

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
INSTITUTO DE FÍSICA DE SÃO CARLOS
INSTITUTO DE QUÍMICA DE SÃO CARLOS

Estudo experimental de adesivos para fabricação de madeira laminada colada: avaliação da resistência de emendas dentadas, da durabilidade e de vigas

Maximiliano dos Anjos Azambuja

Tese apresentada à Área Interunidades em
Ciência e Engenharia de Materiais, da
Universidade de São Paulo, para obtenção
do título de Doutor em Ciência e
Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Alves Dias

São Carlos

2006.

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	iv
LISTA DE TABELAS.....	vii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	x
LISTA DE SÍMBOLOS	xi
RESUMO.....	XII
ABSTRACT.....	XIII
1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 – Objetivos	2
1.2 - Estrutura da Tese	2
2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1 - MADEIRA LAMINADA COLADA.....	4
2.1.1 – Breve histórico	4
2.1.2 - Madeira de reflorestamento.....	5
2.1.3 – Componentes básicos de vigas de MLC	7
2.1.4 - Aspectos favoráveis e limitações da MLC	7
2.1.5 – Aspectos de fabricação de MLC	8
2.1.6 – Recomendações para a avaliação de adesivos segundo a norma ASTM D4688	13
2.1.6 – Classificação das lâminas	14
2.1.7 – Controle de qualidade do produto acabado.....	20
2.1.8 – Ensaio em vigas de MLC.....	21
2.2 – ADESIVOS APLICADOS EM MADEIRA	24
2.2.1 - Adesivo poliuretano à base de óleo de mamona.....	25
2.2.2 – Aplicação de adesivos poliuretanos em madeira e outros substratos.....	28
2.3 – CONSIDERAÇÕES SOBRE A REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	34
3 – ESTUDO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO PARALELA EM EMENDAS DENTADAS COM DIMENSÃO ESTRUTURAL	35
3.1 – MATERIAIS	35
3.1.1 - Madeira.....	35
3.1.2 - Adesivos	37
3.2 – MÉTODOS.....	38
3.2.1 - Classificação visual da madeira	39

3.2.2 - Classificação mecânica da madeira	41
3.2.3 - Plano experimental.....	42
3.2.4 - Confeção das emendas dentadas e procedimento de colagem	43
3.2.5 - Ensaio de tração em peças estruturais.....	46
3.2.7 - Forma de Análise dos dados	47
3.3 - RESULTADOS OBTIDOS.....	49
3.3.1 - Classificação visual e mecânica.....	49
3.3.2 - Ensaio de caracterização da madeira.....	49
3.3.3 - Tração paralela em peças de tamanho estrutural	50
3.4 - ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	53
3.4.1 - Comparação entre os adesivos	53
3.4.2 - Comparação entre os tratamentos e o controle.....	59
3.4.3 - Comparação dos perfis vertical e horizontal	62
3.4.4 - Análise dos modos de ruptura.....	63
4 – AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO MECÂNICO EM DIFERENTES CONDIÇÕES DE UMIDADE PARA ADESIVOS ESTRUTURAIS.....	65
4.1 - MATERIAIS.....	65
4.1.1 - Madeiras	65
4.1.2 - Adesivos	65
4.2 – MÉTODOS.....	65
4.2.1 – Confeção dos corpos-de-prova colados.....	66
4.2.2 – Tratamento dos corpos-de-prova.....	67
4.2.3 - Ensaio de cisalhamento na lâmina de cola e de resistência da emenda dentada	69
4.2.4 - Ensaio de tração paralela às fibras	69
4.2.5 - Plano experimental	70
4.2.6 – Forma de análise dos dados.....	71
4.3 - RESULTADOS OBTIDOS	74
4.4 – ANÁLISE DOS RESULTADOS	79
4.4.1 – Resistência ao cisalhamento na lâmina de cola	79
4.4.2 - Resultados dos ensaios de tração paralela às fibras – espécie Pinus	87
5 – VIGAS DE MADEIRA LAMINADA COLADA.....	97
5.1 – MATERIAIS E MÉTODOS	97
5.1.1 - Madeira.....	97
5.1.2 - Adesivos	97
5.1.3 – Montagem das vigas	98

5.1.4 - Método de ensaio para caracterização das vigas	101
5.1.5 – Resistência ao cisalhamento na lâmina de cola	103
5.2 - RESULTADOS OBTIDOS	104
5.2.1 – Ensaio de Flexão	104
5.2.2 – Resistência ao cisalhamento na lâmina de cola	108
5.3 - ANÁLISE DOS RESULTADOS	109
5.3.1 - Ensaio de flexão das vigas	109
5.3.1.1 - Avaliação da rigidez à flexão	109
5.3.1.2 - Avaliação da ruptura das vigas	113
5.3.2 - Resistência ao cisalhamento na lâmina de cola	115
6 – CONCLUSÕES.....	117
7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	121

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Tipos de emendas longitudinais (a) emenda de topo, (b) emenda biselada e (c) emenda dentada.	8
Figura 2.2 - Emenda dentada com os parâmetros geométricos identificados.....	9
Figura 2.3 – (a) perfil vertical e (b) perfil horizontal.	10
Figura 2.4 - Distância mínima entre nó e a emenda dentada.	10
Figura 2.5 - Distância mínima entre o corte e o nó.	11
Figura 2.6 – Diagonal máxima do esmoado ($a_{w,max} = \sqrt{A/5}$).	11
Figura 2.7 - Pressão de colagem em função do comprimento da emenda (DIN 68 140).....	12
Figura 2.8 - Linha radial representativa em peça sem medula.	17
Figura 2.9 - Equipamento para a determinação do MOE por vibração transversal.....	18
Figura 2.10 – (a) Lote II - vigas laminadas horizontalmente e (b) Lote III – vigas laminadas multidirecionalmente.	21
Figura 2.11 - Configuração para o teste de flexão a quatro pontos.....	22
Figura 2.12 – Emendas dentadas e ruptura viga <i>Eucalyptus grandis</i>	23
Figura 2.13 – Configuração do teste de cisalhamento em viga em 5 pontos.....	23
Figura 2.14 – (a) Falhas de cisalhamento na viga, e (b) e (c) parte da falha na seção transversal.	23
Figura 2.15 - Curva de decomposição térmico do polímero em atmosfera de N ₂	26
Figura 2.16 – Curva do ensaio de tração para amostra do polímero.....	26
Figura 2.17 – Valores médios de resistência ao cisalhamento para os adesivos poliuretanos e adesivo resorcinol-formaldeído: (a) Yellow Birch e (b) Douglas-Fir.....	31
Figura 2.18 - Falha na madeira de adesivos poliuretanos C e D sem e com fundo preparador, e adesivo RF, para Yellow birch (a) e Douglas-fir (b).	32
Figura 2.19 - Seção transversal de vigas laminadas da espécie Yellow birch (a) 53,5% de separação de lâminas para o adesivo poliuretano D sem fundo preparador e (b) 5,8% de separação de lâmina para o mesmo adesivo com fundo preparador.	32
Figura 2.20 - Seção transversal de vigas laminadas da espécie Douglas fir (a) 71,1% de separação de lâminas para o adesivo poliuretano C sem fundo preparador e (b) 2,1% de separação de lâmina para o mesmo adesivo com fundo preparador.	32
Figura 3.1 - Talhão Horto Florestal de Itirapina, SP.	36
Figura 3.2 - Secagem ao ar (madeira serrada).	36
Figura 3.3: Linha radial representativa para contagem do número de anéis e avaliação da porcentagem de madeira de inverno.	39
Figura 3.4: Exemplo de peça com 4 m classificada como SS e N1 em diferentes trechos.	40
Figura 3.5: Proporção de cerne na seção transversal da espécie Eucalipto.	40
Figura 3.6: Lotes classificados – (a) Pinus e (b) Eucalipto.	41
Figura 3.7: Ensaio de classificação mecânica – (a) vibração transversal e (b) flexão estática.	41
Figura 3.8 – Parâmetros geométricos das facas asas.	43
Figura 3.9 - processo de fabricação das emendas.....	44

Figura 3.10 - Facas asas posicionadas em espiral e emendas dentadas verticais	44
Figura 3.11 - Aplicação do adesivo e posicionamento do corpo-de-prova.....	45
Figura 3.12 - Detalhe do aplicador de carga, manômetro e posicionamento da peça a ser emendada	45
Figura 3.13 - Prensa manual.....	46
Figura 3.14 - Lote de lâminas com emendas.....	46
Figura 3.15 - Ensaio de tração em peças com dimensões estruturais.....	46
Figura 3.16 – (a) Máquina de ensaio DARTEC M1000/RC e (b) máquina universal de ensaio AMSLER	47
Figura 3.17 - Exemplos de rupturas ocorridas em cada modo.....	50
Figura 3.18 - Histograma de freqüências, para a espécie Pinus (perfil vertical).....	53
Figura 3.19 - Gráfico de probabilidade normal dos resíduos, para a espécie Pinus (perfil vertical).....	54
Figura 3.20 - Resíduos versus valor estimado, para a espécie Pinus (perfil vertical).....	54
Figura 3.21 – Esquema gráfico da diferença de resistência entre os adesivos.....	56
Figura 3.22 - Valores médios de resistência para os diferentes tratamentos, para a espécie Pinus.....	56
Figura 3.23 - Valores médios de resistência para os diferentes tratamentos, para a espécie Eucaliptos.....	59
Figura 3.24 - Comportamento da resistência à tração com o aumento das faixas de módulo de elasticidade (Bloco).....	61
Figura 3.25 - Valores médios de resistência para cada bloco, para a espécie Pinus.....	62
Figura 3.26 - Gráfico de freqüência de ocorrência dos modos de ruptura.....	64
Figura 4.1 – Esquema de prensagem das lâminas de cisalhamento.....	66
Figura 4.2 – Corpos-de-prova de cisalhamento distribuídos e numerados.....	66
Figura 4.3 – Lâminas coladas entablicados para cura.....	67
Figura 4.4 – Corpos-de-prova colados de tração paralela.....	67
Figura 4.5 - Compressor para vácuo-pressão (a) e autocalve (b).....	68
Figura 4.6 – Corpos-de-prova nas prateleiras da climatizadora.....	68
Figura 4.7 – (a) Corpo-de-prova da NBR 7190/97 e (b) corpo-de-prova proposto.....	70
Figura 4.8 – Formas de ruptura à tração (sem emendas).....	74
Figura 4.9 - Valores médios de resistência ao cisalhamento na lâmina de cola para os diferentes tratamentos, para a espécie Pinus.....	80
Figura 4.10 - Valores médios de resistência ao cisalhamento na lâmina de cola para os diferentes tratamentos, para a espécie Eucalipto.....	82
Figura 4.11 – Distribuição percentual em função da Porcentagem de ruptura na madeira na área cisalhante, espécie Pinus.....	85
Figura 4.12 – Porcentagem de ruptura na madeira na área cisalhante, espécie Eucalipto.....	86
Figura 4.13 - Valores médios de resistência de emendas dentadas à tração paralela às fibras da madeira para os diferentes tratamentos, para espécie Pinus.....	89
Figura 4.14 - Gráfico de freqüência de ocorrência dos modos de ruptura “Seco”.....	91

Figura 4.15 - Gráfico de frequência de ocorrência dos modos de ruptura “Saturado”.....	91
Figura 4.16 - Gráfico de frequência de ocorrência dos modos de ruptura “Fervido”.....	92
Figura 4.17 - Valores médios de resistência à tração paralela às fibras da madeira para os diferentes tratamentos, para espécie Pinus.....	94
Figura 4.18 – Porcentagem dos modos de ruptura.....	95
Figura 5.1 – Prensagem das vigas de MLC.....	101
Figura 5.2 – Vigas de madeira laminada colada.....	101
Figura 5.3 - Esquema estático do ensaio das vigas de MLC.....	102
Figura 5.4 – Variações de apoios testados.....	102
Figura 5.5 - Esquema estático do ensaio das vigas de MLC.....	103
Figura 5.6 - Esquema estático das vigas de MLC ensaiadas.....	103
Figura 5.7 – (a) Esquema do corpo-de-prova de cisalhamento estrutural e (b) corpo-de-prova de Pinus.....	104
Figura 5.8 – Forma A: Ruptura predominante por cisalhamento na madeira, e em alguns trechos pequenos de linhas de cola alternadas.....	106
Figura 5.9 – Forma B: Ruptura por cisalhamento na madeira e na linha de cola, alternadamente, e em proporções semelhantes.....	106
Figura 5.10 – Forma D: Ruptura por tração na borda inferior, propagando por cisalhamento.....	107
Figura 5.11 – Forma E: Esmagamento na região do apoio.....	107
Figura 5.12 – Ruptura por cisalhamento na área cisalhante: Pinus (a) e Eucalipto (b).....	109
Figura 5.13 - Seção transversal genérica de uma viga em MLC.....	110
Figura 5.14 – Distribuição percentual em função da Porcentagem de ruptura na madeira na área cisalhante.....	116
Figura C-1: Histograma de frequências, para a espécie Eucaliptos (perfil vertical).....	139
Figura C-2: Gráfico de probabilidade normal dos resíduos, para a espécie Eucaliptos (perfil vertical).....	139
Figura C-6: Resíduos versus valor estimado, para espécie Eucaliptos (perfil vertical).....	141
Figura C-7: Histograma de frequências, para espécie Pinus.....	141
Figura C-8: Gráfico de probabilidade normal dos resíduos, para espécie Pinus.....	142
Figura C-9: Gráfico dos resíduos versus valores estimados, para espécie Pinus.....	142
Figura C-10: Histograma de frequências dos resíduos, para a espécie Eucalipto.....	142
Figura C-11: Gráfico de probabilidade normal dos resíduos, para a espécie Eucalipto.....	143
Figura C-12: Gráfico dos resíduos versus valores estimados, para a espécie Eucalipto.....	143
Figura C-13: Histograma de frequências dos resíduos.....	143
Figura C-14: Gráfico de probabilidade normal dos resíduos.....	144
Figura C-15: Gráfico dos resíduos versus valores estimados.....	144
Figura C-16: Histograma de frequências dos resíduos.....	144
Figura C-17: Gráfico de probabilidade normal dos resíduos.....	145
Figura C-18: Gráfico dos resíduos versus valores estimados.....	145

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Área plantada com <i>Pinus</i> e <i>Eucalipto</i> , no Brasil (ha) – 2000	6
Tabela 2.2: Características geométricas dos perfis estruturais usados nas emendas dentadas pela indústria de MLC Norte-americana.	9
Tabela 2.3: Modos de ruptura em ensaios de tração paralela (ASTM D4688-99).	14
Tabela 2.4: Limitação da dimensão dos nós em função da proporção da área da seção transversal ocupada.	15
Tabela 2.5: Classes de densidade definidas na ASTM D245-93	16
Tabela 2.6: Necessidades mínimas para a produção de MLC.....	20
Tabela 2.7: Síntese dos resultados obtidos	22
Tabela 2.8: Resultados de resistência ao cisalhamento para as vigas.	24
Tabela 3.1: Valores médios de densidade aparente , resistência à compressão paralela, resistência à tração paralela e módulo de elasticidade para o <i>Pinus hondurensis</i> e <i>Eucalyptus grandis</i> . Fonte: NBR 7190/97.	36
Tabela 3.2 – Limites relativos à proporção da área da seção transversal ocupada pelo nó.....	40
Tabela 3.3: Organização do planejamento do experimento em blocos.....	42
Tabela 3.4: Comparações entre adesivos, perfis e controle.....	48
Tabela 3.5: Resistência à compressão (f_{co}), umidade (U) e densidade (ρ) - <i>Pinus hondurensis</i> ..50	
Tabela 3.6: Resistência à compressão (f_{co}), umidade (U) e densidade (ρ) – <i>Eucalyptus grandis</i> 50	
Tabela 3.7: Resistência (MPa) das lâminas à tração - <i>Pinus hondurensis</i>	51
Tabela 3.8: Resistência (MPa) das lâminas à tração - <i>Eucalyptus grandis</i>	52
Tabela 3.9: Tabela ANOVA, para espécie <i>Pinus</i> (perfil vertical).....	55
Tabela 3.10: Diferença entre as resistências médias dos adesivos.....	55
Tabela 3.11: Tabela ANOVA, para espécie <i>Eucalipto</i> (perfil vertical).	57
Tabela 3.12: Diferença entre as resistências médias dos adesivos.....	58
Tabela 3.13: Resistências à tração, médias e diferenças com relação ao controle (<i>Pinus</i>).	60
Tabela 3.14: Resistências à tração, médias e diferenças com relação ao controle (<i>Eucalipto</i>).	60
Tabela 3.15: Eficiência entre as resistências médias dos adesivos e o controle.	60
Tabela 3.16: Tabela ANOVA (perfil vertical e horizontal).	63
Tabela 3.17: Frequência dos modos de ruptura, <i>Pinus</i> (P) e <i>Eucalipto</i> (E).	63
Tabela 4.1: Quantidade de corpos-de-prova testados (cisalhamento na lâmina de cola e resistência da emenda dentada).	70
Tabela 4.2: Quantidade de corpos-de-prova testados (tração paralela às fibras).....	71
Tabela 4.3: Matriz de planejamento – Cisalhamento na lâmina de cola.....	72
Tabela 4.4: Matriz de planejamento – Resistência de emendas dentadas coladas.	73
Tabela 4.5: Matriz de planejamento – Resistência à tração paralela.	73
Tabela 4.6: Resistência (MPa) ao cisalhamento e porcentagem de falha na madeira - <i>Pinus</i>	75

Tabela 4.7: Resistência (MPa) ao cisalhamento e porcentagem de falha na madeira - Eucalipto	76
Tabela 4.8: Resistência (MPa) de emendas dentadas à tração e modos de ruptura - Pinus.	77
Tabela 4.9: Resistência (MPa) à tração paralela as fibras da madeira, para a espécie Pinus.	78
Tabela 4.10: Tabela ANOVA para resistência ao cisalhamento na lâmina colada, espécie Pinus.	79
Tabela 4.11: Diferença entre os valores médios das resistências para os adesivos/tratamentos.	80
Tabela 4.12: Tabela ANOVA para resistência ao cisalhamento na lâmina colada, espécie Eucalipto.	81
Tabela 4.13: Diferença entre as resistências médias dos adesivos.	82
Tabela 4.14: Razão entre as resistências médias dos adesivos.	83
Tabela 4.15: Perda de resistência - razão entre resistências com base no tratamento seco.	84
Tabela 4.16: Tabela ANOVA para resistência das emendas dentadas (PU Mamona, Purbond e Cascophen).	87
Tabela 4.17: Diferença entre as resistências médias dos corpos-de-prova de tração sem emendas.	88
Tabela 4.18: Razão entre as resistências médias dos adesivos.	89
Tabela 4.19: Perda de resistência - razão entre resistências com base no tratamento seco.	90
Tabela 4.20: Frequência dos modos de ruptura, espécie Pinus.	90
Tabela 4.21: Tabela ANOVA para resistência à tração (sem emendas).	93
Tabela 4.22: Diferença entre as resistências médias dos corpos-de-prova de tração sem emendas.	93
Tabela 4.23: Frequência dos modos de ruptura, sem emendas.	95
Tabela 4.24: Eficiência dos adesivos PU Mamona, Purbond e Cascophen.	96
Tabela 5.1: Propriedades das lâminas utilizadas - vigas 1 a 7, espécie Pinus.	99
Tabela 5.2: Propriedades das lâminas utilizadas - vigas 8 a 14, espécie Eucalipto.	100
Tabela 5.3: Deslocamentos verticais na viga 1, para o último ciclo de carregamento.	104
Tabela 5.4: Deslocamentos $\delta_{3,abs}$ e $\delta_{3,rel}$.	105
Tabela 5.5: Relações F/v e forças de ruptura.	105
Tabela 5.6: Formas de ruptura.	107
Tabela 5.7: Resistência (MPa) ao cisalhamento e % de falha na madeira (corpos-de-prova retirados das vigas).	108
Tabela 5.8: Resistência (MPa) ao cisalhamento (estrutural) e % de falha na madeira (corpos-de-prova retirados das vigas).	109
Tabela 5.9: Cálculo do EI_{teo} da viga 1 de <i>Pinus</i> .	111
Tabela 5.10: Resultados teóricos e experimentais de rigidez à flexão.	111
Tabela 5.11: Valores de eficiência das vigas da espécie Pinus Caribea.	112
Tabela 5.12: Valores obtidos para F_r (kN), M_{max} (kN.m), τ_{max} (MPa) e σ_{max} (MPa).	114
Tabela 5.13: Resistência ao cisalhamento na lâmina de cola.	115
Tabela 6.1: Eficiência (η) das emendas coladas.	117

Tabela 6.2: Razão entre as resistências médias dos adesivos.....	119
Tabela 6.3: Eficiência dos adesivos para as emendas dentadas em corpos-de-prova, para os tratamentos seco, saturado e fervido – Espécie: Pinus	119

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

MLC – Madeira Laminada Colada

MUF - Melamina Uréia Formaldeído

NBR – Norma Brasileira Registrada

ASTM - American Society for Testing and Materials

SPIB - Southern Pine Inspection Bureau

DIN – Norma Alemã

PVA – polivinil acetato

MDF – compósito de madeira de média densidade

AITC - American Institute of Timber Construction

SS – select structural

SS, N1, N2, N3 - classes estruturais, segundo o SPIB

LSD - Diferença Menos Significativa

qtd. – quantidade

pol. – polegada

H – perfil horizontal

V – perfil vertical

PU Mamona – Adesivo poliuretano à base de óleo de mamona

WB – Wonderbond

Cps – corpos-de-prova

CV – coeficiente de variação

ANOVA - Análise de Variância

GL – graus de liberdade

SQ – soma dos quadrados

QM – quadrados médios

QME – quadrado médio do erro

LISTA DE SÍMBOLOS

L	comprimento
t	largura do dente
b	largura da ponta do dente
a	inclinação do dente
ρ_{ap}	densidade aparente da madeira
f_{c0}	resistência à compressão paralela às fibras
f_{t0}	resistência à tração paralela às fibras
U	teor de umidade
F	valor de estatística, tabelado: “F” de Snedecor
$t_{q/2,u}$	valor de estatística, tabelado: “t” de Student
q	erro
u	número de graus de liberdade da parcela do erro
n_i	número de observações dentro de um mesmo tratamento
\bar{y}_i	resistência média do lote controle
\bar{y}_j	resistência média do lote com emenda
k	número de tratamentos (nº de observações dentro de um bloco)
s	desvio padrão
n_A	número de corpos-de-prova do controle
n_t	número de corpos-de-prova para cada tratamento
E	Módulo de Elasticidade

RESUMO

Neste trabalho propõe-se contribuir para o desenvolvimento de tecnologia nacional investigando a aplicação de uma nova geração de adesivos para a confecção de elementos estruturais de madeira laminada colada (MLC), viabilizando um menor custo final do produto e tornando-o competitivo no mercado interno e externo. Nesse contexto, avaliou-se a resistência à tração paralela em emendas dentadas com dimensão estrutural, em condições de temperatura ambiente e umidade padrão, usando as espécies Pinus e Eucalipto e vários tipos de adesivos, dentre eles o adesivo poliuretano à base de óleo de mamona, foco principal de estudo deste trabalho. Outro aspecto abordado é o da durabilidade, em que foi avaliado o desempenho dos adesivos Cascophen e poliuretano à base de óleo de mamona por meio de ensaios de resistência ao cisalhamento na lâmina de cola e de resistência à tração de emendas dentadas, ambos em corpos-de-prova isentos de defeitos. Também foi avaliada a qualidade da colagem das lâminas, por meio de ensaios de flexão buscando-se a ruptura por cisalhamento, em vigas de MLC com dimensões estruturais, fabricadas em laboratório com os adesivos Cascophen, poliuretano à base de óleo de mamona e Purbond. Os resultados obtidos permitem concluir o bom desempenho do adesivo poliuretano à base de óleo de mamona, demonstrando a sua adequação para aplicação na produção de madeira laminada colada.

Palavras-chave: emendas dentadas, adesivos alternativos, adesivo de mamona, madeira laminada colada.

