



Universidade Estadual Paulista

“Júlio de Mesquita Filho”



FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA DE PROCESSOS DE FABRICAÇÃO

JOÃO CARLOS BIAZZON

**ANÁLISE DA RESISTÊNCIA DA ÁREA DE COLAGEM NA
PRODUÇÃO DE PAINÉIS SARRAFEADOS EMPREGANDO-SE
ADESIVO POLIURETANO**

Bauru, SP
Dezembro - 2018

JOÃO CARLOS BIAZZON

**ANÁLISE DA RESISTÊNCIA DA ÁREA DE COLAGEM NA
PRODUÇÃO DE PAINÉIS SARRAFEADOS EMPREGANDO-SE
ADESIVO POLIURETANO**

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia de Bauru, programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica na Área Processos de Fabricação, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Ivaldo De Domenico Valarelli
Coorientador: Prof. Dr. Marcos Tadeu Tibúrcio Gonçalves

Bauru, SP
Dezembro – 2018

B579a	Biazzon, João Carlos Análise da resistência da área de colagem na produção de painéis sarrafeados empregando-se adesivo poliuretano / João Carlos Biazzon. -- Bauru, 2018 106 p. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Engenharia, Bauru Orientador: Ivaldo De Domenico Valarelli Coorientador: Marcos Tadeu Tibúrcio Gonçalves 1. Madeira serrada. 2. Painéis laminados. 3. Resistência na região de cola. 4. Adesivo poliuretano. I. Título.
-------	---

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Engenharia, Bauru. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA TESE DE DOUTORADO DE JOÃO CARLOS BIAZZON, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

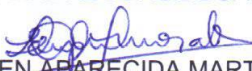
Aos 23 dias do mês de novembro do ano de 2018, às 14:30 horas, no(a) Anfiteatro do DTI / FEB / BAURU, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. MARCOS TADEU TIBURCIO GONCALVES do(a) Departamento de Engenharia Industrial Madeireira / Campus Experimental de Itapeva - UNESP, Prof. Dr. ALEXANDRE JORGE DUARTE DE SOUZA do(a) Departamento de Engenharia Industrial Madeireira / Campus Experimental de Itapeva - UNESP, Profª. Drª. ELEN APARECIDA MARTINES MORALES do(a) Departamento de Engenharia Industrial Madeireira / Campus Experimental de Itapeva - UNESP, Prof. Dr. JULIO CESAR MOLINA do(a) Departamento de Engenharia Industrial Madeireira / Campus Experimental de Itapeva - UNESP, Profª. Drª PRISCILA ROEL DE DEUS do(a) Departamento de Silvicultura / Faculdade de Tecnologia de Capão Bonito - FATEC, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da TESE DE DOUTORADO de JOÃO CARLOS BIAZZON, intitulada **ANÁLISE DA RESISTÊNCIA DA ÁREA DE COLAGEM NA PRODUÇÃO DE PAINÉIS SARRAFEADOS EMPREGANDO-SE ADESIVO POLIURETANO**. Após a exposição, o discente foi arguido oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: APROVADO . Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.



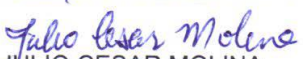
Prof. Dr. MARCOS TADEU TIBURCIO GONCALVES



Prof. Dr. ALEXANDRE JORGE DUARTE DE SOUZA



Profª. Drª. ELEN APARECIDA MARTINES MORALES



Prof. Dr. JULIO CESAR MOLINA



Profª. Drª PRISCILA ROEL DE DEUS

Agradecimentos

Agradeço em primeiro lugar e acima de tudo a Deus, pelo Dom da minha vida, e por iluminar meu caminho durante toda essa trajetória.

A minha mãe, Ada Terezinha Talamonte Biazzon, mesmo com sua idade avançada, pelo grande apoio e incentivo dado durante todo esse caminho até aqui. Agradeço pelos ensinamentos e conselhos que foram alicerce para minha formação como pessoa.

A minha Família pela força dada nessa trajetória.

A Patrícia Almeida pelo seu imenso apoio nesta jornada de busca dos meus ideais, tanto profissionais quanto pessoais.

Ao Professor Dr. Marcos Tadeu Tibúrcio Gonçalves, pela sua nobre e valiosa amizade, por seu companheirismo, pela sua dedicação e orientação segura durante a realização deste trabalho.

Ao Professor Dr. Ivaldo De Domenico Valarelli, pela dedicação na realização deste trabalho.

Ao Professor Dr. Alexandre Jorge Duarte de Souza por sua dedicação e orientação durante a realização deste trabalho.

Ao Professor Dr. Julio Cesar Molina pela sua colaboração e orientação durante a realização deste trabalho.

A minha amiga e Professora Dr^a. Elen Aparecida Martines Morales por seu grande apoio e incentivo.

Aos técnicos de laboratório David José Tenório de Aquino e Juliano Rodrigo de Brito do Campus da UNESP de Itapeva, pelas dedicações exemplares e por suas valiosas colaborações para o desenvolvimento deste projeto.

A todos os demais técnicos de laboratório do Campus de Itapeva que colaboraram neste trabalho.

Aos Professores da UNESP de Bauru pelos seus ensinamentos.

Aos amigos que muito apoiaram durante todo o desenvolvimento deste projeto de pesquisa.

Dedico este trabalho:

À Deus,

A minha mãe Ada Terezinha Talamonte
Biazzon e ao meu pai Vicente Biazzon (*in
memorian*).

As minhas irmãs e irmãos que sempre me
apoiaram.

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo verificar o desempenho e a resistência mecânica de dois tipos de emendas dentadas laterais com diferentes geometrias que poderiam estar presentes na produção industrial de painéis sarrafeados colados de madeira das espécies de *Pinus*. Para a colagem dos painéis utilizou-se adesivo poliuretano à base de mamona formulado com condições especiais para resistir à umidade da madeira. A partir dos painéis confeccionados foram retirados os corpos de prova seguindo-se as especificações de ensaios da norma ABNT NBR 7190:1997 para os ensaios mecânicos de tração normal às fibras e cisalhamento na região de cola e EN 14080:2013 para o ensaio de delaminação. Como conclusão dos resultados obtidos nos ensaios de resistência os desempenhos das emendas dentadas laterais não foram satisfatórios em relação aos valores médios das amostras da madeira maciça.

PALAVRAS-CHAVE: madeira serrada, painéis laminados, resistência na região de cola, adesivo poliuretano.

ABSTRACT

The present study aimed to verify the mechanical performance and strength of two types of toothed lateral joints with different geometries, that could be available for industrial production of batten boards based on *Pinus elliottii* woods species. For panel bonding, the castor oil-based polyurethane resin was used and formulated with special conditions to resist the moisture of the wood. Through batten boards glued laterally with two toothed lateral joints, specimens were obtained according to the specifications of the standard documents (Brazilian) ABNT NBR 7190:1997 related to mechanical tests of perpendicular tensile to fiber and shear strength in the glue region, and (European) EN 14080:2013 for delamination testing. As conclusion of the results obtained in the resistance tests the performance of the toothed lateral joints were not satisfactory in relation to the average values of the samples of solid wood.

KEYWORDS: sawn wood, laminated panels, strength in the glue region, polyurethane adhesive.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	-	Associação Brasileira de Normas Técnicas
EN	-	Norma Europeia
EGP	-	<i>Edge Glued Panel</i> , painel colado lateralmente.
PSL	-	<i>Parallel strand lumber</i> , peça de ripas paralelas.
BB	-	<i>Blockboard</i> , chapa tipo sanduíche, de madeira sarrafeada no miolo revestida com lâminas de madeira.
PVAc	-	Poliacetato de Vinila
EPI	-	Emulsão Polimérica de Isocianato
MLC	-	Madeira laminada colada
PU	-	Poliuretano
PW	-	<i>Plywood</i> , chapa de madeira compensada.
LVL	-	<i>Laminated veneer lumber</i> , peça micro-laminada.
PB	-	<i>Particle board</i> , chapa de madeira aglomerada.
OSB	-	<i>Oriented strand board</i> , chapa de flocos orientados.
WB	-	<i>Waferboard</i> , chapa de flocos não-orientados.
OSL	-	<i>Oriented strand lumber</i> , peça de flocos orientados.
IB	-	<i>Insulating board</i> , chapa isolante.
HB	-	<i>Hardboard</i> , chapa dura.
MDF	-	<i>Medium density fiberboard</i> , fibras de média densidade.
$\rho_{bás}$	-	Densidade básica
ρ_{ap}	-	Densidade aparente
IPT	-	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
MDI	-	4,4'-diisocianato de difenilmetano
TDI	-	Mistura de 2,4- e 2,6-diisocianato de tolueno
TEDA	-	Trietilenodiamina
DMEA	-	N,N dimetiletanolamina
DBTL	-	Dibutil dilaurato de estanho
SnOct	-	Octoato de estanho
pMDI	-	Pré-polímero de difenilmetano-diisocianato
pH	-	Potencial Hidrogeniônico
f_{v0}	-	Resistência ao cisalhamento na direção paralela às fibras
$f_{t,90}$	-	Resistência à normal às fibras

LISTA DE SÍMBOLOS

cm	-	Centímetro
mm	-	Milímetro
MPa	-	Mega Pascal
kPa	-	Quilo Pascal
°C	-	Graus Celsius
N	-	Newton
N.m	-	Newton.metro
m/s	-	Metro por segundo
lb	-	Libras
Kgf	-	Quilograma força
Kgf/cm ²	-	Quilograma força por centímetro quadrado
m ²	-	Metro quadrado
mm ²	-	Milímetro quadrado
g	-	Grama
g.m ⁻²	-	Grama por metro quadrado
kg.m ⁻³	-	Quilograma por meto cúbico

LISTA DE FIGURAS

Figura 2. 1- Esquema e dimensões de “ <i>Blockboard</i> ”	23
Figura 2. 2- Diferentes classificações dos painéis de madeira colada lateralmente com revestimento de lâminas	24
Figura 2. 3- Esquema geral de emendas longitudinais e transversais.	25
Figura 2. 4- Desenho esquemático de uma junta de topo.	25
Figura 2. 5- Desenho esquemático de uma junta biselada.....	26
Figura 2. 6- Desenho esquemático de uma junta encaixada.....	26
Figura 2. 7- União do tipo <i>finger joint</i> : (a) <i>Finger</i> estrutural vertical; (b) <i>Finger</i> não estrutural; (c) <i>Finger</i> estrutural horizontal.....	27
Figura 2. 8- Geometria do fresamento discordante (Norma ABNT NBR 6162:1988).	29
Figura 2. 9- Geometria do fresamento concordante (Norma ABNT NBR 6162:1988).	29
Figura 2. 10- Percurso de corte (L_c), percurso de avanço (L_f) e percurso efetivo (L_e) no fresamento discordante (Norma ABNT NBR 6162:1988).....	30
Figura 2. 11- Avanço por dente (f_z), avanço de corte (f_c) e avanço efetivo (f_e) no fresamento discordante (Norma ABNT NBR 6162:1988).....	30
Figura 2. 12- Formação do cavaco tipo II	33
Figura 2. 13- Distorção de várias regiões do tronco após secagem de uma tora.....	37
Figura 2. 14- Três eixos principais de madeira com relação à direção da grã e anéis de crescimento.....	38
Figura 2. 15- Características do <i>Pinus elliottii</i> . a) Face Tangencial. b) Face Radial. c) Fotomicrografia (10x).....	40
Figura 2. 16- Representação das possíveis estruturas de ressonância do grupo NCO.	42
Figura 2. 17- Estruturas químicas do MDI e TDI.	43
Figura 2. 18- Estruturas químicas do poliéter ou poliéster.....	43
Figura 2. 19- Esquema geral da reação química entre poliol e isocianato	43
Figura 2. 20- Elos de conexão entre adesivo e madeira. Analogia de elo de cadeia para a adesão em madeira.....	49
Figura 2. 21- Reação generalizada da cura da resina pMDI com a madeira	52
Figura 2. 22- Formas de interação entre o adesivo e a madeira	54

Figura 3. 1- Adesivo PU.....	58
Figura 3. 2- Plaina Moldureira Plus Advance – 5/6E.....	59
Figura 3. 3- Máquinas de usinagem utilizadas para a produção do painel laminado colado e dos corpos de prova.	60
Figura 3. 4- Equipamentos utilizados no processo da experimentação.....	60
Figura 3. 5- Instrumentos de medição e controle.	61
Figura 3. 6- Máquina de ensaio universal EMIC.....	62
Figura 3. 7- Substituição dos cabeçotes de tupia pelas fresas de metal duro.	62
Figura 3. 8- Tipos de emendas dentadas de perfil “macho e fêmea” : a) Emenda com 3 dentes; b) Emenda com 2 dentes; c) e d) Juntas macho e fêmea.	64
Figura 3. 9- Ilustração da emenda de 3 dentes.	64
Figura 3. 10- Ilustração da emenda de 2 dentes.	65
Figura 3. 11- Área de colagem de uma superfície plana.	66
Figura 3. 12- Etapas do processo de colagem do painel: a) Distribuição do adesivo sobre a peça; b) Junção e prensagem das peças.	66
Figura 3. 13- Prensagem do painel – a) Prensagem com torquímetro; b) Painel prensado.....	67
Figura 3. 14- Painéis e suas respectivas dimensões.	69
Figura 3. 15- Dimensões em centímetros, do corpo de prova para ensaio de cisalhamento na região de cola, na direção paralela às fibras. (Fonte: ABNT NBR 7190:1997).	70
Figura 3. 16- Dispositivos utilizados para realizar os ensaios de cisalhamento. a) e b) Dispositivo para emenda dentada de 2 dentes; c) e d) Dispositivo para emenda dentada de 3 dentes.	71
Figura 3. 17- Dispositivos acoplados na EMIC para realizar os ensaios de cisalhamento. a) Dispositivo para emenda dentada de 3 dentes posicionados na parte superior e parte inferior dos corpos de prova; b) Dispositivo para emenda dentada de 2 dentes posicionado na parte inferior dos corpos de prova.	71
Figura 3. 18- Corpo de prova para tração da região de cola normal às fibras da madeira laminada colada, dimensões em centímetros (Fonte: ABNT NBR 7190:1997).	72
Figura 3. 19- Arranjo de ensaio para tração da região de cola na direção normal às fibras da madeira laminada colada. (Fonte: ABNT NBR 7190:1997).	73
Figura 3. 20- Esquema mostrando os posicionamentos dos diferentes corpos-de-prova confeccionados para avaliação dos painéis.	75
Figura 3. 21- Seccionamento dos painéis: a) Em 3 partes; b) Peças menores.....	75

Figura 3. 22- Ilustração das medidas segundo ABNT NBR 7190:1997: a) Paineis com 3 dentes; b) Painel com 2 dentes.	76
Figura 3. 23- Etapas da preparação dos corpos de prova: a) Procedimento inicial para preparar os corpos de prova; b) Primeiro corte para preparação dos corpos de prova; c) Finalização dos corpos de prova para ensaio de cisalhamento.....	76
Figura 3. 24- Aferimento das medidas segundo ABNT NBR 7190:1997.....	77
Figura 3. 25- Etapas da confecção dos corpos de prova a) Confecção dos furos nas amostras; b) Corpos de provas finalizados.	77
Figura 3. 26- Esquema do comprimento da linha de cola nos corpos de prova: a) Lateral 2 dentes; b) Parte inferior 2 dentes; c) Lateral 2 e 3 dentes d) Lateral 3 dentes e e) Parte inferior 3 dentes.....	78
Figura 3. 27- Medição do comprimento da linha de cola nos corpos de prova com 2 e 3 dentes. a) e b) Linha de cola lateral dos corpos de prova; c) e d) Linha de cola dos dentes dos corpos de prova.....	79
Figura 3. 28- Ilustração da parte interna da autoclave: a) Corpos de prova dentro da autoclave e b) Grelha em cima dos corpos de prova.....	80
Figura 3. 29- Estufa: a) Detalhes da estufa e b) Corpos de prova dentro da estufa.....	81
Figura 4. 1- Falhas na colagem nos corpos de prova da emenda dentada com 2 dentes: a) e b) Falhas nas posições 4, 5 e 6 nos corpos de prova; c) e d) Falhas na lateral nos corpos de prova.	82
Figura 4. 2- Corpos de prova da emenda dentada com 3 dentes não se encostaram por completo: a) Falha na acomodação dos dentes; b) Falhas na lateral dos dentes.....	83
Figura 4. 3- Corpos de prova antes e após o ensaio delaminação para emendas com 2 dentes na posição lateral.....	83
Figura 4. 4- Corpos de prova antes e após o ensaio delaminação para emendas com 2 dentes na posição inferior.....	84
Figura 4. 5- Corpos de prova antes e após o ensaio delaminação para emendas com 3 dentes na posição lateral.....	85
Figura 4. 6- Corpos de prova antes e após o ensaio delaminação para emendas com 3 dentes na posição inferior.....	86
Figura 4. 7- Ruptura nos corpos de prova após o ensaio de cisalhamento: a) Ruptura na madeira; b) Ruptura mista e c) Ruptura na região de cola.....	88

Figura 4. 8- Corpos de prova após o ensaio de tração normal às fibras: a) Ruptura na madeira, b) Ruptura mista e c) Ruptura na região de cola.....	89
Figura 4. 9- Valores médios da resistência ao cisalhamento.	91
Figura 4. 10- Valores médios da resistência à tração normal às fibras.....	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 2. 1- Fresamento e dimensão do avanço por dente.....	32
Tabela 2. 2- Propriedades de resistência mecânica do <i>Pinus elliottii</i>	40
Tabela 2. 3- Tipos de adesivos monocomponentes e bicomponentes	45
Tabela 2. 4- Composição do óleo de mamona.....	47
Tabela 2. 5- Resistência mecânica na região da região de cola por cisalhamento e resistência a tração normal às fibras em juntas da madeira de <i>Eucalyptus saligna</i>	47
Tabela 3. 1- Valor médio do teor de umidade das pranchas de pinus.	63
Tabela 3. 2- Métodos de ensaio de delaminação segundo a EN 14080:2013.	74
Tabela 3. 3- Número amostras para os ensaios de cisalhamento e tração normal às fibras.	77
Tabela 3. 4- Comprimento médio da linha dos corpos de prova para a emenda dentada 2 dentes.	79
Tabela 3. 5- Comprimento médio da linha dos corpos de prova para a emenda dentada 2 dentes.	80
Tabela 4. 1- Valores médios de resistência ao cisalhamento na região de cola dos corpos de prova com os respectivos, desvio padrão e coeficiente de variação.....	87
Tabela 4. 2- Ruptura dos corpos de prova após o ensaio de cisalhamento.....	87
Tabela 4. 3- Valores médios de resistência à tração normal às fibras dos corpos de prova com os respectivos, desvio padrão e coeficiente de variação.....	88
Tabela 4. 4- Ruptura dos corpos de prova após o ensaio de tração normal às fibras.	89
Tabela 4. 5- Valores médios entre os corpos de prova no cisalhamento.....	90
Tabela 4. 6- Comparações múltiplas entre os resultados de cisalhamento através do teste Tukey.	90
Tabela 4. 7- Relação em porcentagem entre as resistências de cisalhamento da madeira maciça e dos diferentes tipos de juntas coladas.....	91
Tabela 4. 8- Relação em porcentagem entre as resistências de cisalhamento da superfície plana e as emendas dentadas.	92
Tabela 4. 9- Valores médios entre os corpos de prova na tração normal às fibras.....	94
Tabela 4. 10- Comparações múltiplas entre os resultados de tração normal às fibras através do teste Tukey.....	94

Tabela 4. 11- Relação em porcentagem entre as resistências de tração normal às fibras da madeira maciça e dos diferentes tipos de juntas coladas.....	95
Tabela 4. 12- Relação em porcentagem entre as resistências de tração normal às fibras da superfície plana e as emendas dentadas.....	96

Sumário

1. INTRODUÇÃO	19
1.1. Objetivo	21
1.1.1. Objetivo Geral	21
1.1.2. Objetivos Específicos	21
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1. Painéis à Base de Madeira	22
2.1.1. Painéis sarrafeados	22
2.1.2. Emendas em painéis	24
2.2. Processo de Usinagem	28
2.3. Propriedades Físicas e Mecânicas da Madeira	33
2.3.1. Propriedades físicas da madeira	33
2.3.2. Propriedades de resistência mecânica da madeira	37
2.4. A Madeira da Espécie de <i>Pinus elliottii</i>.	39
2.5. Adesivos para Madeira	40
2.5.1. Adesivos poliuretanos	42
2.5.2. Tipos de adesivos poliuretanos	45
2.5.3. Polióis derivados de óleos vegetais	46
2.5.4. Poliuretano á base de óleo de mamona	46
2.6. Teoria da Adesão	48
2.7. Interações Químicas entre Adesivo PU e a Madeira	51
2.8. Fatores que Influenciam na Colagem de Madeiras	52
2.8.1. Características físico-químicas do adesivo	53
2.8.2. Características anatômicas da madeira	55
2.8.3. Propriedades físicas da madeira	56
2.8.4. Extrativos e pH da madeira	57

3. MATERIAIS E METODOLOGIA.....	58
3.1. Materiais.....	58
3.1.1. Madeira utilizada na experimentação	58
3.1.2. Adesivo.....	58
3.1.3. Máquinas, equipamentos e instrumentos.....	59
3.2. Metodologia.....	62
3.2.1. Confeção dos painéis	63
3.2.2. Procedimentos dos ensaios físico-mecânicos	69
3.2.3. Transformação dos painéis em corpos de prova.....	74
3.2.4. Análise estatística	81
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	82
4.1. Resultados obtidos no ensaio de delaminação na linha de cola.....	83
4.2. Resultados obtidos nos testes de resistência ao cisalhamento na região de cola....	86
4.3. Resultados obtidos nos testes de tração normal às fibras na região de cola	88
4.4. Comparações entre os resultados obtidos nos ensaios	89
5. CONCLUSÕES.....	98
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	100

1. INTRODUÇÃO

A cobertura florestal brasileira é formada por árvores nativas e de reflorestamento, destacando-se na região Sul e Sudeste as espécies exóticas dos gêneros *Pinus sp.* e *Eucalyptus sp.*, empregados na substituição de madeiras nativas. As maiores concentrações de madeiras exóticas encontram-se nas regiões Centro-Oeste, Norte e até mesmo no Nordeste do país.

A madeira é um material natural, renovável com múltiplas aplicações, indispensável em vários setores como: na construção civil, indústria moveleira, indústria de papel e celulose e na fabricação de painéis reconstituídos. Na sua forma maciça e em dimensões maiores apresenta propriedades desejáveis e indesejáveis, sendo necessário reduzir aquelas indesejáveis para aumentar as suas aplicações. Em certos casos, suas características precisam ser modificadas para melhor atender a requisitos específicos de aplicação.

Atualmente os produtos derivados da madeira são indispensáveis para a sociedade, contribuindo com uma parcela importante para a economia e na preservação dos recursos naturais, já que os mesmos são fabricados a partir de matéria-prima renovável.

No Brasil, a madeira do gênero *Pinus* não é apenas a mais utilizada na fabricação de produtos e derivados de madeira serrada, mas também é matéria-prima muito empregada em produtos de maior valor agregado.

Dentre os produtos derivados de madeira destacam-se os painéis de madeira colados lateralmente denominados comercialmente como painéis sarrafeados, dos tipos *Paralel strand lumber* (PSL), *Laminboard*, “EGP” (*Edge Glued Panel*) e “BB” (*Blockboards*). Estes produtos estes surgem como um recurso essencial para o setor industrial madeireiro, com o intuito de minimizar as perdas com resíduos gerados no processamento de toras de madeira.

O reaproveitamento da madeira se faz necessário por questões sócio-econômicas, ambientais e de sustentabilidade. Portanto, os painéis sarrafeados são uma evolução na indústria de processamento da madeira e apresentam-se como uma alternativa cada vez mais promissora no segmento de produção dos painéis de madeira reconstituída.

Os painéis de madeira constituída por sarrafos oferecem um amplo espectro de uso, os quais estão diretamente associados às propriedades físicas e mecânicas que agregam aos mesmos. Este fato faz necessário se atentar aos fatores que interferem na qualidade da produção desses painéis como: colagem, acabamento da superfície da madeira a ser colada, tipo de adesivo a ser utilizado e suas especificações para uso interno ou externo, gramatura do adesivo empregada na colagem, tempo e forma de prensagem, teor de umidade e os extrativos que podem dificultar a penetração do adesivo na madeira.

No mercado nacional os painéis sarrafeados do tipo painéis colados lateralmente (EGP) disponíveis, geralmente são fabricados com peças de madeiras de pinus, eucalipto, teca, dentre outras espécies, e com diferentes dimensões, em sua maioria, coladas lateralmente com o adesivo Poliacetato de Vinila (PVAc) ou Emulsão Polimérica de Isocianato (EPI), formados com emendas de topo tipo “*finger joint*”. Na fabricação de madeira laminada colada (MLC), os adesivos mais utilizados nestes casos são os poliuretanos e os à base de resorcinol.

Devido às novas exigências do mercado é necessário que os adesivos tenham alto desempenho na colagem da madeira e que, sejam aplicáveis em superfícies com teor de umidade elevado. Além dessas condições os adesivos devem apresentar alta resistência à umidade, tornando-se aptos para uso exterior, e devem possuir resistência a intemperismo.

Durante o processo de fabricação de painéis dos tipos EGP e MLC são feitas emendas dentadas. Geralmente as emendas são longitudinais, as quais empregadas para obter lâminas com maior comprimento. As emendas longitudinais podem ser de topo (*butt-joint*), biselada (*scarf-joint*) e dentada (*finger-joint*).

Das emendas dentadas, a mais utilizada é do tipo *finger joints*, as quais encontram-se distribuídas nos painéis EGP e MLC, influenciando de forma significativa na resistência mecânica dos mesmos. Desta forma, o conhecimento da resistência mecânica das emendas dentadas é imprescindível para o bom desempenho dos painéis.

Apesar de todo o avanço na utilização de tecnologias para a fabricação de produtos de madeira serrada (painéis de madeira e produtos de maior valor agregado), ainda existe pouca ou quase nenhuma informação técnico-científica sobre emendas dentadas laterais, as quais podem apresentar melhores condições na produção de painéis sarrafeados, no que se refere uma aplicação adequada aos mais variados fins.

Diante da necessidade de se gerar informações científicas e tecnológicas que contribuam para a melhoria da eficiência dos processos de fabricação de painéis de madeira, justifica-se o foco dado a este trabalho no processo de fabricação de painéis de madeira sarrafeada com dois tipos de emendas dentadas laterais coladas com adesivo poliuretano bicomponente, utilizando a madeira da espécie de *Pinus elliottii* com elevado teor de umidade.

O principal benefício gerado por esta pesquisa é o conhecimento do comportamento das ligações dentadas para a combinação espécie/adesivo analisada neste estudo.

Este trabalho apresenta como foco principal estudar dois tipos de emendas dentadas laterais que podem estar presentes na produção de painéis sarrafeados com resina PU.

1.1. Objetivo

1.1.1. Objetivo Geral

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a resistência mecânica na região de colagem de painéis sarrafeados colados lateralmente com dois tipos de emendas dentadas laterais a partir das especificações de ensaios da norma ABNT NBR 7190:1997, relativas aos ensaios mecânicos de tração normal às fibras e cisalhamento na região de cola, visando o estudo da viabilidade tecnológica na produção de painéis de madeira colados lateralmente com emendas dentadas laterais empregando-se a madeira da espécie *Pinus elliottii* com teor de umidade elevado.

