, n. 24, p. 5373-5388, dez. 2022.

OLIVEIRA, A. C. et al. Parâmetros de qualidade da madeira de do carvão vegetal de *Eucalyptus pellita* F. Muell. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 87, p. 431-439, set. 2010.

OLIVEIRA, F. L. de. et al. Propriedades da madeira de *Pinus taeda* L. em função da idade e da posição radial na tora. **Revista Instituto Florestal**, São Paulo, v. 18, p. 59-70, dez. 2006



ORMONDROYD, G. A.; STEFANOWSKI, B. Fibreboards and their applications. In: ANSELL, M. P. (Ed.). **Wood composites**. Cambridge: Woodhead Publisher, 2015. p. 91-102.

PARIS, J. L.; KAMKE, F. A. Quantitative wood–adhesive penetration with X-ray computed tomography. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, Oxford, v. 61, p. 71-80, set. 2015.

PAZZETTO, V. M. de F. **Efeito da espessura e do vão sobre deformação em flexão de painéis de madeira utilizados na produção de móveis**. 2009. 70 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Departamento de Engenharia Florestal, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

PETRIE, E. M. **Handbook of adhesives and sealants**. 3. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2021.

PLÖTZE, M.; NIEMZ, P. Porosity and pore size distribution of different wood types as determined by mercury intrusion porosimetry. **European Journal of Wood and Wood Products**, Berlin, v. 69, n. 4, p. 649-657, nov. 2010.

PURAGBOLA, A. et al. Surface preparation for structural adhesive joints. In: MITTAL, K. L.; PANIGRAHI, S. K. (Eds.). **Structural adhesive joints: design, analysis and testing**. Beverly: Wiley-Scrivener Publishing, 2020. p. 3-34. (Adhesion and Adhesives: Fundamental and Applied Aspects Series).

RAIA, R. Z.; ROSA, T. S. da; FONTE, A. P. N. da. **Painéis de madeira: da matéria-prima ao acabamento**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2017.

REIS, A. H. S. et al. Physical-mechanical properties of plywood produced with *Acrocarpus fraxinifolius* and *Pinus oocarpa*. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 26, n. 4, pág. irregular, 2019.

RINDLER, A.; HANSMANN, C.; KONNERTH, J. The effect of moisture on the mechanical response of wood, adhesive and their interphase by means of nanoindentation. **Wood Science and Technology**, Berlin, v. 53, n. 4, p. 729-746, may 2019.

RITTER, M. A. **Timber bridges: design, construction, inspection, and maintenance**. Washington: U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1990.

ROHUMAA, A. et al. The effect of surface properties on bond strength of birch, black alder, grey alder and aspen veneers. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, Oxford, v. 110, p. 102945, out. 2021.

RUSAKOV, D. et al. Research of strength of gluing of wood. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, [s.l.], v. 574, n. 1, p. 012070, out. 2020.

SANDBERG, D. Additives in wood products – today and future development. In: KUTNAR, A.; MUTHU, S. S. (Eds.). **Environmental impacts of traditional and innovative forest-based bioproducts**. Singapore: Springer Singapore, 2016. p. 105-172. (Environmental Footprints and Eco-design of Products and Processes Series).

SHIRMOHAMMADI, M.; LEGGATE, W. Review of existing methods for evaluating adhesive bonds in timber products. In: GONG, M. (Ed.). **Engineered wood products for construction**. London: IntechOpen, 2021. pág. irregular.

SILVA, A. L. S. da. **Determinação do teor de cinzas em dez espécies de madeiras amazônicas**. 2018. 39 f. Monografia (Bacharel em Engenharia Florestal) – Centro de Estudos Superiores de Itacoatiara, Universidade do Estado do Amazonas, Itacoatiara, 2018.

SILVA, C. J. da; VALE, A. T. do; MIGUEL, E. P. Densidade básica da madeira de espécies arbóreas de Cerradão no estado de Tocantins. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 82, p. 63, 30 jun. 2015.

SILVA, R. S. **Resistência mecânica da madeira de *Eucalyptus saligna* unidas por adesivo poliuretano para diferentes acabamentos de superfície**. 2013. 102 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica / Materiais) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2013.

SOUZA, G. O. de. **Viabilidade técnica de espécies madeireiras da caatinga para a produção de painéis de madeira colada lateralmente**. 2019. 46 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais / Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais) – Unidade Acadêmica Especializada em Ciências Agrárias, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Macaíba, 2019.

STERLEY, M. **Characterisation of green-glued wood adhesive bonds**. 2012. 67 f. Thesis (PhD) – Faculty of Science and Engineering, Linnaeus University, Växjö, 2012.

STOECKEL, F.; KONNERTH, J.; GINDL-ALTMUTTER, W. Mechanical properties of adhesives for bonding wood – a review. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, Oxford, v. 45, p. 32-41, set. 2013.