ABSTRACT

The aim of this work is the development of national technology investigating the application of a new adhesive generation to fabrication of glued laminated timber (Glulam) structural members, making possible a lesser final cost of the product and becoming it competitive in the domestic and external market. In this context, the parallel tensile to the fibers tests in joint pieces with structural dimension, in conditions of ambient temperature and standard relative humidity, was evaluated using the species *Pinus* and *Eucalyptus* and some types of adhesives, among them the polyurethane adhesive base on castor oil, that is the main focus of study of this work. Another approached aspect is the durability, in which was evaluated the performance of the Cascophen and the polyurethane adhesive base on castor oil adhesive, by means of shear strength tests in the lamina of glue and tensile strength tests of joint laminas, both made in specimens exempt of defects. Also the quality of the collage of lamina, by means of bending and shearing tests, in glulam structural beams was evaluated, which were manufactured in laboratory with the adhesives Cascophen, polyurethane adhesive base on castor oil and Purbond. The results allow concluding the well-behaved performance of polyurethane adhesive base on castor oil, demonstrating its adequacy for application in glued laminated timber fabrication.

keywords: finger-joints, alternative adhesive, polyurethane adhesive base on castor oil, glued laminated timber.

1 – INTRODUÇÃO

Peças estruturais de madeira serrada possuem limitação nas suas dimensões devido aos processos de extração, transporte, e da presença de defeitos característicos do próprio material. Uma das formas de eliminar estas restrições é a utilização da madeira laminada colada (MLC), que consiste na confecção de vigas de madeira por meio de lâminas de pequena espessura, dispostas com as fibras paralelas ao eixo da peça, solidarizadas entre si com um adesivo que garanta a transferência de esforços entre as laminas.

A MLC é consagrada internacionalmente como um bom material para aplicação estrutural. Esta técnica baseia-se no uso racional de madeira de baixa e média densidade, com aproveitamento de peças de menor dimensão. Geralmente utilizam-se espécies de reflorestamento, mas também se podem utilizar espécies nativas para sua fabricação.

Com este método construtivo, é possível fabricar-se peças estruturais de diversas larguras, comprimento, formas e espessuras, já que podemos solidarizar peças de madeira lateralmente, ao longo do seu comprimento e altura.

Desta forma, torna-se necessário o conhecimento de vários fatores que influenciam nas características de fabricação de vigas de MLC. Entre estes fatores pode-se destacar os aspectos relacionados à espécie de madeira, quantidade de defeitos, módulo de elasticidade, classificação estrutural por método visual e mecânico das lâminas de madeira e os adesivos empregados na fabricação. Entretanto, existem poucos estudos, no Brasil, relativos à aplicação da classificação visual e mecânica em espécies de reflorestamento para a produção de elementos estruturais de MLC.

Este trabalho se propõe a avaliar a resistência à tração paralela em emendas dentadas com dimensão estrutural, em condições de temperatura ambiente e umidade padrão, usando as espécies Pinus e Eucalipto e vários tipos de adesivos, entre eles o adesivo poliuretano à base de óleo de mamona (PU Mamona), foco principal de estudo do trabalho.

Outro aspecto abordado é o da durabilidade, tendo sido avaliado o desempenho dos adesivos Cascophen e PU Mamona, por meio de ensaios de resistência ao cisalhamento na lâmina de cola, e de resistência à tração de emendas dentadas, ambos em corpos-de-prova isentos de defeitos. No caso dos testes de tração, para avaliação da durabilidade, foi incluído um outro adesivo (Purbond), lançado recentemente.

Também foi avaliada a qualidade da colagem das lâminas em elementos estruturais, por meio de ensaios de flexão de vigas de MLC, fabricadas com os adesivos Cascophen,

Poliuretano à base de óleo de Mamona e Purbond. Procurou-se obter a situação mais crítica possível quanto ao cisalhamento na cola, usando-se vigas com grande altura em relação ao vão.

1.1 – OBJETIVOS

OBJETIVOS GERAIS

- contribuir para o desenvolvimento de tecnologia nacional investigando um adesivo com vantagem ecológica para a confecção de elementos estruturais de MLC.
- avaliar a eficiência de novos adesivos, em especial o adesivo poliuretano à base óleo de mamona, quanto à colagem da madeira para uso estrutural.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- avaliar a resistência à tração de emendas dentadas (“Finger-joints”) para os seguintes adesivos: Cascophen, Cascorez 2550, Wonderbond EPI WS 766-56, Melamina Uréia Formaldeído (MUF), Purbond e em especial o adesivo poliuretano a base de óleo de mamona, para espécies de Pinus e de Eucalipto, em lâminas com tamanho estrutural.
- avaliar o desempenho mecânico em diferentes condições de umidade do adesivo Cascophen e adesivo poliuretano à base de óleo de mamona, quanto à durabilidade, por meio de ensaios de resistência ao cisalhamento, em corpos-de-prova isentos de defeito.
- avaliar o desempenho mecânico em diferentes condições de umidade dos adesivos Cascophen, poliuretano à base de óleo de mamona e Purbond, quanto à durabilidade, por meio de ensaios de resistência à tração de emendas dentadas, em corpos-de-prova isentos de defeito.

1.2 - ESTRUTURA DA TESE

O leitor encontrará, nesta tese, a estrutura do trabalho descrita a seguir.

O capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica efetuada sobre os critérios para classificação visual e para fabricação de vigas de MLC, além de trabalhos relacionados com adesivos poliuretanos aplicados em madeira e em outros substratos. O capítulo cria subsídios para a elaboração de uma pesquisa experimental, levantando informações sobre as pesquisas realizadas no exterior e no Brasil.

O capítulo 3 apresenta a resistência à tração paralela às fibras da madeira, em emendas dentadas com dimensão estrutural, em condições de temperatura ambiente e umidade padrão. O

capítulo mostra o plano experimental utilizado, as espécies de madeira de reflorestamento utilizadas e vários tipos de adesivos; em especial, os adesivos poliuretanos, foco principal de estudo do trabalho, os resultados obtidos e, finalmente, uma análise estatística dos dados.

O capítulo 4 trata do estudo de avaliação do desempenho dos adesivos quanto à durabilidade, por meio de ensaios de resistência ao cisalhamento e resistência à tração paralela às fibras da madeira, em corpos-de-prova isentos de defeitos, submetidos a três tratamentos distintos, que procuram caracterizar a eficiência do adesivo, tendo em vista distintas condições ambientais em que o mesmo pode ser utilizado.

O capítulo 5 trata do desempenho estrutural da colagem das lâminas no produto final, isto é, em vigas de madeira laminada colada (MLC), por intermédio de ensaios de flexão e cisalhamento.

O capítulo 6 apresenta as principais conclusões obtidas das análises experimentais efetuadas.

O capítulo 7 apresenta as referências bibliográficas utilizadas na pesquisa.

2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta os principais trabalhos desenvolvidos relacionados à MLC, critérios para classificação visual e para fabricação de vigas de MLC, além de trabalhos relacionados com adesivos poliuretanos aplicados em madeira. São apresentadas resumidamente informações de pesquisas realizadas no exterior e no Brasil sobre MLC, classificação de lâminas, aspectos de fabricação de vigas retas de MLC e adesivos poliuretanos.

2.1 - MADEIRA LAMINADA COLADA

Este item apresenta um breve histórico sobre MLC, aplicação de MLC no Brasil, componentes básicos de vigas de MLC, critérios de fabricação, emendas dentadas, classificação visual e mecânica de lâminas e adesivos utilizados.

2.1.1 – Breve histórico

Segundo RUSSELL et all (1999), em 1906, *Otto Karl Frederich Hetzer* obteve a primeira patente deste método de construção e, desde então, o método foi utilizado por diversos países europeus sendo chamado no princípio de “*Sistema Hetzer*”. A primeira aplicação data de 1890, com construção de vigas com 10 m de vão livre. Em 1913 o sistema ganhou grande evidência com a construção destinada à *Brussels Word Exposition*, com uma estrutura de cobertura de 43 m de vão. A maioria das aplicações da MLC destinava-se a sistemas estruturais interiores. Entretanto, com o desenvolvimento dos adesivos à prova d’água, a MLC veio a ser usada com sucesso em estruturas expostas. Isto permitiu a sua utilização nos mais variados tipos de estruturas.

Como decorrência do avanço da MLC na Europa, sua introdução nos Estados Unidos da América (EUA) foi apenas uma questão de tempo. *Max Hanisch* foi o responsável por trazer a tecnologia para a América. A primeira aplicação da MLC em estruturas na América data de 1934, na construção de um dos laboratórios do *Forest Products Laboratory*, em Wisconsin. Sua expansão comercial deu-se somente depois da publicação do boletim técnico *The Glued Laminated Wooden Arch* de T. R. Wilson, do *Forest Products Laboratory*, em 1939. A partir de então a MLC foi utilizada na construção de ginásios, igrejas, salões, fábricas, e em aplicações não residenciais. Algumas pontes pioneiras de MLC construídas nos anos 60, século XXX,

permanecem em serviço até hoje, indicando a longevidade potencial associada ao uso da MLC na construção de pontes.

De acordo com RUSSELL et al (1999), a MLC é definida como o produto resultante da colagem de lâminas de madeira classificadas estruturalmente formando duas ou mais camadas, com as fibras de todas as lâminas paralelas ao eixo longitudinal da peça.

Segundo BONO (1996), a primeira indústria brasileira de MLC foi fundada em 1934, em Curitiba/PR, a ESMARA Estruturas de Madeira Ltda; as obras da empresa são marcantes na Região Sul do país. Outra indústria que merece registro é a EMADEL Estrutura de Madeira Ltda, atualmente instalada em Curitiba/PR. A EMADEL possui uma prensa para fabricação de vigas de MLC de 23 m de comprimento, e projeta também estruturas em madeira roliça de eucalipto.

Em 2005, a empresa BATTISTELLA destacou-se no cenário nacional como a principal indústria de MLC do país. Foi fundada em 1949, em Lages/SC, tendo, portanto, mais de cinquenta anos de experiência no mercado madeireiro nacional e internacional. Criou a Stella, marca comercial dos produtos elaborados com madeira tratada da Battistella Indústria e Comércio Ltda. Possui uma linha de produção de casas pré-fabricadas, onde a estrutura do sistema construtivo é feito em MLC, além de fabricar vigas de madeira com bitolas já padronizadas.

2.1.2 - Madeira de reflorestamento

No Brasil, a utilização de *Pinus* de reflorestamento na indústria madeireira tem sido crescente nos últimos anos. As estimativas indicam que, do volume de madeira serrada produzida no País, estimado em aproximadamente 22 milhões de m³, mais de 35% é formado de madeira de *Pinus*. Atualmente, existem aproximadamente 1,70 milhão de hectares de plantações constituídas por espécies de *Pinus*, das quais 46% são de *Pinus taeda*, espécie, portanto, muito importante para o fornecimento de matéria-prima, especialmente nas regiões Sul e Sudeste, segundo LARA-PALMA et al (2002).

Atualmente, o uso estrutural de madeira de reflorestamento como uma alternativa às espécies tropicais é uma solução natural, pois representam materiais de bom desempenho, com baixo custo, e baixo impacto ambiental (CALIL et al, 2002).

A tabela 2.1 apresenta, de acordo com a Sociedade Brasileira de Silvicultura, a área plantada com as espécies de *Pinus* e de *Eucalipto*, no Brasil.

Tabela 2.1: Área plantada com *Pinus* e *Eucalipto*, no Brasil (ha) – 2000

Estado	Pinus	Eucalipto	Total
Amapá	80.360	12.500	92.860
Bahia	238.390	213.400	451.790
Espírito Santo	-	152.330	152.330
Mato Grosso do Sul	63.700	80.000	143.700
Minas Gerais	143.410	1.535.290	1.678.700
Pará	14.300	45.700	60.000
Paraná	605.130	67.000	672.130
Rio Grande do Sul	136.800	115.900	252.700
Santa Catarina	318.120	41.550	359.670
São Paulo	202.010	574.150	776.160
Outros	37.830	128.060	165.890
Total	1.840.050	2.965.880	4.805.930

Fonte: Sociedade Brasileira de Silvicultura (SBS, 2001).

Devido ao rápido crescimento, as árvores das espécies do gênero *Pinus* produzem uma madeira na sua região central com características diferentes daquela produzida na região mais externa. A madeira produzida na parte central é chamada de madeira juvenil, e madeira produzida na parte externa, por sua vez, é chamada de madeira adulta (LARA-PALMA et al, 2002).

Segundo LARA-PALMA et al (2002), a madeira juvenil, de uma forma geral, caracteriza-se por menor densidade, contração transversal menor, maior contração longitudinal, paredes celulares mais finas, maior conteúdo de lignina e hemicelulose, menor conteúdo de celulose. A madeira adulta apresenta maior quantidade de anéis de inverno, e, portanto, oferece melhor propriedade de resistência mecânica. O conhecimento das propriedades básicas da madeira juvenil e adulta das espécies de *Pinus*, portanto, é indispensável, visando principalmente um subsídio aos diferentes usuários desta matéria-prima para seu emprego correto em diferentes soluções.

Para fabricação de elementos estruturais de MLC, é extremamente importante fazer o corte da tora de madeira de forma diferenciada aproveitando ao máximo a madeira adulta com maior densidade e melhores qualidades de resistência. A densidade da madeira é um dos principais fatores para a fabricação de elementos de MLC com qualidade e eficiência estrutural.

A norma AITC 117-2001, “*Standard specifications for structural glued laminated timber of softwood species manufacturing requirements*”, estabelece que, para espécies coníferas de uma maneira geral, considera-se a madeira densa quando a massa específica é de 0,32 g/cm³ (Western Lumber Softwood) e para espécie do gênero *Pinus* em torno de 0,49 g/cm³ (Southern Pine).

A norma NBR 7190/97 – Projeto de Estruturas de Madeira define as madeiras do gênero *Pinus*, no Brasil, que possuem densidade em torno de $0,50 \text{ g/cm}^3$. No Brasil, as indústrias de MLC utilizam essas madeiras para a fabricação de elementos estruturais de MLC.

Na Tabela 2.1 observa-se uma análise comparativa da produção de Eucalipto e Pinus. No caso do Eucalipto, esse gênero tem sido foco de estudos de vários trabalhos científicos nas diversas áreas do conhecimento, por exemplo, SALES (1991) apresentou estudos das características de resistência mecânica de alguns gêneros de Eucalipto do Estado de São Paulo e ALBUQUERQUE NOGUEIRA (1991) apresentou indicações para o emprego de dezesseis espécies de Eucalipto na construção civil. Além disso, estudos têm sido conduzidos no sentido de aplicação dessa gênero para fabricação de elementos estruturais de madeira laminada colada.

2.1.3 – Componentes básicos de vigas de MLC

Os elementos de MLC são constituídos por um determinado número de lâminas, unidas paralelamente ao eixo do elemento. Por sua vez, as lâminas são constituídas por uma ou mais tábuas unidas entre si através de emendas longitudinais (de topo ou biseladas ou dentadas).

De acordo com COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION (1995), a definição de MLC diz respeito à obtenção de peças estruturais a partir de lâminas de madeira coladas, com todas as fibras paralelas no sentido longitudinal da peça. São estabelecidas as seguintes definições dos componentes de um elemento estrutural de MLC:

- **lâmina:** tem espessura variável em função da altura e da curvatura do elemento a ser construído (\approx de 2,5 a 5 cm);
- **emendas longitudinais:** empregadas para a obtenção de lâminas com maior comprimento, podendo ser de topo (butt-joint), biseladas (scarf-joint) ou dentadas (finger-joint);
- **emendas transversais:** empregadas para obtenção de largura superior à das peças disponíveis;
- **linha adesiva:** é constituída por um tipo de adesivo compatível com as espécies de madeira utilizadas e com a finalidade das peças; os adesivos mais empregados para o uso em interiores são à base de uréia melanina ou de caseína, e para uso exterior, são à base de resina resorcinol.

2.1.4 - Aspectos favoráveis e limitações da MLC

Sem dúvida, um dos principais aspectos favoráveis a se utilizar elementos estruturais de MLC de reflorestamento é a preservação de matas nativas.

Devido à possibilidade do emprego de lâminas de madeira de melhor qualidade nas regiões de alta sollicitação, e lâminas de madeira de qualidade inferior nas regiões onde a sollicitação é menos intensa, fabricam-se elementos estruturais de madeira com qualidade

superior à da madeira a madeira sã, pois se classifica adequadamente as regiões de enfraquecimento das lâminas devido à ocorrência de defeitos, tais como nó e medula, descartando-se os defeitos que possam prejudicar a resistência e rigidez da peça.

A influência dos defeitos de secagem, próprio de peças sã de grandes dimensões, são moderados, ocorrendo uma redução da intensidade dos defeitos de secagem, pelo fato das lâminas de madeira possuírem uma secção transversal reduzida, segundo ROCCO e SALES (1998).

Outro aspecto a salientar é o baixo peso próprio dos elementos estruturais de MLC (quando comparado a outros elementos estruturais construídos com outros materiais, por exemplo: o aço ou concreto) para o processo construtivo, onde se permite construções com inércia reduzida, propiciando maior economia na execução das fundações, de acordo com LE COURRIER (1987).

Alguns aspectos restritivos de fabricação de elementos estruturais de MLC, de acordo com MANTILLA CARRASCO (1984), diz respeito ao fator de perda ser elevado durante a sua fabricação, variando entre 13 e 33%, tanto na madeira como no adesivo, devido principalmente ao processo de confecção das emendas, ao acabamento, e às características do projeto, além do elevado custo do adesivo à base de resorcinol-formaldeído, utilizado atualmente no mercado brasileiro, chamado de Cascophen (CASCOPHEN, 2001). Ainda, existe o custo adicional devido ao transporte que, em algumas situações, é elevado.

Pode-se ainda citar que o processo de fabricação exige equipamentos e técnicas especiais como também mão-de-obra especializada, segundo ROCCO e SALES (1998).

2.1.5 – Aspectos de fabricação de MLC

As emendas longitudinais nas lâminas dos elementos estruturais de madeira laminada colada (MLC) surgem da necessidade de se obter lâminas de comprimentos superiores aos da madeira serrada ou em decorrência da retirada dos defeitos como, por exemplo, os nós. As emendas nas lâminas podem ser de topo, biseladas ou dentadas, conforme figura 2.1.

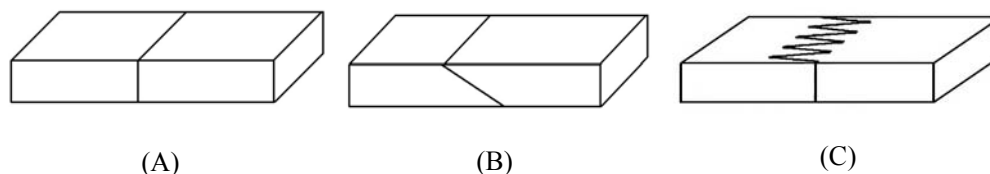


Figura 2.1 - Tipos de emendas longitudinais (a) emenda de topo, (b) emenda biselada e (c) emenda dentada.

Segundo MACEDO (1996), as emendas de topo, apesar de serem as mais simples de serem executadas, apresentam colagem ineficiente das fibras (baixos valores de resistência à

tração) e por isso são as emendas menos eficientes. As emendas biseladas foram desenvolvidas para suprir as limitações de resistência das emendas de topo. Contudo, do ponto de vista de fabricação, este tipo de emenda é muito dispendioso, uma vez que, para atingir uma boa proporção de resistência da madeira, é necessário que o corte do bisel apresente uma baixa inclinação, da ordem de 1:10. Esse fato faz com que o processo gere um consumo excessivo de madeira e adesivo, além das dificuldades inerentes ao corte do bisel e montagem das lâminas, como alinhamento e prensagem, prejudicando a velocidade de produção. As emendas dentadas foram desenvolvidas com o objetivo de substituir as emendas biseladas. Atualmente esse tipo de emenda é a mais utilizada pelos produtores de MLC.

Ainda, segundo MACEDO (1996), a geometria de 20 mm de comprimento correspondente à norma DIN 68140-1 - Keilzinkenverbindungen von Holz, da DEUTSCHES INSTITUT FÜR NURMUNG (1971), é considerada adequada, por se tratar de um perfil de emenda amplamente utilizado na tecnologia de MLC.

De acordo com HERNANDEZ (1998), os perfis mais utilizados na América do Norte pela indústria de MLC são os de 26 mm e os de 28 mm de comprimento. A Tabela 2.2 e a Figura 2.2 apresentam a geometria destes perfis.

Tabela 2.2: Características geométricas dos perfis estruturais usados nas emendas dentadas pela indústria de MLC Norte-americana.

Parâmetro	Perfil 1	Perfil 2
Comprimento (L)	28,3	26,3
Largura do dente (t)	6,98	6,73
Largura da ponta do dente (b)	0,81	0,76
Inclinação (α)	1:10,6	1:10,9

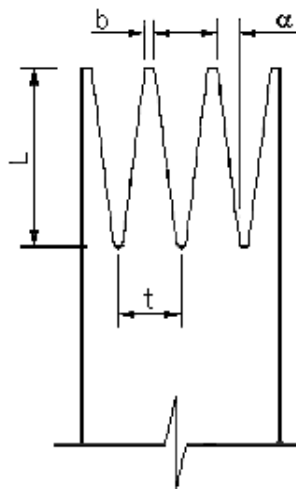


Figura 2.2 - Emenda dentada com os parâmetros geométricos identificados.

Atualmente existem duas geometrias para as emendas dentadas (figura 2.3). Na Europa o perfil mais utilizado é o vertical enquanto nos Estados Unidos, Canadá e Austrália utiliza-se o perfil horizontal. LOUW (1964) constatou que o perfil vertical é aproximadamente 9% mais resistente que o perfil horizontal. Isso ocorre porque o perfil vertical oferece a vantagem de proporcionar uma área de colagem maior.



Figura 2.3 – (a) perfil vertical e (b) perfil horizontal.

Entretanto, CHEUNG et all (2002) testaram à tração paralela 28 peças com emendas dentadas de madeira da espécie de *Pinus taeda* plantadas no Brasil, sendo 14 com perfil vertical e 14 com perfil horizontal, coladas com o adesivo resorcinol-formaldeído (Cascofhen RS-216-M). Para efeito comparativo, avaliou-se 14 peças sem emendas do mesmo lote com seção transversal idêntica. Os resultados mostram que as emendas dentadas verticais e horizontais em média são iguais considerando um nível de significância de 5%. Observou-se também que tais emendas apresentaram uma eficiência aproximada de 80% quando comparadas com a resistência da madeira sem emenda.

A Norma EN 385/1995 descreve a necessidade de obter informações suficientes sobre a espécie de madeira a ser utilizada para verificar se satisfaz ou não às exigências para o emprego em emendas dentadas (corte, colagem, encaixe) e ainda especifica:

- Nós com diâmetro menor que 6 mm serão desconsiderados.
- Não deverá existir nós, fissuras ou desordem de fibras pronunciada dentro da própria emenda. Fora da emenda, à distância entre o nó e a mais longa da emenda da madeira não deverá ser menor que $L+3d$, onde d é o diâmetro do nó medido perpendicular à direção das fibras (direção longitudinal), conforme figura 2.4.

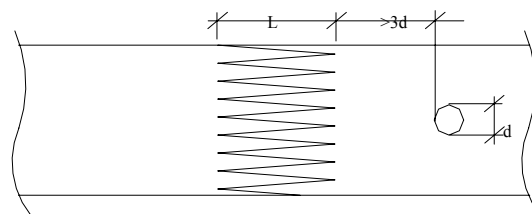


Figura 2.4 - Distância mínima entre nó e a emenda dentada.

- Onde a peça é cortada para retirar o nó, o corte deverá ser feito a uma distância, a partir do nó, de pelo menos igual ao comprimento de $3d$, conforme figura 2.5.

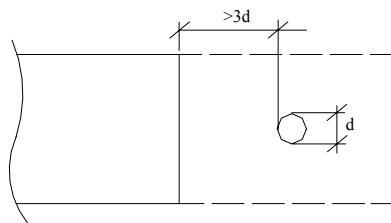


Figura 2.5 - Distância mínima entre o corte e o nó.

- Esmoado ou dano de borda: Não deverá haver esmoado ou dano de borda afetando mais que 2 cantos na emenda, dentro do comprimento do dente e dentro de 75 mm da origem dos dentes. A área do esmoado em qualquer canto não deverá exceder a 1% da área da seção transversal, conforme figura 2.6.