1.1.2. Objetivos Específicos

Este trabalho tem como objetivo específico avaliar:

- Resistência das emendas dentadas laterais, comparando-as com as emendas planas e madeira maciça;
- Qualidade de colagem das emendas dentadas;
- Eficiência do uso de adesivo PU na colagem da madeira com alto teor de umidade;

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Painéis à Base de Madeira

Segundo Mattos, Gonçalves e Chagas (2008), os painéis são estruturas fabricadas com madeiras na forma de lâminas ou em diferentes estágios de desagregação, que são aglutinadas, pela ação de pressão e temperatura. Esse tipo de produto surgiu da necessidade de se substituir a madeira maciça, devido a sua escassez, encarecimento e dimensões adequadas para o aproveitamento. Os mesmos autores afirmam que os painéis vêm sendo usados em vários setores da indústria moveleira e civil.

Gonçalves (2000), baseado em normas técnicas internacionais apresenta uma classificação dos painéis à base de madeira, a partir do material industrial padronizado utilizado na formação desse produto, ficando assim divididos em 4 categorias: painéis de lâminas; painéis de partículas; painéis de fibras e painéis de ripas ou sarrafos.

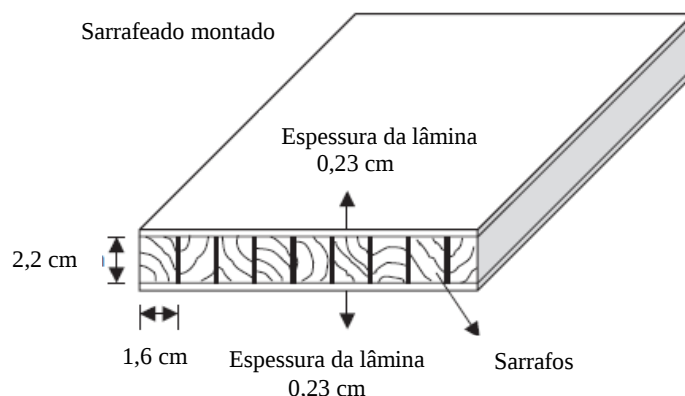
- A partir de lâminas: Painéis de madeira compensada, *Plywood* (PW); Painéis micro-laminados, *Laminated veneer lumber* (LVL).
- A partir de partículas: Chapa de madeira aglomerada, *Particleboard* (PB); Chapa de flocos orientados, *Oriented strand board* (OSB); Chapa de flocos não-orientados, *Waferboard* (WB); Peça de flocos orientados, *Oriented strand lumber* (OSL).
- A partir de fibras: Chapa isolante, *Insulating board* (IB); Chapa dura, *Hardboard* (HB); Chapa de média densidade, *Medium density fiberboard* (MDF).
- A partir de ripas ou sarrafos: Peça de ripas paralelas, *Parallel strand lumber* (PSL); Painéis sarrafeados de madeira colada lateralmente, *Edge glued panel* (EGP); Chapa de madeira sarrafeada com capa de lâminas ou chapa dura, formam os painéis chamados laminados como os *laminboards* e os *Blockboards* (BB).

2.1.1. Painéis sarrafeados

Painéis sarrafeados são compostos de ripas ou sarrafos colados lateralmente, conhecidos mundialmente por: “*Parallel strand lumber* (PSL)”, “*Edge glued panel* (EGP)”, “*Laminboard*” e “*Blockboards* (BB)” (GONÇALVES, 2000).

Painéis *Blockboards* “BB” são denominados comercialmente no Brasil por “Painel de Madeira Sarrafeada” (GONÇALVES 2000; MATTOS; GONÇALVES; CHAGAS, 2008). A Figura 2.1 ilustra o esquema e dimensões de “*Blockboard*”.

Figura 2. 1- Esquema e dimensões de “Blockboard”. (Adaptado de KARTAL; AYRILMIS, 2004).



Kartal e Ayrilmis (2004) comentam que os sarrafeados *Blockboards* são usados em interiores de edifícios, na fabricação de móveis e armários de cozinha, portas leves e decorativas, exposição de painéis, painéis divisórias, caixas de alto-falante e painéis de molduras podem ser fabricados a partir de *Blockboards* “BB”.

Segundo Iwakiri (1998, 2005) e Gonçalves (2000), o compensado sarrafeado consiste em um painel fabricado com a parte central constituída de sarrafos, que são colados lateralmente e revestidos com lâminas, formando a capa e a contracapa. Inicialmente, a lâmina correspondente à contracapa funciona como camada de transição, com a grã no sentido perpendicular ao miolo e, finalmente, a lâmina da capa, de melhor qualidade, com grã no sentido paralelo dos sarrafos que compõem o miolo.

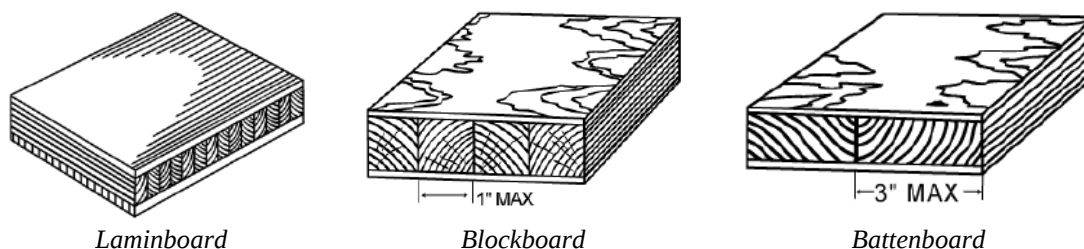
Os painéis “BB” são uma das melhores alternativas para madeira compensada. A principal vantagem do “BB” é que o miolo da placa é produzido a partir da espessura da madeira. Portanto, um grande número de folheados não precisam ser manipulados e fabricados, reduzindo custos de fabricação e tempo. O *Blockboard* é produzido a partir de sarrafos de madeira macia colocado de ponta a ponta e prensado entre lâminas de madeira de lei, sendo todos colados sob alta pressão (KARTAL; AYRILMIS, 2004).

Quando os sarrafos tem espessura de 3 a 7 mm, o painel é chamado de *laminboard*, se a espessura é de 7 a 30 mm *blockboard* e quando a espessura tem de 30 a 75 mm formando caibros, o painel é chamado de *battenboard* (GONÇALVES, 2000). Na Figura 2.2 observam-se as representações esquemáticas destes painéis.

De acordo com a norma ABNT NBR 7203:1982, as dimensões dos sarrafos são padronizadas em espessura de 2,0 a 4,0 cm e largura de 2,0 a 10,0 cm. Peças com menor largura apresentam melhor estabilidade dimensional em relação às peças mais largas. O uso

de peças mais estreitas resulta em maior aproveitamento da madeira. No entanto, o custo será maior, devido ao maior consumo de adesivo e custos operacionais.

Figura 2. 2- Diferentes classificações dos painéis de madeira colada lateralmente com revestimento de lâminas (Fonte: Glossary of wood and woodworking terms).



Antes da confecção dos sarrafos, segundo Mendes, Albuquerque e Iwakiri (1999), deve-se tomar cuidado na seleção do material quanto à espécie ou tipo de madeira a ser utilizada. Esse aspecto deve ser levado em consideração devido às características anisotrópicas da madeira. Segundo os mesmos autores, grandes diferenças entre a contração tangencial e radial proporcionarão aos painéis alta instabilidade dimensional, resultando no surgimento de defeitos e, conseqüentemente, um produto final de má qualidade, podendo até mesmo levar à perda total do painel.

Segundo Mendes, Albuquerque e Iwakiri (1999) e Iwakiri (2005), as propriedades da madeira mais importantes requeridas para a escolha dos sarrafos na produção de compensados sarrafeados são as seguintes: umidade, massa específica, contração radial (CR), contração tangencial (CT), contração volumétrica (CV), coeficiente de anisotropia (CT/CR) e coeficiente de retratibilidade volumétrica.

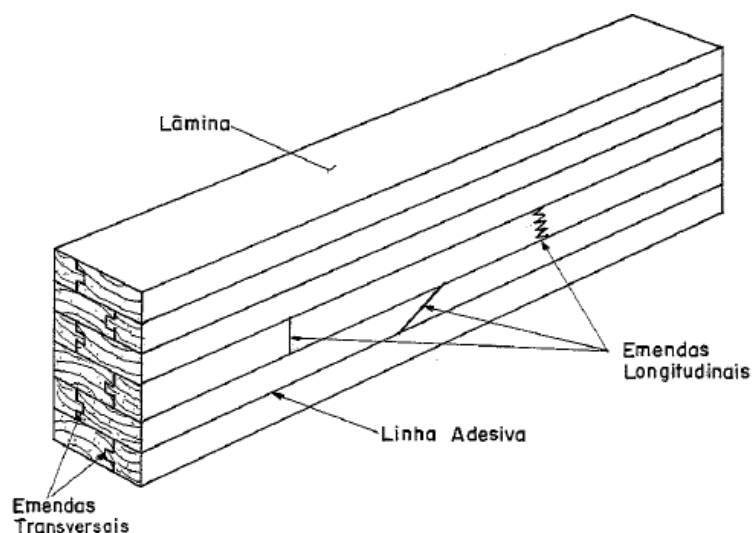
2.1.2. Emendas em painéis

Segundo Carneiro (2010), durante o processo de fabricação de painéis de EGPs e MLC são feitas emendas. A região da junta deve ser isenta de defeitos que diminuam a resistência da junta; esses defeitos são os nós, fibras irregulares, trincas e rachaduras, dentre outros defeitos.

As emendas podem ser longitudinais e transversais conforme a Figura 2.3. As emendas longitudinais são empregadas para obtenção de lâminas com maior comprimento podendo ser de topo (*butt-joint*), biselada (*scarf-joint*) e dentada (*finger-joint*). As emendas transversais ou bordas são empregadas para obter largura superior à das peças disponíveis (CARRASCO,

1989; MACÊDO; JUNIOR, 1999; AZAMBUJA, 2006). Além dessas, Carneiro (2010) acrescenta as juntas encaixadas.

Figura 2. 3- Esquema geral de emendas longitudinais e transversais (CARRASCO, 1989).

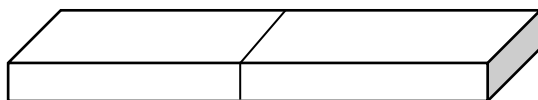


Tipos de emendas ou juntas

Juntas de Topo (butt-joint)

Nordstrom (1995) e Nascimento *et al.*, (2002) relatam que as juntas de topo são as mais simples das juntas longitudinais (Figura 2.4), e que apesar de não desperdiçarem madeira, apresentam baixa resistência mecânica, as juntas podem falhar tanto no adesivo quanto na interface da madeira.

Figura 2. 4- Desenho esquemático de uma junta de topo.

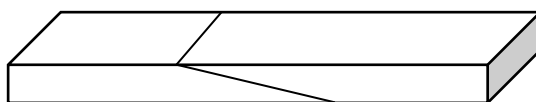


Juntas Biselada (scarf-joint)

De acordo com Macêdo e Junior (1999) e Carneiro (2010) as juntas biseladas surgiram como alternativa para suprir as limitações de resistência das juntas de topo, que mesmo sendo um tipo de junta dispendiosa, consideradas mais resistentes que as juntas de topo. O corte do bisel deve apresentar baixa inclinação de 1:10. A inclinação da junta em bisel é o fator mais

importante no que se refere à melhoria da resistência. A Figura 2.5 mostra um desenho esquemático de uma junta biselada.

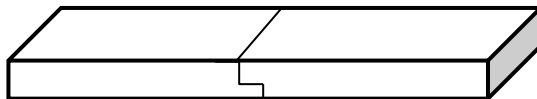
Figura 2. 5- Desenho esquemático de uma junta biselada.



Juntas Encaixada

Segundo Carrasco (1989), para eliminar as dificuldades de alinhamento na hora da montagem, que interferiam na resistência das emendas biseladas, foram introduzidas as emendas encaixadas. Esse tipo de junta segundo Carneiro (2010) é o mais utilizado na tecnologia da madeira colada, sendo considerada como uma junta de resistência intermediária entre a junta de topo e a junta biselada. A Figura 2.6 mostra um desenho esquemático de uma junta encaixada.

Figura 2. 6- Desenho esquemático de uma junta encaixada.



Emendas dentadas (finger-joint)

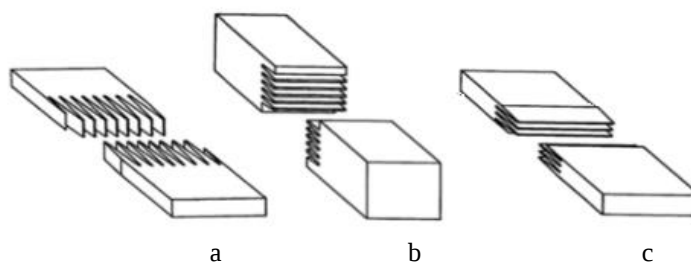
A ABNT NBR 15.930:2011 define a madeira colada do tipo *finger joint* também conhecidas por emendas dentadas, como um conjunto de peças unidas de topo e coladas em forma de "encaixe de dedos" no sentido do comprimento das fibras.

Segundo Frihart e Hunt (2010) este tipo de união permite o uso de peças selecionadas o que garante um melhor aproveitamento qualitativo e quantitativo da madeira. Comentam ainda, que esse tipo de união é tão forte quanto a madeira maciça.

Vick (1999) menciona que os produtos obtidos com emendas de topo (*finger joint*) podem atingir cerca 75% da resistência da madeira sólida. Segundo o mesmo autor, as emendas dentadas são classificadas em estrutural e não estrutural, uma classificação feita de acordo com o uso final a que se destina e em função da geometria da emenda.

Os diferentes tipos de emenda *finger joint* são visualizados na Figura 2.7.

Figura 2. 7- União do tipo *finger joint*: (a) *Finger* estrutural vertical; (b) *Finger* não estrutural; (c) *Finger* estrutural horizontal. (Adaptado de FRIHART e HUNT, 2010).



A qualidade dessas emendas é de grande importância na composição dos painéis EGP e MLC (PRATA, 2010). Para Vick (1999) é de extrema importância levar em consideração os parâmetros da geometria dos dentes que constituem o sistema *finger joint* (largura do dente, largura da ponta do dente e inclinação), pois influenciam no desempenho da colagem em uniões dentadas.

Segundo o mesmo autor, a geometria dos dentes é um parâmetro interdependente. A mudança nas dimensões de um parâmetro ocasionará a mudança dos outros parâmetros, influenciando assim na resistência do sistema *finger joint*.

Macedo e Calil Junior (1999) trabalhando com madeiras de *Pinus elliottii* e *Eucalyptus grandis* (teor de umidade próximo a 12% para ambas as espécies) com adesivo CASCOPHEN RS-216-M determinaram valores de resistência à tração paralela às fibras em emenda dentada tipo *finger joint* iguais a 39 MPa para o *Pinus* e 61 MPa para o *Eucalyptus*.

Azambuja (2006) verificou a resistência à tração das emendas dentadas paralela às fibras da madeira da espécie *Pinus* (teor de umidade em torno de 12%), com adesivos PU Mamona, Purbond e Cascopheno, os valores obtidos foram, respectivamente: 45,6 MPa, 42,9 MPa e 50,2 MPa.

Jesus (2006) obteve os seguintes resultados para resistência da emenda dentada colada (*finger joint*) à tração paralela às fibras para as espécies: *Pinus caribea hondurensis* 55,01 MPa (teor de umidade de 12,71%) e para o *Eucalyptus grandis* 75,67 MPa (teor de umidade de 12,61%).

Segundo Prata (2010), para o painel de EGP fabricado com *Pinus taeda* (teor de umidade em torno de 14%) e adesivo PVAc a média encontrada para o teste de tração normal às fibras foi de 24,54 MPa.

Segundo Almeida *et al.*, (2011), a resistência à tração das emendas dentadas paralela às fibras da madeira da espécie paricá foi 14 MPa com o adesivo fenol-resorcinol (CASCOPHEN RS-216-M).

2.2. Processo de Usinagem

Segundo Koch (1964) e Cardoso (2012) o processo de usinagem da madeira envolve os processos de fresamento, torneamento, lixamento, furação, rosqueamento, entre outros.

Para Koch (1964) as operações de usinagem da madeira seguem dois tipos singulares: o primeiro é o fresamento cilíndrico tangencial, que é realizado por um cabeçote rotativo constituído de facas distribuídas em sua periferia; o segundo é o corte ortogonal, no qual a aresta da ferramenta de corte atua perpendicularmente a direção do movimento relativo entre a ferramenta e a peça. Esta operação pode ser considerada um caso particular do tipo anteriormente citado, considerando infinito o raio do cabeçote rotativo, e nula a velocidade angular da ferramenta.

O processo de fresamento, na usinagem de madeiras, ocorre quando é feita a remoção de material de uma determinada peça de modo não contínuo, por movimento rotativo de uma ferramenta multicortante de muitos dentes de corte, obtendo com isso superfícies de várias formas (STEMMER, 1992).

Diniz, Marcondes e Coppini (1999; 2001) definem o fresamento como uma operação de usinagem que se caracteriza por:

- A ferramenta, chamada fresa, é provida de arestas cortantes dispostas simetricamente em torno de um eixo;
- O movimento de corte é proporcionado pela rotação da fresa ao redor do seu eixo;
- O movimento de avanço é geralmente feito pela própria peça em usinagem, que está fixada na mesa da máquina, o qual obriga a peça a passar sob a ferramenta em rotação, que lhe dá forma e dimensão desejadas.

De acordo com Ferraresi (1977) o fresamento é definido como o processo mecânico de usinagem destinado a obtenção de superfícies quaisquer com o auxílio de ferramentas geralmente multicortantes. Para tanto, a ferramenta gira e a peça ou a ferramenta se deslocam segundo uma trajetória qualquer.

Distinguem-se dois tipos básicos de fresamento:

- Fresamento cilíndrico tangencial: processo de fresamento destinado a obtenção de superfície plana paralela ao eixo de rotação da ferramenta. Quando a superfície obtida não for plana ou o eixo de rotação da ferramenta for inclinado em relação à superfície originada na peça, será considerado um processo especial de fresamento tangencial;
- Fresamento frontal: processo de fresamento destinado a obtenção de superfície plana perpendicular ao eixo de rotação da ferramenta.

Neste estudo, propõe-se usinagem na condição de fresamento cilíndrico tangencial, desta forma, a seguir apresentam-se seus conceitos:

No fresamento concordante (*dow-milling*) a ferramenta e a peça se movimentam na mesma direção enquanto que no fresamento discordante (*up-milling*) ou convencional, as ferramentas movem-se contrariamente ao movimento da peça. Segundo Gonçalves (2000) este tipo de classificação é válido apenas no fresamento cilíndrico tangencial, de grande utilização no beneficiamento de madeiras. Uma característica importante das operações de fresamento discordante e concordante é a formação do cavaco em forma de uma vírgula.

Gonçalves (2000) descreve em seu livro “Processamento da Madeira”, os movimentos e relações geométricas para o fresamento cilíndrico tangencial discordante e concordante, com suas respectivas terminologias, segundo a Norma ABNT NBR 6162:1988 adotada para processos de usinagem de metais. As Figuras 2.8 e 2.9 ilustram os movimentos e relações geométricas para o fresamento cilíndrico tangencial discordante, e concordante, respectivamente.

Figura 2. 8- Geometria do fresamento discordante (Norma ABNT NBR 6162:1988).

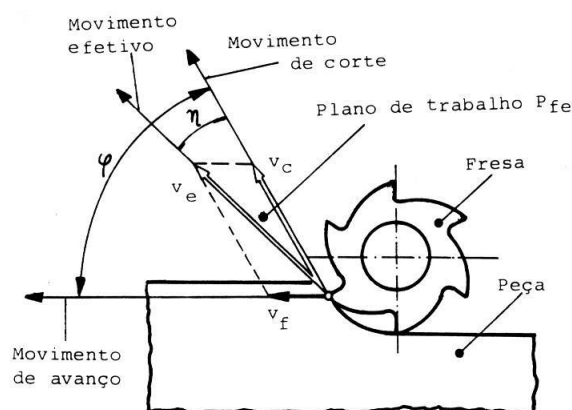
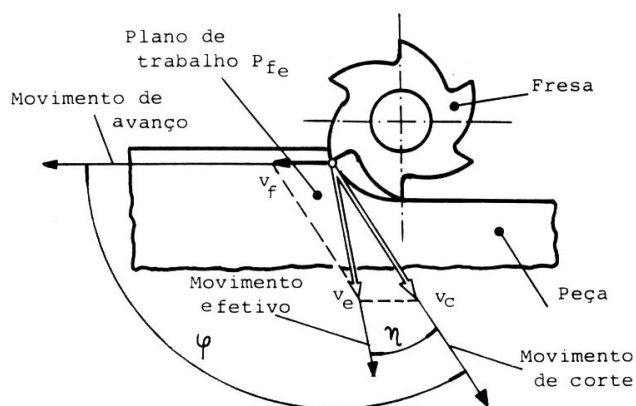


Figura 2. 9- Geometria do fresamento concordante (Norma ABNT NBR 6162:1988).



Os movimentos e grandezas de avanço são referidos à peça parada, e normalmente representados com uso de outros parâmetros, são: “ P_{fe} ” plano de trabalho, o qual passa pelo ponto de corte escolhido e contém as direções de corte e de avanço; “ V_c ” velocidade de corte em m/s; “ V_e ” velocidade efetiva em m/s; “ V_f ” velocidade de avanço em m/min; “ a_e ” profundidade de corte em mm; “ η ” ângulo de direção efetiva de corte e “ ϕ ” ângulo de direção de avanço.

Baseado nos conceitos da geometria do processo de fresamento dado pela Norma ABNT NBR 6162:1988, Gonçalves (2000) estende os mesmos para o processo de usinagem de madeiras, apresentando os movimentos relativos entre a aresta de corte e a peça no processo de fresamento periférico, conforme ilustrado nas Figuras 2.10 e 2.11.

Figura 2. 10- Percurso de corte (L_c), percurso de avanço (L_f) e percurso efetivo (L_e) no fresamento discordante (Norma ABNT NBR 6162:1988).

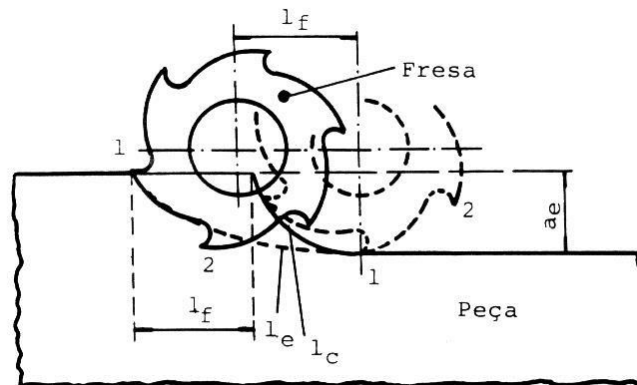
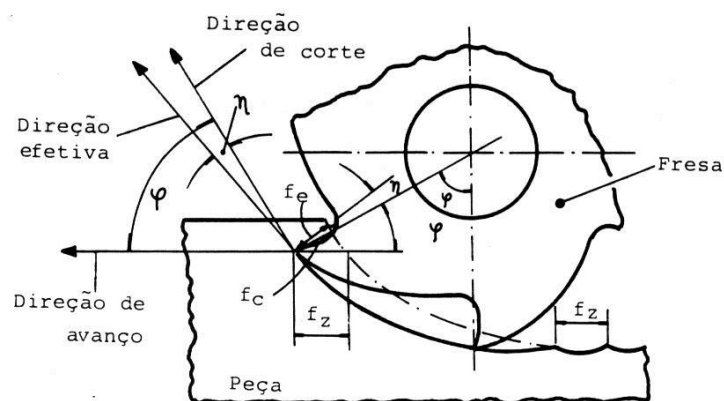


Figura 2. 11- Avanço por dente (f_z), avanço de corte (f_c) e avanço efetivo (f_e) no fresamento discordante (Norma ABNT NBR 6162:1988).



Das relações geométricas, tem-se a Equação 2.1.

$$V_f = f_z \cdot Z \cdot n \quad (2.1)$$

Onde o avanço da peça, é dada pela Equação 2.2.

$$f_z \cdot Z = f \quad (2.2)$$

Logo, a velocidade de avanço é dada pela Equação 2.3.

$$V_f = f \cdot n \quad (2.3)$$

Sendo:

f_z = Avanço por dente da ferramenta em mm/rotação;

Z = Número de dentes da ferramenta;

n = Rotação da ferramenta por minuto [rotação/minuto];

f = Avanço da peça em mm/rotação.

Koch (1964) descreve que o processo de fresamento de madeiras é denominado na literatura específica de “*Periferal Milling*”. Esta situação de usinagem é denominada comercialmente no Brasil por “Aplainamento de Madeira”.

Segundo Koch (1964) o aplainamento de madeira envolve a remoção de excesso de material na peça usinada na forma de cavacos, os quais são formados pelo contato intermitente da peça com a ferramenta de uma ou mais facas que giram no porta-ferramentas. O conjunto do cabeçote porta-ferramenta com as lâminas de corte, mais os suportes de fixação e quebra cavacos, é de uso universal em máquinas para beneficiamento da madeira nos processos de aplainamento e fresamento nas mais variadas formas (geração de superfícies, rasgos, rebaixos, chanfros, molduramento em perfis etc.).

Conforme Gonçalves (2000) atualmente utilizam-se ferramentas de um único corpo (fresas) multicortantes, com pastilhas ou lâminas de corte fixas no corpo da fresa ou intercambiáveis. O processo de serramento circular também se enquadra na situação de usinagem fresamento, porém o corte não se limita como periférico paralelo às fibras.

No fresamento, os ângulos de saída e de folga instantâneos mudam continuamente como função da profundidade instantânea de corte, o ângulo de saída efetivo se torna maior e o ângulo de folga efetivo se torna menor conforme a aresta executa o percurso efetivo de corte “ L_e ”.

Segundo Kollmann e Côté (1984) o processo de fresamento da madeira é considerado, a operação mais importante na confecção de peças e componentes de móveis de madeira.

Silva *et al.*, (1999) estudaram as relações entre a anatomia da madeira a qualidade da usinagem e o acabamento da superfície, e concluíram que a qualidade final de um produto relaciona-se com as operações de usinagem e com a estrutura física e anatômica da madeira.

Gonçalves (2000) comenta que os fatores intrínsecos à madeira, que podem influenciar na usinagem são: direção de crescimento das fibras, densidade, teor de umidade, concentração de resinas, presença de nós, entre outros. Cita também que os diferentes modos de cortar não podem ser abordados sem uma definição prévia do comportamento anisotrópico da madeira. Segundo o mesmo autor, existem três direções principais relativas ao corte, padronizadas na literatura específica, como: Direção Longitudinal ou Axial: corte paralelo às fibras; Direção Radial: corte perpendicular às fibras; Direção Tangencial: corte perpendicular às fibras.

Além dos fatores citados por Gonçalves (2000), Nogueira (2002) cita outros fatores que influenciam no acabamento superficial na usinagem da madeira sendo:

- Grandeza de corte – quanto maior a profundidade e a espessura de corte, maiores os esforços de usinagem e, conseqüentemente, mais rígido deve ser o sistema para garantir o mesmo acabamento superficial;
- O estado de afiação da ferramenta – a ferramenta deverá estar isenta de qualquer tipo de defeito, para obter um perfeito acabamento;
- Rigidez do par peça ferramenta – certeza de que a espessura de corte seja constante;
- Condições de usinagem – quanto menor a velocidade de avanço da peça, melhor o acabamento superficial da madeira para uma velocidade de corte constante, devido à diminuição de “ f_z ” (avanço por dente), ou quanto maior a velocidade de corte, melhor o acabamento superficial da madeira para uma velocidade de avanço da peça constante, devido à diminuição de “ f_z ” (avanço por dente).

De acordo com Gonçalves (2000) citado por Nogueira (2002), os avanços por dente nos processos de fresamento são especificados da seguinte maneira, conforme indica a Tabela 2.1.