SÜTÇÜ, A. Investigation of parameters affecting surface roughness in CNC routing operation on wooden EGP. **BioResources**, Raleigh, v. 8, n. 1, p. 795-805, 2013.

SÜTÇÜ, A.; KARAGÖZ, Ü. The influence of process parameters on the surface roughness in aesthetic machining of wooden Edge-Glued Panels (EGPs). **BioResources**, Raleigh, v. 8, n. 4, p. 5435-5448, 2013.

SZÜCS, C. A. et al. **Estruturas de madeira**. 3. ed. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2015.

TAYLOR, G. et al. **La madera**. Barcelona: Blume, 1978.

THOMA, H.; PERI, L.; LATO, E. Evaluation of wood *surface* roughness depending on species characteristics. **Maderas. Ciencia y Tecnología**, Concepción, v. 17, n. 2, p. 285-292, 2015.

TONG, Y.; BOHM, S.; SONG, M. Graphene based materials and their composites as coatings. **Austin Journal of Nanomedicine & Nanotechnology**, Irving, v. 1, n. 1, p. 1003-1019, dec. 2013.

TOUT, R. A review of adhesives for furniture. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, Oxford, v. 20, n. 4, p. 269-272, 2000.

TRIANOSKI, R.; IWAKIRI, S.; BONDUELLE, G. M. Qualidade das juntas coladas de madeira de cinco espécies de *Eucalyptus* com adesivos acetato de polivinila e resorcina-formaldeído. **Madera y Bosques**, Xalapa, v. 26, n. 3, p. e2632064, 2020.

ÜLKER, O. Wood adhesives and bonding theory. In: RUDAWSKA, A. (Ed.). **Adhesives: applications and properties**. London: IntechOpen, 2016. p. 271-288.

UNECE; FAO. **Forest Products Annual Market Review 2020-2021**. Geneva: United Nations, 2021.

VALE, A. E. do N. et al. Determinação dos teores extrativos e lignina de três espécies amazônicas: Medida de comparação para que não sejam comercializadas como Mogno Brasileiro (*Swietenia macrophylla* King.). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA, 3, 2017, Florianópolis. **Anais...** [s.l.]: Sociedade Brasileira de Ciência e Tecnologia da Madeira, 2017. pág. irregular.

VARANDA, L. D. et al. Mechanical properties of accelerated aging particleboards. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 47, n. 123, p. 571-578, set. 2019.

VARIVODINA, I. et al. Interconnections among the rate of growth, porosity and wood water absorption. **Wood Research**, Bratislava, v. 55, n. 1, p. 59-66, 2010.

VICK, C. B. Adhesive bonding of wood materials In: FOREST PRODUCTS LABORATORY. **Wood handbook** – Wood as an engineering material. Madison: U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1999. pág. irregular. (General Technical Report FPL-GTR-113).

VIVIAN, M. A. et al. Qualidade e eficiência de produtos naturais no tratamento preservativo das madeiras de *Araucaria angustifolia*, *Eucalyptus viminalis* e *Pinus taeda*. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Lages, v. 19, n. 1, p. 35-47, 2020.

WANG, Z. et al. Preparation, characterization and properties of starch-based wood adhesive. **Carbohydrate Polymers**, London, v. 88, n. 2, p. 699-706, abr. 2012.

YUAN, Q. et al. Wood. In: YUAN, Q.; LIU, Z.; ZHENG, K.; MA, C. **Civil engineering materials: from theory to practice**. Cambridge: Elsevier, 2021. p. 239-259.

YUSOH, A. S. et al. Effect of wood species, clamping pressure and glue spread rate on the bonding properties of cross-laminated timber (CLT) manufactured from tropical hardwoods. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 273, p. 121721, mar. 2021.

ZAQUE, L. A. M. et al. Teores de extrativos na madeira de Mogno Brasileiro / Extractive contents in Brazilian Mahogany wood. **Brazilian Applied Science Review**, Curitiba, v. 5, n. 4, p. 1871-1880, jul. 2021.

ZEGARRA, B. E. V. **Caracterização da estrutura anatômica e da densidade do lenho de árvores de *Pinus taeda* e efeito nas propriedades tecnológicas dos painéis OSB**. 2011. 121 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais / Tecnologia de Produtos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

ZHONG, Z.; NG, Q.; HIZIROGLU, S. Evaluation of bonding strength and surface quality of wood exposed to accelerated soaking. **Journal of Tropical Forest Science**, Kuala Lumpur, v. 30, n. 4, p. 622-627, out. 2018.



# UPF

UNIVERSIDADE  
DE PASSO FUNDO

UPF Campus I - BR 285, São José  
Passo Fundo - RS - CEP: 99052-900  
(54) 3316 7000 - [www.upf.br](http://www.upf.br)