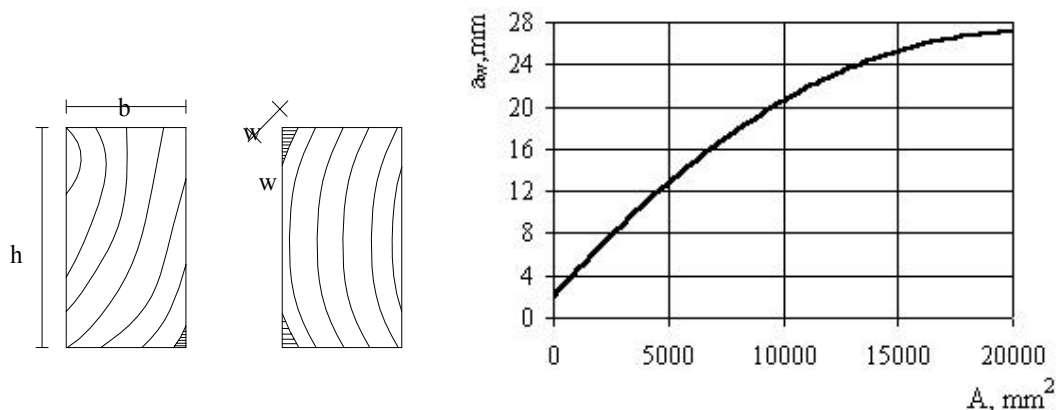


Figura 2.6 – Diagonal máxima do esmoado ($a_{w,max} = \sqrt{A/5}$).

A Norma EN 385/1995 descreve que a diferença no teor de umidade entre as extremidades da madeira para ser emendada não deverá exceder a 5%, na montagem; a temperatura da madeira na emenda não deverá ser menor que 15° C.

A norma NBR 7190 - Projeto de estruturas de madeira, da ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1997), recomenda que, em lâminas adjacentes, as emendas devem estar afastadas entre si de uma distância pelo menos igual a 25 vezes a espessura da lâmina ou à altura da viga.

Segundo SZÜCS (1992), para emendas de lâminas adjacentes, recomenda-se a seguinte distribuição:

- As lâminas mais externas, ou seja, que se encontram na quarta parte externa da altura da seção transversal da peça, deve-se espaçar as emendas de lâminas vizinhas de no mínimo 20 vezes a espessura da lâmina;

- Na metade central da peça, o espaçamento entre emendas de lâminas vizinhas deve ser de no mínimo 12 vezes a espessura da lâmina;

Segundo HERNANDEZ (2002), um espaçamento entre emendas, de uma mesma lâmina, deve ser superior a 180 cm e para lâminas adjacentes, um espaçamento mínimo de 15 cm.

A norma AITC A 190.1 (1983), “*American National Standard for Wood Products –Structural Glued Laminated Timber*” especifica que o espaçamento entre emendas dentadas deve ser determinado pela medida da distância entre uma emenda e a emenda da lâmina adjacente, na direção longitudinal da madeira e recomenda que a distância mínima entre as emendas deve ser de 15 cm.

De acordo com AITC A190-1, não deverão ocorrer nós dentro de emendas dentadas, a não ser que ocorra ocasionalmente um único nó preso, sem exceder 0,95cm (3/8 in) no diâmetro, podendo ocorrer em emendas dentadas em lâminas para uso não estrutural.

Todas as superfícies de colagem incluindo face, cantos e emendas de extremidade deverão ser aplainados e, exceto para variações locais de pouca importância, deverão estar livres de “fibras em relevo”, fibras rompidas, degraus, queimaduras, polimento e outras variações no plano da superfície que possam interferir no contato das fibras de madeira sã nas superfícies. Toda superfície de colagem deverá estar livre de poeira, substância estranha ou transpiração que possam ser prejudiciais a uma colagem satisfatória. A colagem de madeiras lixadas ou abrasivamente aplainadas requer restrições particulares. Na colagem das peças de MLC deve-se levar em consideração a pressão a ser aplicada na viga para garantir uma eficiência na colagem das lâminas.

Ainda é importante ressaltar, de acordo com a norma DIN 68 140 (1971), que as emendas dentadas devem ser coladas sob pressão, em função do comprimento do dente e da densidade da madeira. No entanto, deverá ser observado que a pressão empregada não exceda o limite que provoque fissura de extensão superior a 0,5 cm no fundo dos dentes. A figura 2.7 apresenta um gráfico que relaciona comprimento dos dentes com a respectiva pressão de colagem. O tempo mínimo de prensagem recomendado é de 2 segundos.

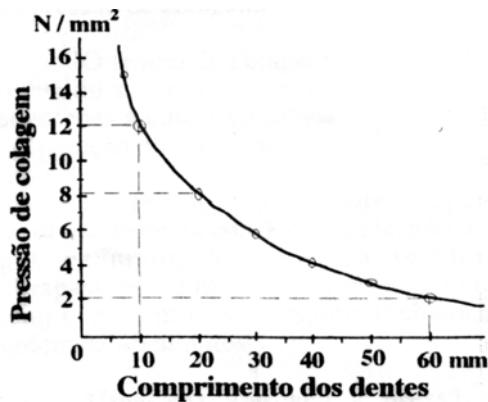


Figura 2.7 - Pressão de colagem em função do comprimento da emenda (DIN 68 140).

Segundo MACEDO (1996), as intensidades das pressões de colagem utilizadas em emendas dentadas usando o adesivo Cascophen (ALBA QUÍMICA) são da ordem de 8 kN/mm² para o *Pinus caribea hondurensis* e 10 kN/mm² para o *Eucalyptus grandis*. Para o adesivo poliuretano à base de óleo de mamona, constituído a partir do pré-polímero A249 e do poliól B1640, estudado por HENRIQUES DE JESUS (2000), as pressões de colagem indicadas são de 9 kN/mm² para o *Pinus caribea hondurensis* e 10 kN/mm² para *Eucalyptus grandis*. Todas as emendas dentadas devem ser ensaiadas após um período igual ou superior a 8 dias, tempo necessário para que todas as ligações adesivas alcancem a máxima resistência.

De acordo com HENRIQUES DE JESUS (2000), para madeiras de densidade inferior ou igual a 0,5 g/cm³ deve-se utilizar uma pressão de colagem na linha de cola (lâminas de madeira) igual a 0,7 MPa e, para madeiras de densidade superior a 0,5 g/cm³, pressão igual a 1,2 MPa, ou então atender à recomendação do fabricante da cola.

De acordo com BORDEN QUÍMICA, para adesivo phenol-resorsinol (Cascophen RS), a prensagem deve ser mantida por um período mínimo de 12 horas, tomando-se por base um ambiente com temperatura de 20°C e teor de umidade relativa do ar de 65%. Este valor pode variar dependendo do tipo de adesivo. Após o período de prensagem, a retirada da pressão deverá ser gradativa e alternada ao longo da peça.

2.1.6 – Recomendações para a avaliação de adesivos segundo a norma ASTM D4688

A norma ASTM D 4688-99 “*Standard test Method for Evaluating Structural Adhesives for Finger Jointing Lumber*” define critérios para a avaliação de adesivos estruturais aplicados em emendas dentadas para madeira laminada colada. Os corpos-de-prova devem ser submetidos a três tratamentos distintos:

- "Dry test", os corpos-de-prova devem estar com o teor de umidade em equilíbrio com o ar (em torno de 12%), definido neste trabalho como “SECO”.

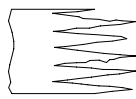
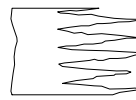
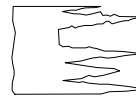

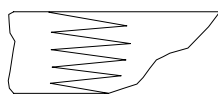
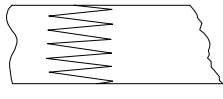
- “Cold Water Vacuum-Pressure Soak Test”, os corpos-de-prova devem ser introduzidos na autoclave de vácuo-pressão e mantidos com vácuo inicial de 25 pol. Hg durante 30 minutos. Logo após, devem ser mantidos submersos em água na temperatura ambiente, com uma pressão de 20 kgf/cm², durante 2 horas. Os corpos-de-prova foram removidos da autoclave e colocados submersos na água em temperatura ambiente, até serem testados, definido neste trabalho como “SATURADO”.

- “Cyclic Boil test” os corpos-de-prova devem ser introduzidos em um caldeirão de fervura, de modo que a água tenha acesso livre a todas as superfícies. Depois devem ser fervidos por 4 horas, e em seguida, secos em climatizadora com circulação de ar para um índice de umidade de 8% entre 18 a 20 horas. O ciclo de ferver e secar deve ser repetido por 5 vezes, exceto durante o último ciclo, no qual os corpos-de-prova, após a fervura, devem ser mantidos

submersos na água, resfriada até atingir a temperatura ambiente, para serem testados, definido neste trabalho como “FERVIDO”.

Além disso, a norma ASTM D4688-99, recomenda a avaliação dos modos de ruptura obtidos pelo o ensaio de resistência à tração em emendas dentadas, que devem ser observados e comparados aos seis modos descritos na tabela 2.3.

Tabela 2.3: Modos de ruptura em ensaios de tração paralela (ASTM D4688-99).

Modos	Descrição	Exemplo
1	Rompe, na maioria das vezes, ao longo das superfícies da linha de cola com poucas falhas de qualquer tipo (ruptura < 70%)	
2	Rompe, na maioria das vezes, ao longo das superfícies da linha de cola com considerável ruptura por cisalhamento (ruptura > 70%)	
3	Rompe, na maioria das vezes, ao longo do perfil da emenda, mas com alguma ruptura na base dos dentes. Considerável ruptura por cisalhamento em toda a superfície do perfil.	
4	Rompe, principalmente, na base das emendas dentadas. Poucas falhas ao longo do perfil.	
5	A ruptura começa na emenda (possivelmente devido a um concentrador de tensão) e prossegue fora da emenda. Praticamente 100% das rupturas são na madeira.	
6	A ruptura é fora da emenda (não influenciada pela emenda) - toda a ruptura é na madeira.	

2.1.6 – Classificação das lâminas

Seja por meios mecânicos ou visuais, a classificação das peças de madeira é, sem dúvida, um dos fatores mais importantes para o adequado desempenho dos elementos estruturais de MLC, pois ela permite a utilização racional da madeira dispondo as lâminas de melhor qualidade nas zonas de maiores solicitações e as lâminas de qualidade inferior nas zonas menos solicitadas, segundo a AMERICAN PLYWOOD ASSOCIATION (2000). Com isso, consegue-se uma melhoria das propriedades de resistência e rigidez das vigas de MLC tornando-as, em muitos casos, de qualidade superior à madeira serrada. Assim, a classificação estrutural das peças para fabricação de MLC torna-se imprescindível para se obter um produto eficiente.

Todas as lâminas de madeira utilizadas para a fabricação de vigas de MLC devem ser classificadas visualmente ou mecanicamente. As lâminas podem ser classificadas pelos métodos descritos a seguir:

2.1.6.1 - Classificação visual

A classificação visual de madeira é baseada na premissa de que as propriedades mecânicas de uma peça de madeira diferem das propriedades mecânicas da madeira isenta de defeitos devido às características de crescimento, e que tais características podem ser vistas e julgadas pelo olho humano. Com o auxílio de regras de classificação, as características de crescimento são usadas para selecionar a madeira em classes de qualidade. Basicamente, é dividida em duas etapas distintas:

- a) Atribuição de uma classe para cada peça de madeira a partir da identificação visual de certas características de crescimento;
- b) Determinação das propriedades de resistência e rigidez para cada classe de uma determinada espécie.

Segundo CARREIRA (2003), a qualidade visual da madeira é definida em quatro níveis de qualidade visual seguida da densidade da madeira definida em dois níveis como: Classe Estrutural Especial (SS), Classe Estrutural Nº 1 (Nº 1), Classe Estrutural Nº 2 (Nº 2), Classe Estrutural Nº 3 (Nº 3), Madeira Densa (D) e Madeira Não-Densa (ND).

Exemplificando, a classe SS_ND, indica madeira com qualidade visual Classe Estrutural Especial e com densidade não-densa. A densidade é medida pelo número de anéis de crescimento medidos em uma linha radial representativa de 2,5cm (1").

De acordo ainda com CARREIRA (2003), as principais condições que limitam os níveis de qualidade visual são a presença de nós e a inclinação das fibras da madeira. O limite da seção transversal ocupada pelo nó é praticamente constante para cada classe, independentemente da seção transversal da peça. Esta constatação traz simplificações no sistema de classificação visual, permitindo que os nós sejam limitados em função da proporção da área da seção transversal ocupada pela peça. Desta forma, tem-se, conforme a tabela 2.4:

Tabela 2.4: Limitação da dimensão dos nós em função da proporção da área da seção transversal ocupada.

Características		Classe			
		Estrutural Especial	Nº 1	Nº 2	Nº 3
Inclinação de fibras		1:12	1:10	1:8	1:4
Nós	Borda da face larga	1/5	1/4	1/3	1/2
	Centro da face larga	40%	1/2	60%	3/4
	Face estreita	1/5	1/4	1/3	1/2

O classificador examina as quatro faces e as duas extremidades de cada peça. A localização e a natureza dos nós, bem como outras características aparentes na superfície da madeira são avaliadas por todo seu comprimento. Assim, o classificador limita o tipo, localização e tamanho dos vários defeitos que podem afetar a resistência estrutural.

A madeira deve ser classificada de modo que cada peça resultante esteja de acordo com todas as exigências de classificação apropriadas, incluindo tamanho do nó, inclinação das fibras e densidade ou taxa de crescimento, de acordo com a norma AITC A190.

Ainda na mesma filosofia, segundo COIADO & DIAS (2004), testaram a resistência à tração de peças estruturais classificadas de acordo com as normas do SIPB de *Pinus Spp.* Os resultados indicam que existe uma forte correlação entre a presença de quantidade de anéis de crescimento de madeira de inverno por polegada em relação à resistência à tração da peça diminuindo significativamente sua resistência final, sendo mais acentuada do que a relação entre a quantidade de nós e inclinação de fibras.

A norma ASTM D245-93 estabelece classes de densidade para a madeira, além da classificação com relação a defeitos, em função da taxa de crescimento da madeira serrada. As classes de densidade definidas são apresentadas na tabela 2.5 a seguir:

Tabela 2.5: Classes de densidade definidas na ASTM D245-93

Classes	Anéis/2,5 cm	Quantidade de madeira de inverno	
Densa	≥ 6	e	$> 1/3$
	≥ 4	e	$> 1/2$
Média	≥ 4		
Leve	< 4		

Na tabela 2.5, com relação à norma ASTM D245-93, o termo taxa de crescimento se refere à quantidade de anéis de crescimento presentes em 2,5 cm (1") de comprimento, medidos em uma linha radial representativa. A figura 2.8 apresenta várias possibilidades de ocorrências de linhas representativas em peças sem a presença de medula.

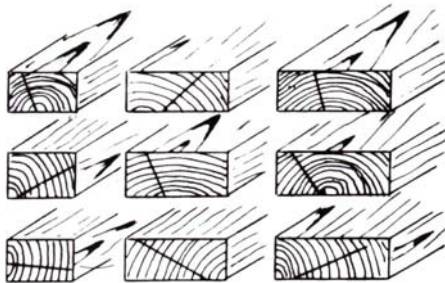


Figura 2.8 - Linha radial representativa em peça sem medula.
 Fonte: SOUTHERN PINE INSPECTION BUREAU (1994).

Segundo GALLIGAN e MCDONALD (2000), na América do Norte a maior parte da madeira estrutural ainda é classificada visualmente. Porém, o volume de madeira classificada mecanicamente vem aumentando progressivamente.

Existem poucas pesquisas no Brasil desenvolvidas sobre classificação visual de espécies coníferas. CARREIRA (2003) aplicou os critérios de classificação visual descritos nas regras de classificação visual do SOUTHERN PINE INSPECTION BUREAU (1994) para a classificação das espécies *Pinus taeda* e *Pinus elliottii*. Com isso, foram estabelecidos valores de resistência e rigidez à flexão para estas espécies, e feito uma adequação dos modelos estatísticos existentes para determinação de propriedades de resistência e rigidez com testes em peças de dimensões estruturais.

A regra aborda os critérios para a classificação visual de inclinação de fibras, quantidade de nós, diâmetro, posicionamento, no centro da face larga, na borda da face larga e na face estreita, conjunto de nós, presença de medula, rachas anelares, fendas, empenamento e desvio de fibras locais, encurvamento, encanoamento, arqueamento e torcimento. Os detalhes para avaliação de cada caso podem ser encontrados na Dissertação de Mestrado de CARREIRA (2003). Recentemente, foi encaminhado uma proposta para o comitê revisor da norma NBR 7190 – Projeto de estruturas de madeira, da ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1997), recomendando regras de classificação visual para peças estruturais de madeira.

Em complemento da regra do SIPB, a norma AITC 117-2001, “*Standard specifications for structural glued laminated timber of softwood species manufacturing requirements*”, é aplicada para MLC estrutural que deverá ser classificada visualmente de acordo com a regra de classificação do SIPB e as exigências desta norma aqui mencionadas.

Essa regra se aplica às quatro principais espécies de Southern Pine: Loblolly, Longleaf, Shortleaf e Slash, como definido no Southern Pine Inspection Bureau “*Regras de classificação*” (SPIB, 1994). Para estas especificações, Southern Pine é considerado denso quando a massa específica, referente ao teor de umidade 12%, é de $0,49 \text{ g/cm}^3$.

Para a Classe de densidade média, a peça de madeira deve conter quatro ou mais anéis de crescimento por polegada, e a medida deve ser feita sobre um comprimento contínuo de 7,62 cm (3 in) ou tão próximo de 7,62 cm (3 in) quanto possível em uma linha radial representativa. Em peças sem a presença de medula, a medida deve ser tomada na parte central de sua linha radial representativa. Já em peças com a presença de medula é permitido tomar a medida excluindo-se uma parte interna do raio de valor igual a 1/4 da menor dimensão nominal da peça.

A norma AITC 117-2001, permite nós fixos, cariados ou não fixados firmemente; orifícios no mesmo tamanho dos nós; fendas e rachas se estendendo da face larga na espessura de um ângulo de 45° ou de mais da face larga; arqueamento ou torcimento leve; bolsas de resina não excedendo 1/6 da largura da peça; fendas sazonais; fibras ou marcas de fibras torcidas por volta dos nós e esmoado não excedendo 1/6 da largura sobre cada borda da face larga de uma lâmina, exceto em lâminas externas, onde as extremidades devem ser livres de esmoado.

A norma AITC 117-2001 fornece várias configurações de vigas para cada classe de resistência, e também são apresentadas configurações para vigas balanceadas, onde a classificação visual e a porcentagem de lâminas na região comprimida são iguais as da região tracionada e para vigas desbalanceadas, onde a classificação visual e a porcentagem das lâminas na região comprimida são diferentes, e estabelece classes de resistência para vigas de MLC relacionadas com a classificação visual e com E-Rated.

2.1.6.2 - Classificação mecânica pela técnica de vibração transversal

A vibração transversal é uma técnica de avaliação não destrutiva e consiste na imposição de um impacto aleatório ao elemento estrutural e medida da frequência natural de vibração em um intervalo de tempo curto, e, com esta frequência, faz-se à correlação com a rigidez do material. A figura 2.9 ilustra o equipamento para a determinação do MOE por meio da vibração transversal do LaMEM.



Figura 2.9 - Equipamento para a determinação do MOE por vibração transversal.

De acordo com ROSS e PELLERIN (1994), a hipótese fundamental para a avaliação não destrutiva da madeira foi iniciada por JAYNE (1959). Ele propôs que a energia armazenada

e as propriedades de dissipação da madeira podem ser medidas por meios não destrutivos, sendo que tais mecanismos determinam o comportamento estático da madeira. Como consequência, convenientes relações matemáticas entre estas propriedades e as propriedades estáticas de resistência e elasticidade podem ser alcançadas por meio de análises de regressão estatística.

MOODY (1977) testou 120 vigas de MLC com o objetivo de estabelecer procedimentos analíticos para a utilização da madeira classificada pela medida do Módulo de Elasticidade (MOE) em elementos estruturais de MLC e concluiu que os procedimentos usados para o dimensionamento dos elementos de MLC usando madeira visualmente classificada podem ser estendidos para a madeira classificada mecanicamente.

2.1.6.3 - Outras técnicas de classificação mecânica

Quando a madeira classificada mecanicamente é cortada, ela deverá ser reclassificada usando a classe que determina as propriedades físicas ou mecânicas e as exigências visuais aplicáveis.

2.1.6.4 - Classificação mecânica pelo sistema MSR

A classificação mecânica pelo sistema MSR (Machine Stress Rated) é baseada no uso de um estimador para avaliar a resistência da madeira. Neste processo, uma força provocando flexão é aplicada perpendicular ao eixo de menor inércia da seção transversal da peça e o módulo de elasticidade de cada peça é medido. A rigidez (MOE) de uma peça de madeira serrada é um indicador de sua resistência (MOR) classificação mecânica. O teste não-destrutivo é altamente automatizado, e o processo requer muito pouco tempo, porém além do teste não-destrutivo, a madeira classificada é submetida a uma inspeção visual.

ROSS et al (1996) aplicou o sistema de ondas de tensão para a determinação in-loco do MOE de tabuleiros laminados protendidos de pontes de madeira e concluiu que as técnicas de avaliação não destrutiva podem ser utilizadas para avaliar o valor do MOE para lâminas individuais de um tabuleiro laminado protendido. Entretanto, os dispositivos comumente usados podem fornecer um valor de MOE menor que o esperado.

2.1.6.5 - Ultra-Som

A classificação mecânica por meio de ensaio de ondas ultra-sônicas é baseada nos mesmos princípios que o método das ondas de tensão, mas utiliza ondas de alta frequência (maior que 20 kHz).

As principais dificuldades associadas aos ensaios por meio de ondas ultra-sônicas em elementos de madeira se devem ao acoplamento entre o transdutor ultra-sônico e a superfície da

madeira, às limitações nas dimensões do material para a inspeção efetiva devido à atenuação natural da madeira e à necessidade de acessar as faces opostas dos elementos de madeira para transmitir e receber a energia ultra-sônica.

Algumas análises comparativas dos resultados de testes destrutivos convencionais e o método não destrutivo, pela técnica ultra-sônica, em corpos-de-prova de madeira para determinação do MOE têm sido realizado com sucesso. Pode-se citar alguns pesquisadores que abordam o assunto: EMERSON et all (1998); GABRIEL & BALLARIN (2000); BARADIT e FUENTEALBA (2000); OLIVEIRA & SALES (2005), entre outros.

2.1.7 – Controle de qualidade do produto acabado

De acordo com AITC A190-1, “*American National Standard for Wood Products – Structural Glued Laminated Timber*” é necessário fazer um controle de qualidade contínuo dos fabricantes das operações de produção e inspeções periódicas por meio de uma inspeção qualificada e ensaios. Estes sistemas de controle de qualidade incluem:

- (a) Fiscalização de cada passo do processo de produção;
- (b) Ensaios físicos em amostras representativas do produto acabado; e
- (c) Inspeção visual do produto acabado.

As necessidades mínimas do produto acabado são apresentadas na tabela 2.6.

Tabela 2.6: Necessidades mínimas para a produção de MLC.

Tipo	Tolerâncias	Observações
Arqueamento Alinhamento	Até 6 m (240 in) $\pm 0,6$ cm; Acima de 6 m (240 in) $\pm 0,3$ cm (1/8in) para cada 6 m (240 in) adicionais ou fração disso, mas sem exceder a 1,9 cm (3/4in)	Sem compensação de contra-flecha. Indicado para uso em peças levemente arqueadas ou retas e não são aplicáveis a peças curvadas tais como arcos.
Enquadramento da seção transversal	$\pm 0,3$ cm (1/8in) por 30,5 cm (12 in) de profundidade	É medido ao posicionar em um dos lados um esquadro ao longo do topo ou base da face e determinando a distância normal a partir do outro lado do esquadro até o lado da peça
Espessura da lâmina	-Não deverá exceder 5 cm (2 in) na espessura líquida; -Ao longo da largura não deverá exceder $\pm 0,02$ cm (0,008 in); - Ao longo do comprimento não deverá exceder $\pm 0,03$ cm (0,012 in);	As variações deverão ocorrer aleatoriamente ao longo da largura e do comprimento de modo que o efeito cumulativo não contribua para variações de profundidade de lado a lado.
Empenamento Encurvamento	- Até 1/6 na largura em cada uma das extremidades é permitido (interior) e em se o acúmulo de umidade for fora das áreas empenadas (exterior).	Não deverão ser tão grandes a ponto de não ser possível o alinhamento pela prensagem na colagem

A norma especifica que devem ser feitos ensaios de cisalhamento, de delaminação, e de resistência à tração para o controle de qualidade de cada adesivo testado.