Tabela 2. 1- Fresamento e dimensão do avanço por dente.

Fresamento	Avanço por dente (f_z).
Acabamento fino	De 0,30 a 0,80 mm
Acabamento médio	De 0,80 a 2,50 mm
Acabamento grosso	De 2,50 a 5,00 mm

Koch (1964) reconheceu os mesmos tipos de cavacos no fresamento periférico paralelo às fibras, que aqueles que foram classificados para o corte ortogonal paralelo às fibras. Além

disso, a espessura do cavaco instantâneo é constantemente mudada de um valor mínimo no momento de contato até um valor máximo ao ponto onde a ferramenta emerge da madeira.

A porção do percurso da ferramenta que define a superfície da peça é a primeira parte do percurso. A sequência de formação do cavaco é determinada pelas propriedades físicas e de resistência da madeira e pela geometria do processo de fresamento. Em geral se desejam adequar os fatores envolvidos de modo que o cavaco Tipo II se forme durante a parte inicial do percurso; o qual conseqüentemente determinará a qualidade da superfície final (GONÇALVES, 2000). A Figura 2.12 ilustra a formação do cavaco Tipo II.

Figura 2. 12- Formação do cavaco tipo II (GONÇALVES, 2000).



Goli *et al.*, (2009) estudaram o fresamento periférico da madeira com corte discordante e concordante. No processamento da madeira, material anisotrópico, estes aspectos geométricos implicaram diferenças relevantes na usinagem. O fresamento da madeira leva a diferentes geometrias de corte quando discordante ou concordante, e quando aumenta ou diminui a profundidade de corte, resultando em grã de diferentes orientações dependendo do processo adotado. No fresamento periférico a aresta cortante continuamente muda sua direção de corte relativa ao direcionamento das fibras até que emerge da peça.

2.3. Propriedades Físicas e Mecânicas da Madeira

2.3.1. Propriedades físicas da madeira

Algumas das principais propriedades físicas da madeira são: umidade, densidade e retratibilidade.

Umidade da madeira

A umidade está relacionada ao teor de água que a madeira apresenta; a água na madeira pode estar presente preenchendo os espaços vazios no interior das células (lúmen celular) ou pode estar fixada à parede das células (água de impregnação na estrutura anatômica molecular) ou pode estar compondo a estrutura química do próprio tecido (água de constituição). (BURGER; RICHTER, 1991).

Segundo Gonçalves (2000) a árvore após ser abatida tende a perder o elevado teor de umidade que possui, ocorrendo uma tendência natural da umidade da madeira equilibrar-se com a umidade relativa do ambiente onde se encontra, em função da temperatura desse ambiente.

Segundo Klock (2012) a água presente na madeira pode ser dividida em três diferentes condições de extrema importância em termos de qualidade, sendo elas:

- Água livre ou de capilaridade: a que preenche seus espaços capilares, formados pelos lúmens e espaços intercelulares (acima de aproximadamente 28 % de umidade);
- Água de impregnação adsorvida: a impregnada nos espaços submicroscópicos da parede celular, ligadas por forças elétricas polares (entre 6 e 28 % de umidade) e;
- Água de adsorção química: a aderida às interfaces existentes entre moléculas de celulose e de hemicelulose por forças de valências secundárias monomoleculares, forças de Van der Waals e ligações de hidrogênio (entre 0 e 6 % de umidade).

Segundo Gonçalves (2000) o ponto de saturação corresponde ao mínimo de água livre e ao máximo de água de impregnação. Somente depois de toda água livre (água de embebição ou de capilaridade) ser removida, começa ocorrer a perda da água de impregnação contida nos espaços submicroscópicos, existentes entre os constituintes estruturais da parede celular. O ponto de saturação das fibras da madeira segundo ABNT NBR 7190:1997 é de 25%.

Segundo Glass e Zelinka (2010) a parede celular é composta principalmente de celulose e hemicelulose, e os grupos hidroxilas desses constituintes químicos fazem da parede celular, um material higroscópico. No entanto, a lignina, é o agente de cimentação das células, é uma molécula relativamente hidrofóbica. As paredes celulares da madeira de acordo com os mesmos autores têm uma grande afinidade à água, mas a capacidade das paredes para absorver a água é limitada, em parte, devido à presença da lignina.

Gonçalves (2000) enfatiza que cada unidade de celulose tem três oxidrilas (OH), em tese, pode ligar-se a três moléculas de água, por pontes de hidrogênio. A relação água/celulose é 54/162 entre o peso molecular de três moléculas de água e uma de celulose indica que o máximo de água de impregnação da celulose é de 33%. Considerando-se um teor

de celulose na madeira de 45%, e 33% de água de impregnação, obtém-se, nestas condições um teor de aproximadamente 15%, ($0,45 \times 0,33 = 0,1485$), o qual corresponde ao teor de umidade da madeira seca ao ar, ou seja, sem água de embebição.

A água na madeira de acordo com Glass e Zelinka (2010) tem um forte efeito sobre suas propriedades, e as relações de água na madeira muito afetam o seu uso industrial.

O teor de umidade afeta várias propriedades da madeira (ZENID, 2009). Vários autores como Kollmann e Côté (1984), Gonçalves (2000), Néri (2003) e Ferrolho (2006) comentam que o teor de umidade é uma propriedade física que tem grande influência nos processos de usinagem da madeira.

Segundo Pinheiro (2014) controlar o teor de umidade da madeira é uma ação de extrema importância para sua correta utilização, este controle auxilia na diminuição dos defeitos secagem como empenamentos, arqueamentos, torções e defeitos de usinagem, como arrepiamentos das fibras ou lascamentos das arestas das peças de madeira acabadas, entre outros defeitos. Alguns defeitos são encontrados em produtos de madeira antes que ela adquira equilíbrio higroscópico com o ambiente (temperatura e umidade relativa do ar).

Densidade

Para Gonçalves (2000) a densidade, juntamente com o teor de umidade, são duas características de grande importância para classificar as madeiras serradas ou compostas.

Segundo o mesmo autor a densidade das madeiras depende da espécie de madeira examinada, da árvore de onde provém, da localização dos corpos de prova na tora, da umidade, etc.

A densidade básica ($\rho_{bás}$) é um dos atributos mais utilizado nos vários setores da produção industrial madeireira, sendo considerada um índice de qualidade que indica o uso final da madeira (RODRIGUES *et al.*, 2008).

Define-se densidade básica ($\rho_{bás}$) da madeira como sendo a massa específica convencional obtida pelo quociente da massa seca (Kg) pelo volume saturado (m^3) (CARNEIRO, 2010). A massa seca é determinada mantendo-se os corpos de prova em estufa a $103 \pm 2^\circ C$ até que sua massa permaneça constante. O volume saturado é determinado em corpos de prova submersos em água até atingirem peso constante (ABNT NBR 7190:1997).

A densidade básica da madeira ($\rho_{bás}$), segundo Glass e Zelinka (2010) varia significativamente entre as espécies e dentro da mesma espécie por causa de características anatômicas, tais como a proporção de madeira lenho inicial e de lenho tardio e cerne de

alburno. Para um número limitado de espécies, os conteúdos de minerais e de extrativos podem afetar também a densidade.

A densidade aparente (ρ_{ap}) da madeira é definida como relação entre a massa e o volume, a um teor de umidade determinado, segundo a ABNT NBR 7190: 1997 adota a umidade de equilíbrio de $12\% \pm 4\%$.

A densidade aparente é muitas vezes necessária para algumas aplicações, como por exemplo, para os cálculos das cargas estruturais ou pesos de transporte (GLASS; ZELINKA, 2010).

Retratibilidade

A retratibilidade da madeira é o fenômeno relacionado à sua variação dimensional, em função da troca de umidade do material com o meio que o envolve (SILVA; OLIVEIRA, 2003).

Para Gonçalves (2000) e Nogueira (2002) a retração da madeira se manifesta com a perda da água de impregnação, que provoca uma aproximação das cadeias de celulose, em porcentagens diferentes, em relação aos três planos de crescimento da árvore: axial, tangencial e radial. A retração axial se dá na direção das fibras da madeira, em termos percentuais é a menor; a retração radial ocorre na direção dos raios medulares da seção transversal do tronco da árvore e a retração tangencial é a maior, e ocorre no plano tangente aos anéis de crescimento da árvore. A retração volumétrica é bastante significativa, sendo a composição das outras três retrações.

Segundo Poubel *et al.* (2011) a contração volumétrica é proporcional ao número de moléculas de água adsorvidas na parede celular e que, por sua vez, está relacionada ao número de hidroxilas acessíveis principalmente na celulose e na hemicelulose e ao volume da parede celular.

Nogueira (2002) relata que as diferenças entre as retrações tangencial e radial forem elevadas, podem inviabilizar o emprego de determinadas espécies de madeira para uso na construção civil. Segundo Gonçalves (2000) e Carneiro (2010) a retratibilidade da madeira e está relacionada aos defeitos de secagem tais como trincas e empenamento.

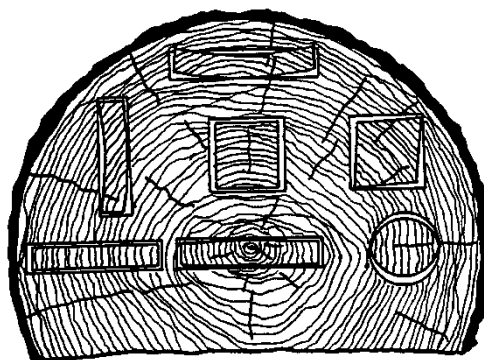
Os defeitos de trincas de acordo com Gonçalves (2000) podem apresentar-se em diferentes formas, sendo que o caso mais comum de ocorrência das trincas se dá pela separação das fibras da madeira devido a condição de secagem inadequada. O empenamento segundo o mesmo autor é a deformação da peça de madeira pelo arqueamento de seus eixos

longitudinal, transversal ou ambos, devido à retração da madeira resultante da variação de umidade da peça. Classificar tais defeitos como:

- Arqueamento ou encurvamento: Deformação em relação ao comprimento da peça.
- Encanoamento: Deformação em relação a largura da peça.
- Torcimento: Deformação simultânea nos sentidos longitudinal e transversal.

A Figura 2.13 apresenta a retratibilidade de peças planas, quadradas e redondas de várias regiões da secção transversal de um tronco após secagem.

Figura 2. 13- Distorção de várias regiões do tronco após secagem de uma tora (GONÇALVES, 2000).



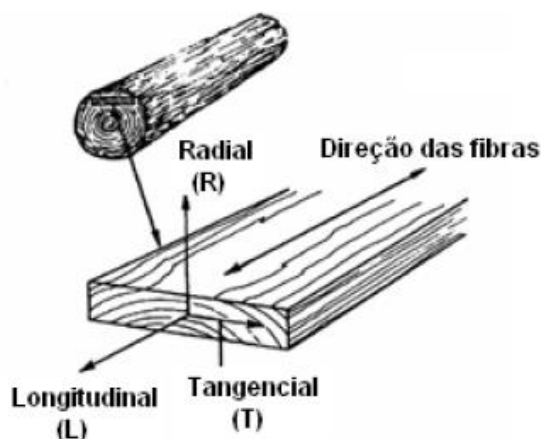
2.3.2. Propriedades de resistência mecânica da madeira

As propriedades de resistência mecânica da madeira, segundo Braz *et al.*, (2013) definem o comportamento da mesma, quando submetida a esforços de natureza mecânica, o que permite compará-la com outras madeiras de propriedades conhecidas. Os valores sobre essas propriedades variam de acordo com a espécie, densidade, teor de umidade e tempo de duração da carga durante o ensaio de caracterização, entre outros fatores.

Segundo Kretschmann (2010) a madeira é um material heterogêneo e anisotrópico, ou seja, tem propriedades mecânicas únicas e independentes nas direções dos três eixos perpendiculares: longitudinal, radial e tangencial (Figura 2.14).

O eixo longitudinal é paralelo às fibras; o eixo radial é normal aos anéis de crescimento (perpendiculares às fibras na direção radial); e o eixo tangencial é perpendicular às fibras, mas tangente aos anéis de crescimento.

Figura 2. 14- Três eixos principais de madeira com relação à direção da grã e anéis de crescimento (Adaptado de RITTER, 1990).



Segundo a ABNT NBR 7190:1997 que apresenta os principais ensaios de caracterização das propriedades de resistência mecânica que devem ser realizados na madeira. As propriedades mais comumente analisadas para projeto são: o módulo de ruptura na flexão, a tensão máxima de compressão paralela às fibras, tensão de compressão perpendicular às fibras e cisalhamento paralelo às fibras. Medições adicionais são feitas frequentemente para avaliar o trabalho de carga máxima em flexão, impacto, dureza e resistência à tração perpendicular às fibras.

A ruptura por esforços de cisalhamento ocorre seguindo as possíveis formas: perpendicular às fibras (a madeira antes de romper por cisalhamento apresenta esmagamento por compressão) e paralelo às fibras (ocorre com a força aplicada no sentido longitudinal às fibras e rompe por escorregamento entre as células da madeira).

A ruptura por esforços de tração ocorre com as seguintes orientações: paralela às fibras (ocorre por deslizamento entre as células da madeira ou por ruptura das paredes das células provocando alongamento das células ao longo do eixo longitudinal) e perpendicular às fibras (a integridade estrutural é afetada pela separação das células da madeira perpendicular aos seus eixos e apresenta baixos valores de deformação e baixa resistência).

A ruptura por esforços de compressão ocorre seguindo duas orientações: paralela às fibras (refere-se à força suportável por uma peça de madeira quando esta é aplicada em direção paralela às fibras) e perpendicular às fibras (a madeira apresenta resistências menores que na compressão paralela, pois a força é aplicada na direção normal ao comprimento das células, a fim de se verificar o valor máximo que a espécie suporta sem ser esmagada).

2.4. A Madeira da Espécie de *Pinus elliottii*.

Segundo Wrege *et al.*, (2014) as espécies de madeira do gênero *Pinus* começaram a ser cultivadas no Brasil por volta de 1936. Somente em 1950 o gênero *Pinus* sp, segundo Shimizu e Medrado (2017) iniciaram-se os plantios comerciais para produção de madeira. Sua principal utilização é como fonte de matéria-prima para as indústrias de celulose e papel, de madeira serrada e de lâminas, de painéis e extração de resinas.

Segundo Zenid (2009) dentro deste gênero encontra-se o *Pinus elliottii*, espécie introduzida nos estados de Espírito Santo, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Paraná, Rio de Janeiro, Rio Grande do Sul, Santa Catarina e São Paulo.

Com alto índice de reflorestamento, a madeira de *Pinus elliottii* tem sido cada vez mais empregada na substituição de madeiras nativas (BILESKEY, 2015). Essa produtividade é relacionada com o melhoramento genético para selecionar as espécies de maior potencial de produção de madeira, o controle de pragas, e o manejo e colheita baseados em técnicas florestais de alta tecnologia.

O *Pinus elliottii* apresenta como características gerais: baixa densidade, fibras bem direcionadas, textura fina, e permite bom acabamento (IPT, 1989), sendo uma madeira macia de boa usinabilidade (relativamente fácil de desdobrar, aplainar, lixar, torneiar e furar), fácil de secar e boas propriedades mecânicas de resistência à flexão, compressão paralela às fibras entre outras propriedades. Porém a madeira de pinus é susceptível ao ataque de fungos (emboloradores, manchadores e apodrecedores), cupins, brocas de madeira e perfuradores marinhos e apresenta defeitos como nós, etc.

A madeira de *Pinus elliottii*, segundo o IPT (1989) possui cerne e alburno indistintos pela cor (branco-amarelado), cheiro e gosto característico devido à resina. Segundo IPT (1989) e Pinheiro (2014), por se tratar de uma madeira leve, sua densidade aparente se apresenta em média 480 kg.m^{-3} para teor de umidade de 15% e densidade básica de 400 kg.m^{-3} . Possui um amplo espectro de uso, sendo os principais na construção civil (cordões, guarnições, rodapés, forros e lambris, molduras, fôrmas para concreto, pontaletes e tábuas para andaimes), fabricação de móveis, partes internas de móveis, móveis torneados (para exportação), painéis compensados, laminados, peças torneadas, ripas e tábuas para embalagens, etc.

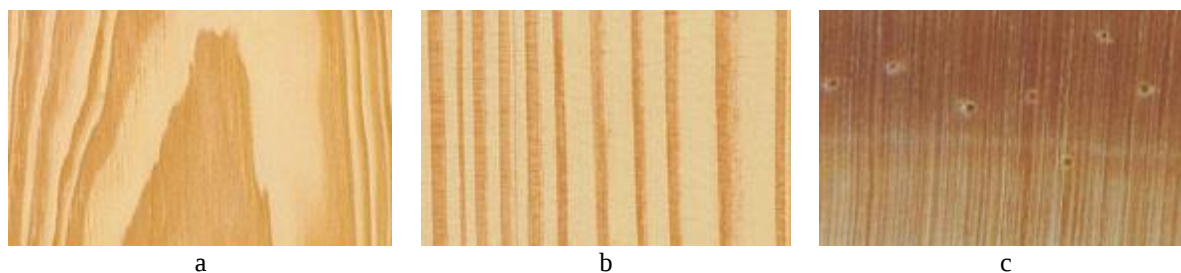
Segundo o IPT (1989) a madeira de *Pinus elliottii* apresenta as seguintes descrições anatômicas macroscópicas:

➤ Parênquima axial: invisível mesmo sob lente;

- Raios: visíveis apenas sob lente no topo, sendo invisível mesmo sob lente na face tangencial;
- Camadas de crescimento: distintas com transição brusca entre o lenho inicial e o tardio;
- Canais de resina: visíveis sob lente na disposição axial e radial.

A Figura 2.15 apresenta as características anatômicas macroscópicas do *Pinus elliottii*.

Figura 2. 15- Características do *Pinus elliottii*. a) Face Tangencial. b) Face Radial. c) Fotomacrografia (10x) (IPT, 1989).



A Tabela 2.2 apresenta as propriedades de resistência mecânica do *Pinus elliottii*.

Tabela 2. 2- Propriedades de resistência mecânica do *Pinus elliottii* (Adaptado IPT, 1989).

Flexão	Resistência (f_M): Madeira verde: 48,0 MPa; a 15% de umidade: 69,6 MPa.
	Módulo de elasticidade - Madeira verde: 6463 MPa.
	Limite de proporcionalidade - Madeira verde: 19,7 MPa.
Compressão paralela às fibras	Resistência (f_{c0}): Madeira verde: 18,5 MPa; a 15% de umidade: 31,5 MPa.
	Módulo de elasticidade - Madeira verde: 8846 MPa.
	Coefficiente de influência de umidade: 6,7 % . Limite de proporcionalidade - Madeira verde: 13,7 MPa.
Outras propriedades	Cisalhamento - Madeira verde: 5,8 MPa.
	Tração normal às fibras - Madeira verde: 3,0 MPa.
	Dureza janka paralela - Madeira verde: 1932 N.
	Fendilhamento - Madeira verde: 0,4 MPa. Resistência ao impacto na flexão - Madeira a 15% (choque): 14,5.

2.5. Adesivos para Madeira

O adesivo é um componente importante, com implicações técnicas e econômicas significativas na utilização da madeira, sendo que gundo seu custo pode chegar a 50% do preço total desta (PIZZI, 1983). Aproximadamente 80% de produtos derivados da madeira estão ligados de alguma maneira, além de aderir dois substratos, o adesivo tem que fluir e preencher espaços vazios entre as juntas a serem coladas (PIZZI, 2005).

Segundo Vick (1999); Frihart e Hunt (2010) o principal uso de adesivos é na indústria moveleira e no fabrico de materiais de construção (madeira compensada, madeira laminada colada, *strandboard* orientado, aglomerados, MDF, etc.).

Os adesivos podem ser classificados em:

- **Naturais** → origem animal (albumina e caseína) ou vegetal (soja e látex).
- **Semi-sintéticos** → derivados dos produtos naturais que sofrem modificação química como por exemplo o nitrato de celulose e poliuretanos (óleo de mamona).
- **Sintéticos** → polímeros que se assemelham a adesivos naturais nas características físicas, mas que podem ser adaptados para atender a requisitos específicos e possuem maior resistência à água.

Os adesivos sintéticos podem ser termoplásticos ou termofixos. Os adesivos termoplásticos amolecem e fluem no aquecimento e, em seguida, endurecem novamente com o resfriamento, geralmente possuem menor resistência ao calor, à umidade e a carga estática. Os adesivos termofixos são excelentes adesivos estruturais porque sofrem uma transformação química irreversível quando curada, e no reaquecimento, eles não amolecem e não fluem (VICK, 1999; FRIHART; HUNT, 2010).

Os adesivos podem ser agrupados em: não estruturais, semi-estruturais e estruturais, estas categorias são definidas a partir do uso externo ou interno (FRIHART; HUNT, 2010), podendo também serem classificados em relação a sua durabilidade (refere-se às condições ambientais reversíveis) e permanência (refere-se às condições ambientais irreversíveis) (FRIHART, 2005a).

Para escolher o tipo de adesivo deve-se levar em consideração quais as condições e o tipo de ambiente a que ele será exposto, os fatores ambientais que mais influenciam na ligação adesiva são a temperatura e a umidade (VICK, 1999).

Há vários tipos de adesivos citados na literatura, dentre os quais, os mais utilizados para a confecção de peças de madeira colada destacam-se:

Fenol-Formaldeído (FF) – Adesivo líquido sintético, à base de fenol-formol, em solução aquosa/alcoólica, apresenta alta resistência mecânica, química e as intempéries.

Resinas à base de Melamina Ureia Formaldeído (MUF) – Resina líquida à base de melamina-formol, que é apresentada em solução aquosa, resistente à água.

Resorcinol-Formaldeído (RF) – Esta resina apresenta alta resistência a umidade e alta resistência mecânica.

Poliacetato de Vinila (PVAc) – Adesivo em emulsão aquosa, que apresenta baixa resistência a umidade e a temperaturas elevadas.

Poliacetato de Vinila (PVAc) resistente à umidade – Adesivo em emulsão aquosa, que apresenta resistência a umidade e a temperaturas elevadas.

Resina Epóxi – Podem ser monocomponentes ou bicomponentes. Possuem alta resistência mecânica e à umidade; apresentam excelente aderência a diversos tipos de fibras e substratos; são resistentes às ações químicas e apresentam baixa retração durante o processo de cura.

Poliuretano (PU) – Podem ser monocomponentes ou bicomponentes. Apresentam alta resistência mecânica e à umidade. Possuem a vantagem de não emanar formaldeído.

Para o presente trabalho, utilizou-se o adesivo à base de poliuretano cujas características e propriedades são descritas a seguir.

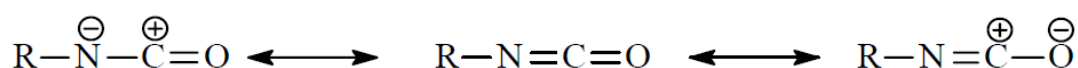
2.5.1. Adesivos poliuretanos

A história dos poliuretanos começou na década de 1930 na Alemanha, quando Otto Bayer propôs utilizando diisocianatos e dióis para a preparação de macromoléculas (PETROVIĆ, 2005).

Segundo Somani *et al.*, (2003), Lay e Cranley (2003), os grupos dos adesivos de poliuretanos (PU's) são aplicados nas mais diversas áreas e se destacam pela a ampla diversidade de sua aplicação industrial e de construção. Petrie (1999) e Vilar (1999) comentam que os adesivos PU's possuem excelente adesão, boa flexibilidade, dureza, alta coesão, resistência à abrasão e cura rápida. Os principais setores nos quais utilizam esses adesivos são: embalagens, aparelhos, painéis compensados, moveleiro, medicina, laminados flexíveis, montagens diversas, eletroeletrônicos, aeroespacial, automotivo, têxteis entre outros.

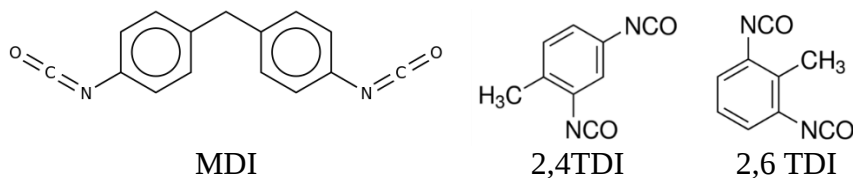
De acordo com Vilar (1999), poliuretano é um polímero que compreende unidades orgânicas unidas por ligações uretânicas. Segundo Lay e Cranley (2003) e Petrović (2005), os diisocianatos podem ser de dois tipos, aromático ou alifático, que apresentam alta reatividade devido a estrutura eletrônica apresentada pelo grupo NCO, conforme indica a Figura 2.16.

Figura 2. 16- Representação das possíveis estruturas de ressonância do grupo NCO.



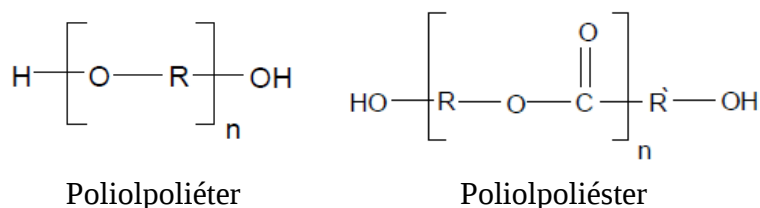
Segundo Lay e Cranley (2003) e Petrović (2005), os diisocianatos mais importantes são: MDI (4,4'-diisocianato de difenilmetano) e TDI (mistura de 2,4- e 2,6-diisocianato de tolueno), conforme indica a Figura 2.17.

Figura 2. 17- Estruturas químicas do MDI e TDI.



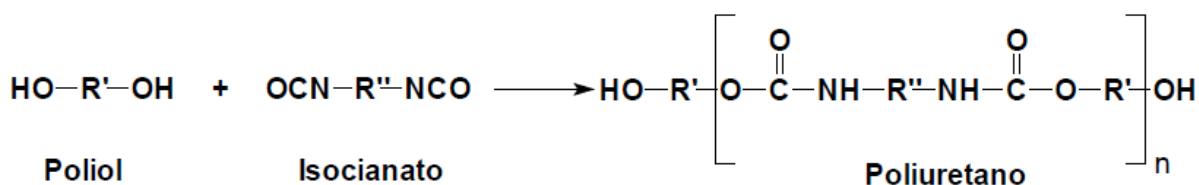
Os dióis podem ser do tipo poliéter ou poliéster, e apresentam as seguintes fórmulas químicas, ilustradas na Figura 2.18.

Figura 2. 18- Estruturas químicas do poliéter ou poliéster.



Os adesivos poliuretanos são produzidos por reação conjunta de duas matérias-primas básicas – um poliálcool e um isocianato (PARKER, 2005), conforme ilustra a Figura 2.19.

Figura 2. 19- Esquema geral da reação química entre poliálcool e isocianato



Outros aditivos utilizados nos adesivos de PU

Além dos dois componentes básicos formadores do adesivo PU, são citados na literatura como, por exemplo, Wegener *et al.* (2001); Vilar (2003); Petrović (2005) e Silva (2006), vários aditivos que podem ser utilizados para modificação de propriedades dos PU's, neste trabalho será citado apenas alguns aditivos.

- **Catalisadores:** Os catalisadores aceleram a reação química entre o grupo isocianato que reage com polióis, água e ele próprio, diminuindo o tempo de cura do adesivo. Os catalisadores exercem considerável influência nas propriedades finais dos PU's. A escolha do catalisador para a manufatura dos PU's é normalmente dirigida para a obtenção de um perfil adequado entre as diversas reações que podem ocorrer durante os processos de fabricação.