2.1.8 – Ensaios em vigas de MLC

MOTTA BEZ & SZÜCS (2002) fizeram uma análise comparativa do desempenho e da viabilidade entre vigas de MLC com espécie de Eucalipto Grandis e vigas maciças de Angelim Pedra. O estudo contempla ainda a utilização da técnica de Madeira Laminada Colada Multidirecional e o reforço destas vigas, através da inserção de fibra de vidro nas linhas de cola.

Foram ensaiadas vigas de quatro lotes distintos com dimensões de 8,0 cm x 16,0 cm x 230,0 cm:

- Lote I - Composto por nove vigas maciças de Angelim Pedra; Lote II - Seis vigas em madeira laminada colada de Eucalipto, possuindo seção convencional, com lâminas dispostas horizontalmente, uma sobre a outra; Lote III: Seis vigas em madeira laminada colada multidirecional de Eucalipto, possuindo seção composta por lâminas dispostas em duas direções, horizontal e vertical. As lâminas dispostas verticalmente se encontram no quarto inferior da seção; e Lote IV: três vigas em madeira laminada colada multidirecional de Eucalipto, reforçada com fibra de vidro. As vigas deste lote possuem seção e composição idêntica às do Lote III, porém foram introduzidas mechas de fibra de vidro dispostas dentro da linha de cola, entre as lâminas verticais.

A figura 2.10 mostra um esquema das vigas fabricadas.

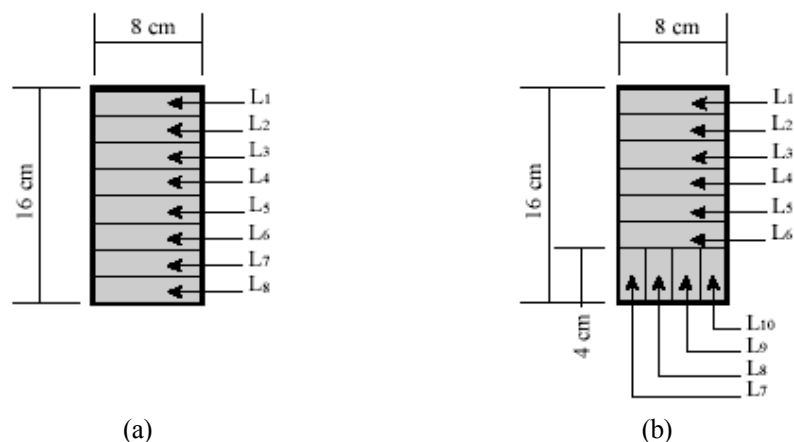


Figura 2.10 – (a) Lote II - vigas laminadas horizontalmente e (b) Lote III – vigas laminadas multidirecionalmente.

Utilizou-se o ensaio de flexão a quatro pontos para os ensaios nas vigas (figura 2.11). Os resultados determinados por MOTTA BEZ & SZÜCS são apresentados na tabela 2.7.

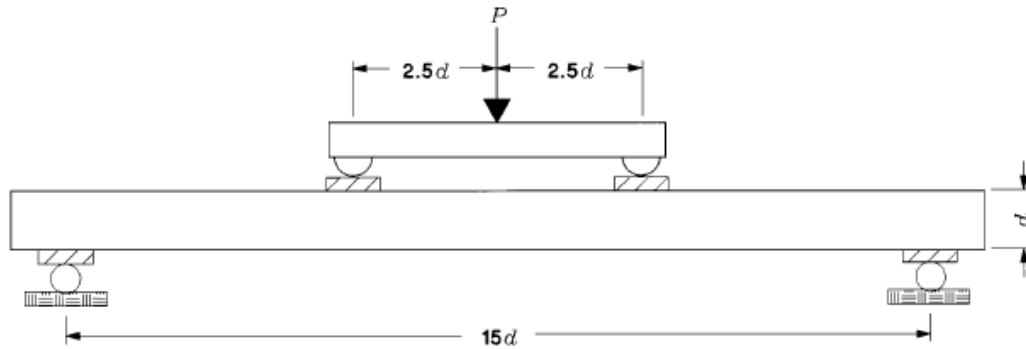


Figura 2.11 - Configuração para o teste de flexão a quatro pontos.

Tabela 2.7: Síntese dos resultados obtidos

	$F_{rup,médio}$ (MPa)	$E_{M0,médio}$ (MPa)
Lote I - Angelim Pedra (<i>Hymenolobium petraeum</i>)	62,00	11796
Lote II - Eucalipto (<i>Eucalyptus grandis</i>)	74,52	19678
Lote III - Eucalipto (<i>Eucalyptus grandis</i>)	50,95	19209
Lote IV - Eucalipto (<i>Eucalyptus grandis</i>)	81,11	18897

A resistência média das vigas do Lote II é maior que a das vigas dos Lotes I e III. Porém, a resistência média dos Lotes I e III não diferem significativamente entre si. Os autores afirmam que a rigidez média das vigas dos Lotes I é menor que a das vigas dos Lotes II e III. Porém, a rigidez média dos Lotes II e III não diferem significativamente entre si.

DUARTE & MANTILLA CARRASCO (2006), avaliaram experimentalmente a resistência à flexão de vigas de MLC e verificaram a redução na resistência devido aos defeitos de fabricação nas emendas longitudinais. Foram estudadas três vigas de MLC, fabricadas (com emendas dentadas) a partir de lâminas de *Eucalyptus cloesiana* e três, de lâminas de *Eucalyptus grandis*. As vigas foram submetidas a ensaios para verificação do módulo de resistência à flexão estática. Os resultados destes ensaios permitiram avaliar o tipo de ruptura e a redução na resistência à flexão devido às emendas. O ensaio de flexão foi realizado com a viga sobre um apoio articulado móvel e outro fixo, com uma força aplicada no meio do vão. A ruptura das vigas (figura 2.12) se deu por falhas nas emendadas longitudinais posicionadas nas lâminas mais tracionadas. Comparando os resultados das resistências experimentais com as resistências teóricas calculadas a partir das recomendações da NBR 7190 (1997), os autores concluíram que os resultados teóricos foram superiores aos experimentais.

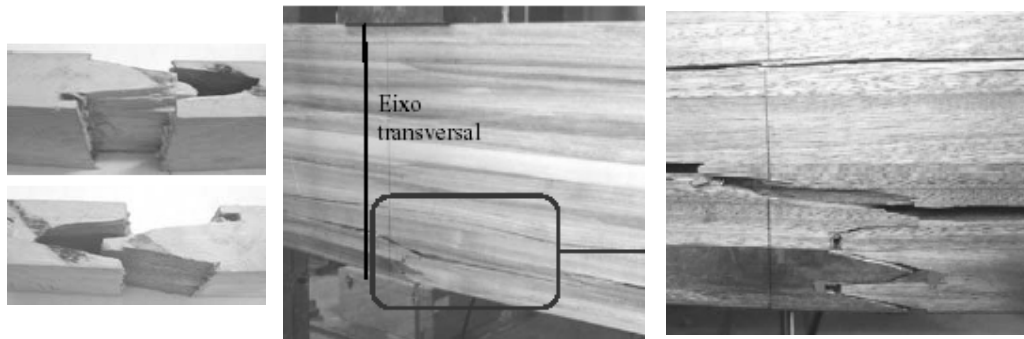


Figura 2.12 – Emendas dentadas e ruptura viga *Eucalyptus grandis*

RAMMER, D.R. (1998) determinou a capacidade de resistência ao cisalhamento em 5 tamanhos diferentes de vigas de MLC, laminada verticalmente e horizontalmente, em um teste de flexão de 5 pontos (figura 2.13). Este método têm sido usado com sucesso para produzir altas porcentagens de falhas de cisalhamento em vigas de madeira pelo Forest Products Laboratory. Além disso, o efeito da resistência estrutural e a correlação entre o cisalhamento em vigas e em corpos-de-prova de cisalhamento isentos de defeito (ASTM D143) foram avaliados. A figura 2.14 mostra as falhas de cisalhamento na viga e parte da falha na seção transversal.

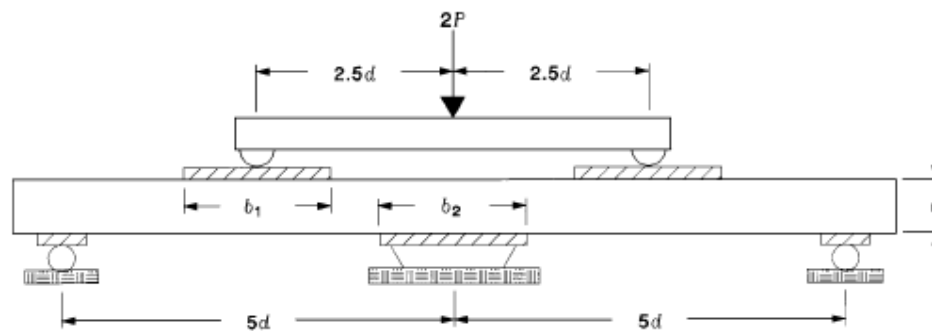


Figura 2.13 – Configuração do teste de cisalhamento em viga em 5 pontos
Fonte: RAMMER (1998)

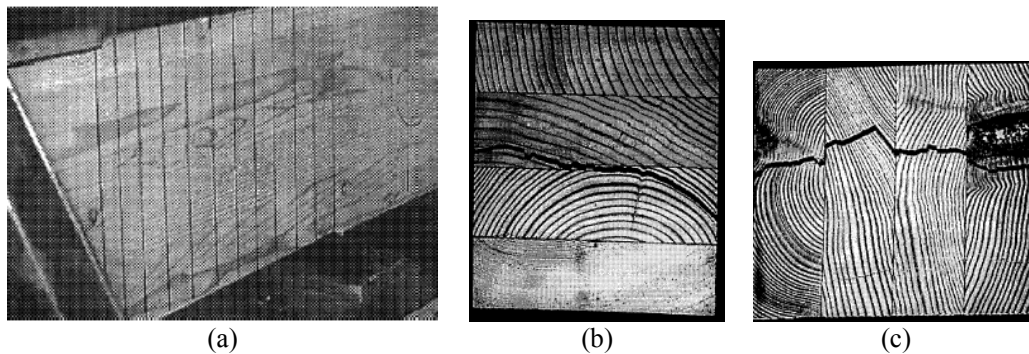


Figura 2.14 – (a) Falhas de cisalhamento na viga, e (b) e (c) parte da falha na seção transversal.

Os corpos-de-prova (ASTM D143) apresentaram resistência ao cisalhamento de 7,83 MPa. Os resultados das vigas são apresentados na tabela 2.8.

Tabela 2.8: Resultados de resistência ao cisalhamento para as vigas.

Orientação	Seção transversal da Viga (mm)	Resistência ao cisalhamento (MPa)
Vertical	130 x 152	10,0
	130 x 305	-
	130 x 419	-
	130 x 572	-
	130 x 762	-
Horizontal	130 x 152	7,71
	130 x 305	6,16
	130 x 419	5,81
	130 x 572	4,82
	130 x 762	4,63

A tabela 2.8 lista os resultados de resistência ao cisalhamento somente para as vigas que apresentaram falhas por cisalhamento. A resistência ao cisalhamento para as vigas horizontais decresceu com o aumento do tamanho das vigas. Os resultados de resistência ao cisalhamento de uma maneira geral foram inferiores aos resultados encontrados para os corpos-de-prova isentos de defeito, exceto para a viga de orientação vertical.

Outros estudos sobre ensaios em vigas de madeira são encontrados em: RAMMER, D.R. and SOLTIS, L.A. (1994); RAMMER, D.R.; SOLTIS, L.A. and LEBOW, P. K. (1996); e SANDERS, C.L., (1996).

2.2 – ADESIVOS APLICADOS EM MADEIRA

Independentemente do tipo de adesivo a ser utilizado, o mesmo deve desenvolver resistência de colagem suficiente para manter as partes unidas durante o tempo de vida esperado para o produto fabricado em suas condições de uso. Segundo OLIVEIRA e FREITAS (1995), o adesivo deve ser capaz de:

- fluir ou espalhar-se sobre a superfície a ser colada;
- transferir-se para a outra superfície que está sendo colada;
- solidificar por evaporação, resfriamento ou reação química;
- minimizar o custo do produto final.

Neste processo de escolha, alguns fatores devem ser considerados, segundo OLMOS (1992):

- o tipo de esforço em que a colagem estará sujeita em serviço;
- o tipo de agente químico que podem reagir com a colagem;
- o tipo de exposição que a colagem estará sujeita;
- a temperatura em que a colagem será exposta;
- fatores biológicos;
- características de trabalhabilidade (aplicação, velocidade de cura, estabilidade e rendimento).

É interessante destacar que o adesivo utilizado não deve alterar a coloração natural da madeira, objetivando definir uma melhor aparência para proposta arquitetônica dentro do contexto estrutural.

2.2.1 - Adesivo poliuretano à base de óleo de mamona

ARAÚJO (1998) enfatiza a existência de uma tendência mundial à procura de materiais não poluentes e derivados de biomassa. Com isso, as pesquisas com poliuretanos derivados de óleo de mamona se tornaram um tema atual, abrindo novas perspectivas para o seu desenvolvimento.

Uma importante propriedade das poliuretanas é a versatilidade quanto à variação de suas estruturas. A diferença de cada variedade depende do tipo de prensagem da semente e dos métodos de purificação de óleo prensado. São conhecidas como exemplo de materiais que combinam alta resistência mecânica com elevado grau de alongamento. Esta combinação de propriedades proporciona ao material excelentes resistências ao impacto e à abrasão, segundo ARAÚJO (1992).

CLARO NETO (1997) determinou as propriedades físico-químicas do adesivo poliuretano à base de óleo de mamona, utilizado para implantes ósseos, verificando o comportamento térmico do polímero totalmente curado (figura 2.15).

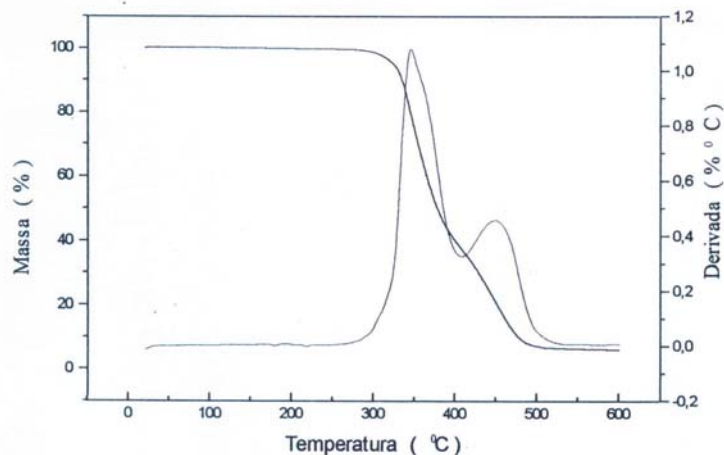


Figura 2.15 - Curva de decomposição térmico do polímero em atmosfera de N_2 .

A curva de decomposição térmica do polímero possui duas etapas de decomposição, a primeira de 300 a 400°C, com 65% de perda de massa, e a segunda etapa, de 400 a 500 °C, com 30% em perda de massa. A primeira decomposição está relacionada ao rompimento das ligações uretanas, visto que está presente em maior quantidade no polímero. A segunda decomposição, que termina em 500°C, está relacionado à decomposição da ligação éster presente no polioliol. Esses resultados determinam que a decomposição térmica do polímero se inicia a partir de 300°C, com o rompimento das ligações uretanas e conseqüente perda das moléculas de diisocianato; em seguida ocorre a decomposição do polioliol.

CLARO NETO (1997) determinou, também, a curva de tensão em função da deformação obtidas nos ensaios de tração do polímero. A figura 2.16 apresenta a resistência à tração encontrada para o polímero em função da deformação específica.

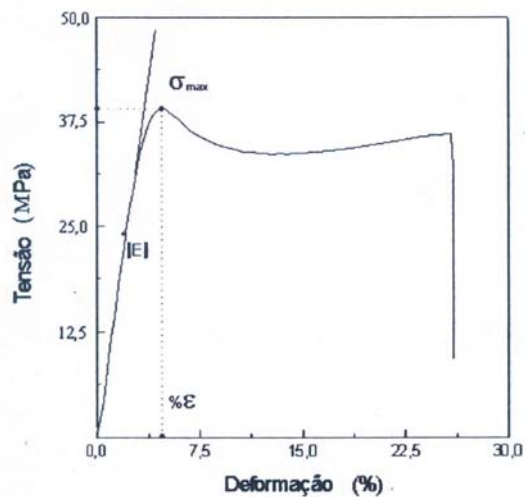


Figura 2.16 – Curva do ensaio de tração para amostra do polímero.

A figura 2.16 apresenta uma curva característica de Tensão X Deformação para os polímeros que sofrem escoamento após a região linear de elasticidade, ocorrendo a deformação plástica até a ruptura. O valor médio encontrado para a resistência à tração (σ_{\max}) foi igual a 39,7 MPa e módulo de elasticidade (E) igual a 2337,7 MPa.

HENRIQUES de JESUS (2000) evidenciou a aplicação do poliuretano à base de óleo de mamona como adesivo bi-componente, constituído a partir de um poliól B16040 e um pré-polímero A249, determinando parâmetros de colagem para MLC. O estudo objetivou avaliar a resistência ao cisalhamento, tração paralela e normal às fibras em corpos-de-prova de madeira, de acordo com a norma brasileira NBR 7190/97 – “Projeto de Estruturas de Madeira”.

Conforme AZAMBUJA (2002), em estudos desenvolvidos com uma nova versão deste adesivo poliuretano bi-componente à base de óleo de mamona baseado no poliól 25040 e pré-polímero A249, em corpos-de-prova de madeira de reflorestamento sem e com tratamento de Arseniato de Cobre Cromatado (CCA - tipo C), foram identificados parâmetros adequados de colagem para aplicação em madeira.

Os resultados obtidos indicaram a viabilidade de aplicação do adesivo em vigas de MLC com bom desempenho estrutural. Entretanto, para sua utilização em escala industrial, há necessidade de aumentar o tempo de cura do adesivo (>33 min) objetivando propiciar um processo de montagem mais eficiente para as vigas.

Projeções sobre o custo final do adesivo poliuretano indicaram em 2002 valores inferiores aos aplicados nos adesivos à base de resorcinol-formaldeído, e ainda com a grande vantagem do adesivo poliuretano ser biodegradável e não agredir o organismo humano.

Com o avanço da tecnologia de polímeros em 2003, CARLO (2003) desenvolveu e caracterizou um poliuretano monocomponente baseado em óleo vegetal com processo de cura pela umidade do ar, que pode ser utilizado sobre superfícies molhadas, podendo ser aplicado com pincel, rolos, spray ou imersão. Esta resina poderá atingir um desempenho equivalente aos sistemas poliuretanos bi-componentes.

Em seu trabalho, CARLO (2003) alterou as proporções do adesivo em 30% de teor de sólidos (parte ativa) e o restante 70% de solventes para aplicação como material para impregnação em madeiras, objeto de estudo da tese de RODRIGUES (2004), e em processos de confecção de chapas de MDF, objeto de estudo da tese de SILVA (2003), atingindo excelentes resultados.

A KEHL Indústria de Polímeros e Borrachas, situada em São Carlos-SP, desenvolveu em 2004 uma nova composição de um adesivo poliuretano bi-componente à base de óleo de mamona com tempo de secagem suficiente para confeccionar vigas de MLC.

A maior indústria de laminado colado do Brasil atualmente, a Batistella, está estudando a possibilidade de implementar testes em sua linha de produção de MLC estrutural com um Adesivo Poliuretano Reativo (PUR), fornecido pela NATIONAL STARCH & CHEMICAL.

Há, portanto, um conhecimento prévio sobre adesivos poliuretanos, sendo que, potencialmente, poderão ter muita utilidade como adesivo de madeira.

2.2.2 – Aplicação de adesivos poliuretanos em madeira e outros substratos

AYARKWA et al (2000) estudaram o efeito do tipo de adesivos nas propriedades de tração e flexão de emendas dentadas em madeiras tropicais dicotiledôneas da África (Obeche- 351 kg/m³, Makore- 677 kg/m³, Moabi- 819 kg/m³) usando o adesivo resorcinol-formaldeído, adesivo melamina-formaldeído e adesivos poliuretanos (isocianatos). Os resultados indicaram que o tipo de adesivo teve um efeito significativo, estatisticamente, sobre as resistências à tração e flexão das emendas dentadas nas três espécies tropicais. O desempenho dos três tipos de adesivos parece estar relacionado à densidade da madeira, exibindo a maior eficiência na espécie de menor densidade (Obeche), eficiência moderada na espécie de média densidade (Makore) e a menor eficiência na espécie de alta densidade (Moabi). Nenhum efeito significativo foi observado no módulo de elasticidade, tanto na flexão quanto na tração.

De acordo com BUSTOS et al (2003), os adesivos à base de isocianatos, tais como os poliuretanos, estão ganhando aceitação na América do Norte para uma variedade de aplicações estruturais e não estruturais. As ligações com estes adesivos apresentam resistência à fluência, à umidade, aos tratamentos com exposição ao calor e, além disso, a cura pode ser feita em condições ambientais. Por estas razões, o adesivo poliuretano é uma alternativa viável para aplicações em madeira com emenda dentada (VERREAULT 1999, CHEN 2001, LANGE et al. 2001, citados por BUSTOS et al 2003).

SOMANI et. al (2003) sintetizaram adesivos poliuretanos (PU) proveniente de três diferentes polióis obtidos por reação de um derivado de óleo de mamona. Os corpos-de-prova foram submetidos a um tratamento com água fria e água quente e posteriormente ensaiados para determinar a resistência de adesão entre superfícies de madeira, por medidas de resistência ao cisalhamento. Concluiu que os adesivos feitos com pólios e isocianatos aromáticos obtiveram uma resistência superior para ligação em madeira. A composição polioliol A, com taxa NCO/OH 1.3, obteve uma excelente resistência ao cisalhamento comparado com as outras composições e conseguiu uma resistência ao cisalhamento superior ao adesivo comercializado usualmente.

DESAI et. al (2003) sintetizaram polióis e poliésteres de óleo de mamona e óleo de argemone (planta nativa) para usar na preparação de um adesivo poliuretano (PU). A performance dos adesivos PUs para ligação em madeira foram avaliados por testes de cisalhamento, segundo a ASTM D906 - Strength Properties of Adhesives in Plywood Type Construction in Shear by Tension Loading (1987), antes e depois de expostos em água a 30°C, água a 100°C, solução ácida e solução alcalina.

Concluíram que há uma melhora na performance do adesivo com o aumento de NCO, até $NCO/OH=1,3$, diminuindo posteriormente. A falha encontrada foi na coesão devido à baixa taxa de NCO/OH (1.0, 1.1 e 1.2). Isto ocorre provavelmente por causa da formação de menor número de estruturas de “*cross linked*” de poliuretanas. Com alta taxa de NCO (1.5, 1.6 e 1.7), eleva-se a dureza, o que provoca uma falha mista de coesão e adesão no adesivo. Para determinar o efeito da variação do valor de hidroxila sobre a performance do adesivo, uma série de polióis (com os óleos estudados: óleo de mamona e óleo de argemone) com diferentes valores de hidroxilas foram confeccionados. Para esta série, foi utilizada uma taxa constante de $NCO/OH=1,3$. Os resultados mostram a dependência da resistência ao cisalhamento em relação ao valor das hidroxilas. Os valores de hidroxilas foram variados entre 100 e 500 para formulação do adesivo. Verifica-se que, com o aumento do valor de hidroxilas, a resistência ao cisalhamento aumenta e para o valor de 500 a performance do adesivo foi superior a da madeira, ocasionando falha no substrato.

O tempo de gel ou “*pot life*” foi analisado, verificando-se que, com o aumento do valor de hidroxilas (mg de KOH/g), o tempo de gel diminui significativamente, e o tempo máximo de aplicação é de 48 minutos para os polióis baseados em óleo de mamona.

Segundo ZHANG, et. all (1997), uma série de poli-poliuretanas à base de óleo de mamona (IPN) foram produzidas de óleo de mamona, di-isocianato tolueno, e metil metacrilate. Recentemente, pesquisa sobre poliuretanas à base de óleo de mamona (IPNs-Interpenetrating polymer networks) se tornaram um campo ativo na China. Neste artigo, os adesivos baseados em pré-polímeros foram sintetizados e sua influência de composição na resistência à adesão, propriedades e morfologias foram estudadas. Os resultados experimentais indicam que as propriedades mecânicas dependem da taxa de NCO/OH e o adesivo apresenta um bom desempenho em relação à resistência ao cisalhamento e a resistência à tração comparados com adesivos convencionais.

Segundo BROUGHTON e HUTCHINSON (2001), pode-se fazer uniões com adesivos por meio de barras de aço ou tarugos em elementos estruturais pré-furados de madeira, para que transmitam a força entre cada elemento. Broughton e Hutchinson revêem a importância do assunto em relação à tecnologia de ligação e investiga a eficiência de 1 (um) tipo de adesivo poliuretano, de 1 (um) fenol resorcinol formaldeído (PRF), de 5 (cinco) tipos de resinas epóxi e de 2 (dois) tipos de acrílicos em corpos-de-prova de LVL. O adesivo poliuretano não apresentou diferença estatisticamente significativa em relação ao adesivo de referência (PRF) para os ensaio de resistência à tração.

FOTSING e ALEXIS (2003), conduziram experimentos, de acordo com a norma ASTM D905 - Strength properties of adhesive bonds in shear by compression loading, para determinar a resistência de alguns adesivos aplicáveis em madeira disponíveis no mercado de Camarões (Cameroon). A espécie usada foi a *Sapellii*, uma dicotiledônea nativa usada em construções

internas e externas. Foram determinadas as resistências ao cisalhamento em quatro tipos de adesivos, em especial um adesivo poliuretano (SADER), que podem ser usados na fabricação de vigas laminadas. O adesivo poliuretano apresentou o melhor resultado de resistência ao cisalhamento e pode ser indicado para aplicação de uso estrutural.

PROPERZI et al (2003), testaram a eficiência de colagem de três resinas diferentes na união de madeira com umidade de 12% e com uma alta umidade de 22%. O primeiro é um adesivo poliuretano (PU) aprovado para uso externo em classe estrutural comum na Alemanha. O segundo é um fenol-resorcinol-formaldeído (FRF) também aprovado para uso externo em classe estrutural comum em países como Austrália e África do Sul. O terceiro é um adesivo experimental bi-componente composto por melanina-uréia-formaldeído (MUF).

Os adesivos foram testados de acordo com a norma BS 1204 - Parte I (1979) - *Synthetic resin adhesives (phenolic and aminoplastics) for wood. Specification for gap-filling adhesives*. Os adesivos PRF, MUF e PU alcançam a resistência mínima exigida pela norma, em tempos diferentes por falha na madeira, respectivamente de 35%, entre 40% e 75%, e 95%.

Dois adesivos fenol-resorcinol-formaldeído (PRF) e dois adesivos poliuretanos (PU) comerciais, aprovados em toda a comunidade Européia e mais tarde na Alemanha para uso externo em classe estrutural para emendas dentadas e madeira laminada colada, foram testados por GEORGE et al (2003). Os autores realizam testes dinâmicos por análises termomecânicas (TMA) sobre um aparato de Mettler em um modelo não isotérmico entre 25°C e 250°C. Com os resultados de força e deformação foi possível calcular o módulo de elasticidade. Os autores concluem que os adesivos poliuretanos estudados reduzem significativamente seu módulo de elasticidade em função da temperatura.

VICK e OKKONEN (1998) realizaram estudo com o propósito de determinar a resistência e a durabilidade de quatro adesivos poliuretanos comerciais utilizados na ligação de madeira para espécies conífera e folhosa. Os nomes dos adesivos poliuretanos não são apresentados neste artigo, a pedido dos fabricantes, e foram aplicados e curados de acordo com as instruções dos produtores. Um adesivo resorcinol-formaldeído comercial identificado, tradicionalmente usado, foi incluído nos testes para comparação.

Foi determinada a resistência ao cisalhamento, e as falhas da madeira (medidos por cm^2), em condições normais e de vácuo-pressão atmosférico em água saturada (VAS); vácuo-pressão em água saturada (VPS) e em ciclos de ferver-secar-ferver (BDB), para as espécies Yellow birch e Douglas fir.

Os autores analisaram estatisticamente os resultados e concluíram que não foram detectadas diferenças significativas na resistência ao cisalhamento entre os quatro adesivos poliuretanos ensaiados. As resistências de ligação para espécie Yellow birch foram quase o dobro do que para Douglas fir, principalmente por que a madeira Yellow birch tem uma densidade superior à espécie Douglas fir. Os resultados são apresentados a seguir na figura 2.17.

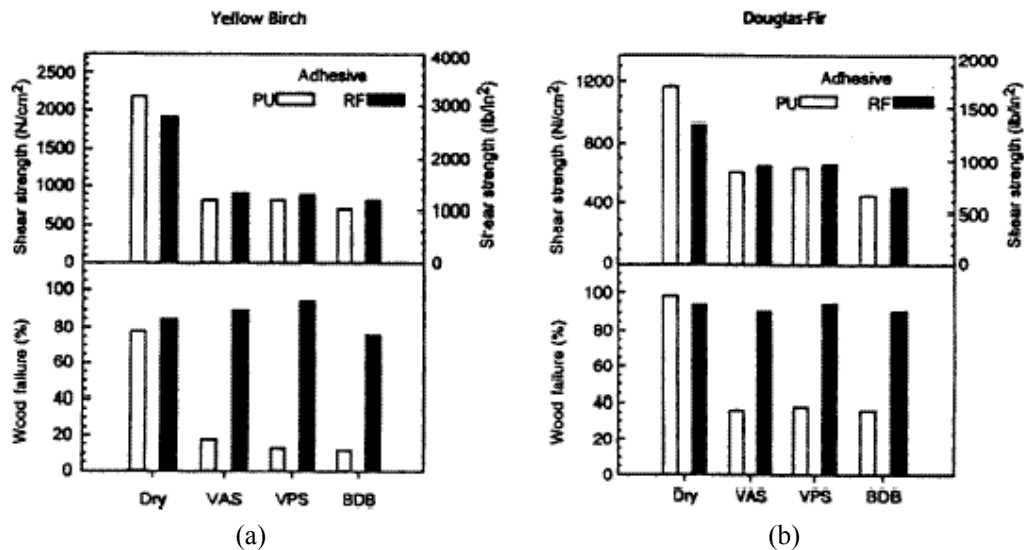


Figura 2.17 – Valores médios de resistência ao cisalhamento para os adesivos poliuretanos e adesivo resorcinol-formaldeído: (a) Yellow Birch e (b) Douglas-Fir.

No tratamento Dry (figura 2.17), para as espécies Yellow birch e Douglas fir, os quatro adesivos poliuretanos desenvolveram uma resistência ao cisalhamento maiores que o adesivo resorcinol-formaldeído. Entretanto, para os tratamentos VAS, VPS e BDB, o adesivo resorcinol-formaldeído apresentou melhores resultados de resistência ao cisalhamento, cerca de 10 a 15% superiores aos adesivos poliuretanos. Os resultados dos ensaios excederam, para todos os adesivos, a resistência mínima exigida pela norma ASTM D2559 - *Standard Specification for Adhesives for structural laminated wood Products for use under exterior (wet use) exposure conditions*, da AMERICAN SOCIETY for TESTING and MATERIALS (2003). Nota-se que para os ensaios de durabilidade, os adesivos poliuretanos apresentaram falhas na madeira inferiores ao adesivo resorcinol-formaldeído.

VICK e OKKONEN (2000) melhoraram a durabilidade de ligações de adesivos poliuretanos para madeira preparando sua superfície com um agente de união, o resorcinol hidroxymethylated (HMR). O HMR é aplicado na superfície da madeira a ser colada antes do uso do adesivo poliuretano; com isso, melhora a porcentagem de falha na madeira no ensaio de resistência ao cisalhamento na lâmina de cola, e por sua vez a resistência ao cisalhamento, contribuindo favoravelmente para a capacidade de adesão e resistência a intempéries dos adesivos poliuretanos. Foram testados dois adesivos poliuretanos (PU) e um adesivo resorcinol formaldeído comercial. Os resultados de porcentagem de falha na madeira (figura 2.18) e separação de laminas (figura 2.19 e 2.20) são apresentados a seguir.

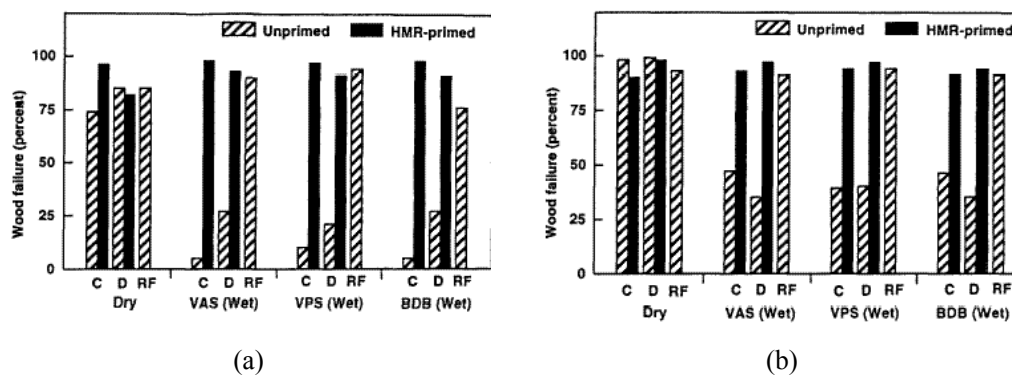


Figura 2.18 - Falha na madeira de adesivos poliuretanos C e D sem e com fundo preparador, e adesivo RF, para Yellow birch (a) e Douglas-fir (b).

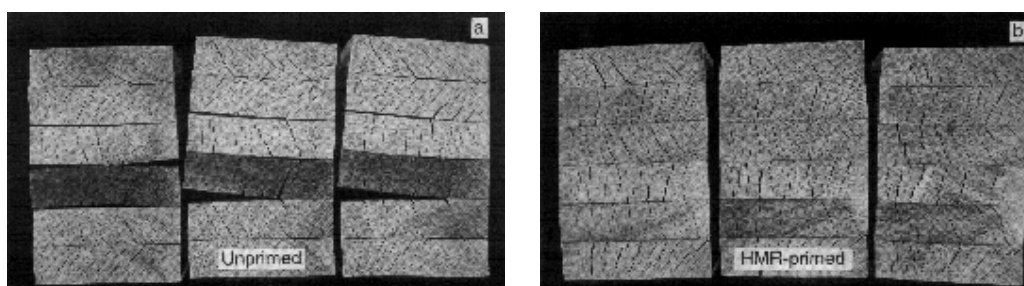


Figura 2.19 - Seção transversal de vigas laminadas da espécie Yellow birch (a) 53,5% de separação de lâminas para o adesivo poliuretano D sem fundo preparador e (b) 5,8% de separação de lâmina para o mesmo adesivo com fundo preparador.

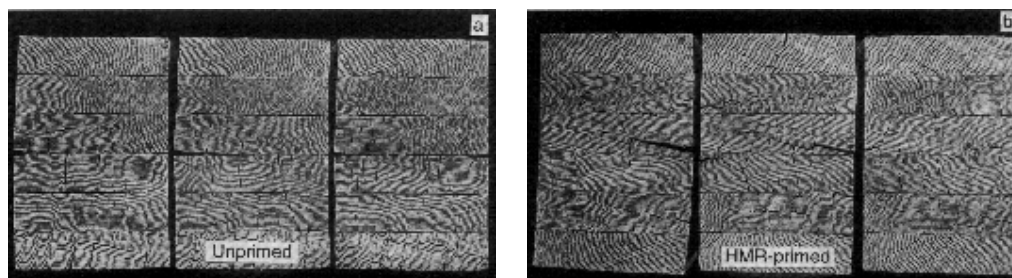


Figura 2.20 - Seção transversal de vigas laminadas da espécie Douglas fir (a) 71,1% de separação de lâminas para o adesivo poliuretano C sem fundo preparador e (b) 2,1% de separação de lâmina para o mesmo adesivo com fundo preparador.

Na figura 2.18, nota-se um aumento na resistência ao cisalhamento na lâmina de cola quando os corpos-de-prova são preparados com HMR. Além disso, a porcentagem de falha na madeira para os corpos-de-prova confeccionados com o HMR e o adesivo poliuretano mostra um aumento na durabilidade nas ligações, conforme a figura 2.19 e 2.20.

Segundo RICHTER e SCHIRLE (2002), os adesivos baseados em polimerização ou policondensação, sistemas 1 K PUR tendem a exibir baixo valor na quantidade de fibras na zona de ruptura, embora os mesmos atinjam os valores de resistência requeridos por norma. Por outro

lado, eles podem conduzir para conclusão de que a interação específica (ligação física e química) são a principais responsáveis pela boa adesão de sistemas 1 K PUR para madeira. A falta de informações relativa à causa e aos mecanismos de falha devem ser investigados e explicados para prover instruções definitivas para o sucesso de aplicação destes adesivos. Para isso, foi feita uma investigação da rugosidade da madeira, medidas de ângulo de contato do adesivo e análises de microscopia.

A superfície da madeira foi escaneada de acordo com a ISO 4287/1 “*Surface roughness – Terminology, Part 1: Surface and its parameters*”, da ORGANIZATION for STANDARDIZATION (1997). Foram utilizadas três amostras de espécies de madeira diferentes: Spruce (*Picea abies* L.), Larch (*Larix decidua* Mill.) e Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii* Mirb.) com cortes radiais e tangenciais. Foram analisados dois tratamentos diferentes de superfície: aplainada e lixada.

Um dos resultados mais importantes encontrado da análise da rugosidade foi a conclusão que não há diferença estatisticamente significativa na rugosidade nas direções: radial e tangencial da seção transversal do tronco e na direção axial ou longitudinal, paralela ao eixo do seu crescimento. Pode-se concluir que a direção do corte não pode ser utilizada para descobrir os problemas de interface de adesão na prática. Para a superfície aplainada, nota-se que é homogênea e até detalhes anatômicos podem ser distinguidos. Já na superfície mais rugosa, com aglomeração de fibras, os detalhes anatômicos não podem ser distinguidos e os resultados comprovam claramente que a superfície lixada possui uma maior rugosidade do que a superfície aplainada, e, em alguns casos possui duas vezes a rugosidade de superfícies aplainadas.

Para a análise do ângulo de contato, observou-se que a influência do procedimento mecânico sobre a propagação do adesivo na superfície da madeira é mais pronunciado que o efeito do tipo de espécie de madeira testados no trabalho. Observou-se que os ângulos para madeira lixada mostram menor valor que para as espécies aplainadas, e estudos estão sendo desenvolvidos para melhor compreender este fato.

2.3 – CONSIDERAÇÕES SOBRE A REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na classificação da madeira, as classes visuais de resistência são definidas pela qualidade visual da madeira seguida da densidade de anéis. As classes de densidade são definidas em função do número de anéis de crescimento a cada 2,5 cm, medidos em uma linha radial representativa. Os sistemas mecânicos, de classificação, empregam algum tipo de inspeção visual das peças de madeira.

Existem perfis geométricos consolidados para fabricação de emendas dentadas, e a pressão de colagem deve ser estabelecida em função do comprimento dos dentes e de acordo com a densidade da madeira. A pressão de colagem, na linha adesiva, também deve ser garantida para se obter eficiência do elemento estrutural em vigas de MLC.

Quanto aos perfis de emenda vertical e horizontal, a maioria dos autores afirmam que as diferenças na resistência devidos à orientação dos perfis de emenda dentada (vertical e horizontal) são insignificantes.

A norma ASTM D 4688-99 “*Standard test Method for Evaluating Structural Adhesives for Finger Jointing Lumber*” recomenda três tratamentos para a avaliação de adesivos para uso estrutural. Além disso, define critérios para avaliar os modos de ruptura obtidos pelo o ensaio de resistência à tração em emendas dentadas.

Nesse trabalho, optou-se por fazer a configuração do ensaio de flexão a quatro pontos, tradicionalmente utilizado para ensaios de vigas de madeira, buscando-se a ruptura por cisalhamento.

Pesquisas desenvolvidas em diversos continentes mostram a aplicação de novos adesivos poliuretanos em madeira, como descrito na revisão; entretanto, o seu comportamento em vigas de MLC precisa ser melhor estudado. Existem poucos artigos referentes a este assunto, principalmente quando se trata de espécies de madeiras nativas nacionais e de adesivos poliuretanos desenvolvidos com tecnologia nacional.

Neste trabalho, adotaram-se rigorosamente as recomendações da literatura, com relação à execução das emendas dentadas, ensaios de desempenho mecânico em diferentes condições de umidade (“durabilidade”) e a fabricação de vigas de madeira laminada colada.

3 – ESTUDO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO PARALELA EM EMENDAS DENTADAS COM DIMENSÃO ESTRUTURAL

Este capítulo tem como objetivo avaliar a resistência à tração paralela às fibras da madeira, em emendas dentadas com dimensão estrutural, em condições de temperatura ambiente e umidade padrão. Neste estudo, foram utilizadas duas espécies de madeira de reflorestamento, o *Pinus Hondurensis* e o *Eucalyptus Grandis* e vários tipos de adesivos; em especial, os adesivos poliuretanos.

Foram avaliadas emendas dentadas (padrão vertical) coladas com seis adesivos:

- Cascorez (2550 – resistente à umidade);
- Cascophen (Resorcinol formaldeído);
- PU Mamona (Adesivo poliuretano a base de óleo de mamona);
- Wonderbond (EPI WS 766-56);
- MUF (Melamina Uréia Formaldeído);
- Purbond (Purbond HB 312).

Também foram realizados ensaios para emendas dentadas com padrão horizontal, utilizando o adesivo Cascophen, e ensaios em peças de controle (sem emendas).

3.1 – MATERIAIS

Este item apresenta as espécies de madeiras e os tipos de adesivos utilizados na parte experimental do trabalho.

3.1.1 - Madeira

Foram escolhidas duas espécies de madeira de reflorestamento: o *Pinus caribea hondurensis*, uma conífera, e o *Eucalyptus grandis*, uma folhosa. De acordo com as informações da "NBR 7190 - Projeto de Estruturas de Madeira", da ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1997), estas espécies poderiam enquadrar nas classes de resistência C-25 (coníferas) e C-30 (dicotiledôneas), respectivamente. A escolha dessas espécies foi devida à sua abundância nas regiões Sul e Sudeste, onde se localizam as indústrias produtoras de MLC, e por serem espécies freqüentemente empregadas na construção de estruturas de MLC no Brasil.

Algumas das características destas espécies, contidas na NBR 7190/97 (para peças isentas de defeito), estão organizadas na tabela 3.1.

Tabela 3.1: Valores médios de densidade aparente, resistência à compressão paralela, resistência à tração paralela e módulo de elasticidade para o *Pinus hondurensis* e *Eucalyptus grandis*. Fonte: NBR 7190/97.

Espécie	ρ_{ap} (g/cm ³)	f_{c0} (MPa)	f_{t0} (MPa)	E_{c0} (MPa)
<i>Pinus hondurensis</i>	0,535	42,3	50,3	9.868
<i>Eucalyptus grandis</i>	0,640	40,3	70,2	12.813

A madeira que foi utilizada é proveniente do Horto Florestal de Itirapina-SP com idade aproximada de 30 anos; a figura 3.1 ilustra a retirada das toras da espécie *Pinus Hondurensis*.

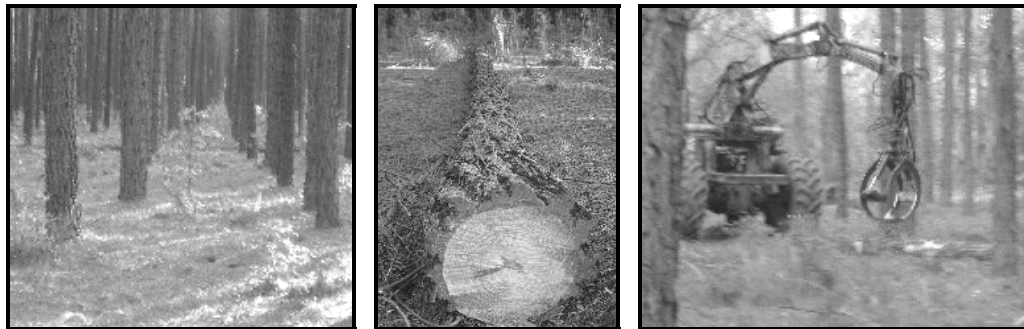


Figura 3.1 - Talhão Horto Florestal de Itirapina, SP.

As toras de madeira foram desdobradas em peças de seção nominal de 4,5 cm x 7,0 cm x 400 cm e transportadas para o LaMEM. As peças permaneceram entabecadas, como mostra a figura 3.2, em ambiente externo durante 3 meses para secagem até aproximadamente 12 % de umidade.



Figura 3.2 - Secagem ao ar (madeira serrada).

3.1.2 - Adesivos

Os adesivos utilizados nessa pesquisa foram selecionados por seu desempenho já reconhecido no mercado nacional ou internacional, ou por indicação de técnicos da indústria de adesivos. Em especial, o adesivo poliuretano à base de óleo de mamona foi desenvolvido pela Kehl Polímeros para aplicação nesta pesquisa.

Os fabricantes e os adesivos são apresentados a seguir:

Borden química (<http://www.bordenquimica.com.br/>)

Alba química (<http://www.albaadesivos.com.br/>)

Cascophen – é um adesivo líquido sintético, à base de resorcinol-formol, em solução aquosa/alcoólica. Apresenta dois componentes, sendo um a resina CASCOPHEN RS 216 (Cascophen, 2001), de cor marrom avermelhada, e, o outro, o endurecedor (Preparado Endurecedor FM), que se apresenta na forma de pó bege. Os dois componentes, depois de misturados, resultam numa “cola” de alto desempenho, à prova d’água (fria ou fervente), resistente a diversos solventes orgânicos, fungos e às intempéries. O produto tem prazo de validade de 12 (doze) meses.

Cascorez 2550 - resistente à umidade, é um adesivo em emulsão aquosa à base de poliacetato de vinila, formulado para colagens de madeira onde se requeira alta resistência térmica e alta resistência à umidade.

Wonderbond EPI WS 766-56 - é um adesivo em emulsão aquosa “EPI”, utilizado para colagens de artefatos de madeira, onde seja necessário alto desempenho, alta resistência térmica e alta resistência à água. Uma de suas aplicações é na madeira laminada colada.

Melamina Uréia Formaldeído (MUF) - são adesivos e resinas classificados como polímeros termorrígidos e produzidos por uma reação de condensação entre a melamina, a uréia e o formaldeído. O MUF pode ser formulado para proporcionar vários graus de resistência à água e ao tempo para uso externo, interno e na presença de umidade. É utilizado em aglomerados que exigem maior resistência à água, MDF, portas, divisórias e painéis. Para se obter o adesivo MUF é necessário fazer a seguinte mistura (partes por peso): 100 partes de Resina Cascamite convencional (é uma resina à base de uréia formol), 90 partes de Cascomel CR-1S (é uma resina líquida, à base de melamina formol), 20 partes de farinha de trigo, 10 partes de água e 1 a 2 partes de endurecedor k-6.

National Starch & Chemical (<http://www.nationalstarch.com/>) - Representante
Purbond (<http://www.purbond.com/>)

Adesivo Purbond – é mono-componentes (sem mistura), contendo 100% sólidos (não contém solvente), requerendo menor quantidade de adesivo. Os adesivos PURBOND têm sido utilizados na Europa desde 1990. O adesivo utilizado para aplicação em emendas dentadas é o Purbond HB 312, com aplicação em 2 minutos e o tempo de cura de 6 a 8 minutos, esse adesivo alcança sua resistência final em 12 horas. Já para as faces das vigas é utilizado o adesivo Purweld 665, com aplicação em 1 hora e o tempo de cura de 3 horas, esse adesivo alcança sua resistência final em 24 horas.