São utilizados para aumentar a seletividade quando diferentes reações químicas ocorrem ao mesmo tempo. Para reação química entre isocianatos e polióis, os catalisadores empregados são normalmente as aminas terciárias (Trietilenodiamina – TEDA, N,N dimetiletanolamina – DMEA) que também catalisam a reação de expansão com o isocianato e água, formando poliureia e gás carbônico.

Os catalisadores organometálicos (Dibutil dilaurato de estanho – DBTL, Octoato de estanho – SnOct), geralmente são mais reativos que as aminas, sendo empregados principalmente na catálise da reação de polimerização do isocianato com o polioli, formando o PU.

- **Cargas:** São substâncias adicionadas nos PU's para aumentar a dureza, reduzir custos e a contração durante o enrijecimento do adesivo, alterando porém, o desempenho e as propriedades físicas, sendo normalmente empregadas em adesivos para substratos rígidos. Em alguns casos atuam como retardantes de chama, como exemplo a melamina. Podem também atuar na diminuição da absorção de água em espumas e no aumento de peso do polímero. Há vários tipos de cargas: carbonato de cálcio, sulfato de bário, talco, fibras e microesferas de vidro sílica, argila, negro de fumo, pós de quartzo e de ardósia, etc.
- **Extensores de cadeia:** São normalmente moléculas (polióis ou poliamidas) de baixo peso molecular, cuja função é melhorar as propriedades dos PU's, aumentando a temperatura de transição vítrea. Os extensores se incorporaram na cadeia polimérica, promovendo ligação e reestruturando as cadeias. Vários tipos de compostos químicos podem ser empregados como agentes extensores de cadeia, podem ser hidroxilados ou diaminas.
- **Plastificantes:** São substâncias que reduzem a viscosidade e o custo do adesivo, e também auxilia no processamento do PU. Os plastificantes reduzem a tensão de ruptura, a temperatura de transição vítrea e a dureza. O aumento da fluidez causada por este tipo de aditivo facilita a formação de uma camada coesa de adesivo sobre a superfície do substrato. Existem vários tipos de plastificantes, sendo os mais comuns: os ftalatos, benzoatos e parafinas cloradas.

2.5.2. Tipos de adesivos poliuretanos

Strobech (1990); Frihart e Hunt (2010) salientam que devido à versatilidade da química dos PU's, podem-se obter diferentes tipos de adesivos, monocomponentes ou bicomponentes. Para Strobech (1990) e Somani *et al.*, (2003) os tipos mais importantes estão indicados na tabela 2.3.

Tabela 2. 3- Tipos de adesivos monocomponentes e bicomponentes (Adaptado de STROBECH, 1990 e SOMANI *et al.*, 2003).

Monocomponente	cura por umidade, com solvente;
	cura por umidade, sem solvente;
	cura por umidade, elástico;
	cura por umidade, <i>hot melt</i> ;
Bicomponente	adesivo de contato, com solvente.
	rígido;
	elástico;
	adesivo de contato, com solvente.

Os adesivos PU's monocomponentes, geralmente são líquidos, e a cura consiste por umidade do ar e do substrato. Segundo Vick e Okkonen (1998) os PU's monocomponentes são obtidos com excesso MDI com poliol. O fator mais importante no processo de produção deste tipo de adesivo é o tempo em que o frasco pode permanecer aberto e o tempo de cura à temperatura ambiente (STROBECH,1990). Segundo o mesmo autor, durante a cura por umidade, ocorre liberação de dióxido de carbono fazendo o adesivo espumar ligeiramente.

Vick e Okkonen (1998); Vick e Okkonen (2000) alertam que a espuma gerada na colagem da madeira, pode comprometer a força de coesão do filme do adesivo.

Os adesivos bicomponentes são produzidos em diferentes formas de acordo com a necessidade de aplicação (PETROVIĆ, 2005). Segundo Silva, Martinez e Bordado (2006) o adesivo bicomponente é composto por um pré-polímero com terminação -NCO (uretano), obtido pela reação de um poliol com excesso de di ou poliisocianato e, em uma segunda etapa do processo, o pré-polímero reage com o restante do poliol, formando o poliuretano.

Somani *et al.*, (2003) avaliaram o comportamento de adesivos poliuretanos em madeira utilizando dois tipos de isocianatos: um aromático e outro alifático. Os resultados de sua pesquisa mostraram que o adesivo sintetizado com isocianato alifático apresentou maior

tempo de cura que o sintetizado com isocianato aromático comprovando, que a presença de grupo aromático na estrutura do isocianato favorece sua reatividade.

Frihart e Hunt (2010) salientam que a seleção depende da aplicação. Os adesivos poliuretanos monocomponentes ou bicomponentes segundo Vick (1999), apresentam limitações para uso externo e requerem alta pressão e cura a temperatura ambiente. Estes adesivos são aplicados em pisos, laminados plásticos e metálicos e laminados especiais (FRIHART; HUNT, 2010).

Somani *et al.*, (2003) e Desroches *et al.*, (2012) mencionam que maior parte dos poliuretanos são sintetizados a partir de produtos derivados de petróleo. Havendo a necessidade de se buscar fontes alternativas, preferencialmente fontes em recursos renováveis, ou seja, à base de óleo vegetal, como descrito a seguir.

2.5.3. Polióis derivados de óleos vegetais

Segundo Clemente *et al.*, (2014) os óleos vegetais são fontes importantes para a obtenção de polióis, pois apresentam elevado grau de instauração, baixa toxicidade, menor quantidade de formação de resíduos durante a fase de processamento e baixo custo de produção. Os produtos obtidos são, geralmente, biodegradáveis. Nesta categoria se encontram: o óleo de soja, óleo de girassol, óleo de milho, óleo de oliva, óleo de mamona, entre outros, sendo uma excelente fonte alternativa para obtenção de poliuretanas.

Segundo Dias (2005) existe uma tendência mundial na procura de materiais biodegradáveis, não poluentes e derivados de biomassa. No Brasil se desenvolveu poliuretano à base de óleo de mamona, classificado como bicomponente. Sendo uma boa alternativa ao mercado de painéis estruturais de madeira.

2.5.4. Poliuretano á base de óleo de mamona

O óleo de mamona (“*Castor Oil*”) é obtido a partir da compressão das sementes de mamona (*Ricinus communis*), planta da família das euforbiáceas encontradas em maior quantidade em regiões tropicais e subtropicais, sendo muito abundante no Brasil (DIAS, 2005).

A composição do óleo de mamona segundo a EMBRAPA (2017) está indicada na Tabela 2.4.

Tabela 2. 4- Composição do óleo de mamona (EMBRAPA, 2017).

Componente	Porcentagem
Ácido ricinoléico	84 - 91
Ácido oléico	3,1 – 5,9
Ácido linoléico	2,9 – 6,5
Ácido estereático	1,4 – 2,1
Ácido palmítico	0,9 – 1,5

Em 1983 uma importante contribuição nacional foi dada ao estudo dos adesivos à base de resinas poliuretanas, pelo Departamento de Química USP/São Carlos, desenvolveu uma resina poliuretana à base de mamona que apresenta várias vantagens como: manipulação em temperatura ambiente, grande resistência à ação da água e de raios ultravioleta, grande resistência mecânica (JESUS, 2000).

Jesus (2000) apresentou um estudo de adesivo poliuretano à base de mamona para confecção de MLC. Os resultados indicaram que o adesivo é uma boa alternativa para ser utilizado na produção de MLC. Nos experimentos preliminares de cisalhamento na região de cola com adesivo à base de mamona, para as espécies *Pinus elliottii* e *Eucalyptus grandis*, os valores médios obtidos foram, respectivamente de 7,63 MPa (com o tempo de cura de 6 dias) e 8,99 MPa (tempo de cura de 8 dias).

Para os ensaios de resistência ao cisalhamento na região de cola paralela às fibras da madeira e resistência da região de cola à tração normal obteve os seguintes resultados abaixo:

- Cisalhamento: *Pinus caribea hondurensis* 10,94 MPa e *Eucalyptus grandis* 17,70 MPa.
- Tração normal: *Pinus caribea hondurensis* 4,70 MPa e *Eucalyptus grandis* 6,42 MPa.

Silva (2013) verificou a resistência mecânica na região de cola por cisalhamento e resistência a tração normal às fibras em juntas da madeira de *Eucalyptus saligna* (teor de umidade entre 9,3% a 14,3%) unidas por adesivo PU derivado do óleo de mamona bicomponente na velocidade de avanço 6,0 m.min⁻¹, 11,0 m.min⁻¹ e 15,0 m.min⁻¹, conforme indica Tabela 2.5.

Tabela 2. 5- Resistência mecânica na região da região de cola por cisalhamento e resistência a tração normal às fibras em juntas da madeira de *Eucalyptus saligna* (Adaptado de SILVA, 2013).

Velocidade de avanço	Cisalhamento	Tração normal às fibras
6,0 m.min ⁻¹	8,17 MPa	2,43MPa
11,0 m.min ⁻¹	10,75 MPa	3,54 MPa
15,0 m.min ⁻¹	6,41 MPa	2,74 MPa

2.6. Teoria da Adesão

No processo de colagem há dois fenômenos físico-químicos a coesão, que é a resistência interna do filme adesivo através de forças de valência primárias ou secundárias e a adesão, que é a resistência mecânica da interface entre o filme adesivo e o substrato. (GALEMBECK; GANDUR, 2001; MANO; MENDES, 2004).

Para Frihart e Hunt (2010) o adesivo é responsável pela adesão que envolve fatores químicos e mecânicos. De acordo Schultz e Nardin (2003), a estabilidade mecânica de juntas coladas é influenciada por vários fatores como: densidade da madeira, teor de umidade da superfície de madeira, anatomia da madeira, a força coesiva da região de cola e a penetração do adesivo na madeira.

Para obter uma boa adesão segundo Galembeck e Gandur (2001) entre o adesivo e substrato é necessário que ocorra um contato íntimo entre eles, sendo fundamental que o adesivo umidifique a madeira, fenômeno que envolve a migração do adesivo para dentro da madeira.

Jakes, Stone e Frihart (2007); Paris e Kamke (2015) relatam que a madeira é um material natural e poroso, a penetração do adesivo na estrutura porosa da madeira pode ocorrer nos lúmens, ou penetrar na própria parede celular.

Segundo os mesmos autores a penetração do adesivo na madeira se pode ocorrer em duas escalas: escala micrométrica ou grosseira, a penetração do adesivo ocorre no lúmen, e na escala nanométrica ou molecular, a penetração do adesivo ocorre nas paredes das células da madeira.

No processo da ligação do adesivo com a madeira Frihart (2005a) cita que há três etapas. A primeira etapa é a preparação de superfície para proporcionar uma melhor interação entre o adesivo e o substrato. A segunda etapa o adesivo necessita formar um contato íntimo em nível molecular, com a superfície, e a terceira etapa é a fixação, a qual envolve a solidificação e / ou cura do adesivo.

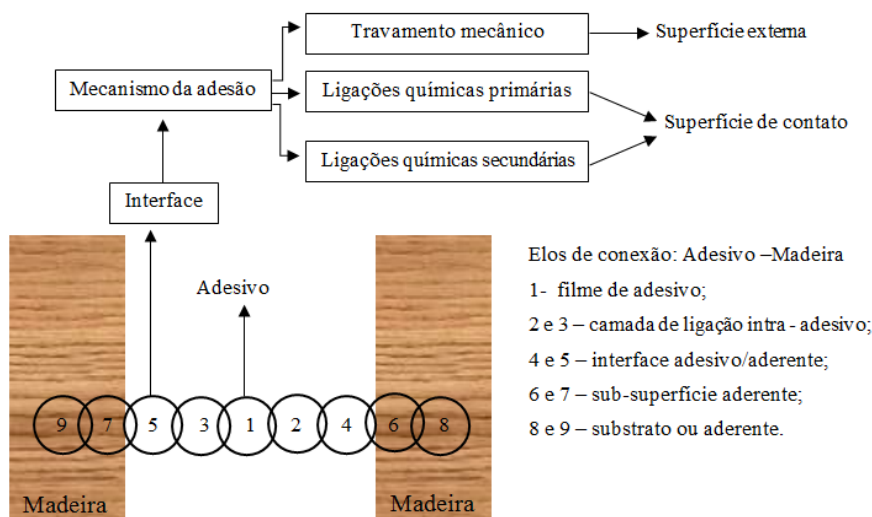
Para os autores como: Kollmann; Kuenzi e Stamm (1975), Pizzi (1994), Petrie (1999), Schultz e Nardin (2003), Fhirart (2005 a, 2005b) e Frihart e Hunt (2010) não há uma única teoria que explique a adesão de uma forma geral e abrangente, mas várias teorias tentam descrever a adesão entre o adesivo e o aderente.

Kollmann; Kuenzi e Stamm (1975); Schultz e Nardin (2003) consentem que a combinação entre as teorias de adesão é o que mais se aproxima da realidade.

Schultz e Nardin (2003) destacam que os modelos teóricos propostos sobre a adesão, que, juntos, são complementares e contraditórios, mas não se anulam, pois dependem em grande parte do sistema escolhido. Os mesmos afirmam que cada uma destas teorias são válidas, em certa medida, dependendo da natureza dos sólidos em contato e das condições de formação do sistema ligado.

A Figura 2.20 ilustra as interações do mecanismo de adesão que ocorrem entre duas peças de madeira e o adesivo, na qual cada elo é responsável por uma ação particular do adesivo-cadeia.

Figura 2. 20- Elos de conexão entre adesivo e madeira. Analogia de elo de cadeia para a adesão em madeira. (BIAZZON, 2016).



Kamke e Lee (2007) comentam que o termo *interface* é designado a uma superfície bidimensional virtual entre o adesivo e o aderente. Já o termo *interfase* refere-se ao volume adjacente à interface, que inclui a região de penetração do adesivo entre a região de transição do material puro e os materiais misturados, e que a penetração do adesivo ocorre em múltiplas escalas na região da interfase. As principais teorias existentes sobre adesão entre adesivos e madeira, apresentadas na literatura são: mecânica; adsorção; difusão e adesão química.

Teoria mecânica

Devido à fluidez e penetração do adesivo em substratos porosos ocorrem à formação de ganchos (enganchamento “*interlocking*”) mecânico do adesivo, o qual fica fortemente preso ao substrato após a cura e endurecimento do adesivo. (PETRIE 1999; VICK, 1999).

A rugosidade, aspereza e irregularidades da superfície podem contribuir para o aumento de ganchos mecânicos para a ancoragem do adesivo (PIZZI, 1994; PETRIE, 1999; SCHULTZ; NARDIN, 2003; ALLEN, 2005a, 2005b; PACKHAM, 2005).

A penetração do adesivo na madeira é um aspecto muito importante no processo da colagem. Se a penetração for profunda aumenta a área de superfície de contato entre adesivo e madeira, tornando-se mais eficaz a ancoragem mecânica do adesivo (VICK, 1999; FRIHART, 2005a, 2005b; FRIHART; HUNT, 2010).

Para que ocorra uma adesão mecânica eficiente e forte, o adesivo deve alcançar a camada de madeira intacta abaixo da superfície, penetrando e preenchendo os lúmens ou pontuação das células e as fendas da parede celular (ALBUQUERQUE; LATORRACA, 2000; JAKES; STONE; FRIHART, 2007).

Teoria adsorção

Nesta teoria, a adesão resulta do contato íntimo entre dois materiais, que desenvolvem forças de atração superficiais. O processo de estabelecimento do contato contínuo entre um adesivo e um substrato é chamado de umedecimento, que pode também ser definido como a adesão de um líquido a um sólido. Portanto, uma condição necessária para se obter uma boa adesão, é a molhagem. (PETRIE, 1999; SCHULTZ; NARDIN, 2003).

Segundo Allen (2005a, 2005c), esta teoria abrange explicações que dependem das ligações secundárias entre o adesivo e o aderente.

Teoria da difusão

Para Schultz e Nardin (2003) a adesão ocorre através da difusão de segmentos de cadeias de polímeros. As forças de adesão podem ser visualizadas como as mesmas produzidas na adesão mecânica, só que agora em nível molecular. No entanto, as aplicações dessa teoria também são limitadas. Segundo Pizzi (1994); Mano e Mendes (2004) a mobilidade de longas cadeias de polímeros é bastante restrita, limitando severamente a interpenetração molecular proposta nessa teoria.

Teoria da adesão química ou “Adesão específica”

Segundo Pizzi (1994); Schultz e Nardin (2003), Frihart e Hunt (2010) a adesão se dá através de ligações químicas formadas entre adesivo e substrato. A teoria da adesão química deve ser entendida como uma subdivisão da teoria da adsorção. Esta teoria baseia-se em que

as ligações químicas seriam consideradas como os principais mecanismos de adesão (PIZZI, 1994).

As ligações químicas estão divididas em ligações primárias (ligações covalentes, iônicas e metálicas), e ligações secundárias como as forças de Van der Waals, (dipolo-dipolo ou forças de Keesom ou ainda dipolo permanente, dipolo-dipolo induzido, forças de dispersão ou forças de London) e ligação de hidrogênio (BIAZZON, 2016).

2.7. Interações Químicas entre Adesivo PU e a Madeira

Segundo Biazon (2016) autores como Pizzi (1994), Schultz e Nardin (2003), Frihart (2005 a) Frihart e Hunt (2010) afirmam que a formação de ligações químicas entre o adesivo e a madeira depende da reatividade do adesivo, do substrato e dos diferentes tipos de ligações primárias e secundárias.

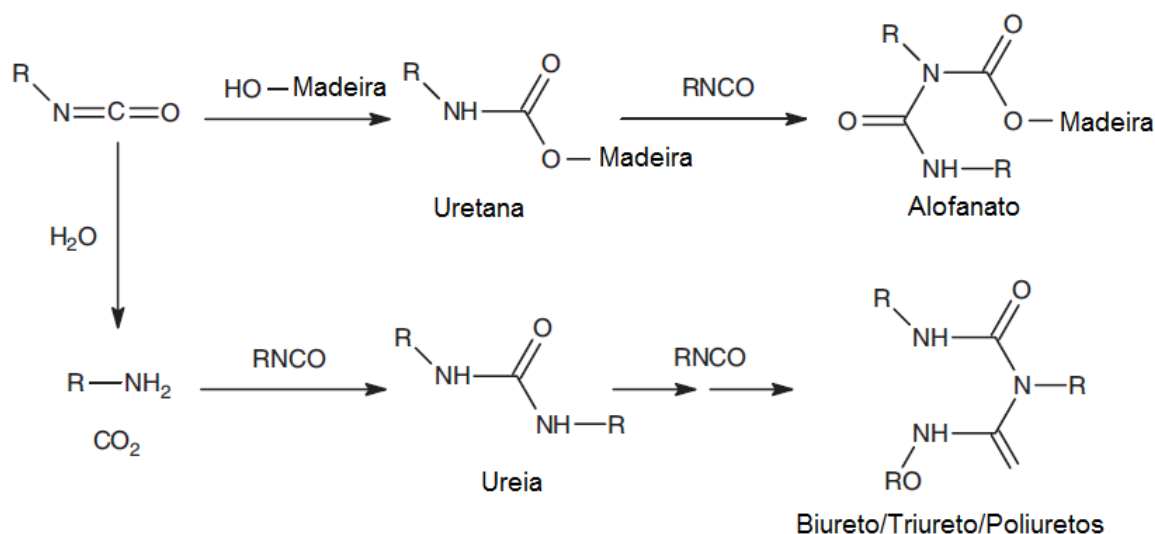
Garcia e Rech (2011) comentam que a reação química do poliuretano durante a colagem ocorre em duas fases. Na fase inicial ocorre uma mudança de estado físico de líquido para sólido e o adesivo assume comportamento termoplástico. Posteriormente, na segunda fase, o grupo químico isocianato presente no adesivo reage com o grupo hidroxílico (OH) da madeira e com a umidade do ar e da madeira e, assim, produz uma estrutura reticular semelhante à de um adesivo termofixo. Nesta fase, o adesivo assume alta resistência ao calor, frio e solventes.

A resistência final da colagem se obtém em um curto período de tempo, sendo que após o primeiro dia de colagem atinge em torno de 50% do seu valor máximo (GARCIA; RECH, 2011).

Os dois principais componentes utilizados na produção de PU como adesivos para madeira são o pré-polímero de difenilmetano-diisocianato (pMDI) e um poliol na presença de um catalisador. No caso da madeira a água é o catalisador da reação que formam a cadeia polimérica (LOPES, 2008).

Zhou e Frazier (2001) salientam que os adesivos pMDI, por muitos anos, foi atribuído a formação uretânica com os grupos hidroxilas da madeira. Porém através de seus estudos com ^{13}C e ^{15}N pela técnica de RMN, eles demonstraram que os adesivos pMDI são capazes de formar uma ligação uretânica covalente com a madeira, a qual serve para acentuar a durabilidade da linha de cola, como demonstra a Figura 2.21.

Figura 2. 21- Reação generalizada da cura da resina pMDI com a madeira (Adaptado de DAS; MALMBERG e FRAZIER 2007).



2.8. Fatores que Influenciam na Colagem de Madeiras

Segundo Frihart e Hunt (2010) há vários fatores que influenciam na colagem da madeira. Ahmad; Ansell e Smedley (2010) comentam que a preparação e o processamento da superfície da madeira é um fator importante a ser considerado para a aplicação do adesivo.

A qualidade do acabamento na superfície das madeiras após o seu beneficiamento segundo Frihart e Hunt (2010) é de extrema importância. As superfícies beneficiadas da madeira devem estar livres de marcas, tanto de usinagem ou outras irregularidades, incluindo “batidas” de plaina, partes esmagadas, farpas e fibras soltas.

As formas de interação entre o adesivo e a madeira dependem de características físico-químicas do adesivo como o pH e composição química, a molhabilidade, a viscosidade. (FRIHART, 2005a).

Segundo vários autores como Kollmann e Côté (1984) existem outros fatores que influenciam na colagem da madeira, são as suas propriedades anatômicas, físicas, teor de extrativos e seu valor de pH.

2.8.1. Características físico-químicas do adesivo

pH e composição química dos adesivos

O pH do adesivo influencia na colagem da madeira, não devendo ultrapassar as faixas de 2,5 a 11,0. Abaixo e acima desses valores podem causar degradação das fibras de madeira. Além disso, o pH muito baixo pode provocar uma formação excessiva de espuma na mistura, prejudicando a aplicação do adesivo (IWAKIRI, 2005).

Segundo Follich *et al.* (2010), o fluxo hidrodinâmico e a ação capilar são as principais causas para penetração do adesivo, sendo influenciados pela composição química do adesivo (teor de sólidos, distribuição de peso molecular), viscosidade e a temperatura.

Molhabilidade

A definição de molhabilidade segundo Jennings (2003) é a capacidade de um líquido se espalhar e estabelecer um contato íntimo sobre a superfície da madeira, este contato íntimo é muito influenciado pela energia livre da superfície da madeira. O adesivo deve apresentar uma boa molhabilidade com a madeira (JENNINGS, 2003; FRIHART, 2005a).

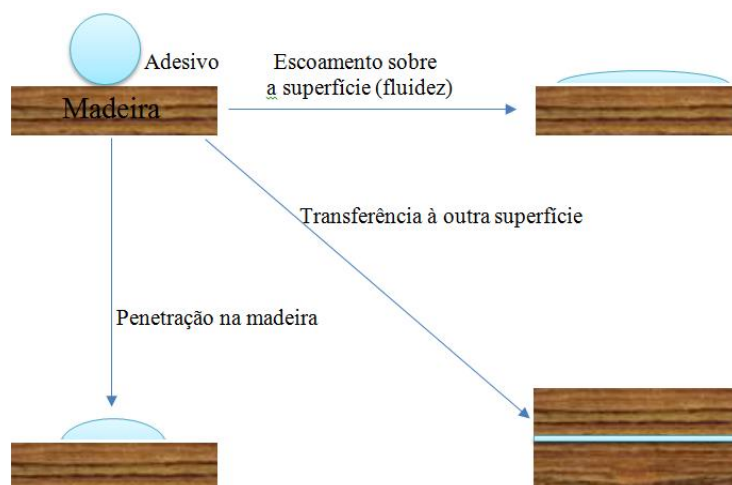
Além da penetração do adesivo na madeira, segundo Frihart (2005a) deve-se considerar a umectação (habilidade que uma gota do adesivo tem de formar um pequeno ângulo de contato com a superfície) e a fluidez (envolve o escoamento e espalhamento do adesivo sobre a superfície em um tempo razoável. Essa é uma característica importante, pois quanto maior a fluidez mais a superfície é coberta pelo adesivo resultando em uma colagem mais eficiente).

A Figura 2.22 apresenta a diferença entre fluidez, penetração e transferência do adesivo sobre a superfície da madeira.

O ângulo de contato permite quantificar a afinidade do líquido pelo sólido (JENNINGS, 2003 e MANO; MENDES, 2004). Quando o ângulo é pequeno a molhabilidade é alta e vice-versa. Se o ângulo é nulo a molhabilidade é perfeita, e indica a máxima afinidade do adesivo pelo substrato (JENNINGS, 2003; MANO; MENDES, 2004).

Diversos fatores podem influenciar o ângulo de contato entre o líquido e a superfície da madeira. De acordo com Jennings (2003), a viscosidade e a tensão superficial do líquido, a energia de superfície da madeira, a rugosidade superficial da madeira, a porosidade da madeira e a orientação com relação à grã. Portanto extrair medidas de ângulo de contato do adesivo na madeira não é uma tarefa fácil devido a aspectos como a porosidade que favorece o espalhamento ou absorção do líquido.

Figura 2. 22- Formas de interação entre o adesivo e a madeira. (Adaptado de FRIHART, 2005a).



Viscosidade

De acordo com Frihart e Hunt (2010), a viscosidade do adesivo depende do tipo de adesivo que será aplicado, a quantidade de solvente, a idade do adesivo e da temperatura. A viscosidade do adesivo afeta vigorosamente a mobilidade, o fluxo e a penetração e, em particular, a transferência de adesivo para superfícies da madeira oposta, quando a pressão é aplicada no conjunto. Segundo os mesmos autores, após a aplicação, a viscosidade do adesivo pode se modificar, dependendo da propagação e da quantidade de adesivo utilizado, espécies e teor de umidade da madeira, temperatura e umidade do ar ambiente, evaporação e absorção de solvente.

Segundo Albuquerque e Latorraca (2005); Almeida (2009); quando a viscosidade do adesivo for baixa, a penetração do adesivo na madeira ocorre com maior facilidade podendo até ser em demasia e quando a viscosidade do adesivo for alta dificulta o espalhamento do mesmo sobre a madeira, provocando condições desfavoráveis de umectação e resultando em menor penetração do adesivo na estrutura capilar da madeira, causando qualidade inferior de colagem. Os mesmos autores afirmam que não são desejáveis valores extremos de viscosidade.

Frihart (2005a) relata que o teor de umidade da madeira afeta a viscosidade do adesivo, podendo aumentar ou diminuir a penetração do adesivo na mesma.

2.8.2. Características anatômicas da madeira

Dentre as características anatômicas da madeira tem-se: ângulo das direções das fibras (grã), porosidade, anéis de crescimento, cerne e alburno e idade da árvore (ALBUQUERQUE; LATORRACA, 2005). A variabilidade estrutural e anatômica existente na madeira afeta de modo significativo o desempenho de uma ligação adesiva (KOLLMANN; KUENZI; STAMM, 1975, ALBUQUERQUE; LATORRACA, 2000, 2005).

Ângulo da direção das fibras (Grã)

O ângulo da grã, segundo Albuquerque e Latorraca (2000) influencia nas propriedades físicas e mecânicas da madeira e está diretamente relacionado com o teor de umidade, a estabilidade dimensional, a resistência e propriedades relativas ao acabamento de superfícies da madeira. O efeito da direção do ângulo da grã na formação da ligação adesiva está ligado a porosidade que ocorrem em diferentes planos de corte, afetando a interação adesivo/madeira (ALBUQUERQUE; LATORRACA, 2005).

Porosidade

A porosidade da madeira está relacionada com a densidade, que influencia na penetração dos adesivos. Albuquerque e Latorraca (2005) afirmam que quanto mais porosa for a madeira, ocorrerá a absorção excessiva de adesivo, ou seja, ocorre maior penetração do adesivo em sua estrutura, podendo ocasionar uma linha de cola “faminta”, consequentemente, a resistência da colagem será comprometida. Por outro lado, quanto menos porosa for a madeira maior a dificuldade penetração do adesivo em sua estrutura podendo ocorrer linha de cola espessa.

Anéis de crescimento

Os anéis de crescimento são formados por dois tipos de lenho: inicial e tardio (ALBUQUERQUE; LATORRACA, 2000). O lenho inicial possui elementos anatômicos menores, paredes celulares finas, lúmens grandes, numerosas pontuações grandes, madeira macia, menor densidade e resistência mecânica e maior porosidade. O lenho tardio possui os elementos anatômicos maiores, paredes celulares espessas, lúmens pequenos, poucas pontuações pequenas, madeira dura, maior densidade e resistência mecânica e menor porosidade (BURGER; RICHTER, 1991).

Estas diferenças na estrutura da madeira podem ocasionar problemas relativos à penetração de adesivos, ocasionando a linha de cola “faminta” ou “espessa”. (ALBUQUERQUE; LATORRACA, 2005).

Cerne e alburno

O cerne é menos permeável e mais denso que o alburno devido ao depósito de substâncias nas células como óleos, graxas e compósitos fenólicos, possuindo maiores dificuldades na secagem e na absorção de produtos preservativos. Com isto aumenta a dificuldade de ocorrer reações químicas para a efetuação da colagem (BURGER; RICHTER, 1991; ALBUQUERQUE; LATORRACA, 2005).

Idade da árvore

Segundo Iwakiri (2005) o crescimento das árvores resulta na formação do lenho adulto e juvenil. O lenho juvenil possui anéis de crescimento mais largos, menor densidade, maior porosidade, apresentando maior facilidade de colagem em relação ao lenho adulto (ALBUQUERQUE; LATORRACA, 2005).

2.8.3. Propriedades físicas da madeira

Das propriedades físicas da madeira, as que mais podem interferir na colagem são a densidade e o teor de umidade (VICK, 1999; FRIHART; HUNT, 2010).

Densidade

Madeiras de alta densidade segundo Frihart e Hunt (2010), possuem um maior grau de dificuldade de colagem se comparadas às de baixas densidades. Madeiras densas apresentam paredes celulares mais espessas, lúmens reduzidos e pontuações reduzidas. Essas características tendem a limitar a penetração do adesivo na madeira, ocasionando uma ligação adesiva mais superficial e provavelmente mais fraca (VICK, 1999; ALBUQUERQUE; LATORRACA, 2000).

Teor de umidade

O teor de umidade da madeira influencia na colagem da mesma, afetando a resistência da junta colada, no desenvolvimento de rachaduras na madeira e na estabilidade dimensional do produto colado (VICK, 1999).

Quando a madeira contém baixo teor de umidade, maior será a taxa de absorção, a velocidade de cura e a solidificação do adesivo (IWAKIRI, 2005). Entretanto, quando a madeira contém alto teor de umidade, menos água e adesivo podem ser absorvidos. Para se obter uma melhor adesão nas peças coladas, as faixas de umidade da madeira deve ser entre 6-14% (VICK, 1999).

Quando o teor de umidade da madeira aumenta (absorve água), vai enfraquecendo as ligações e perdendo sua força de adesão formando uma zona de falha (FRIHART, 2005a).

2.8.4. Extrativos e pH da madeira

Segundo Iwakiri (2005), os extrativos, o pH e as substâncias inorgânicas (teor de cinzas) afetam a colagem da madeira. O mesmo autor afirma que o teor de cinzas pode afetar o pH da madeira.

Os extrativos da madeira interferem na umectação e permeabilidade do adesivo (VICK, 1999; FRIHART; HUNT, 2010). Segundo Stehr e Johansson (2000), após a usinagem os extrativos migram para a superfície da madeira interferindo na colagem.

No processo de prensagem, segundo Bianche (2014), os extrativos presentes no cerne quando voláteis influenciam na permeabilidade da madeira, podendo afetar a colagem, formando as bolhas. Outra influência do extrativo se dá na alteração do pH da superfície da madeira interferindo na cura (FRIHART; HUNT, 2010).

Segundo Prata (2010) a espécie pinus sofre influências da gramatura de adesivo, pois possui baixos teores de extrativos permitindo assim que o adesivo penetre mais na madeira.

3. MATERIAIS E METODOLOGIA

Todo o desenvolvimento do estudo foi realizado no Campus da UNESP de Itapeva.

3.1. Materiais

3.1.1. Madeira utilizada na experimentação

As peças de madeira, objeto da experimentação, foram adquiridas na serraria Alena no município de Itapeva/SP, no formato de pranchas com as seguintes dimensões nominais: 5,0 cm de espessura, 15,0 cm de largura e 190 cm de comprimento, identificadas pelo fornecedor, como sendo da espécie *Pinus elliottii*.

Essas peças foram usinadas para confeccionar 32 painéis com dimensões de 135,0 cm de comprimento, 72,0 cm de largura e 4,5 cm de espessura. Esses painéis foram testados pela Maringá Ferro-Liga Itapeva – São Paulo, para serem utilizados como “bandejas”.

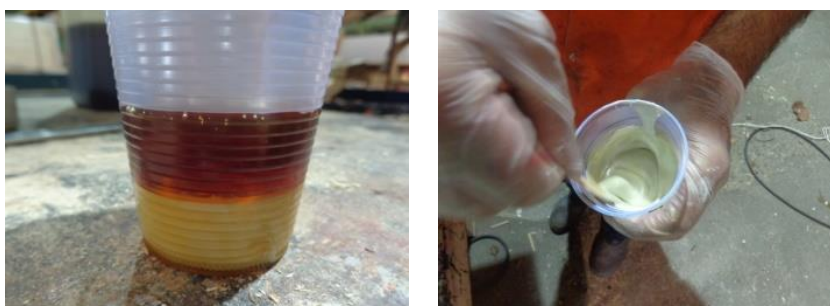
Essas bandejas são colocadas em uma esteira, e levadas até um equipamento o qual as prende, em seguida são “despejadas” partículas de minério para serem recuperadas e reaproveitadas.

As partículas de minérios são prensadas e formam os bloquetes (aglomerado de partículas). Nesse procedimento as partículas estão úmidas, sendo necessário que os painéis resistam à pressão exercida pela prensa, às intempéries, a abrasividade e a umidade.

3.1.2. Adesivo

O adesivo escolhido e utilizado neste trabalho, foi o poliuretano bicomponente AD 101. Segundo o fornecedor KEHL® Indústria e Comércio LTDA – ME, o adesivo é derivado de óleo de mamona, e o mesmo está ilustrado na Figura 3.1.

Figura 3. 1- Adesivo PU.



3.1.3. Máquinas, equipamentos e instrumentos.

Máquinas de usinagem

Para a usinagem de madeira foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Plaina Moldureira Plus Advance - 5E 5/6 eixos da marca “OMIL” série 10-11 nº 1846 com faixa de velocidade de avanço entre 1 e 37 m/min ajustadas por inversor de frequência. Na plaina moldureira, as superfícies das peças foram submetidas à usinagem cilíndrica tangencial com fresas. A Plaina Moldureira Plus Advance - 5E 5/6 eixos apresenta a rotação do eixo porta-ferramenta de 6045 RPM, diâmetro das fresas 125 mm de cabeçote com 4 facas de aço rápido (HSS), para aplainamento das superfícies superior e inferior com velocidade de corte $V_c = 39,56 \text{ m.s}^{-1}$. O jogo de fresas cilíndricas de perfil com dentes de metal duro foram utilizadas para confeccionar os dentes macho e fêmea nas laterais das pranchas. A Figura 3.2 ilustra a Plaina Moldureira Plus Advance -5/6E.

Figura 3. 2- Plaina Moldureira Plus Advance – 5/6E.



- Plaina desengrossadeira (Figura 3.3a), utilizada para desbastar e uniformizar espessuras das peças de madeira;
- Serra circular destopadeira (Figura 3.3b), utilizada para serrar perpendicularmente as pranchas para padronizar o comprimento das peças;
- Serra circular esquadrejadeira com eixo inclinável para corte de 45° a 90° (Figura 3.3c), utilizada para cortar as peças de madeira em peças menores e para confeccionar os corpos de prova;
- Seccionadora de painéis (Figura 3.3d), utilizada para dimensionar os painéis e refilar;

- Serra circular manual (Figura 3.3e), usada para seccionar as laterais dos painéis com ângulo de 45°;
- Lixadeira de cinta (Figura 3.3f), usada para retirar pequenas irregularidades na superfície dos painéis;
- Furadeira horizontal (Figura 3.3g), utilizada para preparar os corpos de prova a serem submetidos à tração normal às fibras.

A Figura 3.3 apresenta as máquinas de usinagem utilizadas para a produção dos painéis laminados colados e dos corpos de prova para experimentação.

Figura 3. 3- Máquinas de usinagem utilizadas para a produção do painel laminado colado e dos corpos de prova.

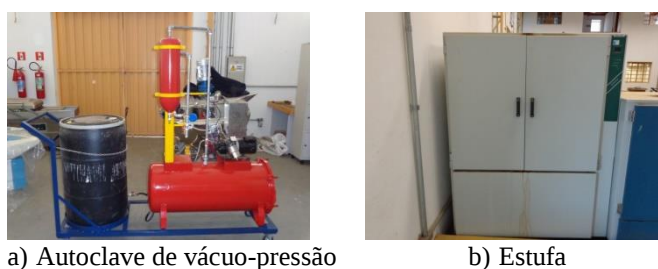


Equipamentos

Os equipamentos utilizados no processo da experimentação (Figura 3.4) foram:

- Autoclave de vácuo-pressão (Figura 3.4a), utilizada para realizar os ensaios de delaminação para avaliar o comportamento da combinação madeira-adesivo para uso exterior.
- Estufa (Figura 3.4b), utilizada para secar os corpos de prova após o ensaio de delaminação.

Figura 3. 4- Equipamentos utilizados no processo da experimentação.



Instrumentos de medição e controle

Os instrumentos de medição e controle usados neste trabalho são (Figura 3.5):

- Medidor de umidade (Figura 3.5a), com faixa de medição de 8% a 60% à base seca, capacidade de resolução de 0,1 %, visor de cristal líquido com 3,5 dígitos e martelete de medição com 4 eletrodos fixados em base de acrílico;
- Medidor de umidade do tipo resistivo (Figura 3.5b) com ampla faixa de medição para escala de madeira (5-65%), calibrado para madeira de baixa densidade;
- Balança semi analítica (Figura 3.5c), usada para a pesagem dos adesivos e dos corpos de prova;
- Paquímetro (Figura 3.5d), usado para medir as dimensões das pranchas, a espessura e a profundidade dos dentes e as dimensões dos corpos de prova.

Figura 3. 5- Instrumentos de medição e controle.



a) Medidor de umidade



b) Medidor de umidade do tipo resistivo



c) Balança semi analítica



d) Paquímetro

Máquina de Ensaio

- Marca “EMIC”, modelo GR 048 Linha DL 300KN - máquina de ensaios universal de caracterização mecânica de materiais.

Para os ensaios de caracterização de resistência ao cisalhamento na região de cola e a tração, empregou-se uma máquina de ensaio universal computadorizada, marca “EMIC”, modelo DL 30000, com capacidade para realizar ensaios mecânicos para uma carga de até 30 toneladas, disponível no laboratório de Propriedades dos Materiais do Campus da UNESP de Itapeva, conforme ilustrado na Figura 3.6.

Figura 3. 6- Máquina de ensaio universal EMIC.



3.2. Metodologia

Antes de iniciar a usinagem da madeira *Pinus elliottii*, a Plaina Moldureira Plus Advance - 5E 5/6 eixos foi preparada e regulada. As facas de aço rápido do cabeçote para aplainamento das superfícies superior e inferior das peças foram afiadas, os cabeçotes das tupias direita e esquerda foram substituídos por fresas cilíndricas de perfil de emendas para a confecção dos dentes macho e fêmea, as fresas de metal duro foram reguladas na altura e na profundidade dos dentes, conforme ilustra a Figura 3.7.

Figura 3. 7- Substituição dos cabeçotes de tupia pelas fresas de metal duro.



A velocidade de avanço para a usinagem das peças foi fixada em 6 m.min^{-1} , a qual foi aferida com o tacômetro digital.

As pranchas de *Pinus elliottii* utilizadas neste trabalho foram secas naturalmente ao ar livre. O controle da umidade das pranchas foram aferidas com medidor de umidade (Figura 3.5a).

As pranchas foram classificadas em relação somente à espessura da seguinte maneira: espessuras abaixo de 4,7 cm, espessuras entre 4,7 a 5,3 cm e espessuras acima de 5,3 cm. As espessuras abaixo de 4,7 cm foram descartadas, as espessuras entre 4,7 a 5,3 cm foram usinadas na plaina moldureira e as espessuras acima de 5,3 cm foram aplainadas para atingirem a espessura de 5,3 cm, para depois serem usinadas na plaina moldureira.

Após o processo de seleção e usinagem na plaina moldureira, foi verificado o teor de umidade das pranchas, a verificação foi realizada em 6 diferentes pontos em cada prancha, foram coletadas 7 amostras aleatórias do lote.

O teor de umidade média de cada amostra está indicado na Tabela 3.1.

Tabela 3. 1- Valor médio do teor de umidade das pranchas de pinus.

Teor de umidade							
Média da 1 ^a amostra	Média da 2 ^a amostra	Média da 3 ^a amostra	Média da 4 ^a amostra	Média da 5 ^a amostra	Média da 6 ^a amostra	Média da 7 ^a amostra	Média das amostras
18,1%	19,4%	19,8%	19,0%	20,2%	17,9%	19,6%	19,1%

Posteriormente à usinagem, as peças foram seccionadas no comprimento em serra circular destopadeira para padronização dos comprimentos, para iniciar as confecções dos painéis.

3.2.1. Confecção dos painéis

Neste estudo os painéis foram confeccionados da seguinte maneira:

As peças de dimensões 4,5 x 13,0 x 140,0 cm foram aplainadas nas superfícies de sua largura e usinadas com fresas de perfil macho e fêmea nas superfícies de sua espessura (emenda lateral). Duas geometrias de fresa de perfil disponíveis no mercado recomendadas para emendas laterais foram adotadas.

Convencionou-se neste estudo que as emendas macho e fêmea com geometrias diferentes seriam citadas como emenda dentada 2 dentes e emenda dentada 3 dentes, conforme ilustra a Figura 3.8.

Figura 3. 8- Tipos de emendas dentadas de perfil “macho e fêmea” : a) Emenda com 3 dentes; b) Emenda com 2 dentes; c) e d) Juntas macho e fêmea.



a



b



c



d

O primeiro tipo de emenda foi confeccionada com 3 dentes. As dimensões de profundidade, da espessura superior e inferior dos dentes estão apresentadas na Figura 3.9.

Figura 3. 9- Ilustração da emenda de 3 dentes.



A dimensão da superfície de contato das amostras em perfil de emenda era de 45 mm (4,5cm), ao realizar a emenda dentada com 3 dentes, a superfície de contato passou para 82 mm (8,2 cm).

O segundo tipo de emenda foi confeccionado com 2 dentes. As dimensões de profundidade, da espessura superior e inferior dos dentes estão apresentadas no esquema abaixo na Figura 3.10.

Figura 3. 10- Ilustração da emenda de 2 dentes.



A dimensão da superfície de contato (espessura da peça) era de 45 mm (4,5 cm) e ao realizar a emenda dentada com 2 dentes passou para 65 mm (6,5 cm).

Após o término da confecção das emendas dentadas, iniciou-se o processo de colagem dos painéis.

Colagem do painel

Na literatura para realizar a colagem das amostras de madeira, recomenda-se que estas devem estar com teores de umidade próximo da umidade de 12 % $\pm$ 4%. Neste trabalho o teor médio de umidade da madeira foi em torno 19,1%.

A gramatura do adesivo utilizada para a produção dos painéis foi de 200 g.m⁻². O componente A é o Diisocianato e o componente B é o Poliól, a mistura recomendada pelo fabricante é na proporção de 1:1 (1 parte de poliól e 1 parte de diisocianato).

A Equação 3.1 foi usada para determinar a área de colagem.

$$A = C \times E \quad (3.1)$$

Em que:

A = área de colagem em cm^2 ; C = comprimento da peça em cm;

E = Espessura da peça em cm.

A Figura 3.11 ilustra a área de colagem em uma superfície plana.

Figura 3. 11- Área de colagem de uma superfície plana.



A massa de adesivo obtida para a colagem das peças foi de 65g, mas foi utilizado 80g de adesivo, devido ao aumento da superfície de contato dos dentes da emenda. Portanto, foram pesados 40g do componente A e 40g do componente B.

O adesivo foi distribuído com pincel nas superfícies das peças de madeira para que ficasse o mais uniforme possível.

Após a aplicação do adesivo, juntaram-se as partes das peças imediatamente, não ultrapassando um período de 10 minutos entre sua aplicação e a união das partes (recomendação do fabricante até 15 minutos), para não comprometer a eficiência da colagem, evitando defeitos. A Figura 3.12 ilustra as etapas do processo de colagem do painel.

Figura 3. 12- Etapas do processo de colagem do painel: a) Distribuição do adesivo sobre a peça; b) Junção e prensagem das peças.



a



b

Após as peças serem juntadas, foram prensadas a frio por cerca de 4 horas por 4 grampos do tipo rosca e apoios, popularmente denominado por “sargento”, com aplicação de torque de 28,13 N.m em cada grampo. Para controlar a intensidade do torque (força de aperto) dos grampos sargento de barra utilizou-se um torquímetro de estalo. A Figura 3.13 ilustra a prensagem de um painel com o torquímetro.

Figura 3. 13- Prensagem do painel – a) Prensagem com torquímetro; b) Painel prensado.



Conforme a norma EN 385:2002, a pressão necessária para produzir as emendas dentadas de coníferas varia de 2N/mm² a 10 N/mm², todavia o valor dessa pressão depende do comprimento dos dentes.

O cálculo do torque para força de prensagem foi realizado da seguinte forma:

- Área de Prensagem

$$A_{\text{prensagem}} = C \times E = 145 \text{ cm} \times 4,5 \text{ cm} = 652,5 \text{ cm}^2 \text{ ou } 65250 \text{ mm}^2$$

- Força de prensagem:

A pressão recomendada para a prensagem foi entre 7 e 10 Kgf/cm² para madeiras com $\rho < 500 \text{ Kg/m}^3$.

$$F = 652,5 \text{ cm}^2 \times 10 \text{ Kgf/cm}^2 = 6525 \text{ Kgf}$$

Utilizou-se 4 sargentos de barra para prensar os painéis.

$$6525 \text{ Kgf} : 4 = 1631,2 \text{ Kgf (para cada sargento)}$$

Força de prensagem em Newton (N) será:

$$F = 1631,2 \text{ Kgf} \times 9,81 \text{ N/Kgf} = 16000 \text{ N para cada sargento}$$

Para calcular o torque foram utilizadas as seguintes equações: 3.2; 3.3 e 3.4 (BUDYNAS, R. G.; NISBETT, 2011).

$$T = \frac{F \cdot dm \cdot (a + \pi \cdot \mu \cdot dm)}{2 \cdot (\pi \cdot dm - \mu \cdot a)} \quad (3.2)$$

$$dm = \frac{de - di}{2} \quad (3.3)$$

$$a = p \cdot n \quad (3.4)$$

Onde,

F : força axial, em N.

μ : coeficiente de atrito do parafuso (adimensional)

p : passo, distância do início de um filete ao outro, medido paralelamente ao eixo, em mm

de : diâmetro externo, em mm.

di : diâmetro interno, em mm

dm : diâmetro médio, em mm

a : avanço, deslocamento axial relativo a uma volta do fuso (será o passo vezes o número de entrada), em milímetro (mm).

n : número de filetes.

Tem-se:

$$a = p \cdot n = 3\text{mm} \cdot 1 = 3\text{mm}$$

$$dm = \frac{de - di}{2} = \frac{17,5\text{mm} - 14,5\text{mm}}{2} = 16 \text{ mm}$$

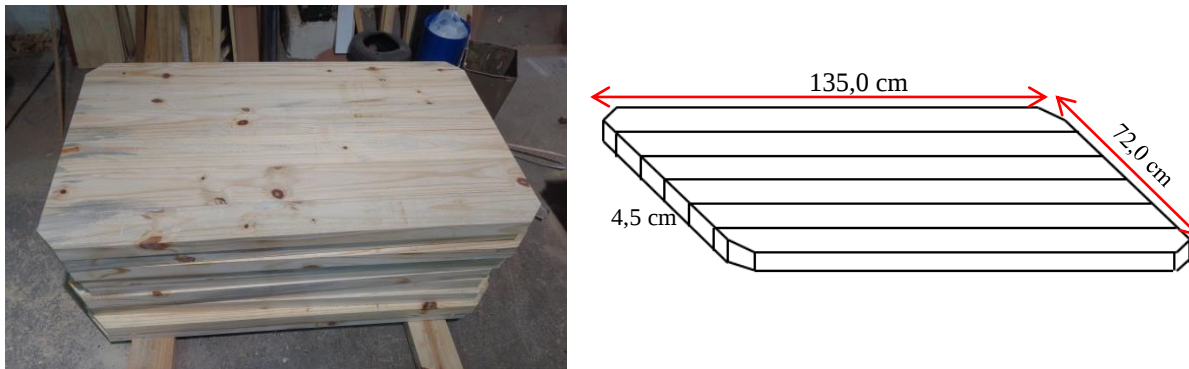
$$\begin{aligned} T &= \frac{F \cdot dm \cdot (a + \pi \cdot \mu \cdot dm)}{2 \cdot (\pi \cdot dm - \mu \cdot a)} = \frac{16000\text{N} \cdot 16\text{mm} \cdot (3\text{mm} + \pi \cdot 0,158 \cdot 16\text{mm})}{2 \cdot (\pi \cdot 16\text{mm} - 0,158 \cdot 3\text{mm})} \\ &= 28128,6 \text{ N} \cdot \text{mm} \text{ ou } 28,13 \text{ N} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

Após 4 horas de prensagem os sargentos foram retirados dos painéis, e aguardou-se o tempo para a cura do adesivo de 24 horas.

Os painéis foram esquadrejados na seccionadora de painéis para obtenção das medidas finais com as seguintes dimensões nominais: 135,0 cm de comprimento, 72,0 cm de largura e 4,5 cm de espessura. Sequencialmente as quinas dos painéis foram cortadas com ângulo de

45°, a pedido da empresa. Alguns painéis foram lixados devido a pequenas irregularidades na superfície. A Figura 3.14 ilustra os painéis com suas respectivas dimensões.

Figura 3. 14- Painéis e suas respectivas dimensões.



Os painéis de emendas dentadas com 3 dentes apresentaram maiores dificuldades nos encaixes das peças. Os painéis de emendas dentadas com 2 dentes acomodaram melhor os encaixes devido a geometria dos dentes.

Após a colagem dos painéis, o adesivo utilizado não sofreu expansão devido a sua formulação, o que evitou a formação de possíveis bolhas interface adesivo-madeira.

3.2.2. Procedimentos dos ensaios físico-mecânicos

Neste trabalho foram realizados os seguintes ensaios de resistência mecânica na região de cola na emenda dentada: ensaios de resistência ao cisalhamento, e à tração normal às fibras, bem como o ensaio de delaminação. Após o ensaio de delaminação os corpos de prova foram submetidos aos ensaios de cisalhamento e tração para verificar quanto foi afetada a resistência das juntas coladas. Foram realizados ensaios de cisalhamento e tração normal às fibras em corpos de provas maciços e na região de cola em emendas de superfície plana a título de comparação dos resultados, como grupos de controle.

Ensaio de resistência ao cisalhamento na região de cola

Em referência à ABNT NBR 7190:1997, o cisalhamento na região de cola que teve por objetivo a determinação da resistência ao cisalhamento na região de cola da madeira de um lote considerado homogêneo. A definição da resistência ao cisalhamento na região de cola é

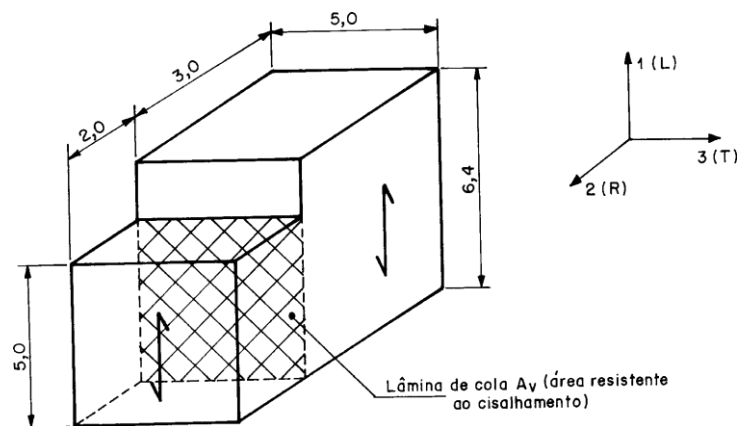
dada pela máxima tensão de cisalhamento que pode atuar na região de cola de um corpo de prova prismático, sendo dada pela Equação 3.5.

$$f_{v0} = \frac{F_{v0,máx}}{A} \quad (3.5)$$

Em que: $F_{v0,máx}$ é a máxima força cisalhante aplicada ao corpo de prova, em Newton (N); A é a área inicial da seção crítica do corpo de prova, num plano paralelo às fibras, em m^2 .

As dimensões do corpo de prova segundo a ABNT NBR 7190:1997 são apresentadas na Figura 3.15.

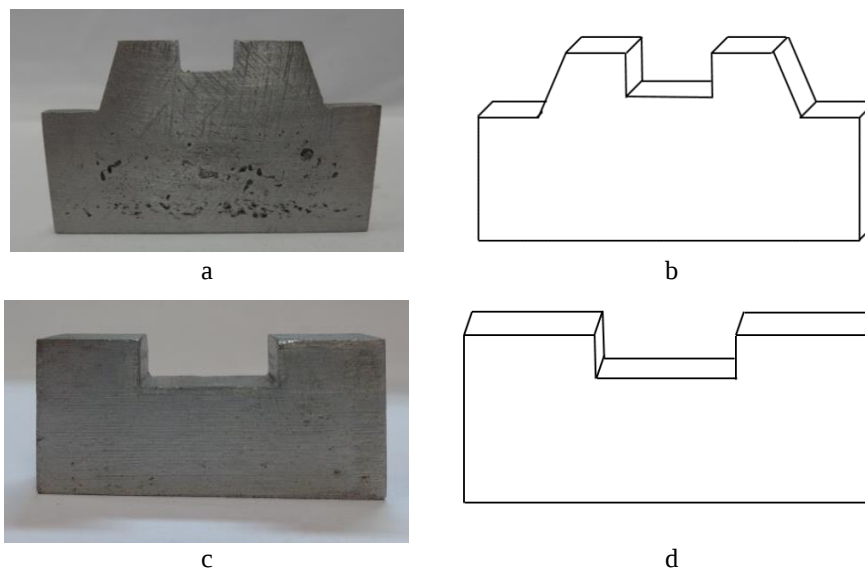
Figura 3. 15- Dimensões em centímetros, do corpo de prova para ensaio de cisalhamento na região de cola, na direção paralela às fibras. (Fonte: ABNT NBR 7190:1997).