Kehl polímeros e borrachas (<http://www.kehl.ind.br/>)

Adesivo poliuretano à base de óleo de mamona – O adesivo poliuretano à base de óleo de mamona tem a vantagem de não ser agressivo ao homem e ao meio ambiente. Além disso, o óleo de mamona utilizado na fabricação do adesivo é proveniente de um recurso natural e renovável, obtido da semente da planta “*Ricinus communis*”, encontrada em regiões tropicais e subtropicais, sendo muito abundante no Brasil. A resina poliuretânica é obtida utilizando duas partes do pré-polímero IC202 e uma parte de polioli de óleo de mamona, ambos desenvolvidos pela Kehl Polímeros. Esses produtos foram desenvolvidos em função das necessidades específicas da fabricação de MLC, em parceria com o Laboratório de Madeira e de Estruturas de Madeira (LaMEM).

3.2 – MÉTODOS

Este item apresenta os procedimentos adotados e os ensaios realizados para avaliar a resistência à tração paralela em emendas dentadas com dimensão estrutural. Para realização deste procedimento foi necessário fazer as seguintes etapas: classificação visual da madeira, classificação mecânica da madeira, seleção dos pares de peças para colagem das emendas, confecção das emendas dentadas, colagem das emendas e ensaio de tração paralela às fibras da madeira.

3.2.1 - Classificação visual da madeira

Atenção especial foi dada à classificação da madeira. Primeiramente, o lote de madeira foi pré-selecionado, descartando-se as peças com empenamento excessivo e com defeitos pronunciados. Para o lote de Pinus, observou-se que a maior ocorrência de descarte advém da presença de medula nas lâminas de madeira. Já para o lote de Eucalipto, a maior ocorrência de descarte aconteceu por defeitos de empenamento e presença de fendas.

Posteriormente, utilizou-se o método de classificação visual descrito pela SOUTHERN PINE INSPECTION BUREAU (1994), “*Graders Manual for Boards and 2" Dimension*”, seguindo as restrições para lâminas coladas dadas pela norma AITC 117-01. Os critérios e as técnicas do SPIB para a medição dos defeitos estão apresentados em CARREIRA (2003). A seguir, estão apresentados os principais aspectos utilizados na classificação.

Foram limitados os diâmetros dos maiores nós (tabela 3.2) presentes no centro da face larga, na borda da face larga e na face estreita, bem como a inclinação das fibras nas quatro faces e presença de fendas, rachas, canto esmoado, empenamentos e presença de resina.

Para a espécie de Pinus, considerou-se, também, o número de anéis de crescimento em uma linha radial representativa com comprimento máximo de 7,5 cm (figura 3.3) em ambas faces. Foi medida a espessura de cada anel e avaliada a porcentagem de madeira de inverno na seção transversal. Este procedimento, além de determinar a classe visual da peça de madeira, determinou a compatibilização das peças na colagem das emendas, ou seja, procurou-se efetuar as emendas em peças que possuíam quantidades de anéis de crescimento e quantidades de madeira de inverno aproximadas.

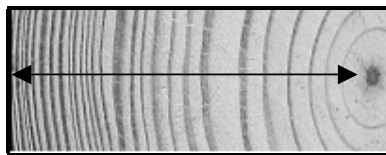


Figura 3.3: Linha radial representativa para contagem do número de anéis e avaliação da porcentagem de madeira de inverno.

As peças de pinus foram classificadas como SS (Select Structural), N1, N2 e N3 (segundo o SPIB), em ordem decrescente de qualidade (em função do diâmetro e posição dos nós, inclinação das fibras, rachas e empenamentos). A tabela 3.2 apresenta os limites, para cada classe, relativos aos nós e à inclinação de fibras, aspectos que tiveram maior influência na classificação.

Tabela 3.2 – Limites relativos à proporção da área da seção transversal ocupada pelo nó.

Fonte: CARREIRA (2003)

Características	Classe			
	SS	N1	N2	N3
Inclinação de fibras	1:12	1:10	1:8	1:4
Nós	Borda da face larga	1/5	1/4	1/3
	Centro da face larga	2/5	1/2	3/5
	Face estreita	1/5	1/4	1/3

Para a extração dos corpos-de-prova estruturais de tração paralela, é necessário que a peça final tenha um comprimento superior a 1,8 m devido à limitação da máquina de ensaio à tração paralela em peça estrutural. Por este motivo, a classificação das peças de 4 m foi feita em trechos com pelo menos 1 m, para que, depois de colada, a peça final, ultrapasse o comprimento mínimo. Durante este processo, selecionaram-se também peças de 2 m de comprimento para o controle (ensaios sem emendas).

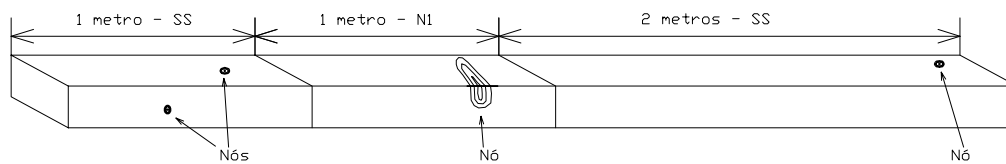


Figura 3.4: Exemplo de peça com 4 m classificada como SS e N1 em diferentes trechos.

Após a classificação mecânica foi feito o corte dessas peças no comprimento final (1 m e 2 m). As seções transversais das peças foram avaliadas visualmente para determinar a quantidade de anéis de crescimento e porcentagem de madeira de inverno.

Para a espécie Eucalipto, foi medida a quantidade de madeira de cerne (figura 3.5) em termos de porcentagem da área total da seção transversal da peça em ambas as faces, para possibilitar uma compatibilização das peças na colagem das emendas.

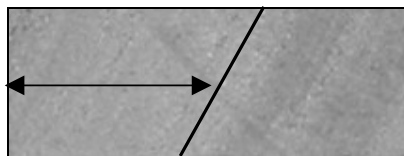


Figura 3.5: Proporção de cerne na seção transversal da espécie Eucalipto.

As peças de Eucalipto, foram classificadas com comprimento de 1 m e 2 m, correspondente aos tamanhos finais das lâminas a serem ensaiadas. Esta providência foi tomada para diminuir o descarte devido ao empenamento das peças de Eucalipto.

A figura 3.6 mostra a armazenagem dos lotes classificados.

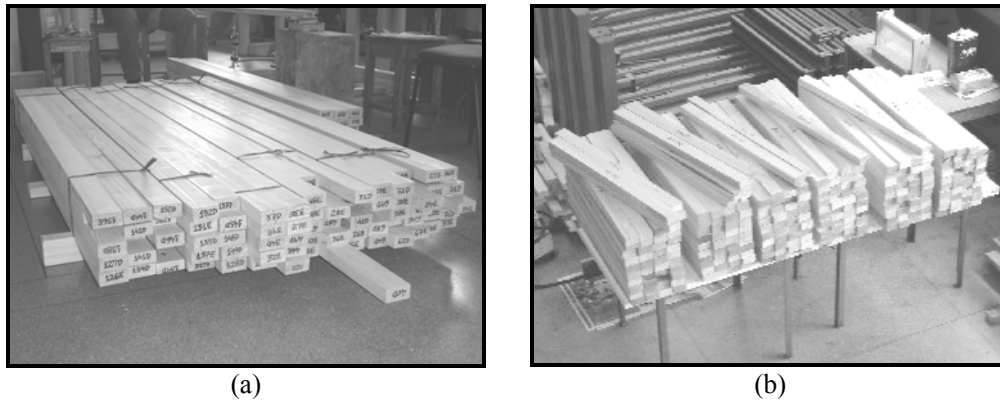


Figura 3.6: Lotes classificados – (a) Pinus e (b) Eucalipto.

3.2.2 - Classificação mecânica da madeira

As peças de madeira de Pinus com 4,20 m de comprimento foram caracterizadas mecanicamente a partir do módulo de elasticidade obtido em ensaio de vibração transversal, com vão de 4 m, ilustrado na figura 3.7-a.

Para as peças de Eucalipto, em função do seu comprimento menor que inviabilizou o uso do equipamento de vibração transversal, optou-se pela obtenção do módulo de elasticidade em ensaio não destrutivo de flexão estática, segundo o eixo de menor inércia. Foi utilizado esquema estático de viga simplesmente apoiada (vão de 0,95 m para as peças de 1 m; vão de 1,95 m para as peças de 2 m), com força aplicada no meio do vão, como mostra a figura 3.7-b.

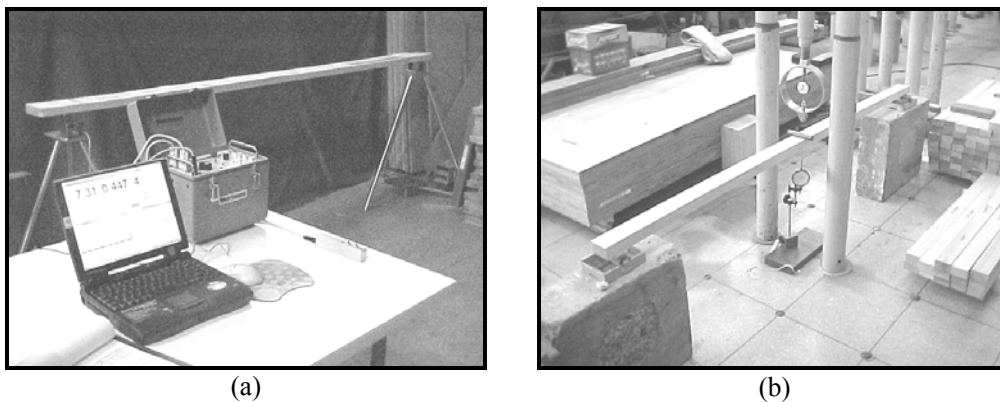


Figura 3.7: Ensaio de classificação mecânica – (a) vibração transversal e (b) flexão estática.

3.2.3 - Plano experimental

Em muitos casos de pesquisa aplicada, é necessário delinear o experimento de modo que a variabilidade proveniente de fontes estranhas possa ser sistematicamente controlada. No caso desta pesquisa, para diminuir o efeito da variabilidade entre as peças de madeira, foi utilizado um delineamento de experimento denominado “Blocos Aleatorizados”, organizando-se o experimento em 25 blocos.

Em cada bloco foram utilizadas lâminas de 1 metro com módulo de elasticidade semelhante, formando 7 pares. Esses setes pares foram distribuídos aleatoriamente para cada tipo de adesivo (tratamentos), constituindo uma peça estrutural de emenda colada com um determinado adesivo ou padrão de emenda.

Os seguintes tratamentos, com emendas dentadas, foram avaliados:

- A: Adesivo Cascorez, com perfil vertical;
- B: Adesivo Cascophen (Hor), com perfil horizontal;
- C: Adesivo Cascophen (Ver), com perfil vertical;
- D: Adesivo PU Mamona, com perfil vertical;
- E: Adesivo Wonderbond, com perfil vertical;
- F: Adesivo MUF, com perfil vertical;
- G: Adesivo Purbond, com perfil vertical;

Cada bloco também possui uma peça de controle sem emenda de 2 m de comprimento (tratamento H), com módulo de elasticidade semelhante aos das peças emendadas.

A tabela 3.3 apresenta a organização do planejamento do experimento em blocos e tratamentos.

Tabela 3.3: Organização do planejamento do experimento em blocos.

BLOCO	TRATAMENTOS							
	A	B	C	D	E	F	G	H
	Cascorez	Cascophen (Hor)	Cascophen (Ver)	PU Mamona	Wonderbond	MUF	Purbond	Controle
1	$E_{(1,1)}$	$E_{(1,2)}$	$E_{(1,3)}$	$E_{(1,4)}$	$E_{(1,5)}$	$E_{(1,6)}$	$E_{(1,7)}$	$E_{1,8}$
2	$E_{(2,1)}$	$E_{(2,2)}$	$E_{(2,3)}$	$E_{(2,4)}$	$E_{(2,5)}$	$E_{(2,6)}$	$E_{(2,7)}$	$E_{2,8}$
.
25	$E_{(25,1)}$	$E_{(25,2)}$	$E_{(25,3)}$	$E_{(25,4)}$	$E_{(25,5)}$	$E_{(25,6)}$	$E_{(25,7)}$	$E_{25,8}$

Obs: $E_{i,1} \cong E_{i,2} \cong E_{i,3} \cong E_{i,4} \cong E_{i,5} \cong E_{i,6} \cong E_{i,7} \cong E_{i,8}$

A numeração dos blocos é crescente com o módulo de elasticidade.

Para as lâminas com emendas dentadas, tomou-se o cuidado de unir extremidades semelhantes quanto à quantidade de anéis de crescimento e madeira de inverno (no caso da madeira de Pinus), ou quanto à proporção de cerne (no caso da madeira de Eucalipto).

A maioria das peças de Pinus utilizadas foram classificadas como SS; as demais peças foram distribuídas uniformemente para os adesivos e peças de controle (sem emendas). Entretanto, é importante salientar que se buscou uma diminuição da influência desses defeitos na resistência à tração, fazendo as emendas em regiões distantes dos defeitos e, no caso das peças de controle, escolheram-se aquelas cuja região central não contivesse defeitos. Assim, o comprimento das lâminas efetivamente tracionado (fora da região das garras) não possuiu defeitos aparentes.

Para cada espécie de madeira, foram confeccionadas 175 lâminas com emendas dentadas e 25 lâminas sem emendas, para efeito comparativo, com dimensões nominais iguais a 3,5 cm x 6,5 cm x 200 cm e com teor de umidade em torno de 12%, totalizando 400 lâminas, distribuídas da seguinte maneira:

- 25 lâminas com emendas dentadas (perfil vertical de 28 mm), para cada espécie de madeira, para cada um dos adesivos: PU Mamona (Poliuretano à base de óleo de mamona), Purbond, Cascorez, Wonderbond e MUF (Melamina Uréia Formaldeído);
- 25 lâminas com emendas dentadas, para cada espécie de madeira, para o adesivo Cascophen para cada padrão de emenda (vertical e horizontal, ambos de 28 mm);
- 25 lâminas sem emendas dentadas, para cada espécie de madeira, para as lâminas estruturais de controle.

3.2.4 - Confeção das emendas dentadas e procedimento de colagem

As emendas dentadas foram feitas com as dimensões apresentadas na figura 3.8.

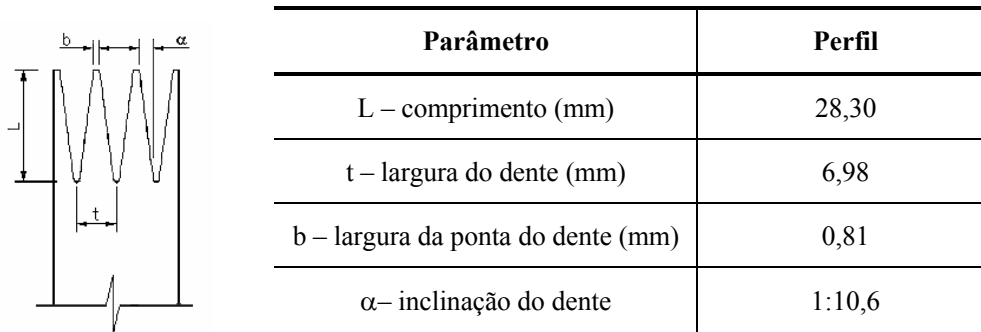


Figura 3.8 – Parâmetros geométricos das facas asas.

O operador da máquina de emendas dentadas, primeiramente, posicionou o corpo-de-prova na posição horizontal, de tal forma, que não ocorresse inclinação da peça, e em seguida utilizou um limitador para que o corpo-de-prova se mantivesse nessa posição (Figura 3.9).



Figura 3.9 - processo de fabricação das emendas.

A máquina para fazer emendas dentadas é composta por uma serra circular que atua como um destopador da madeira, garantindo-se o esquadro de todas as lâminas fabricadas, além de facas asas com lâminas de comprimento igual a 28 mm , como mostra a figura 3.10.

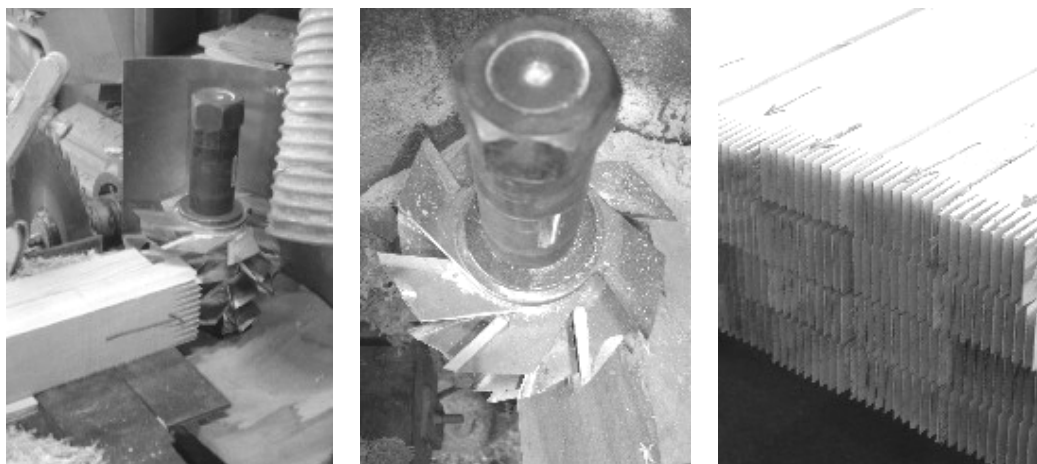


Figura 3.10 - Facas asas posicionadas em espiral e emendas dentadas verticais

Antes da colagem, o excesso de serragem e pó foi retirado com o auxílio de um pincel. Os adesivos foram aplicados com pincéis nas duas faces das emendas dentadas (figura 3.11), posteriormente prensadas (pressão de 9 MPa para espécie Pinus, e de 10 MPa para a espécie Eucalipto) durante um tempo superior a 2 segundos, de acordo com as recomendações da norma DIN 68 140 (2000). Com esta pressão de colagem, não ocorreram fissuras de extensão superior a 5 mm no fundo dos dentes.

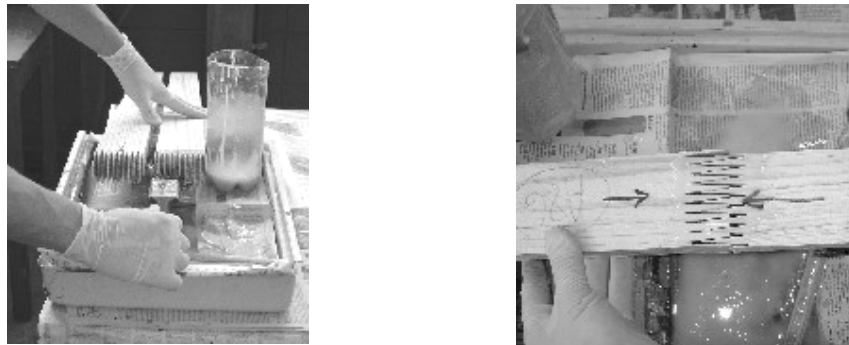


Figura 3.11 - Aplicação do adesivo e posicionamento do corpo-de-prova.

Para realizar este procedimento de prensagem, foi utilizado um equipamento desenvolvido no laboratório de madeiras LaMEM-EESC-USP, formado por dois trilhos que prendem um macaco hidráulico. A peça a ser colada é encaixada no perfil “U” feito de duas outras peças fixas de madeira, presas ao trilho, para garantir o alinhamento no momento da aplicação de carga. Além disso, o equipamento possui duas braçadeiras de madeira que impedem o deslocamento lateral (figura 3.12, 3.13 e 3.14). O controle da força aplicada foi feito por meio de um anel dinamométrico.

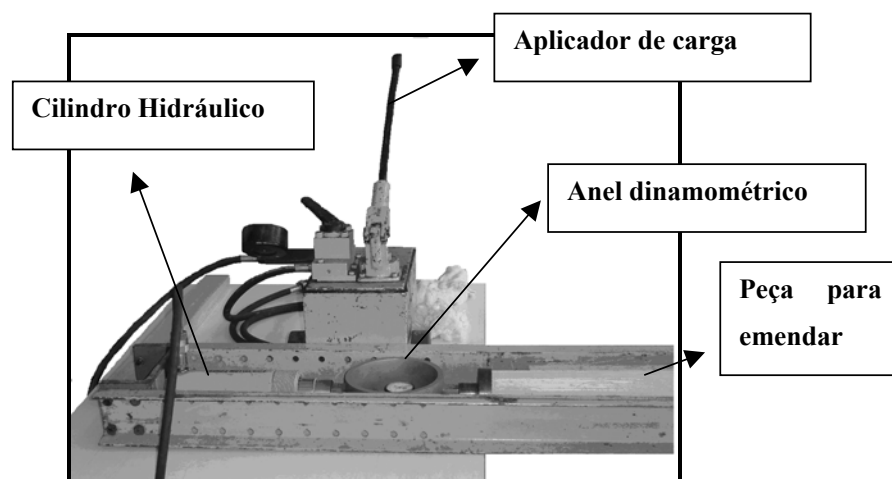


Figura 3.12 - Detalhe do aplicador de carga, manômetro e posicionamento da peça a ser emendada.

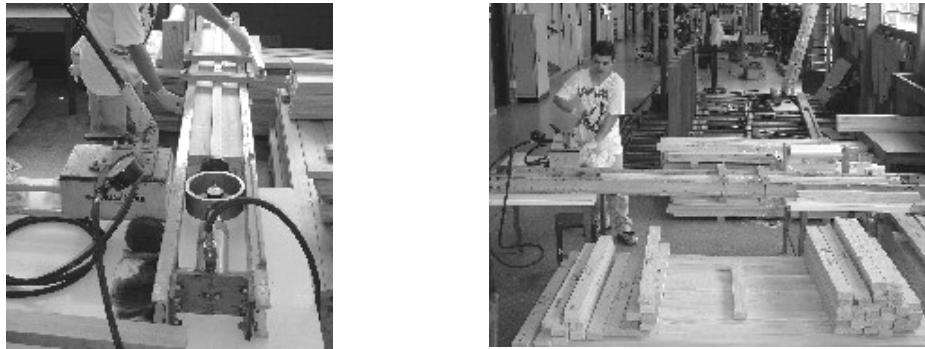


Figura 3.13 - Prensa manual.



Figura 3.14 - Lote de lâminas com emendas.

Os corpos-de-prova foram entabecados até a secagem completa do adesivo e, posteriormente, as lâminas de madeira foram aplainadas (dimensões médias iguais a 3,2 cm x 6,2 cm x 200 cm) para retirar o excesso do adesivo aplicado.

3.2.5 - Ensaio de tração em peças estruturais

Foram testadas as lâminas sem e com emendas, respeitando-se o tempo de cura para todos os adesivos. Foi utilizado o equipamento da marca Metriguard, modelo 422, capacidade para 1000 kN (figura 3.15).



Figura 3.15 - Ensaio de tração em peças com dimensões estruturais.

Esse ensaio fornece o valor da força de ruptura que, dividido pela área da seção transversal do corpo-de-prova, permite obter a resistência à tração paralela às fibras da madeira ($f_{t,0}$).

3.2.6 - Ensaio de caracterização da madeira das emendas

Para a caracterização da madeira, foram efetuados ensaios de densidade aparente, teor de umidade e de compressão paralela às fibras em corpos-de-prova isentos de defeitos, para todas as lâminas testadas, segundo o anexo B da NBR 7190-97. Os corpos-de-prova foram extraídos das peças após o ensaio de tração paralela (foi retirado um corpo-de-prova de cada peça, totalizando 200 para cada espécie). Para o ensaio de compressão paralela, para a espécie Pinus, utilizou-se a máquina universal de ensaio DARTEC M1000/RC, com atuador servo-hidráulico com capacidade de 100 kN e com sistema de aquisição de dados totalmente informatizado (figura 3.16-a). Para os corpos-de-prova de Eucalipto, utilizou-se a máquina universal de ensaio AMSLER (figura 3.16-b).



Figura 3.16 – (a) Máquina de ensaio DARTEC M1000/RC e (b) máquina universal de ensaio AMSLER.