Para a realização dos ensaios de cisalhamento nas emendas dentadas foram confeccionados dispositivos para que o cisalhamento ocorresse apenas na região de cola nas emendas de 2 e 3 dentes.

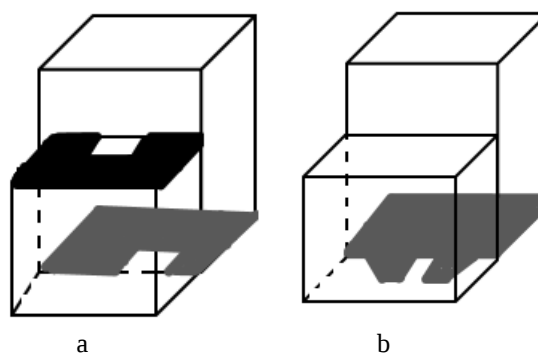
A norma ABNT NBR 7190:1997 não cita procedimentos para avaliar cisalhamento em emendas dentadas, motivo que levou a elaborar os dispositivos conforme ilustra a Figura 3.16.

Figura 3. 16- Dispositivos utilizados para realizar os ensaios de cisalhamento. a) e b) Dispositivo para emenda dentada de 2 dentes; c) e d) Dispositivo para emenda dentada de 3 dentes.



Os dispositivos foram acoplados a máquina de ensaio EMIC para proceder aos ensaios de cisalhamento. Nos corpos de prova da emenda dentada de 3 dentes foram empregados dois dispositivos sendo, um posicionado na parte superior dos corpos de prova e o outro posicionado na parte inferior dos corpos de prova (Figura 3.17a). Para a emenda dentada com 2 dentes foi utilizado apenas um dispositivo, posicionado na parte inferior dos corpos de prova (Figura 3.17b).

Figura 3. 17- Dispositivos acoplados na EMIC para realizar os ensaios de cisalhamento. a) Dispositivo para emenda dentada de 3 dentes posicionados na parte superior e parte inferior dos corpos de prova; b) Dispositivo para emenda dentada de 2 dentes posicionado na parte inferior dos corpos de prova.



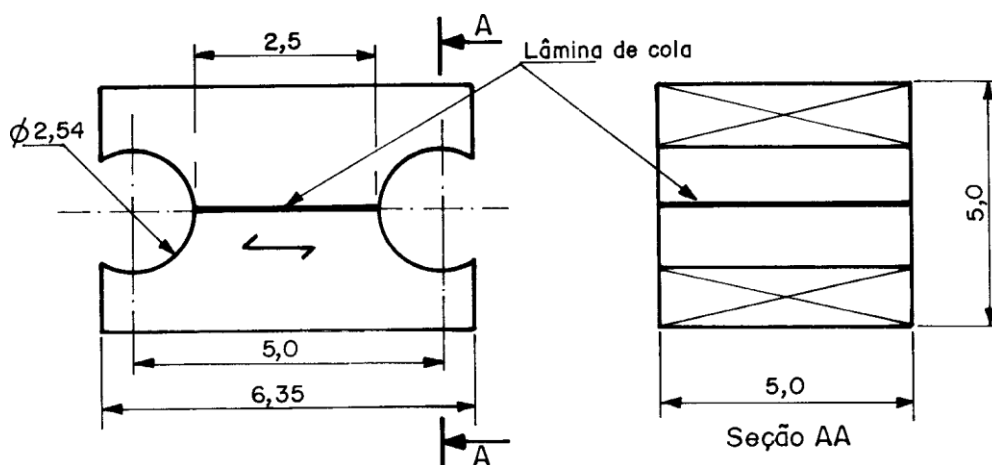
Ensaio de resistência à tração normal às fibras na região de cola

Em referência à ABNT NBR 7190:1997, a resistência da região de cola à tração normal às fibras da madeira laminada colada ($f_{t,90}$) é dada pela máxima tensão de tração que pode atuar em um corpo de prova alongado com trecho central de seção transversal uniforme de área A e comprimento não menor que $2,5 \sqrt{A}$, com extremidades mais resistentes que o trecho central e com concordâncias que garantam a ruptura no trecho central, sendo dada pela Equação 3.6.

$$f_{t,90} = \frac{F_{t90,máx}}{A} \quad (3.6)$$

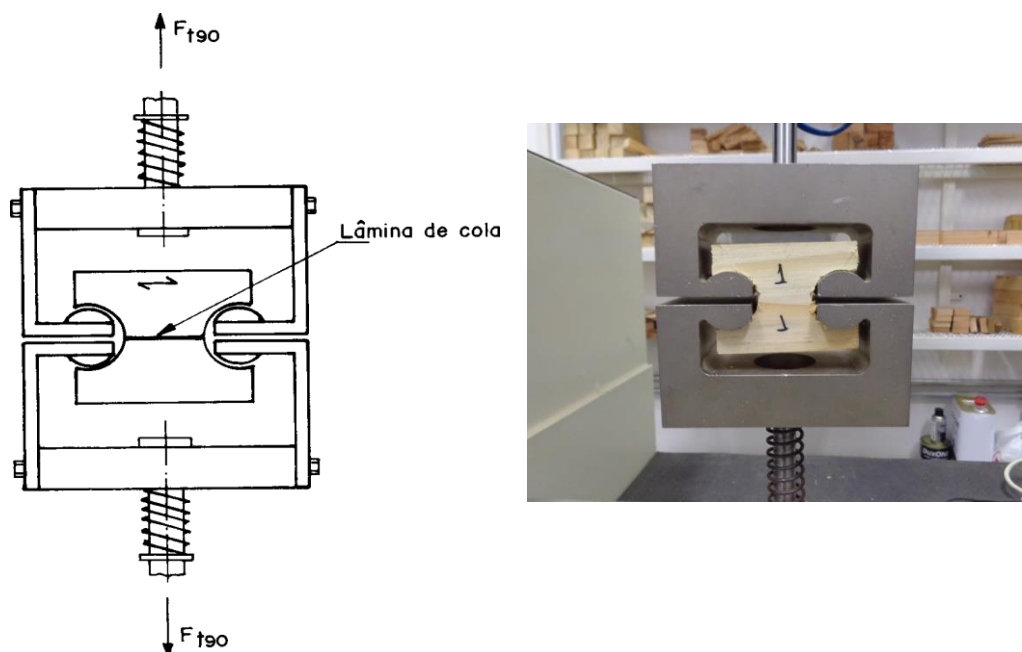
As dimensões do corpo de prova segundo a ABNT NBR 7190:1997 são apresentadas na Figura 3.18.

Figura 3. 18- Corpo de prova para tração da região de cola normal às fibras da madeira laminada colada, dimensões em centímetros (Fonte: ABNT NBR 7190:1997).



O arranjo de ensaio para determinação da resistência da região de cola à tração normal às fibras da madeira laminada colada com o corpo de prova é ilustrado na Figura 3.19.

Figura 3. 19- Arranjo de ensaio para tração da região de cola na direção normal às fibras da madeira laminada colada. (Fonte: ABNT NBR 7190:1997).



Ensaio de delaminação

No Brasil, ainda não existe uma norma da ABNT para avaliação das propriedades dos elementos estruturais que são expostos em ambientes externos e internos.

O ensaio de delaminação consiste no confinamento das amostras em uma autoclave, para aplicar um ciclo de vácuo-pressão sobre imersão em água.

O propósito dessa análise é determinar o comprimento de abertura das lamelas dos corpos de prova na seção transversal, para avaliar a qualidade da colagem.

O ensaio de delaminação adotado para este trabalho foi o da norma europeia EN 14080:2013 (a qual será utilizada como base para a NBR). De acordo com este documento normativo, o ambiente ao qual será exposto o adesivo influencia no tipo de procedimento que será adotado para analisar a delaminação. Por causa disso, existem três métodos distintos de avaliação nesse documento: Método A, B e C, os quais estão descritos na Tabela 3.2.

Neste trabalho o procedimento usado foi o método B, referente a adesivo de uso externo. Os ensaios de delaminação destinam-se a controlar a integridade das juntas coladas.

Tabela 3. 2- Métodos de ensaio de delaminação segundo a EN 14080:2013.

Método A	Método B	Método C
O ensaio começa com a submersão das amostras em água entre 10°C a 20°C. Em seguida, ocorre a aplicação de vácuo, entre 70 kPa e 85 kPa, por 5 minutos e de pressão, entre 500 kPa a 600 kPa, por uma hora. Em seguida, realiza-se um novo ciclo. Na estufa a temperatura deve ser entre 60°C a 70 °C com teor de umidade de no máximo 15% e circulação de ar entre 2 m/s a 3 m/s. O tempo de confinamento na estufa é entre 21 a 22 horas. Depois realiza, novamente esse procedimento.	O ensaio começa com a submersão das amostras em água entre 10°C a 20°C. Em seguida, ocorre a aplicação de vácuo, entre 70 kPa e 85 kPa, por 30 minutos e de pressão, entre 500 kPa a 600 kPa, por duas horas. Na estufa a temperatura deve ser entre 60°C a 70 °C com teor de umidade de entre 8% a 10% e circulação de ar entre 2 m/s a 3 m/s. O tempo de confinamento na estufa é entre 10 a 15 horas.	O ensaio começa com a submersão das amostras em água entre 10°C a 20°C. Em seguida, ocorre a aplicação de vácuo, entre 70 kPa e 85 kPa, por 30 minutos e de pressão, entre 500 kPa a 600 kPa, por duas horas. Em seguida, realiza-se um novo ciclo. Na estufa a temperatura deve ser entre 25°C a 30 °C com teor de umidade de entre 25% a 35% e circulação de ar entre 2 m/s a 3 m/s. O tempo de confinamento na estufa é 90 horas.
Delaminação máxima 5%	Delaminação máxima 4%	Delaminação máxima 10%

Fonte: EN 14080:2013

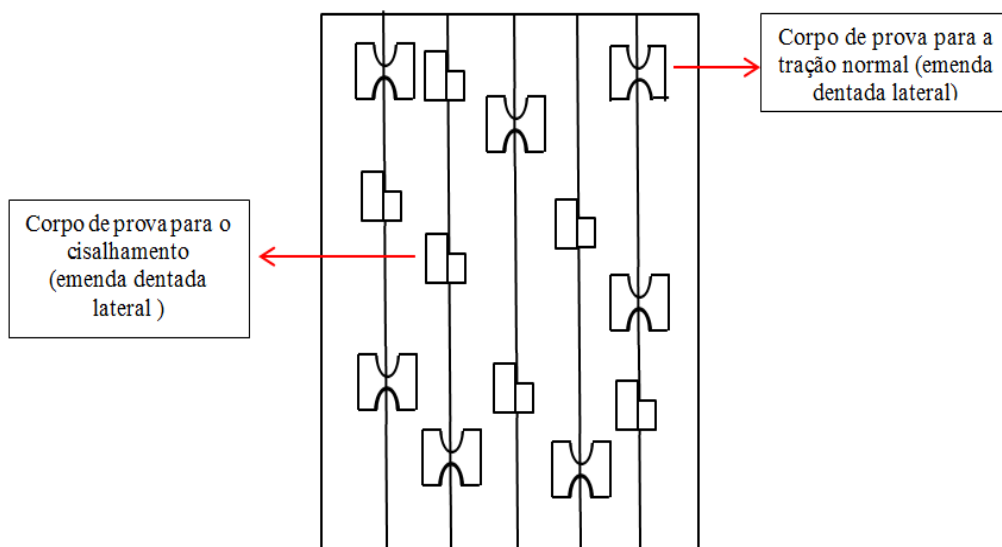
O objetivo foi simular o intemperismo (exposição à umidade), no sentido de tentar perceber os efeitos adversos que o “envelhecimento precoce” pode ter sobre a resistência das juntas coladas a longo prazo, no processo de envelhecimento natural da junta colada. Após ensaio de delaminação os corpos de prova também foram submetidos aos ensaios de cisalhamento e tração normal para verificar quanto foi afetada a resistência das juntas coladas.

3.2.3. Transformação dos painéis em corpos de prova

Nesse tópico apresentam-se a preparação das amostras para gerar os corpos de prova para os ensaios de cisalhamento na região de cola e tração normal às fibras nas emendas dentadas com 2 e 3 dentes. Os ensaios ocorreram após 30 dias a confecção dos painéis para emenda dentada 2 dentes e 90 dias para a emenda dentada 3 dentes.

A Figura 3.20 ilustra de maneira simplificada os posicionamentos dos diferentes corpos-de prova confeccionados para avaliação dos painéis.

Figura 3. 20- Esquema mostrando os posicionamentos dos diferentes corpos-de-prova confeccionados para avaliação dos painéis.



Os painéis foram seccionados transversalmente em 3 partes (Figura 3.21a) na serra esquadrejadeira, e em seguida serrados longitudinalmente em peças menores (Figura 3.21b).

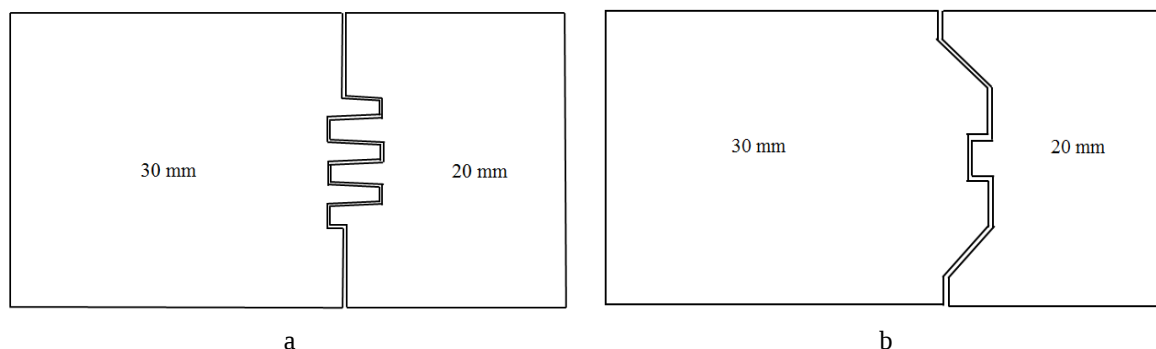
Figura 3. 21- Seccionamento dos painéis: a) Em 3 partes; b) Peças menores.



Preparação das amostras para gerar os corpos de prova para os ensaios de cisalhamento nas emendas dentadas com 2 e 3 dentes.

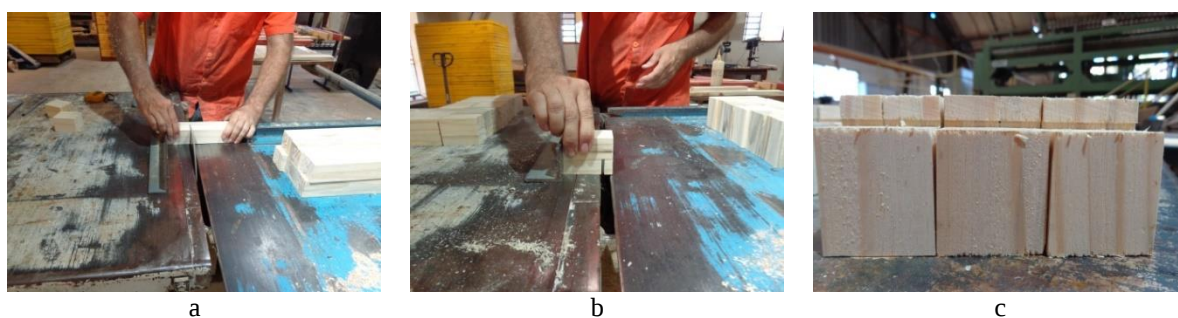
Após o seccionamento, as peças foram aplainadas em plaina desgrossadeira para obter as dimensões 30 mm e 20 mm de posicionamento na região de cola. A Figura 3.22 ilustra as medidas segundo a ABNT NBR 7190:1997 para o ensaio de cisalhamento.

Figura 3. 22- Ilustração das medidas segundo ABNT NBR 7190:1997: a) Painel com 3 dentes; b) Painel com 2 dentes.



Em seguida as peças foram novamente cortadas para a obtenção dos corpos de prova como ilustra a Figura 3.23.

Figura 3. 23- Etapas da preparação dos corpos de prova: a) Procedimento inicial para preparar os corpos de prova; b) Primeiro corte para preparação dos corpos de prova; c) Finalização dos corpos de prova para ensaio de cisalhamento.



Preparação das amostras para gerar os corpos de prova para os ensaios de tração normal às fibras nas emendas dentadas com 2 e 3 dentes.

Após o seccionamento, as peças foram aplainadas para obter as dimensões de posicionamento da região de cola no centro do corpo de prova. A Figura 3.24 ilustra as medidas segundo a ABNT NBR 7190:1997 para o ensaio de tração normal às fibras.

Figura 3. 24- Aferimento das medidas segundo ABNT NBR 7190:1997.



Em seguida as peças foram levadas a furadeira horizontal para confeccionar os furos nas amostras, gerando dos dois semicírculos no corpo de prova, conforme ilustra a Figura 3.25.

Figura 3. 25- Etapas da confecção dos corpos de prova a) Confeção dos furos nas amostras; b) Corpos de provas finalizados.



a)



b)

Foram confeccionados 6 corpos de prova maciços para o cisalhamento, 68 corpos de prova para o cisalhamento na região de cola, 6 corpos de prova maciços para tração normal às fibras e 68 corpos de prova para tração normal às fibras na região de cola, totalizando 148 amostras do mesmo lote de madeira. A Tabela 3.3 mostra o número amostras para os ensaios de cisalhamento e tração normal às fibras.

Tabela 3. 3- Número amostras para os ensaios de cisalhamento e tração normal às fibras.

Número de amostras retiradas do mesmo lote de madeira		
	Cisalhamento	Tração normal às fibras
Maciço	6	6
Emenda com superfície plana	12	12
Emenda dentada com 2dentes	28	30
Emenda dentada com 3dentes	28	26

Ensaio de Delaminação

Antes de iniciar os ensaios de delaminação, foram medidos os comprimentos das linhas de cola nos corpos de prova.

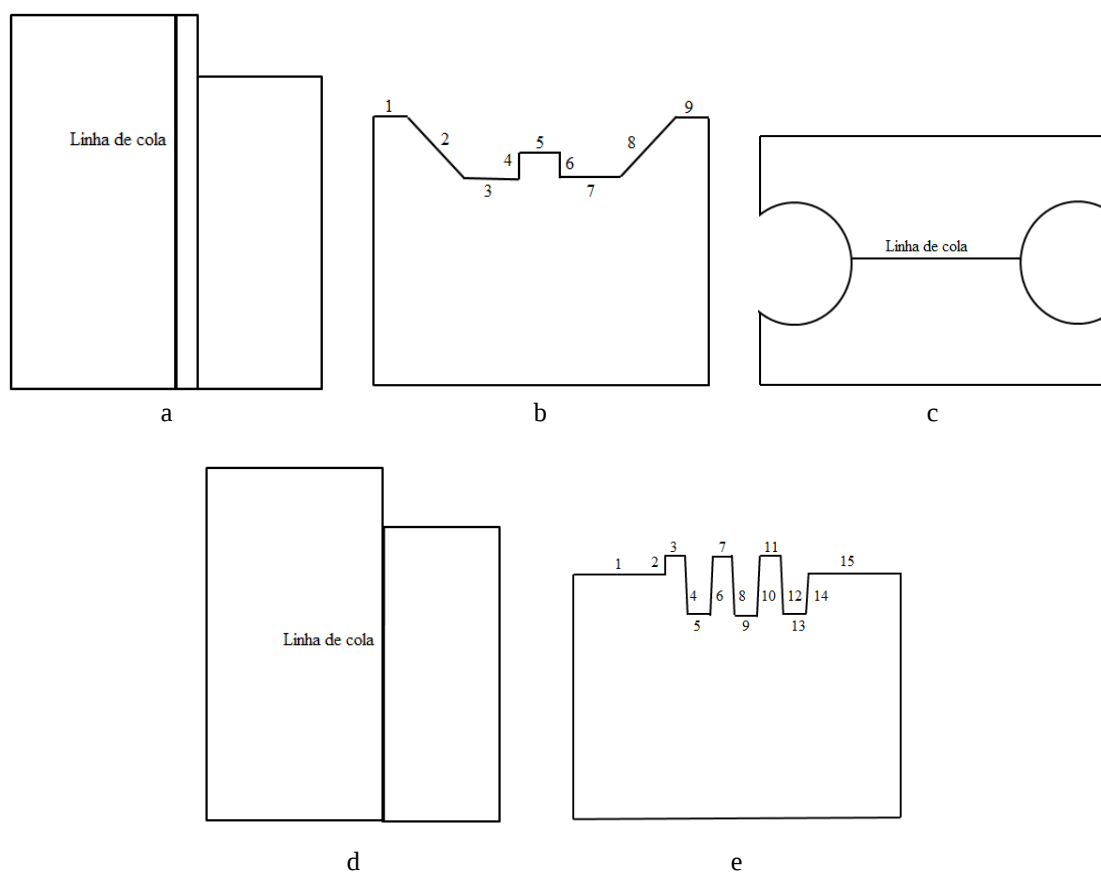
Para os corpos de prova de tração normal às fibras foram medidos os comprimentos das linhas de colas laterais.

Para os corpos de prova de cisalhamento foram medidos os comprimentos das linhas de colas laterais e as juntas dentadas na parte inferior das amostras.

As linhas de cola laterais nos corpos de prova da emenda dentada 2 dentes apenas para ensaio de cisalhamento, estão deslocadas devido à geometria do dente.

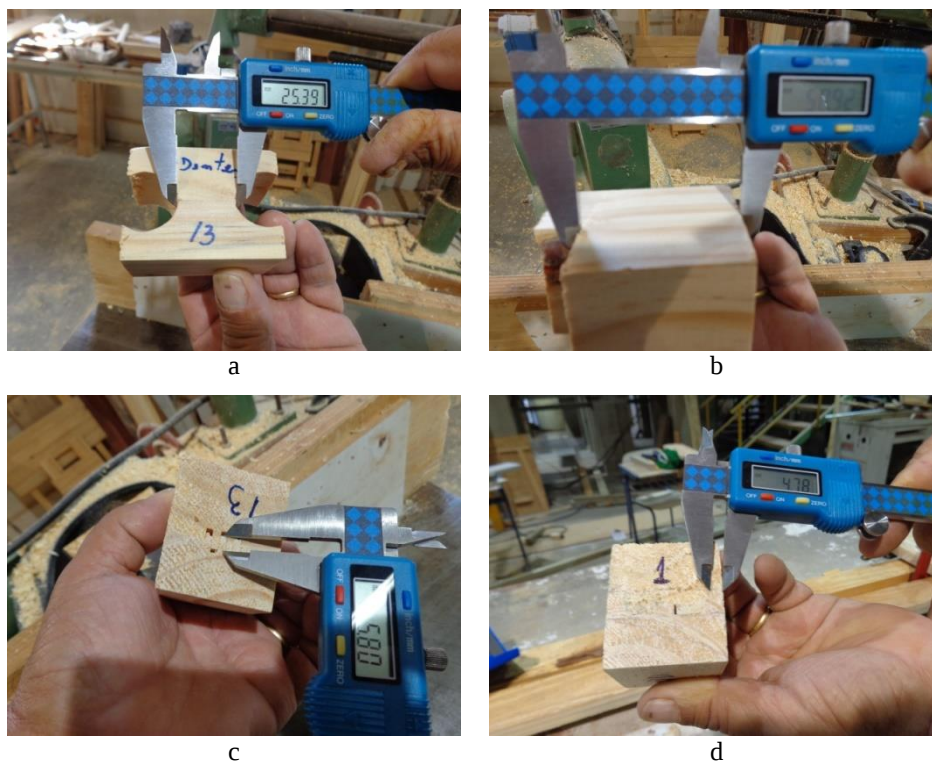
A Figura 3.26 mostra de maneira simplificada as medidas realizadas nos corpos de prova.

Figura 3. 26- Esquema do comprimento da linha de cola nos corpos de prova: a) Lateral 2 dentes; b) Parte inferior 2 dentes; c) Lateral 2 e 3 dentes d) Lateral 3 dentes e e) Parte inferior 3 dentes.



A Figura 3.27 ilustra as medidas dos comprimentos da linha de cola.

Figura 3. 27- Medição do comprimento da linha de cola nos corpos de prova com 2 e 3 dentes. a) e b) Linha de cola lateral dos corpos de prova; c) e d) Linha de cola dos dentes dos corpos de prova.



Para o ensaio de delaminação na linha de cola as amostras foram retiradas aleatoriamente após a confecção dos corpos de prova.

Para as emendas com 2 dentes foram analisados 26 corpos de prova sendo: 13 corpos de prova prismáticos confeccionados para a tração normal às fibras na região de cola e 13 corpos de prova prismáticos confeccionados para a cisalhamento na região de cola.

A Tabela 3.4 mostra a média do comprimento da linha de cola dos corpos de prova para emenda dentada 2 dentes.

Tabela 3. 4- Comprimento médio da linha dos corpos de prova para a emenda dentada 2 dentes.

	Quantidade de corpos de prova	Posição	Comprimento médio da linha de cola
Tração	13	Lateral	24,83 mm
Cisalhamento	13	Inferior	48,77 mm
Cisalhamento	13	Lateral	65,13 mm

No ensaio de delaminação na linha de cola para emendas com 3 dentes foram analisados 32 corpos de prova, sendo 16 corpos de prova prismáticos confeccionados para a tração

normal às fibras na região de cola e 16 corpos de prova prismáticos confeccionados para a cisalhamento na região de cola.

A Tabela 3.5 mostra a média do comprimento da linha de cola dos corpos de prova.

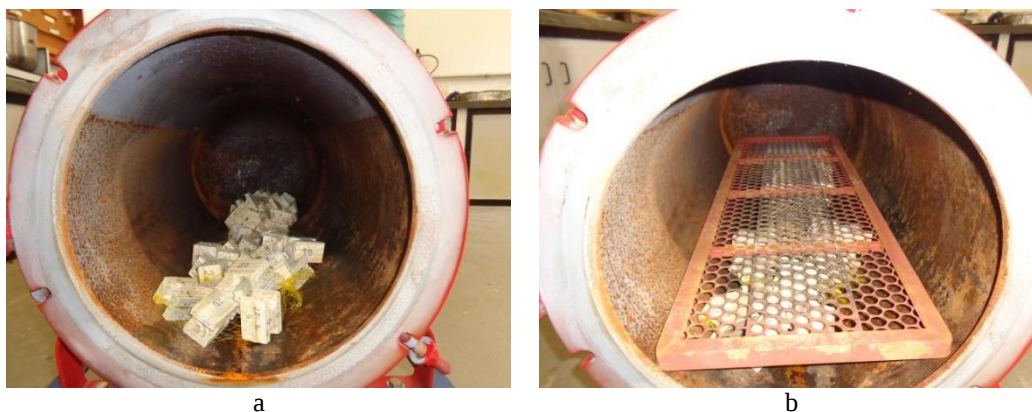
Tabela 3. 5- Comprimento médio da linha dos corpos de prova para a emenda dentada 2 dentes.

	Quantidade de corpos de prova	Posição	Comprimento médio da linha de cola
Tração	16	Lateral	24,42 mm
Cisalhamento	16	Inferior	59,66 mm
Cisalhamento	16	Lateral	50,83 mm

Depois de medidos os comprimentos da linha de cola dos corpos de provas, os mesmos foram pesados. Realizadas as medições e a pesagem, os corpos de provas foram colocados na autoclave para iniciar o procedimento descrito a seguir.

Os corpos de provas foram colocados na autoclave e em seguida sobrepôs-se uma grelha (Figura 3.28) e introduziu-se água a uma temperatura de 18°C. Os corpos de prova ficaram totalmente submersos na água devido à grelha.

Figura 3. 28- Ilustração da parte interna da autoclave: a) Corpos de prova dentro da autoclave e b) Grelha em cima dos corpos de cima.



Em seguida aplicou-se o vácuo de 80 kPa durante 30 minutos. Sequencialmente aplicou-se uma pressão de 550 kPa, durante 2 horas.

Depois desse procedimento os corpos de prova foram retirados da autoclave e levados para a estufa a 75°C durante 15 horas, à uma umidade relativa de 8% e a uma velocidade do ar circulante entre 3 m/s, conforme ilustra a figura 3.29.

Figura 3. 29- Estufa: a) Detalhes da estufa e b) Corpos de prova dentro da estufa



Durante a secagem os corpos de prova ficaram distanciados entre si, para não prejudicar o fluxo de ar.

Após 15 horas os corpos de prova foram retirados da estufa, verificando-se que os corpos de prova estavam muito úmidos. Estes foram pesados novamente, seguindo a recomendação da norma europeia. Os corpos de prova foram novamente colocados na estufa, para que se alcançasse o valor compreendido entre 100% e 110% da massa inicial, e após atingir a porcentagem recomendada os corpos de prova foram retirados da estufa.

Depois de estabilizados verificou-se o teor de umidade dos corpos de prova apresentando em média 9,7 %.

O teor médio de umidade nas amostras estava em torno 19% antes do ensaio de delaminação, após este ensaio as amostras deveriam estar com o teor de umidade próximo a 19%, o que não ocorreu.

Após 10 dias ao ensaio de delaminação as amostras foram submetidas aos ensaios de tração normal às fibras e cisalhamento na região de cola com o teor de umidade 9,7 %.

3.2.4. Análise estatística

Os dados foram tratados de forma descritiva através de média, desvio padrão e coeficientes de variação, bem como receberam análise estatística através do Software R-Estatístico. Foi realizada a verificação prévia da normalidade dos dados pelo teste de Shapiro Wilk, seguido da Análise de Variância e aplicação do Teste de Tukey, quando houve diferença estatística entre os dados, com nível de significância de 5%.

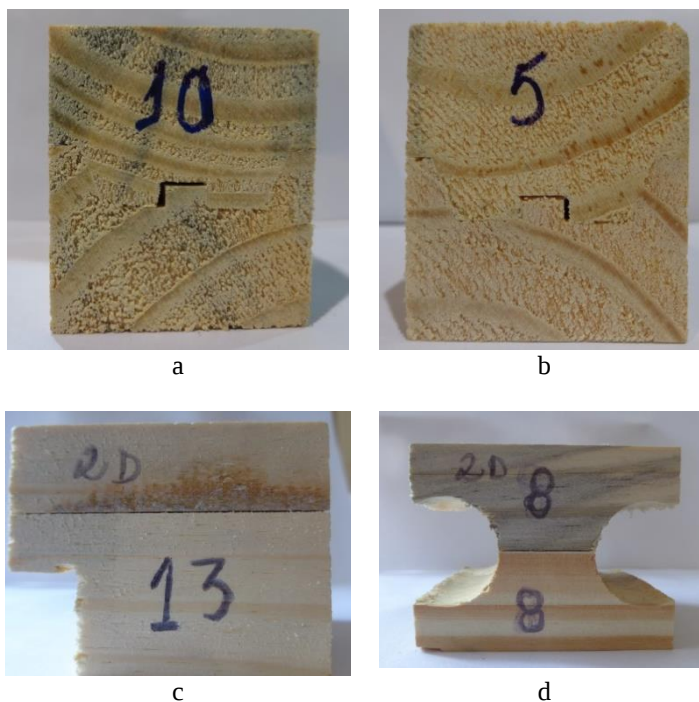
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste item são apresentados na forma de tabelas e gráficos, os resultados obtidos dos ensaios de caracterização de resistência à ruptura dos corpos de prova maciços e na região de cola, conforme descrito na metodologia para os ensaios de cisalhamento e tração normal às fibras.

Os corpos de prova com emendas dentadas de 2 dentes apresentaram falhas na colagem sendo a maioria nas posições 4, 5 e 6 e alguns na lateral (Figura 3.26b).

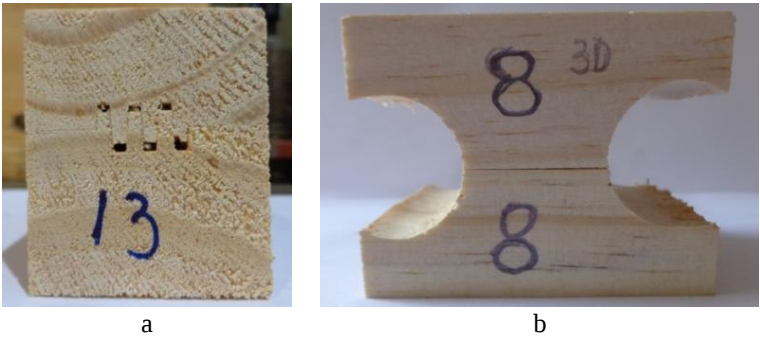
A Figura 4.1 mostra as falhas ocorridas nos corpos de provas da emenda dentada com 2 dentes.

Figura 4. 1- Falhas na colagem nos corpos de prova da emenda dentada com 2 dentes: a) e b) Falhas nas posições 4, 5 e 6 nos corpos de prova; c) e d) Falhas na lateral nos corpos de prova.



Para os corpos de prova com emenda dentada com 3 dentes, devido ao processo de usinagem os dentes de todos os corpos de prova não se encostaram por completo (Figura 4.2), este tipo de emenda apresentou dificuldade de acomodação das juntas, ficando espaços vazios, onde não ocorreu a colagem da junta. Nas laterais quase não houve falhas na colagem.

Figura 4. 2- Corpos de prova da emenda dentada com 3 dentes não se encostaram por completo: a) Falha na acomodação dos dentes; b) Falhas na lateral dos dentes.

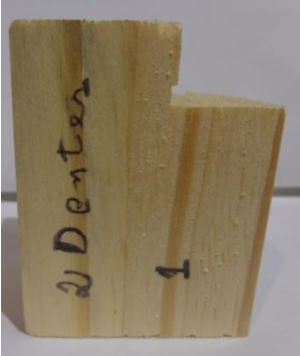
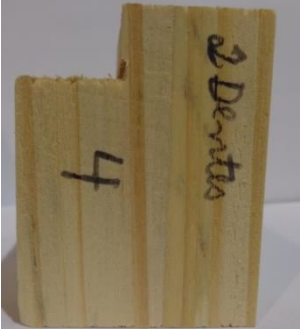


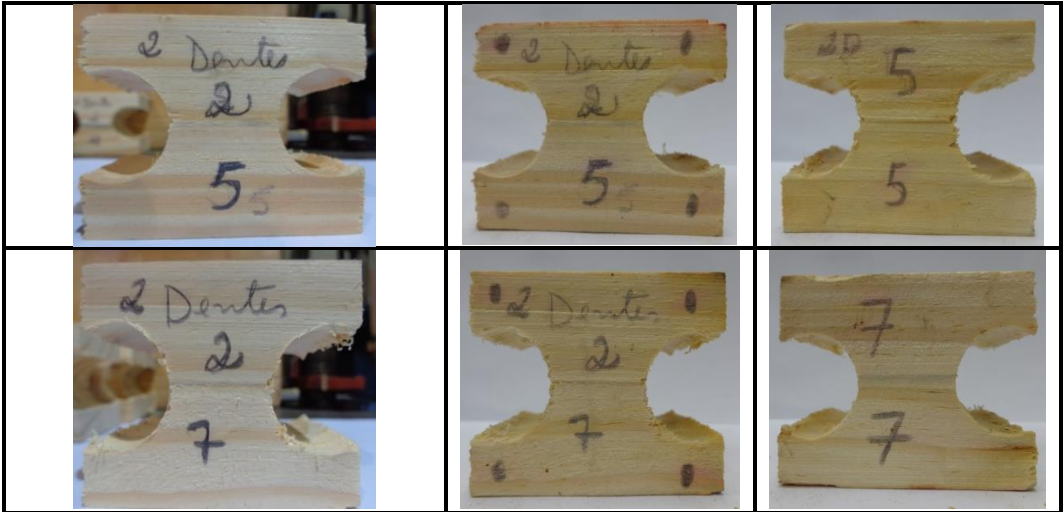
4.1. Resultados obtidos no ensaio de delaminação na linha de cola

➤ *Ensaio de delaminação na linha de cola para emenda lateral com 2 dentes*

Na Figura 4.3 observam-se alguns corpos de prova antes e após o ensaio delaminação para as emendas laterais com 2 dentes na posição lateral.

Figura 4. 3- Corpos de prova antes e após o ensaio delaminação para emendas com 2 dentes na posição lateral.

Antes do ensaio de delaminação		Após o ensaio de delaminação	
			
			



Na Figura 4.4 observam-se alguns corpos de prova antes e após o ensaio delaminação para as emendas laterais com 2 dentes na posição inferior.

Figura 4. 4- Corpos de prova antes e após o ensaio delaminação para emendas com 2 dentes na posição inferior.

Antes do ensaio de delaminação		Após o ensaio de delaminação	
			
			
			

➤ *Ensaio de delaminação na linha de cola para emendas laterais com 3 dentes*

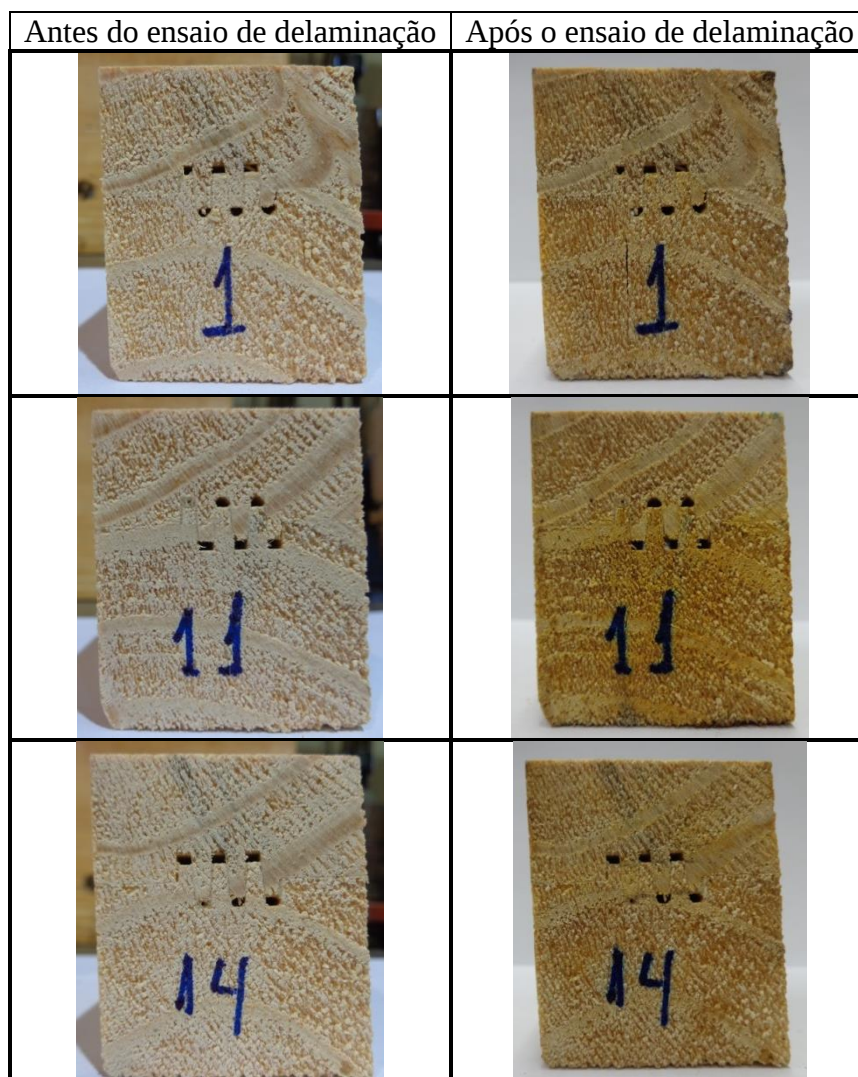
Na Figura 4.5 observam-se alguns corpos de prova antes e após o ensaio delaminação para as emendas laterais com 3 dentes na posição lateral.

Figura 4. 5- Corpos de prova antes e após o ensaio delaminação para emendas com 3 dentes na posição lateral.



Na Figura 4.6 observam-se alguns corpos de prova antes e após o ensaio delaminação para as emendas laterais com 3 dentes na posição inferior.

Figura 4. 6- Corpos de prova antes e após o ensaio delaminação para emendas com 3 dentes na posição inferior.



No ensaio de delaminação as linhas de cola nos corpos de prova não sofreram nenhuma alteração, ou seja, os corpos de prova não apresentaram porcentagem de delaminação, tanto na posição lateral quanto na posição inferior, indicando que a interação adesivo/madeira foi boa.

4.2. Resultados obtidos nos testes de resistência ao cisalhamento na região de cola

Os valores médios dos resultados obtidos nos ensaios de resistência ao cisalhamento na região de cola estão apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4. 1- Valores médios de resistência ao cisalhamento na região de cola dos corpos de prova com os respectivos, desvio padrão e coeficiente de variação.

Resistência ao cisalhamento na região de cola			
	Nº de corpos de prova	Desv.Padrão	Coef.Var.(%) f_{v0} (MPa)
6	Maciços (amostras testemunhas)	1,532	21,99 6,964
12	Superfície plana	0,929	13,97 6,650
15	Dois dentes	1,952	35,17 5,552
9	Dois dentes após ensaio de delaminação	2,477	39,20 6,317
12	Três dentes	1,052	25,71 4,092
9	Três dentes após ensaio de delaminação	2,477	39,20 6,317

Segundo a ABNT NBR 7190:1997 a resistência ao cisalhamento da madeira maciça *Pinus elliottii* é 7,4 MPa.

Em relação à forma de ruptura dos corpos de prova foram classificadas de 3 maneiras: ruptura na madeira; ruptura mista (ocorre na madeira e na região de cola) e ruptura na região de cola.

A Tabela 4.2 mostra as formas de rupturas dos corpos de prova no ensaio de cisalhamento com suas respectivas porcentagens, nos diferentes tipos emendas coladas.

Tabela 4. 2- Ruptura dos corpos de prova após o ensaio de cisalhamento.

Ruptura no ensaio de cisalhamento			
	Madeira	Mista	Região de cola
Superfície plana	25,0%	75,0%	0%
Dois dentes	6,67%	80,0%	13,33%
Dois dentes após ensaio de delaminação	11,11%	77,78%	11,11%
Três dentes	0%	100,0%	0%
Três dentes após ensaio de delaminação	57,15%	42,85%	0%

A Figura 4.7 ilustra alguns corpos de prova com ruptura na madeira, ruptura mista e ruptura na região de cola após o ensaio de cisalhamento.

Figura 4. 7- Ruptura nos corpos de prova após o ensaio de cisalhamento: a) Ruptura na madeira; b) Ruptura mista e c) Ruptura na região de cola.



a) Ruptura na madeira

b) Ruptura mista

c) Ruptura na região de cola

As possíveis rupturas na região de cola devem ter ocorrido devido as seguintes hipóteses:

- A pequena pressão aplicada nas bordas dos painéis, devido a uma distribuição inadequada da força aplicada, e ao número de sargentos utilizados;
- Na parte final das peças houve uma falha na usinagem, devido ao comprimento das peças;
- Deficiência da colagem por usar madeira úmida com teor de umidade acima de 12%.

Devido a estas hipóteses alguns corpos de prova foram descartados.

4.3. Resultados obtidos nos testes de tração normal às fibras na região de cola

Os valores médios dos resultados obtidos nos ensaios de resistência à tração normal às fibras na região de cola estão apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4. 3- Valores médios de resistência à tração normal às fibras dos corpos de prova com os respectivos, desvio padrão e coeficiente de variação.

Resistência à tração normal às fibras				
	Nº de corpos de prova	Desv.Padrão	Coef.Var.(%)	f_{v0} (MPa)
6	Maciços (amostras testemunhas)	0,4760	19,36	2,459
12	Superfície plana	0,6880	31,85	2,16
17	Dois dentes	0,5084	29,02	1,752
12	Dois dentes após ensaio de delaminação	0,7145	36,47	1,959
10	Três dentes	0,8564	46,80	1,830
15	Três dentes após ensaio de delaminação	0,5169	23,51	2,194

A Tabela 4.4 mostra as formas de rupturas dos corpos de prova no ensaio de ensaio de tração normal às fibras com suas respectivas porcentagens, nos diferentes tipos emendas coladas.

Tabela 4. 4- Ruptura dos corpos de prova após o ensaio de tração normal às fibras.

Ruptura no ensaio de tração normal às fibras			
	Madeira	Mista	Região de cola
Superfície plana	33,33%	66,67%	0%
Dois dentes	11,76%	88,24%	0%
Dois dentes após ensaio de delaminação	33,34%	58,33%	8,33%
Três dentes	20,0%	80,0%	0%
Três dentes após ensaio de delaminação	53,33%	46,67%	0%

A Figura 4.8 ilustra corpos de prova após o ensaio de tração normal às fibras.

Figura 4. 8- Corpos de prova após o ensaio de tração normal às fibras: a) Ruptura na madeira, b) Ruptura mista e c) Ruptura na região de cola.



a) Ruptura na madeira



b) Ruptura mista



c) Ruptura na região de cola

4.4. Comparações entre os resultados obtidos nos ensaios

Em todas as Figuras de gráfico de barras apresentadas a seguir, para $P < 5\%$ os valores foram significativos pelo teste Tukey e as médias seguidas de mesma letra, apresentadas no interior das barras, não diferiram entre si a 5% de probabilidade. Também em cada barra está o desvio padrão, apresentados pelas linhas verticais em **negrito**.

➤ Resistência ao cisalhamento

A Tabela 4.5 apresenta os diferentes resultados dos valores médios no cisalhamento dos corpos de prova.

Tabela 4. 5- Valores médios entre os corpos de prova no cisalhamento.

Resistência ao cisalhamento		
Corpos de prova	f_{v0} (MPa)	Desv. Padrão
Maciços (amostra testemunha)	6,964	1,532
Superfície plana	6,650	0,929
Dois dentes	5,552	1,952
Dois dentes após ensaio de delaminação	6,317	2,477
Três dentes	4,092	1,052
Três dentes após ensaio de delaminação	6,547	1,252

A Tabela 4.6 apresenta o teste Tukey, mostrando as comparações múltiplas entre os resultados de cisalhamento, quando P adj foi menor que 0,05 ($P < 0,05$) houveram diferenças significativas entre os grupos.

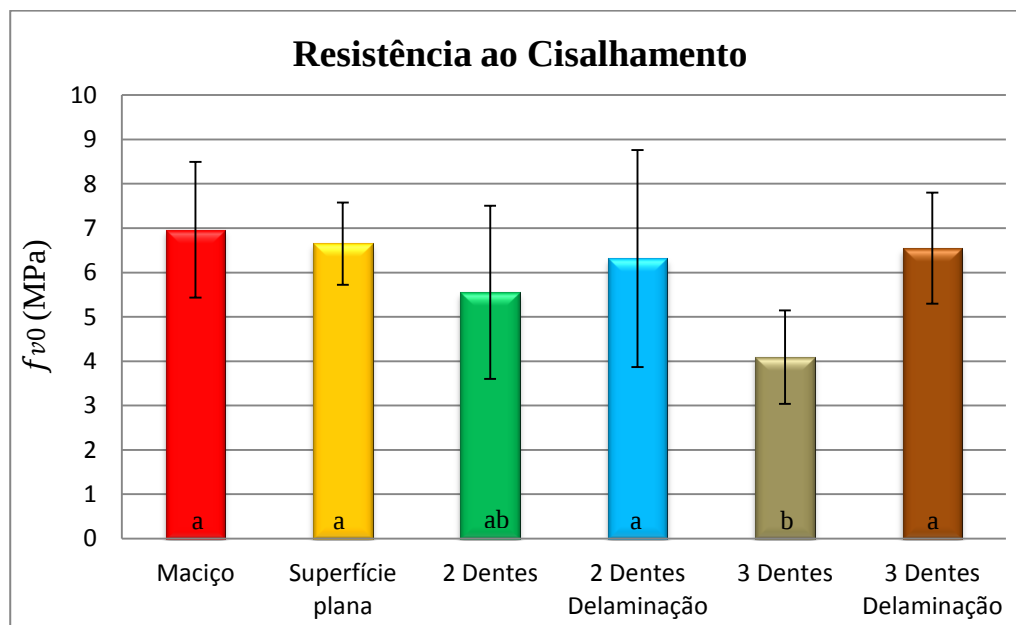
Tabela 4. 6- Comparações múltiplas entre os resultados de cisalhamento através do teste Tukey.

Comparações múltiplas	P adj
Superfície plana - Maciço	0,9685412
2 Dentes - Maciço	0,1005500
2 Dentes após delaminação - Maciço	0,9049243
3 Dentes - Maciço	0,0000209 *
3 Dentes após delaminação - Maciço	0,9375593
2 Dentes - Superfície plana	0,4439570
2 Dentes após delaminação - Superfície plana	0,9998759
3 Dentes - Superfície plana	0,0004419 *
3 Dentes após delaminação - Superfície plana	0,9999921
2 Dentes após delaminação - 2 Dentes	0,6016074
3 Dentes - 2 Dentes	0,1199123
3 Dentes após delaminação - 2 Dentes	0,5336527
3 Dentes - 2 Dentes após delaminação	0,0010676 *
3 Dentes após delaminação - 2 Dentes após delaminação	0,9999982
3 Dentes após delaminação - 3 Dentes	0,0007363 *

* Apresentam diferenças significativas entre os grupos quando P adj foi menor que 0,05 ($P < 0,05$)

A Figura 4.9 ilustra os diferentes resultados dos valores médios no cisalhamento dos corpos de prova, com seu respectivo desvio padrão.

Figura 4. 9- Valores médios da resistência ao cisalhamento.



Letras iguais não diferem entre si, pelo teste de Tukey (5%).

Observa-se na Figura 4.9 que todas as emendas coladas com o adesivo PU bicomponente à base de óleo de mamona, apresentaram resultados médios menores que os valores médios obtidos nas amostras testemunhas (madeira maciça), sendo que emenda dentada com 3 dentes apresentou o menor resultado de todos.

Na Tabela 4.7 tem-se a relação em porcentagem da resistência mecânica na região de cola no ensaio de cisalhamento entre os resultados médios da madeira maciça e os diferentes tipos de juntas coladas.

Tabela 4. 7- Relação em porcentagem entre as resistências de cisalhamento da madeira maciça e dos diferentes tipos de juntas coladas.

Ensaio	Madeira maciça	Tipos de juntas	Relação em %
Cisalhamento	6,964 MPa	Superfície plana - 6,650 MPa	4,50
		Dois dentes - 5,552 MPa	20,27
		Dois dentes após ensaio de delaminação - 6,317 MPa	9,29
		Três dentes - 4,092 MPa	41,24
		Três dentes após ensaio de delaminação - 6,547 MPa	5,99

Observando a Tabela 4.7, nota-se que mesmo com o teor de umidade da madeira elevado (19,1%) a superfície plana obteve um resultado próximo ao resultado da madeira maciça, sendo um indicativo que na produção dos painéis o teor de umidade elevado não implicou em uma perda significativa em relação à resistência a madeira maciça.

Na Tabela 4.8 tem-se a relação em porcentagem da resistência mecânica na região de cola no ensaio de cisalhamento entre os resultados médios da superfície plana e as emendas dentadas.

Tabela 4. 8- Relação em porcentagem entre as resistências de cisalhamento da superfície plana e as emendas dentadas.

Ensaio	Superfície plana	Emendas dentadas	Relação em %
Cisalhamento	6,650 MPa	Dois dentes - 5,552 MPa	16,51
		Dois dentes após ensaio de delaminação - 6,317 MPa	5,01
		Três dentes - 4,092 MPa	38,47
		Três dentes após ensaio de delaminação - 6,547 MPa	1,55

Ao comparar os resultados da superfície plana com as emendas dentadas, nota-se que apenas a emenda dentada com 3 dentes após o ensaio de delaminação e 2 dentes após o ensaio de delaminação apresentaram resultados bem próximos ao obtido pela superfície plana e as demais emendas apresentaram resultados abaixo.

Ao se confrontar os resultados obtidos entre as emendas dentadas com 2 dentes, percebe-se que após o ensaio de delaminação estas apresentaram um maior valor de resistência ao cisalhamento na região de cola, com aumento de 12,11%.

O mesmo é observado quando se comparam as emendas dentadas com 3 dentes entre si, pois após o ensaio de delaminação estas apresentaram maior valor de resistência ao cisalhamento na região de cola, com aumento de 37,50%.

Este aumento na resistência após os ensaios de delaminação foi inesperado. Contudo em ambos os casos, supõe-se que a água favoreceu o aumento na resistência dos corpos de prova, devido ao fato que adesivo escolhido para este trabalho de pesquisa, deva possuir algumas características: adaptar-se ao teor de umidade elevado, a intempéries e a abrasividade.

Tomando por base os argumentos de Zhou e Frazier (2001); Lopes (2008); Garcia e Rech (2011), citados no item 2.7 e a estrutura molecular do adesivo PU e do alofanato ligado à madeira (Figuras 2.19 e 2.21), verifica-se que na estrutura molecular do PU e do alofanato

existem átomos de oxigênio e nitrogênio com elétrons livres capazes de realizar interações químicas, as ligações de hidrogênio.

No ensaio de delaminação os corpos de prova ficaram submersos na água aplicando-se vácuo (30 min), nesta etapa, a água é retirada dos corpos de prova, depois aplicou-se pressão (550kPa), nesta etapa, a água é “empurrada” para dentro do corpo de prova. O procedimento do ensaio de delaminação deve ter desestabilizado (afetado) a estrutura reticular do adesivo, a qual favoreceu a formação de novas interações químicas secundárias (ligações de hidrogênio) entre o adesivo (átomos oxigênio e nitrogênio “com elétrons disponíveis” no PU e alofanato) e a madeira (grupos oxidrilas da celulose e hemicelulose).

Tem-se conhecimento na literatura que a celulose apresenta duas regiões uma cristalina (em torno de 40% nas árvores) e uma amorfa. A absorção de água ocorre com maior facilidade na região amorfa. A união entre as cadeias de moléculas de celulose ocorrem principalmente pelas ligações de hidrogênio sendo as ligações intramoleculares e as intermoleculares.

Além da ligação entre as celulosas, as oxidrilas podem também unir-se às moléculas de água, pelas mesmas pontes de hidrogênio, cada unidade de celulose tem três oxidrilas (OH), em tese, pode ligar-se a três moléculas de água, por ligações de hidrogênio.

Ao permanecerem os corpos de prova na estufa (75°C por 15 horas) as moléculas de água evaporam lentamente, o que pode ter também favorecido uma interação entre o adesivo e a madeira, formando “novas ligações de hidrogênio”, acarretando um aumento na resistência dos corpos de prova.

Outro fator que pode ter favorecido o aumento na resistência mecânica na região de cola nos corpos de prova após o ensaio de delaminação é o teor de umidade da madeira, antes da colagem dos painéis a madeira apresentava teor de umidade médio 19,1% (ABNT NBR – teor de umidade 12%), depois que os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de delaminação foi verificado o teor de umidade obtendo a média de 9,7%.

Esta diferença no teor de umidade madeira pode ter favorecido a formação de novas ligações secundárias, aumentando a resistência mecânica na emenda colada.

Notou-se também que as emendas dentadas após o ensaio de delaminação obtiveram um aumento na ruptura nos corpos de prova na madeira, conforme apresentado na Tabela 4.2.

➤ Resistência à tração normal às fibras

A Tabela 4.9 apresenta os diferentes resultados dos valores médios na tração normal às fibras dos corpos de prova.