3.2.7 - Forma de Análise dos dados

A análise dos dados foi dividida em quatro partes, para cada espécie de madeira: comparação entre todos os adesivos com perfil vertical; comparação dos adesivos e perfis (horizontal e vertical) com o controle; comparação entre os perfis vertical e horizontal para o adesivo Cascophen; e análise dos modos de ruptura (segundo a ASTM D4688-99) e suas relações com a porcentagem de anéis de inverno, e o módulo de elasticidade para espécie Pinus, assim como suas relações com a quantidade de madeira de cerne em termos de porcentagem da área total da seção transversal da peça, para a espécie Eucalipto.

A tabela 3.4 ilustra as três primeiras comparações, para cada espécie de madeira.

Tabela 3.4: Comparações entre adesivos, perfis e controle

Análise	Tratamento
1	(Cascorez, Cascophen (Ver), PU Mamona, Wonderbond, MUF e Purbond)
	(Controle)
2	x
	(Cascorez, Cascophen (Hor), Cascophen (Ver), PU Mamona, Wonderbond, MUF e Purbond)
3	Cascophen (Hor) x Cascophen (Ver)

Segundo ESPINOSA (2002), uma das ferramentas mais significantes para a verificação da adequabilidade de um modelo é a análise dos resíduos. Com esta análise, é possível verificar se as suposições sobre os resíduos se satisfazem, isto é, verificar se as suposições de igualdade de variância e de normalidade se cumprem.

Para avaliar a suposição de igualdade de variância, em geral é traçado o gráfico dos resíduos contra os valores estimados. Esta suposição será válida se a dispersão dos resíduos, nesse gráfico, não revelar uma forma de funil, onde a variância pode diminuir ou aumentar.

A verificação da distribuição normal também pode ser feita por meio de gráficos, tais como: dos escores normais e de probabilidade normal. Nestes gráficos, considera-se que a suposição de normalidade é válida se os pontos do gráfico estiverem localizados aproximadamente ao longo de uma reta. No entanto, para confirmar a indicação visual da linearidade aproximada, deve ser realizado um teste estatístico para normalidade.

Para verificar a adequabilidade do modelo utilizado na pesquisa foram analisadas a igualdade de variância e a distribuição normal dos dados, por meio dos seguintes gráficos:

- Gráfico da Distribuição dos Resíduos (Histograma de frequências);
- Gráfico dos Resíduos versus Valor Estimado;
- Gráfico de probabilidade normal dos resíduos (Teste de normalidade de Shapiro).

Esses gráficos foram construídos em função dos valores de resíduos de resistência à tração paralela às fibras da madeira, em função dos tratamentos. Posteriormente, foi feita uma análise de variância, como descrito, por exemplo, em CARPINETTI (2003).

Em CARPINETTI (2003) também está descrito o método da “Diferença Menos Significativa” (LSD), com o qual é possível fazer comparações múltiplas entre tratamentos e/ou blocos. Para determinação das diferenças significativas entre os adesivos e o controle usou-se o Método de Dunnett, comentado em ESPINOSA (2002).

As formas de ruptura foram avaliadas de acordo com a ASTM D4688-99 “*Standard test Method for Evaluating Structural Adhesives for Finger Jointing Lumber*”.

3.3 - RESULTADOS OBTIDOS

Este item apresenta os resultados obtidos da classificação visual e mecânica, ensaios de caracterização da madeira (teor de umidade, resistência à compressão paralela e densidade aparente), a resistência à tração paralela às fibras da madeira e as formas de ruptura.

3.3.1 - Classificação visual e mecânica

Os resultados obtidos da classificação visual e mecânica, para as peças utilizadas na confecção das lâminas sem emenda (controle) e com emenda dentada, são apresentados nos anexos A e B.

Para a espécie Pinus (anexo A), as tabelas A1 e A2 apresentam, respectivamente, a quantidade de anéis de inverno por polegada e a porcentagem de madeira de inverno, nas seções à esquerda e à direita da emenda; no caso das peças de controle, essa informação é referente às suas extremidades. As tabelas A3 e A4 apresentam, respectivamente, a classe visual e o MOE (GPa) das peças utilizadas em cada lâmina.

Para a espécie Eucalipto (anexo B), a tabela B1 apresenta as porcentagens de cerne nas seções à esquerda e à direita da emenda; no caso das peças de controle, essa informação é referente às suas extremidades. A tabela B2 apresenta o MOE (GPa) das peças utilizadas em cada lâmina.

3.3.2 - Ensaio de caracterização da madeira

As tabelas A5, A6 e A7 (anexo A) e as tabelas B3, B4 e B5 (anexo B) apresentam os valores individuais de teor de umidade, resistência à compressão paralela e densidade aparente para cada lâmina fabricada, com e sem emendas dentadas.

A tabela 3.5 e a tabela 3.6 apresentam os valores médios dos resultados dos ensaios de caracterização (o valor do coeficiente de variação está apresentado entre parêntesis).

Tabela 3.5: Resistência à compressão (f_{co}), umidade (U) e densidade (ρ) - *Pinus hondurensis*
(média e coeficiente de variação para as peças de cada tratamento)

	TRATAMENTOS							
	A	B	C	D	E	F	G	H
	Cascorez	Cascophen (Hor)	Cascophen (Ver)	PU Mamona	Wonderbond	MUF	Purbond	Controle
f_{co} (MPa)	43,4 (21%)	42,6 (17%)	39,5 (17%)	48,7 (14%)	39,5 (15%)	44,5 (17%)	41,0 (14%)	44,8 (20%)
U (%)	13,2 (6%)	11,4 (10%)	12,8 (5%)	13,6 (3%)	11,0 (4%)	13,0 (4%)	12,9 (5%)	13,1 (7%)
ρ_{ap} (g/cm ³)	0,44 (19%)	0,41 (15%)	0,36 (15%)	0,45 (12%)	0,54 (13%)	0,46 (14%)	0,55 (14%)	0,43 (21%)

Tabela 3.6: Resistência à compressão (f_{co}), umidade (U) e densidade (ρ) - *Eucalyptus grandis*
(média e coeficiente de variação para as peças de cada tratamento)

	TRATAMENTOS							
	A	B	C	D	E	F	G	H
	Cascorez	Cascophen (Hor)	Cascophen (Ver)	PU Mamona	Wonderbond	MUF	Purbond	Controle
f_{co} (MPa)	45,4 (10%)	47,6 (10%)	44,5 (14%)	48,9 (12%)	47,2 (9%)	42,0 (14%)	41,0 (14%)	47,1 (10%)
U (%)	16,1 (5%)	15,3 (4%)	15,0 (4%)	14,8 (6%)	14,9 (7%)	15,0 (7%)	13,3 (5%)	15,5 (6%)
ρ_{ap} (g/cm ³)	0,56 (8%)	0,57 (10%)	0,55 (12%)	0,56 (8%)	0,56 (9%)	0,55 (11%)	0,56 (14%)	0,56 (11%)

3.3.3 - Tração paralela em peças de tamanho estrutural

Foram analisadas as formas de ruptura das peças, e classificadas de acordo com os exemplos da figura 3.17. As rupturas de modo 1 indicam falhas de colagem e as de modo 6 falhas na madeira.



Figura 3.17 - Exemplos de rupturas ocorridas em cada modo.

A tabela 3.7 e a tabela 3.8 apresentam os valores obtidos de resistência à tração paralela (MPa) e os modos de ruptura (entre parênteses sobrescrito) para cada lâmina de madeira, e os

valores médios dos desvios padrão, coeficiente de variação (%), para cada tratamento e os modos de ruptura entre parênteses para cada corpo-de-prova.

Tabela 3.7: Resistência (MPa) das lâminas à tração - *Pinus hondurensis*

(média, desvio padrão e coeficiente de variação para as peças de cada tratamento)

BLOCO	TRATAMENTOS							
	A	B	C	D	E	F	G	H
	Cascorez	Cascophen (Hor)	Cascophen (Ver)	Mamona (PU)	Wonderbond	MUF	Purbond	Controle
1	36,9 ⁽⁵⁾	45,7 ⁽⁵⁾	37,4 ⁽⁴⁾	67,7 ⁽³⁾	36,1 ⁽⁴⁾	26,5 ⁽⁴⁾	71,5 ⁽³⁾	58,0
2	65,8 ⁽⁴⁾	32,5 ⁽⁴⁾	51,6 ⁽⁴⁾	57,1 ⁽²⁾	47,3 ⁽⁵⁾	25,6 ⁽⁴⁾	47,4 ⁽⁴⁾	55,2
3	59,6 ⁽⁴⁾	53,4 ⁽⁶⁾	47,8 ⁽⁴⁾	45,1 ⁽³⁾	78,3 ⁽⁴⁾	23,1 ⁽³⁾	18,3 ⁽¹⁾	76,7
4	51,6 ⁽⁴⁾	37,3 ⁽⁴⁾	44,0 ⁽⁴⁾	39,2 ⁽⁴⁾	74,3 ⁽⁶⁾	24,7 ⁽²⁾	42,4 ⁽⁴⁾	39,3
5	54,5 ⁽⁴⁾	48,2 ⁽³⁾	44,0 ⁽⁴⁾	57,2 ⁽³⁾	56,0 ⁽⁴⁾	29,1 ⁽³⁾	55,2 ⁽⁴⁾	83,2
6	50,4 ⁽⁴⁾	60,3 ⁽⁴⁾	50,7 ⁽⁵⁾	47,7 ⁽³⁾	53,1 ⁽⁴⁾	30,4 ⁽⁴⁾	49,0 ⁽⁴⁾	98,5
7	53,1 ⁽⁴⁾	40,5 ⁽⁴⁾	52,5 ⁽⁴⁾	40,9 ⁽²⁾	73,0 ⁽⁴⁾	33,6 ⁽⁴⁾	44,7 ⁽³⁾	90,0
8	43,1 ⁽⁴⁾	45,5 ⁽⁴⁾	39,8 ⁽⁴⁾	51,1 ⁽¹⁾	58,7 ⁽⁴⁾	20,1 ⁽³⁾	54,3 ⁽⁶⁾	58,1
9	43,7 ⁽⁴⁾	45,0 ⁽⁶⁾	42,7 ⁽⁴⁾	48,7 ⁽³⁾	63,8 ⁽⁴⁾	28,9 ⁽¹⁾	52,8 ⁽⁴⁾	71,3
10	65,1 ⁽³⁾	58,4 ⁽⁴⁾	56,1 ⁽³⁾	36,8 ⁽³⁾	63,3 ⁽⁵⁾	31,9 ⁽²⁾	53,4 ⁽³⁾	98,2
11	40,6 ⁽⁴⁾	74,2 ⁽³⁾	48,5 ⁽⁴⁾	58,2 ⁽³⁾	65,1 ⁽⁶⁾	19,1 ⁽³⁾	20,6 ⁽⁶⁾	79,1
12	39,3 ⁽⁴⁾	64,9 ⁽³⁾	58,5 ⁽⁴⁾	44,5 ⁽³⁾	60,9 ⁽⁵⁾	19,5 ⁽¹⁾	63,7 ⁽⁴⁾	60,2
13	47,1 ⁽²⁾	73,0 ⁽⁴⁾	58,9 ⁽³⁾	39,5 ⁽³⁾	55,2 ⁽⁴⁾	27,9 ⁽⁴⁾	45,0 ⁽⁴⁾	85,9
14	52,6 ⁽³⁾	34,1 ⁽⁴⁾	47,7 ⁽⁴⁾	44,7 ⁽²⁾	72,7 ⁽³⁾	19,2 ⁽²⁾	40,5 ⁽³⁾	88,0
15	47,7 ⁽⁴⁾	35,0 ⁽⁴⁾	62,0 ⁽²⁾	43,6 ⁽³⁾	54,1 ⁽⁴⁾	24,2 ⁽²⁾	42,5 ⁽⁴⁾	84,4
16	60,1 ⁽⁶⁾	56,1 ⁽³⁾	58,4 ⁽⁴⁾	44,5 ⁽²⁾	65,9 ⁽⁴⁾	29,4 ⁽¹⁾	33,2 ⁽³⁾	67,4
17	61,3 ⁽⁵⁾	32,6 ⁽⁴⁾	57,6 ⁽⁴⁾	52,3 ⁽²⁾	64,3 ⁽⁴⁾	31,7 ⁽⁴⁾	39,7 ⁽⁴⁾	57,2
18	65,4 ⁽³⁾	54,9 ⁽⁴⁾	63,8 ⁽³⁾	28,5 ⁽²⁾	65,7 ⁽⁴⁾	27,9 ⁽¹⁾	64,3 ⁽⁴⁾	33,8
19	63,0 ⁽²⁾	60,5 ⁽²⁾	63,7 ⁽²⁾	33,0 ⁽²⁾	65,5 ⁽³⁾	28,1 ⁽¹⁾	53,6 ⁽³⁾	123,2
20	85,7 ⁽²⁾	79,0 ⁽¹⁾	64,9 ⁽³⁾	44,6 ⁽⁴⁾	60,2 ⁽⁶⁾	34,7 ⁽¹⁾	34,0 ⁽⁴⁾	53,8
21	50,9 ⁽²⁾	61,2 ⁽³⁾	68,9 ⁽³⁾	44,3 ⁽¹⁾	52,1 ⁽⁴⁾	22,6 ⁽⁴⁾	22,4 ⁽⁶⁾	123,3
22	49,8 ⁽⁴⁾	70,5 ⁽¹⁾	61,1 ⁽³⁾	37,1 ⁽¹⁾	65,4 ⁽⁴⁾	19,1 ⁽¹⁾	45,7 ⁽³⁾	79,4
23	47,8 ⁽⁶⁾	76,4 ⁽³⁾	72,3 ⁽²⁾	44,7 ⁽²⁾	86,8 ⁽³⁾	29,2 ⁽²⁾	60,3 ⁽⁴⁾	95,7
24	76,9 ⁽¹⁾	63,7 ⁽⁴⁾	67,5 ⁽³⁾	55,4 ⁽²⁾	66,8 ⁽³⁾	33,5 ⁽¹⁾	50,1 ⁽⁶⁾	117,3
25	72,4 ⁽²⁾	37,9 ⁽⁴⁾	69,5 ⁽⁴⁾	35,0 ⁽¹⁾	67,7 ⁽²⁾	25,2 ⁽¹⁾	47,6 ⁽³⁾	110,6
Média	55,4	53,6	55,6	45,7	62,9	26,6	46,1	79,5
Desvio	12	15	10	9	10	5	13	25
CV %	22	27	18	20	17	18	29	31

Tabela 3.8: Resistência (MPa) das lâminas à tração - *Eucalyptus grandis*.

(média, desvio padrão e coeficiente de variação para as peças de cada tratamento)

BLOCO	TRATAMENTOS							
	A	B	C	D	E	F	G	H
	Cascorez	Cascophen (Hor)	Cascophen (Ver)	Mamona (PU)	Wonderbond	MUF	Purbond	Controle
1	47,1 ⁽⁴⁾	30,1 ⁽¹⁾	71,1 ⁽¹⁾	49,0 ⁽³⁾	36,8 ⁽⁴⁾	29,9 ⁽⁶⁾	78,4 ⁽²⁾	48,0
2	59,3 ⁽²⁾	46,0 ⁽⁶⁾	63,4 ⁽²⁾	62,0 ⁽⁶⁾	59,5 ⁽⁵⁾	23,5 ⁽⁶⁾	41,8 ⁽²⁾	54,4
3	48,4 ⁽⁵⁾	58,3 ⁽¹⁾	40,5 ⁽⁶⁾	42,8 ⁽⁴⁾	55,4 ⁽⁶⁾	52,1 ⁽⁵⁾	62,6 ⁽³⁾	49,9
4	34,9 ⁽⁶⁾	44,5 ⁽⁴⁾	50,5 ⁽⁵⁾	60,1 ⁽³⁾	67,4 ⁽²⁾	34,5 ⁽⁶⁾	45,7 ⁽⁶⁾	79,8
5	37,1 ⁽⁴⁾	52,3 ⁽⁵⁾	61,0 ⁽⁶⁾	57,7 ⁽⁴⁾	60,8 ⁽²⁾	30,6 ⁽⁴⁾	50,6 ⁽⁴⁾	60,9
6	52,9 ⁽⁵⁾	50,2 ⁽³⁾	23,6 ⁽⁶⁾	51,8 ⁽³⁾	43,1 ⁽⁵⁾	41,3 ⁽⁵⁾	31,1 ⁽⁵⁾	41,9
7	52,4 ⁽⁴⁾	47,6 ⁽²⁾	37,4 ⁽³⁾	60,9 ⁽⁵⁾	59,3 ⁽⁵⁾	39,7 ⁽⁴⁾	49,8 ⁽³⁾	66,5
8	63,2 ⁽¹⁾	48,8 ⁽²⁾	33,5 ⁽⁴⁾	47,3 ⁽³⁾	51,7 ⁽³⁾	30,6 ⁽⁴⁾	56,8 ⁽⁶⁾	91,1
9	77,1 ⁽¹⁾	60,5 ⁽⁵⁾	68,0 ⁽²⁾	60,7 ⁽⁵⁾	49,8 ⁽³⁾	46,1 ⁽⁵⁾	78,6 ⁽¹⁾	101,1
10	43,8 ⁽⁴⁾	76,4 ⁽¹⁾	46,2 ⁽⁴⁾	49,0 ⁽⁴⁾	71,7 ⁽²⁾	62,5 ⁽¹⁾	67,9 ⁽⁵⁾	78,0
11	66,0 ⁽²⁾	64,3 ⁽³⁾	60,1 ⁽¹⁾	60,3 ⁽⁵⁾	54,1 ⁽⁴⁾	67,1 ⁽²⁾	65,1 ⁽⁵⁾	104,0
12	50,5 ⁽²⁾	54,4 ⁽⁶⁾	52,7 ⁽⁵⁾	48,5 ⁽⁴⁾	50,6 ⁽⁴⁾	62,0 ⁽⁶⁾	78,9 ⁽⁵⁾	68,4
13	47,4 ⁽⁵⁾	60,1 ⁽⁴⁾	47,3 ⁽¹⁾	62,4 ⁽⁵⁾	53,6 ⁽⁵⁾	53,5 ⁽⁴⁾	62,1 ⁽³⁾	55,0
14	37,5 ⁽⁴⁾	71,0 ⁽⁵⁾	48,9 ⁽⁴⁾	43,8 ⁽²⁾	67,5 ⁽¹⁾	45,8 ⁽²⁾	36,0 ⁽³⁾	66,1
15	53,6 ⁽³⁾	71,5 ⁽¹⁾	63,9 ⁽¹⁾	50,4 ⁽²⁾	65,2 ⁽⁴⁾	77,7 ⁽¹⁾	80,7 ⁽²⁾	63,4
16	49,9 ⁽²⁾	59,5 ⁽⁴⁾	49,8 ⁽⁴⁾	58,8 ⁽⁴⁾	67,2 ⁽¹⁾	60,1 ⁽¹⁾	70,3 ⁽⁶⁾	98,5
17	69,5 ⁽¹⁾	36,6 ⁽⁶⁾	71,0 ⁽⁶⁾	55,4 ⁽¹⁾	58,1 ⁽⁴⁾	37,9 ⁽⁴⁾	78,3 ⁽¹⁾	85,7
18	54,2 ⁽⁴⁾	52,1 ⁽³⁾	77,3 ⁽¹⁾	52,9 ⁽²⁾	77,7 ⁽²⁾	57,2 ⁽¹⁾	84,2 ⁽²⁾	98,3
19	56,8 ⁽⁴⁾	52,8 ⁽⁵⁾	50,8 ⁽⁵⁾	59,7 ⁽³⁾	61,2 ⁽²⁾	59,1 ⁽¹⁾	77,1 ⁽³⁾	83,4
20	74,6 ⁽⁵⁾	26,8 ⁽⁴⁾	52,0 ⁽⁴⁾	48,0 ⁽¹⁾	68,4 ⁽¹⁾	54,5 ⁽¹⁾	72,1 ⁽⁵⁾	85,1
21	56,1 ⁽⁴⁾	68,1 ⁽¹⁾	73,0 ⁽¹⁾	50,0 ⁽¹⁾	67,4 ⁽⁴⁾	45,9 ⁽⁶⁾	68,7 ⁽⁶⁾	106,4
22	55,5 ⁽³⁾	68,4 ⁽³⁾	81,6 ⁽¹⁾	61,0 ⁽³⁾	55,4 ⁽²⁾	56,8 ⁽²⁾	79,3 ⁽³⁾	66,1
23	61,5 ⁽³⁾	72,7 ⁽¹⁾	52,0 ⁽²⁾	53,5 ⁽³⁾	64,7 ⁽⁵⁾	66,4 ⁽²⁾	76,9 ⁽²⁾	92,8
24	92,3 ⁽¹⁾	68,7 ⁽³⁾	70,0 ⁽²⁾	56,9 ⁽¹⁾	59,8 ⁽¹⁾	61,3 ⁽¹⁾	59,9 ⁽³⁾	84,8
25	81,2 ⁽¹⁾	72,4 ⁽¹⁾	64,0 ⁽²⁾	48,8 ⁽³⁾	67,7 ⁽¹⁾	48,1 ⁽¹⁾	50,5 ⁽⁶⁾	104,4
Média	56,9	56,6	56,4	54,1	59,8	49,8	64,1	77,4
Desvio	14	13	14	6	9	14	15	20
CV %	25	24	25	11	15	28	24	25

3.4 - ANÁLISE DOS RESULTADOS

3.4.1 - Comparação entre os adesivos

A primeira análise foi feita através da comparação entre os valores de resistência à tração obtidos nas emendas com todos os adesivos (perfil vertical), ou seja, utilizaram-se os dados das colunas A, C, D, E, F e G, das tabelas 3.7 e 3.8. Verificou-se a normalidade dos dados e, em seguida, fez-se a Análise de Variância.

3.4.1.1 - Análise para a espécie pinus

As figuras 3.18, 3.19 e 3.20 apresentam, respectivamente, o histograma de frequências, o gráfico de probabilidade normal dos resíduos e o gráfico dos resíduos versus valor estimado, para a espécie Pinus (perfil vertical).

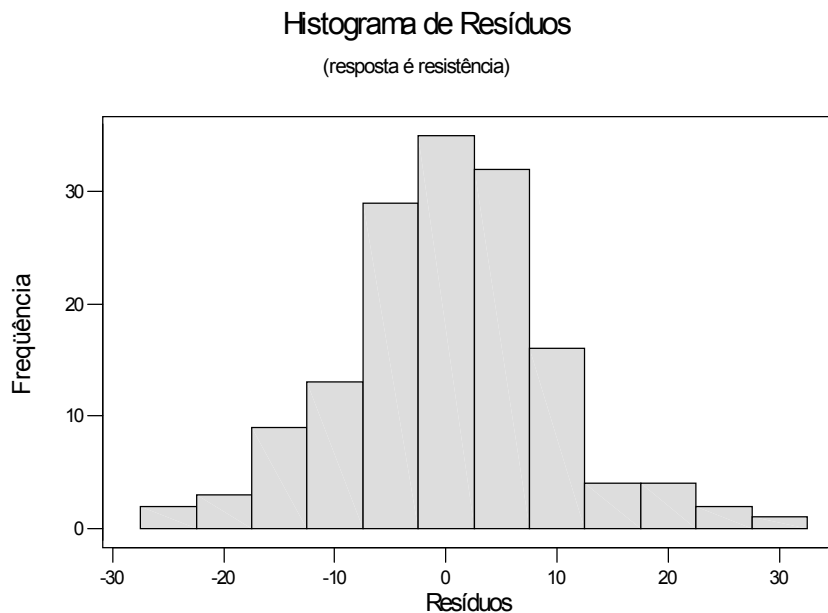


Figura 3.18 - Histograma de frequências, para a espécie Pinus (perfil vertical).