Tabela 4. 9- Valores médios entre os corpos de prova na tração normal às fibras.

Resistência à tração normal às fibras		
Corpos de prova	$f_{t,90}$ (MPa)	Desv. Padrão
Maciços (amostra testemunha)	2,459	0,4760
Superfície plana	2,160	0,6880
Dois dentes	1,752	0,5084
Dois dentes após ensaio de delaminação	1,959	0,7145
Três dentes	1,830	0,8564
Três dentes após ensaio de delaminação	2,194	0,5169

Segundo a ABNT NBR 7190:1997 a resistência a tração normal as fibras da madeira maciça *Pinus elliottii* é 2,5 MPa.

A Tabela 4.10 apresenta o teste Tukey, mostrando as comparações múltiplas entre os resultados de tração normal às fibras, quando P adj é menor que 0,05 ($P < 0,05$) há diferenças significativas entre os grupos.

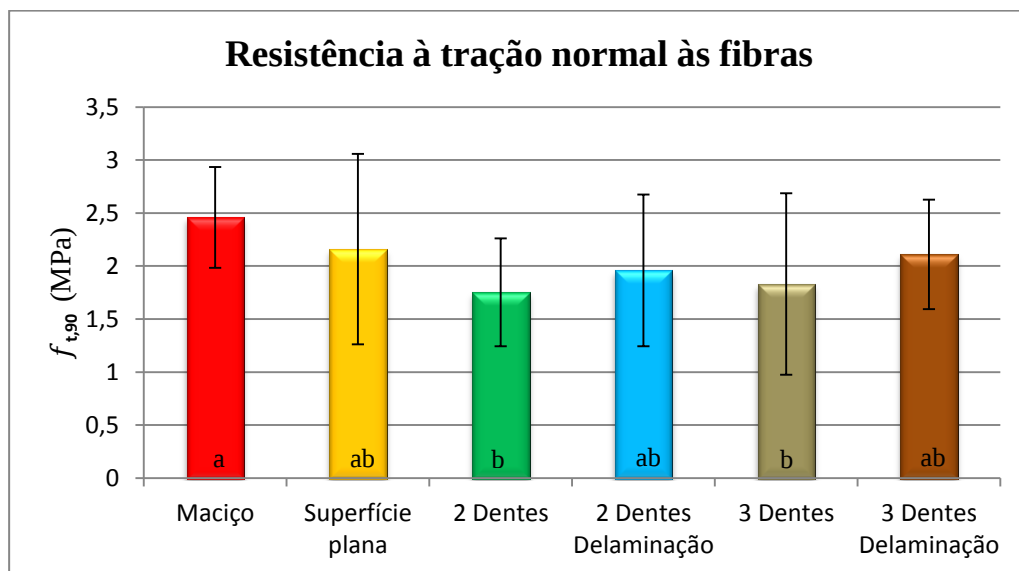
Tabela 4. 10- Comparações múltiplas entre os resultados de tração normal às fibras através do teste Tukey.

Comparações múltiplas	P adj
Superfície plana - Maciço	0,8719242
2 Dentes - Maciço	0,0284385 *
2 Dentes após delaminação - Maciço	0,1590664
3 Dentes - Maciço	0,0233338 *
3 Dentes após delaminação - Maciço	0,9769134
2 Dentes - Superfície plana	0,3529468
2 Dentes após delaminação - Superfície plana	0,7832808
3 Dentes - Superfície plana	0,3148940
3 Dentes após delaminação - Superfície plana	0,9988854
2 Dentes após delaminação - 2 Dentes	0,9823501
3 Dentes - 2 Dentes	0,9999998
3 Dentes após delaminação - 2 Dentes	0,1741616
3 Dentes - 2 Dentes após delaminação	0,9731301
3 Dentes após delaminação - 2 Dentes após delaminação	0,5443889
3 Dentes após delaminação - 3 Dentes	0,1504904

* Apresentam diferenças significativas entre os grupos quando P adj foi menor que 0,05 ($P < 0,05$)

A Figura 4.10 ilustra os diferentes resultados dos valores médios na tração normal às fibras dos corpos de prova, com seus respectivos desvios padrão.

Figura 4. 10- Valores médios da resistência à tração normal às fibras.



Letras iguais não diferem entre si, pelo teste de Tukey (5%).

Observa-se na Figura 4.10 que as todas as emendas coladas com o adesivo PU, apresentaram resultados médios menores que os valores médios obtidos nas amostras testemunhas.

A emenda dentada com 2 dentes apresentou o menor resultado de todos.

Na Tabela 4.11 tem-se a relação em porcentagem da resistência mecânica na região de cola no ensaio de tração normal às fibras entre os resultados médios da madeira maciça e os diferentes tipos de juntas coladas.

Tabela 4. 11- Relação em porcentagem entre as resistências de tração normal às fibras da madeira maciça e dos diferentes tipos de juntas coladas.

Ensaio	Madeira maciça	Tipos de juntas	Relação em %
Tração normal às fibras	2,459 MPa	Superfície plana - 2,160 MPa	12,16
		Dois dentes - 1,752 MPa	28,75
		Dois dentes após ensaio de delaminação - 1,959 MPa	20,33
		Três dentes - 1,830 MPa	25,58
		Três dentes após ensaio de delaminação - 2,194 MPa	10,77

Na Tabela 4.11 nota-se que a superfície plana (teor de umidade 19,1%) obteve um resultado próximo ao resultado da madeira maciço, sendo um indicativo que na produção dos painéis o teor de umidade elevado não implicou em uma perda significativa em relação à resistência da madeira maciça.

Na Tabela 4.12 tem-se a relação em porcentagem da resistência mecânica na região de cola no ensaio de tração normal às fibras entre os resultados médios da superfície plana e as emendas dentadas.

Tabela 4. 12- Relação em porcentagem entre as resistências de tração normal às fibras da superfície plana e as emendas dentadas.

Ensaio	Superfície plana	Emendas dentadas	Relação em %
Tração normal às fibras	2,160 MPa	Dois dentes - 1,752 MPa	18,89
		Dois dentes após ensaio de delaminação - 1,959 MPa	9,30
		Três dentes - 1,830 MPa	15,26
		Três dentes após ensaio de delaminação - 2,194 MPa	*1,55

*Neste caso a emenda dentada 3 após o ensaio de delaminação foi 1,55% superior a superfície plana.

Ao se comparar os valores médios obtidos da superfície plana com as emendas dentadas, notamos que apenas a emenda dentada com 3 dentes após o ensaio de delaminação apresentou um valor inexpressivo (pouquíssimo superior) em relação ao obtido pela superfície plana.

Quando comparam-se os resultados obtidos (Figura 4.10) entre as emendas dentadas com 2 dentes, percebe-se que após o ensaio de delaminação esta apresentou um valor de resistência à tração normal às fibras na região de cola maior, com aumento de 10,57%.

O mesmo ocorre quando comparam-se os resultados obtidos entre as emendas dentadas com 3 dentes e, percebe-se que após o ensaio de delaminação esta apresentou um valor de resistência à tração normal às fibras na região de cola maior, com aumento de 16,59%.

Analisando as tabelas (4.5 e 4.9), resistência ao cisalhamento e tração normal às fibras percebe-se que as emendas dentadas com 2 e 3 após o ensaio de delaminação apresentaram resultados com valores médios superiores às emendas dentadas 2 e 3 dentes. No entanto, as emendas dentadas com 3 dentes após o ensaio de delaminação apresentaram os melhores resultados.

Notou-se também que as emendas dentadas após o ensaio de delaminação obtiveram um aumento na ruptura nos corpos na madeira no cisalhamento e na tração normal às fibras, conforme mostram as tabelas 4.2 e 4.4.

5. CONCLUSÕES

No ensaio de delaminação, as linhas de cola nos corpos de prova das emendas dentadas com 2 e 3 não apresentaram porcentagem de delaminação (não sofreram nenhuma alteração), ou seja, houve uma boa combinação espécie/adesivo.

Os resultados dos ensaios de resistência ao cisalhamento na região de cola permitiram algumas conclusões:

- A emenda dentada com 2 dentes obteve resultado melhor que a emenda dentada 3 dentes.
- As emendas dentadas após o ensaio de delaminação apresentaram os melhores resultados, quando comparadas entre elas, destacando a emenda dentada com 3 dentes.
- A superfície plana apresentou melhor resultado que todas as emendas dentadas.

Os resultados dos ensaios de tração normal às fibras na região de cola permitem algumas conclusões:

- A emenda dentada com 2 dentes obteve menor resultado que a emenda dentada 3 dentes.
- As emendas dentadas após o ensaio de delaminação apresentaram os melhores resultados, destacando a emenda dentada com 3 dentes.
- A emenda dentada 3 dentes após o ensaio de delaminação apresentou o melhor resultado em relação as outras juntas coladas, ficando com um valor médio inexpressivo acima da superfície plana.

Conclusões gerais:

- Nos ensaios realizados nenhuma das emendas atingiram os resultados dos valores médios das amostras testemunhas.
- Nos ensaios de cisalhamento e tração normal às fibras a superfície plana obtiveram melhores resultados em relação às emendas dentadas, portanto as geometrias dos dentes não favoreceram um aumento na resistência à ruptura na região de colagem.
- As rupturas dos corpos de provas ocorreram na madeira e a maioria das rupturas foram mistas, mostrando que a interação adesivo/madeira foi satisfatória.
- As emendas dentadas após o ensaio de delaminação em ambos os testes de resistência mecânica, apresentaram resultados com valores médios superiores que as emendas dentadas 2 e 3 dentes.
- Referindo-se aos ensaios após os de delaminação a emenda dentada com 3 dentes foi a que obteve melhor resultado em todos os ensaios.
- Os ensaios de delaminação favoreceram o aumento da resistência dos corpos de prova.
- O adesivo obteve melhor desempenho após os ensaios de delaminação.

Recomendações para trabalhos futuros:

- a) Rigidez do painel na flexão;
- b) Deformação lenta para determinada aplicação.
- c) Aplicar o método de ensaio para outras combinações de madeira e adesivo.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHMAD, Z.; ANSELL, M.P.; SMEDLEY, D. (2010). Epoxy Adhesives Modified With Nano- And Micro-Particles For In-Situ Timber Bonding: Effect Of Microstructure On Bond Integrity. **Int. J. Mech. Mat. Eng.**, V. 5, p. 59-67.

ALBUQUERQUE, C. E. C.; LATORRACA, J. V. F. Influência das características anatômicas da madeira na penetração e adesão de adesivos. **Revista Floresta e Ambiente**, Curitiba, v. 7, n. 1, p.158-166, jan./dez., 2000.

ALBUQUERQUE, C. E. C.; LATORRACA, J. V. Colagem varia de acordo com propriedades da madeira. **Revista Madeira**, nº 88 mar. 2005.

(a) ALLEN, W. K. **Theories of adhesion** In: PACKHAM, D. E. Handbook of Adhesion, 2 ed. 2005. 638p.

(b) ALLEN, W. K. **Mechanical theory of adhesion** In: PACKHAM, D. E. Handbook of Adhesion, 2 ed. 2005. 638p.

(c) ALLEN, W. K. **Adsorption theory of adhesion** In: PACKHAM, D. E. Handbook of Adhesion, 2 ed. 2005. 638p.

ALMEIDA, V.C. **Efeito da adição de carga e extensor nas propriedades do adesivo uréia-formaldeído e dos compensados de pinus e paricá**. 2009, 75p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal)-Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2009.

ALMEIDA, D. H.; SCALIANTE, R. M.; MACEDO, L. B.; MACÊDO, A. N.; CALIL JUNIOR, C. Madeira laminada colada (MLC) da espécie Paricá. **Madeira: Arquitetura e Engenharia**, v. 12, n.30, p. 71-82, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190 – Projeto de Estruturas de Madeira**. Rio de Janeiro: 1997, 107p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7203 - Condições Gerais – Nomenclatura de peças de madeira serrada**.Rio de Janeiro: 1982. 272p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15.930: Portas de madeira para edificações**. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR – 6162:1988 –m - Conceito da Técnica de Usinagem, Movimentos e Relações Geométricas - Terminologia**. São Paulo. 1988.

AZAMBUJA, M. A. **Estudo experimental de adesivos para fabricação de madeira laminada colada: avaliação da resistência de emendas dentadas, da durabilidade e de vigas**. 2006. 159p. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

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

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, 177f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2016.

BILESKEY, L. R. **Avaliação dos aspectos de processo no torneamento de madeiras tratadas termicamente**. 2015. 133f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

BRAZ, R. L.; OLIVEIRA, J. T. S.; RODRIGUES, B. P.; ARANTES, M. D. C. Propriedades físicas e mecânicas da madeira de *toona ciliata* em diferentes idades. **Floresta**, Curitiba, PR, v. 43, n. 4, p. 663 - 670, out. / dez. 2013.

BUDYNAS, R. G.; NISBETT, J. K. **Elementos de máquinas de Shigley-Projeto de engenharia mecânica**. McGraw- Hill, Brasil. 8ª ed. 2011. 1073p.

BURGER, M. L.; RICHTER, H. G. **Anatomia da madeira**. São Paulo: Nobel. 1991. 154p.

CARDOSO, F. G. **Análise de Forças de fresamento de roscas API**. 2012. 70f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais) – Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca - CEFET/RJ Rio de Janeiro, 2012.

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

CARRASCO, E. V. M. Resistência, elasticidade e distribuição de tensões nas vigas retas de madeira laminada colada (MLC) 1989. 347 f. Tese de Doutorado - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, São Paulo, 1989.

CLEMENTE, M.; ROCHA, R. J.; IHA, K.; ROCCO, J. A. F. F. desenvolvimento de tecnologia de pré-polímeros na síntese de poliuretanos empregados em combustíveis sólidos. **Quim. Nova**, v. 37, n. 6, p.982-988. 2014.

DAS, S.; MALMBERG, M. J.; FRAZIER, C. E. Cure chemistry of wood/polymeric isocyanate (PMDI) bonds: Effect of wood species. **International Journal of Adhesion & Adhesives**, v. 27, p. 250-257, 2007.

DESROCHES, M.; ESCOUVOIS, M.; AUVERGNE, R.; CAILLOL, S.; BOUTEVIN, B.; J. MACROMOL. From Vegetable Oils to Polyurethanes: Synthetic Routes to Polyols and Main Industrial Products. **Sci. Polym. Rev.** v.52, n.38. p. 38-79. 2012.

DIAS, F. M. **Aplicação de resina poliuretana à base de mamona na fabricação de painéis de madeira compensada e aglomerada**. 2005.116p. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L.; **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 1. Ed., São Paulo: MM Editora, 1999.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L.; **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 5. Ed., São Paulo: Artliber Editora, 2001.

EMBRAPA – Cultivo da Mamona. Disponível no portal: <http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Mamona/CultivodaMamona/caracteristicasoleo.htm>. Acessado em 13/07/2017.

EUROPEAN STANDARD. EN-14080. **Timber structures – Glued laminated timber and glued solid timber – Requirements**. CEN, 2013. 14 p.

EUROPEAN STANDARD. EN – 301. **Adhesives, phenolic and aminoplastic, for load-bearing timber structures – Classification and performance requirements**. CEN, 2013. 14 p.

FERRARESI, D. **Fundamentos de usinagem dos metais**. São Paulo: Ed. Blucher, 1977.

FERROLHO, C. A. P. **Análise de rendimentos mássicos na indústria de mobiliário**. 2006. 104 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais Lenhocelulósicos) – Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2006.

FOLLRICH, J.; VAY, O. ; VEIGEL, S.; MÜLLER, U. Bond strength of end-grain joints and its dependence on surface roughness and adhesive spread. **The Japan Wood Research Society**. 2010.

(a) FRIHART, C. R. **Wood adhesion and adhesives**. In: ROWELL, R. M. Handbook of wood chemistry and wood composites. Madison, WI: USDA, Forest Service, Forest Products Laboratory. CRC Press, New York, 2005. 703 p.

(b) FRIHART, C. R. Adhesive Bonding and Performance Testing of Bonded Wood Products. **Journal of ASTM International**, July/August 2005, v. 2, nº. 7.

FRIHART, C. R., HUNT, C. G. **Adhesives with Wood Materials Bond Formation and Performance**. In: Wood Handbook - Wood as an Engineering Material, Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2010, 508 p. cap. 10.

GALEMBECK, F.; GANDUR, M. C. Cientistas explicam o fenômeno da adesão. **Química e Derivados**. v 393, p. 24-32. 2001

GARCIA, A.; RECH, M. Adesivos para a madeira e móveis. **Revista da madeira**. Ed 128. 2011

GLASS, S. V.; ZELINKA, S. L. **Moisture Relations and Physical Properties of Wood**. In: Wood Handbook - Wood as an Engineering Material, Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2010, 508 p. cap 4.

GONÇALVES, M.T.T. **Processamento da Madeira**. Bauru-SP: Document Center Xerox – USC, 242p. (2000)., 23,5 cm. Inclui Índice. ISBN 85-901425-1-5.

GONÇALVES, R.; NÉRI, A. C., Orthogonal cutting forces in juvenile and *mature pinus taeda* wood. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 62, n. 4, p.310-318, ago. 2005.

GOLI, G.; FIORAVANTI, M.; MARCHAL, R.; UZIELLI, L.; BUSONI, S. Up-milling and down-milling wood with different grain orientations – theoretical background and general appearance of the chips. **Eur. J. Wood Prod.**, p. 257-263. 2009.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS - IPT.
http://www.ipt.br/informacoes_madeiras/60.htm. Acessado em 19/07/2017.

IWAKIRI, S. **Painéis de madeira**. Curitiba: FUPEF. 128p. 1998

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

JAKES, J. E.; FRIHART, C. R.; STONE, D.S. **Nanoindentation size effects in wood** 30th **Annual Meeting of The Adhesion Society**, Inc. February 18-21, 2007. Tampa Bay, FL. p. 15-17.

JENNINGS, J. D. **Investigating the surface energy and bond performance of compression densified wood**. 2003. 160 p. Dissertation (Master in Wood Science) - Faculty of Virginia Polytechnic Institute and State, Blacksburg. 2003.

JESUS, J. M. H. **Estudo do adesivo poliuretano à base de mamona em madeira laminada colada**. 2000. 125p. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia dos Materiais) – Universidade de São Paulo, São Carlos. 2000.

KAMKE, F.A.; LEE, J.N. (2007) Adhesive penetration in wood—a review. **Wood Fiber Sci.** V.39, p.205–220.

KARTAL, S. N.; AYRILMIS. N. Blockboard with boron-treated veneers: laboratory decay and termite resistance tests. **International Biodeterioration & Biodegradation**,v. 55, p. 93-98, 2004.

KLOCK, U. **Notas de aula sobre estrutura anatômica da madeira de coníferas, disciplina de química da madeira**, 2012. UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ, Curitiba.

KOCH, P. **Wood Machining Processes**. New York. Ronald Press Company, 1964. 530p.

KOLLMANN, F.F.P.; CÔTÉ, W.A. **Principles of Wood Science and Technology –I - Solid Wood**. New York. Springer-Verlag. 1984 v. 1, 591p.

KOLLMANN, F.F.P.; KUENZI, E.W.; STAMM, A.J. **Principles of Wood Science and Technology –II - Wood Based Materials**. New York. Springer-Verlag. 1975 v. 2, 703p.

KRETSCHMANN, D. E. **Mechanical Properties of Wood**. In: Wood Handbook - Wood as an Engineering Material, Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2010, 508 p. cap 5.

LAY, D. G.; CRANLEY, P. **Polyurethane Adhesives**. In: PIZZI A.; MITTAL, K. L. Handbook of Adhesive Technology. 2nd ed., rev. and expanded. New York : Marcel Dekker. 2003.

LOPES, M. C. **Espectroscopia no infravermelho próximo aplicada na avaliação de painéis de madeira colados lateralmente**. 2008. 130f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

MACÊDO, A.N.; CALIL JUNIOR, C. Fadiga em juntas dentadas em madeira Laminada colada. **Cadernos de Engenharia de Estruturas**, São Carlos, v. 9, n. 37, p. 95-126, 2007.

MACÊDO, A.N.; CALIL JUNIOR, C. Estudo de juntas dentadas em madeira laminada colada (MLC): avaliação de método de ensaio – NBR 7190/1997. **Cadernos de Engenharia de Estruturas**, São Carlos, n. 7, p. 1-23, 1999.

MANO, E. B.; MENDES, L.C. **Introdução a polímeros** 2. ed. rev. e ampl. São Paulo, 191 p. 2004.

MATTOS, R. L. G.; GONÇALVES, R. M.; CHAGAS, F. B. **Painéis de madeira no Brasil: Panorama e perspectivas**. Rio de Janeiro: BNDES, 2008.

MENDES, L.M.; ALBUQUERQUE, C.E.C.; IWAKIRI, S: **Compensados Sarrafeados: Qualidade Da Madeira, Aspectos De Produção E Aproveitamento De Resíduos**. Editora.ufla.br, p.47. 1999.

NASCIMENTO, A. M.; LELIS, R. C. C.; COSTA, D. L.; OLIVEIRA, C. S. Comportamento de ligações adesivas em madeira de reflorestamento. **Revista Floresta e Ambiente**. Rio de Janeiro, v.9, n.1, p. 54-62, 2002.

NÉRI, A. C. **Parâmetros de corte de usinagem de madeiras de reflorestamento**. 2003. 154 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

NOGUEIRA, M.C.J.A. **Indicações para o emprego de dezesseis espécies de eucalipto na construção civil**, publicação eletrônica da tese de doutorado, IBRAMEM, EESC – USP, São Carlos – SP. 2002.

NORDSTROM, J. E. P. Bending strength of spruce End-Grain Butt – joint using formaldehyde based adhesives. **Forest Products Journal**. [S.l.], v. 45, n. 6, p. 77- 83, 1995.

PACKHAM, D. E. **Roughness and adhesion**. In: PACKHAM, D. E. Handbook of Adhesion, 2 ed. 2005. 638p.

PARIS, J.L.; KAMKE, F.A. (2015). Quantitative Wood-adhesive penetration with X-ray computed tomography. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, V.61, p.61-80.

PARKER, G. C. **Polyurethane adhesives**. In: PACKHAM, D. E. Handbook of Adhesion, 2 ed. 2005. 638p.

PETRIE, E. M. **Handbook of Adhesives and Sealants**. 1999. 764p.

PETROVIĆ, Z. S. **Polyurethanes**. In: Handbook of Polymer Synthesis. 2nd ed. New York : Marcel Dekker .2005.

PINHEIRO, C. **Efeitos do teor de umidade da madeira no fresamento de *Pinus elliottii***. 2014. 124f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2014.

PIZZI, A. **Advanced wood adhesives technology**. New York: Marcel Dekker, 1994. 289 p.

PIZZI, A. **Wood adhesives: Chemistry and Technology**. New York: Marcel Dekker, 1983. 364 p.

PIZZI, A. **Wood adhesives – basics General introduction**. In: PACKHAM, D. E. Handbook of Adhesion, 2 ed. 2005. 638p.

POUBEL, D. S.; GARCIA, R. A.; LATORRACA, J. V. F.; CARVALHO, A. M. Estrutura Anatômica e Propriedades Físicas da Madeira de *Eucalyptus pellita* F. Muell. **Floresta e Ambiente**, v. 18, n. 2, p. 117-126, 2011.

PRATA, J. G. **Estudo da viabilidade tecnológica do uso de espécies de pinus tropicais para produção de painéis colados lateralmente (*edge glued panels* – EGP)**. 114 p. Tese (Doutor em Engenharia Florestal, Setor de Ciências Agrárias) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

RITTER, M. A. **Timber Bridges: Design, Construction, Inspection, and Maintenance: manual**.1 ed., Washington, Forest Service USA. 1990.

RODRIGUES, E. A. C.; ROSADO, S. C. S.; TRUGILHO, P. F.; SANTOS, A. M. Seleção de clones de *Eucalyptus* para as propriedades físicas da madeira avaliadas em árvores no campo. **Cerne**, Lavras, v. 14, n. 2, p. 147-152, abr./jun. 2008.

SCHULTZ, J.; NARDIN, M. **Theories and Mechanisms of Adhesion**. In: PIZZI A.; MITTAL, K. L Handbook of Adhesive Technology - Second Edition, Revised and Expanded. 2003. P. 61-75.

SHIMIZU, J. Y.; MEDRADO, M. J. S. **Cultivo do Pinus**. Disponível em: <<http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Pinus/CultivodoPinus/index.ht>>. Acesso em: 18/07/2017.

SILVA, A.L.D., MARTINEZ, J.M.M., BORDADO, J.C.M., Influence of the free isocyanate content in the adhesive properties of reactive trifunctional polyether urethane quasi-prepolymers. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v.26, n.5, p.355-362, august 2006.

SILVA, B.R. **Desenvolvimento de poliuretano a base de óleo de mamona**. 2006. 84 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

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

SILVA, J. R. M.; MENDES, L. M.; TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T. Preparação de superfícies de madeira e derivados para receber acabamento. **Boletim Agropecuário**, Lavras, v. 28, p.05-26, 1999.

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) – Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2013.

SOMANI, K.P.; KANSARA, S.S.; PATEL, N.K.; RAKSHIT, A. K. Castor oil based polyurethane adhesives for wood-to-wood bonding. **International Journal of Adhesion & Adhesives**.v. 23, n.4. p 269-275. 2003.

STEHR, M.; JOHANSSON, I. Weak boundary layers on wood surfaces. **Journal of Adhesion Science and Technology**. v. 14, n. 10, p.1211-1224, Jan 2000.

STEMMER, G. E. **Ferramentas de Corte II: brocas, alargadores, ferramentas de roscas, fresas, brochas, rebolos e abrasivos**. Florianópolis: Ed. da UFSC, p.314, 1992.

STROBECH C. Polyurethane adhesives. **International Journal of Adhesive & Adhesion**.v.10. n.3. p. 225-228. 1990.

VICK, C. B. **Adhesive bonding of wood materials**. In: Wood handbook – Wood as an engineering material. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture. Forest Service. Forest Products Laboratory. 1999. 463 p. cap 9.

VICK, C. B.; OKKONEN, E. A. Strength and durability of one-part polyurethane adhesive bonds to wood. **Forest Products Journal** vol. 48, n. 11/12 p. 71-76. 1998.

VICK, C. B.; OKKONEN, E. A durability of one-part polyurethane bonds to wood improved by HMR coupling agent. **Forest Products Journal** vol. 50, n. 10 p.69-75. 2000.

VILAR, W.D. **Química e tecnologia dos poliuretanos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Vilar Consultoria Técnica, 1999.

VILAR, W.D. **Química e tecnologia dos poliuretanos**. 3. ed. Rio de Janeiro: Vilar Consultoria Técnica, 2003.

WEGENER, G.; BRANDT, M.; HOFMANN, J.; KLESCZEWSKI, B.; KOCH, D.; KUMPF, R. J.; ORZESEK, H.; PIRKL, H. G.; SIX, C.; STEINLEIN, C.; WEISBECK, M. Trends in industrial catalysis in the polyurethane industry. **Applied Catalysis A: General**, v.221, p.303-35, 2001.

WREGE, M.S.; FRITZSONS,E.; SHIMIZU,J. Y.; AGUIAR, A. Virgínia.; CARAMORI, P.H. Pinus tropical com potencial para uso em plantios comerciais no Brasil. **Rev. Instituto Florestal**. São Paulo.v. 26 n. 2 p. 137-145 dez. 2014.

ZENID, J. G. IPT (Org.). **Madeira: uso sustentável na construção civil**. 2 ed. São Paulo, 2009. 99 p.

ZHOU, X; FRAZIER, C. E. Double labeled isocyanate resins for the solid-state NMR detection of urethane linkages to wood. **International Journal of Adhesion & Adhesives**, v.21, p.259-264, 2001.

https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/14565/Glossary_of_wood_and_woodworking_terms.pdf.