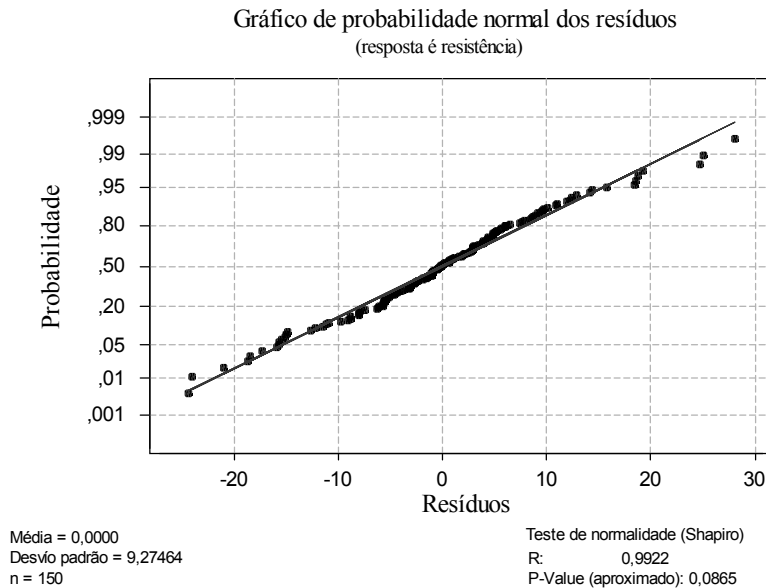


Figura 3.19 - Gráfico de probabilidade normal dos resíduos, para a espécie Pinus (perfil vertical).

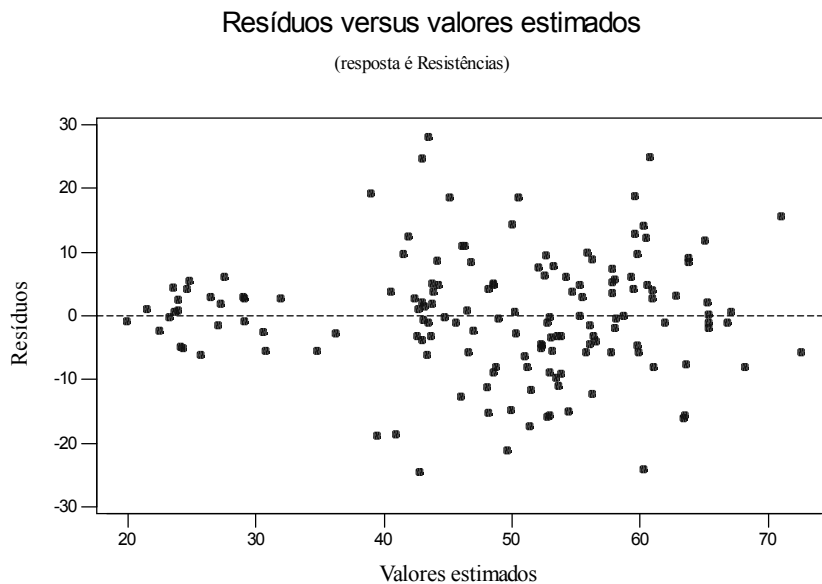


Figura 3.20 - Resíduos versus valor estimado, para a espécie Pinus (perfil vertical).

Os gráficos das figuras 3.17, 3.18 e 3.19 mostram um indicativo de distribuição normal e variância constante. Desta forma, os dados foram tratados como dados paramétricos e a Análise de Variância (ANOVA) foi aplicada. A tabela 3.9 apresenta o quadro da ANOVA.

Tabela 3.9: Tabela ANOVA, para espécie Pinus (perfil vertical).

Fonte	GL	SQ	QM	Razão
Tratamentos	5	19957,04	3991,41	37,37
Blocos	24	2352,68	98,03	0,92
Erro	120	12816,56	106,80	
Total	149	35126,29		

A razão observada com $GL = (5, 120)$ é igual a 37,37. Como o valor de F tabelado, para um nível de confiança de 95%, é igual a 2,29 verifica-se que a razão observada cai na região de rejeição ($37,37 > 2,29$), podendo-se concluir que os dados fornecem evidência suficiente para rejeitar a hipótese nula, isto é, existe pelo menos uma diferença significativa entre as médias das resistências à tração para os seis adesivos testados. Para identificar essas diferenças, utilizou-se o método da “Diferença Menos Significativa” (LSD). Com relação às diferenças entre os blocos, como $0,92 < 1,61$ (tabelado), podemos concluir que não existem diferenças significativas entre os vários blocos, com confiabilidade de 95%.

- LSD entre tratamentos:

$$LSD = t_{\frac{\alpha}{2}, \nu} * \sqrt{\frac{2 * QME}{n}} \quad (3.1)$$

Na expressão 3.1, n corresponde ao número de observações dentro de um mesmo tratamento e ν é o número de graus de liberdade da parcela do erro. O valor tabelado de $t_{0,025, 120}$ é 1,98. Portanto:

$$LSD = 1,98 * \sqrt{\frac{2 * 106,80}{25}} = 5,79$$

Fazendo-se, a partir da tabela 3.10, a diferença entre os valores médios dos adesivos e comparando-se com o valor da LSD, obteve-se entre quais adesivos as diferenças foram significativas. Nessa tabela, os adesivos estão dispostos em ordem decrescente de resistência média.

Tabela 3.10: Diferença entre as resistências médias dos adesivos.

	WB	Cascophen-V	Cascorez	Purbond	PU	MUF
Wonderbond	0,00					
Cascophen V	7,30	0,00				
Cascorez	7,52	0,22	0,00			
Purbond	16,81	9,52	9,30	0,00		
PU	17,23	9,93	9,71	0,42	0,00	
MUF	36,30	29,0	28,78	19,49	19,07	0,00

A análise desses resultados (tabela 3.10) revela que só não existe diferença significativa entre os adesivos Cascophen e Cascorez ($0,22 < 5,79$) e entre os adesivos Purbond e Poliuretano-PU ($0,42 < 5,79$). O diagrama da figura 3.21 indica os grupos, organizados no sentido de menor para o de maior resistência. A figura 3.22 mostra um esquema gráfico da diferença de resistência entre os adesivos.

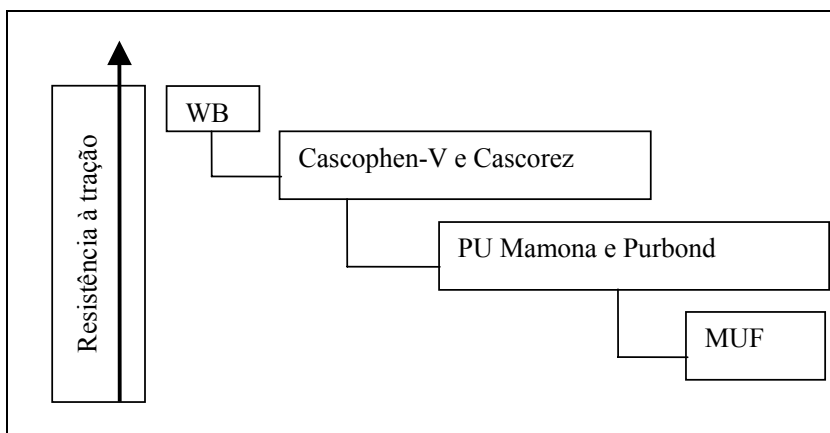


Figura 3.21 – Esquema gráfico da diferença de resistência entre os adesivos.

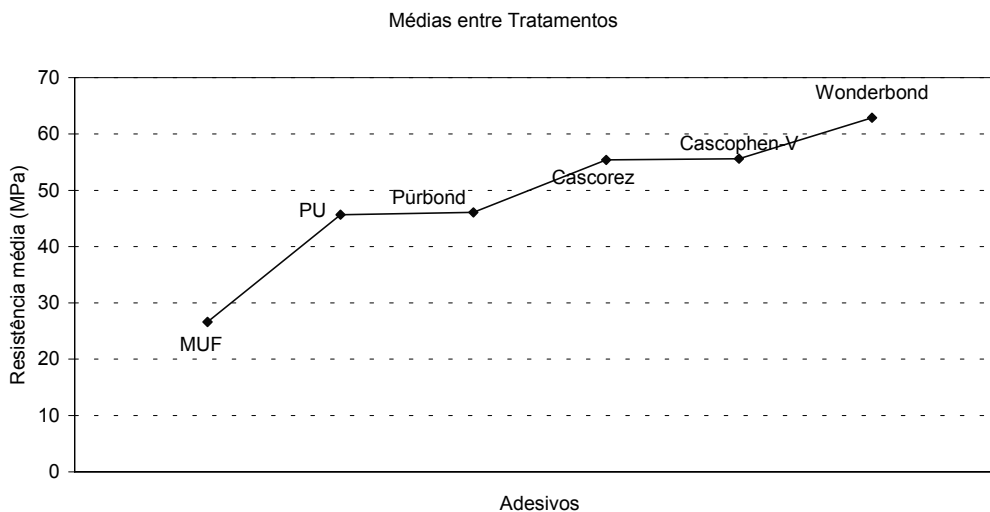


Figura 3.22 - Valores médios de resistência para os diferentes tratamentos, para a espécie Pinus.

3.4.1.2 ANÁLISE PARA A ESPÉCIE EUCALIPTO

As figuras C-1, C-2 e C-3 (Anexo C) apresentam, respectivamente, o histograma de frequências, o gráfico de probabilidade normal dos resíduos e o gráfico dos resíduos versus valor estimado, para a espécie Pinus (perfil vertical).

A análise dos gráficos mostram um indicativo de distribuição normal e variância constante. Desta forma, os dados foram tratados como dados paramétricos e a Análise de Variância (ANOVA) foi aplicada. A tabela 3.11 apresenta o quadro da ANOVA.

Tabela 3.11: Tabela ANOVA, para espécie Eucalipto (perfil vertical).

Fonte	GL	SQ	QM	Razão
Tratamentos	5	2988	598	4,73
Blocos	24	7552	315	2,49
Erro	120	15145	126	
Total	149	25685		

A razão observada com GL = (5, 120) é igual a 4,73. Como o valor de F tabelado, para um nível de confiança de 95%, é igual a 2,29 verifica-se que a razão observada cai na região de rejeição ($4,73 > 2,29$), podendo-se concluir que os dados fornecem evidência suficiente para rejeitar a hipótese nula e que existe pelo menos uma diferença entre as médias nas resistências à tração para os seis adesivos testados. Para identificar essas diferenças, utilizou-se o método da “Diferença Menos Significativa” (LSD). Com relação às diferenças entre os blocos, como $2,49 > 1,61$ (tabelado), podemos concluir que existe pelo menos uma diferença significativas, com confiabilidade de 95%, entre os vários blocos.

- LSD entre tratamentos:

$$LSD = t_{\frac{\alpha}{2}, \nu} * \sqrt{\frac{2 * QME}{n}} \quad (3.2)$$

Na expressão 3.2, n corresponde ao número de observações dentro de um mesmo tratamento e ν é o número de graus de liberdade da parcela do erro. O valor tabelado de $t_{0,025, 120}$ é 1,98. Portanto:

$$LSD = 1,98 * \sqrt{\frac{2 * 126,00}{25}} = 6,29$$

Fazendo-se, a partir da tabela 3.12, a diferença entre os valores médios dos adesivos e comparando-se com o valor da LSD, obteve-se entre quais adesivos as diferenças foram significativas.

Tabela 3.12: Diferença entre as resistências médias dos adesivos.

	Purbond	Wonderbond	Cascorez	Cas-V	Mamona	MUF
Purbond	0,00					
Wonderbond	4,35	0,00				
Cascorez	7,21	2,86	0,00			
Cas-V	7,73	3,38	0,52	0,00		
Mamona	10,05	5,70	2,84	2,32	0,00	
MUF	14,35	10,00	7,14	6,62	2,32	0,00

A análise desses resultados (tabela 3.12) revela que não existe diferença significativa entre os adesivos:

- Purbond e Wonderbond ($4,35 < 6,29$);
- Wonderbond e Cascorez ($2,86 < 6,29$); Wonderbond e Cascophen Vertical ($3,38 < 6,29$); Wonderbond e Mamona ($5,70 < 6,29$);
- Cascorez e Cascophen Vertical ($0,52 < 6,29$) e Cascorez e Mamona ($2,84 < 6,29$);
- Cascorez Vertical e Mamona ($2,32 < 6,29$);
- Mamona e MUF ($2,32 < 6,29$).

A figura 3.23 mostra um gráfico dos valores médios de resistência para cada adesivo.

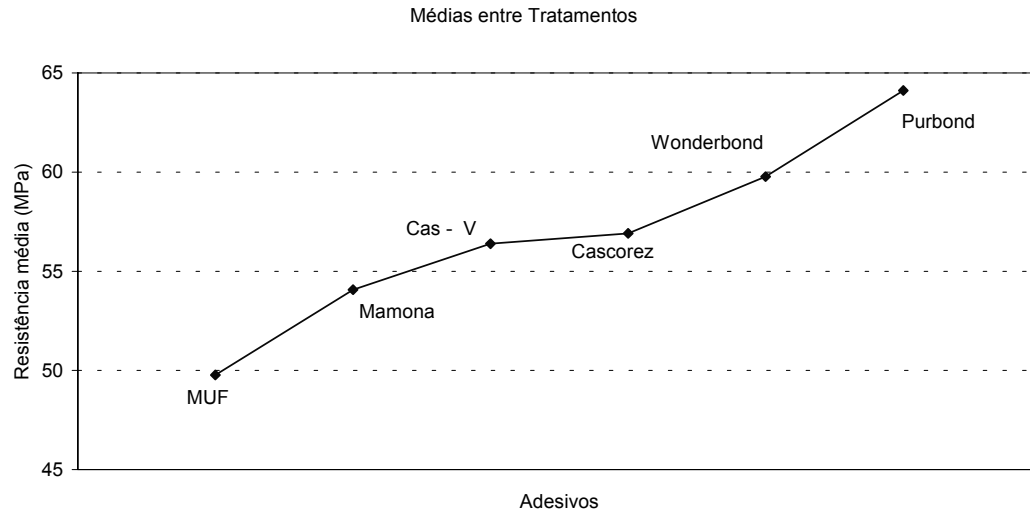


Figura 3.23 - Valores médios de resistência para os diferentes tratamentos, para a espécie Eucalipto.

3.4.2 - Comparação entre os tratamentos e o controle

Para comparar a resistência das peças emendadas com as de controle (sem emendas) foi utilizado o Método de Dunnett. Por este método, a média de um tratamento (no caso, peças de controle) pode ser comparada com a média de um tratamento específico. Considera-se que não existe diferença entre os tratamentos se a diferença entre os tratamentos estiver contida no intervalo:

$$\pm t_{k,v,\frac{\theta}{2}} * s * \sqrt{\frac{1}{n_A} + \frac{1}{n_t}} \quad (3.3)$$

onde $t_{k,v,\theta/2}$ é o valor tabelado, para k tratamentos e v graus de liberdade, sendo θ o nível de confiança (no caso, 95%).

A equação 3.3 fornece o intervalo igual a $\pm 7,04$ MPa para a espécie de Pinus e igual a $\pm 8,15$ MPa para a espécie Eucalipto. Esses intervalos foram comparados com as diferenças entre os valores médios de resistência mostrados na tabela 3.13 (Pinus) e tabela 3.14 (Eucalipto).

Tabela 3.13: Resistências à tração, médias e diferenças com relação ao controle (Pinus).

	Cascorez	Cascophen Vertical	Cascophen Horizontal	PU	WB	MUF	Purbond	Controle
Médias	55,38	55,60	53,63	45,67	62,9	26,60	46,08	79,50
Diferenças	- 24,12	- 23,90	- 25,87	- 33,83	- 16,6	- 52,9	- 33,42	0

Tabela 3.14: Resistências à tração, médias e diferenças com relação ao controle (Eucalipto).

	Cascorez	Cascophen (Vert)	Cascophen (Hor)	PU Mamona	WB	MUF	Purbond	Controle
Médias	56,91	56,55	56,39	54,07	59,77	49,77	64,12	77,36
Diferenças	- 20,45	- 20,81	- 20,97	- 23,29	- 17,59	- 27,59	- 13,24	0

Como nenhuma das diferenças da tabela 3.13 (Pinus) e tabela 3.14 (Eucalipto) estão contidas, respectivamente, nos intervalos $-7,04 < \bar{y}_i - \bar{y}_j < 7,04$ e $-8,15 < \bar{y}_i - \bar{y}_j < 8,15$, conclui-se que existe diferença significativa entre o controle e todos os tratamentos para as duas espécies de madeira.

Para quantificar as diferenças entre controle e adesivo, foram calculadas as eficiências, indicadas na tabela 3.15.

Tabela 3.15: Eficiência entre as resistências médias dos adesivos e o controle.

	TRATAMENTOS						
	A	B	C	D	E	F	G
Eficiência η (%)	Cascorez	Cascophen (Hor)	Cascophen (Ver)	PU Mamona	Wonderbond	MUF	Purbond
η_1 - Pinus	70	67	70	57	79	33	58
η_2 - Eucaliptos	74	73	73	70	77	64	83
Razão (η_1/η_2)	0,95	0,92	0,96	0,81	1,03	0,52	0,70

Os adesivos apresentaram as seguintes variações de eficiência de colagem à tração paralela às fibras da madeira:

- Para a espécie Pinus: de 33% para o MUF até 79% para o Wonderbond;
- Para a espécie Eucalipto: de 64% para o MUF até 83% para o Purbond.

Os adesivos poliuretanos Wonderbond e Purbond apresentaram a melhor eficiência de colagem entre os demais adesivos testados, respectivamente, para a madeira Pinus e Eucaliptos. A razão entre as eficiências de colagem, para as espécies de madeira, indicou que os adesivos

Cascorez e Cascophen (vertical) possuem eficiência de colagem semelhante quando aplicado às duas espécies. Por outro lado, os adesivos, tais como: Cascophen (horizontal), PU Mamona, MUF e Purbond, possuem resultados melhores quando aplicados à espécie Eucalipto.

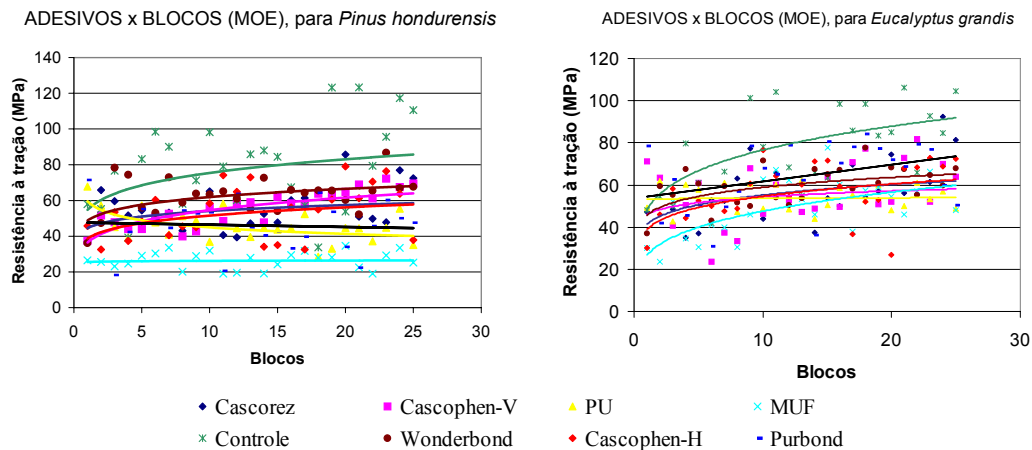


Figura 3.24 - Comportamento da resistência à tração com o aumento das faixas de módulo de elasticidade (Bloco).

Para espécie *Pinus*, no gráfico da figura 3.24, todos os adesivos, com exceção do MUF, PU e Purbond, tiveram uma leve tendência de aumento em sua resistência com o aumento do módulo de elasticidade, embora tenha sido comprovado pela análise estatística que a influência do módulo não foi significativa para este conjunto de dados. Quanto ao adesivo PU Mamona, os valores de resistência à tração decresceram com o aumento do módulo de elasticidade, indicando influência na eficiência do adesivo com o aumento da densidade da madeira.

Para a espécie *Eucalipto*, no gráfico da figura 3.24, todos os adesivos, com exceção do PU, tiveram uma leve tendência de aumento em sua resistência com o aumento do módulo de elasticidade, embora tenha sido comprovado pela análise estatística que a influência do módulo não foi significativa para este conjunto de dados. Quanto ao adesivo PU Mamona, os valores de resistência à tração mantiveram-se constante com o aumento do módulo de elasticidade.

Para o adesivo MUF, o desempenho foi diferente para as duas espécies de madeira, *Pinus* e *Eucalipto*, apresentando melhores resultados de resistência quando aplicado na espécie *Eucalipto*.

Foram feitas outras duas análises dos dados independentes descartando-se os blocos que apresentaram valores altos de resíduos. Para a espécie *Pinus*, descartaram-se os blocos 4, 18, 19, 21, 24 e 25 da tabela 3.8 – “Resistência (MPa) das lâminas à tração - *Pinus hondurensis*” e para a espécie *Eucalipto*, descartaram-se os blocos 1, 2, 3, 6, 8, 11, 21 e 25 da tabela 3.9 – “Resistência (MPa) das lâminas à tração - *Eucalyptus grandis*”. Essas análises não

apresentaram diferenças significativas em relação às análises feitas anteriormente; por este motivo, os dados não estão apresentados no trabalho.

3.4.3 - Comparação dos perfis vertical e horizontal

Para as espécies de Pinus e Eucalipto, foi feita a comparação entre os valores de resistência à tração obtidos nos ensaios com as emendas de perfis vertical e horizontal feitas com adesivo Cascophen, ou seja, as colunas B e C, respectivamente, para a tabela 3.8 e a tabela 3.9.

Nessa análise, para a espécie Pinus, foi verificada e constatada a normalidade dos dados (os gráficos dessa análise não são apresentados nesse trabalho). Para a espécie Pinus, não existiu diferença significativa entre os dois tratamentos; entretanto, há evidências de que existem diferenças significativas entre os valores dos blocos.

Para identificar estas diferenças foi aplicado o método da “Diferença Menos Significativa” (LSD). Notou-se que as diferenças entre as faixas se tornam significativas, com exceção de alguns valores intermediários, a partir do 19º bloco, que representa um valor de módulo igual a 15,6 GPa. Ao se analisar apenas 2 adesivos (estatisticamente semelhantes), a influência do bloco passa a ser detectada. A figura 3.25 mostra os valores médios de resistência para cada bloco, para a espécie Pinus.

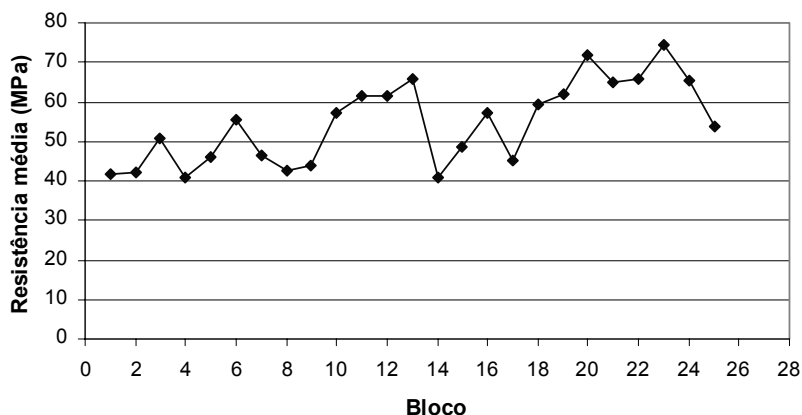


Figura 3.25 - Valores médios de resistência para cada bloco, para a espécie Pinus.

Para a espécie Eucalipto, foi verificada e constatada a normalidade dos dados, como mostrado nos gráficos das figuras C-4, C-5 e C-6 (anexo C).

Para verificar se há diferença significativa entre os valores de resistência, a tabela 3.16 de ANOVA foi construída:

Tabela 3.16: Tabela ANOVA (perfil vertical e horizontal).

Fonte	GL	SQ	QM	Razão
Tratamentos	1	0	0	0,002
Blocos	24	5044	210	1,199
Erro	24	4206	175	
Total	49	9250		

O número de graus de liberdade é dado por $GL = (k-1, (n-1)(k-1)) = (1, 24)$ e o valor crítico tabelado entre tratamentos, é $F_{0,05} = 4,26$. Já que $0,002 < 4,26$, não existe diferença significativa entre os dois tipos de tratamento. O valor crítico entre blocos é dado por $F_{0,05} = 1,98$. Como $1,199 < 1,98$ não há evidências de que existem diferenças significativas entre os valores dos blocos.

3.4.4 - Análise dos modos de ruptura

A tabela 3.17 apresenta a freqüência de cada modo de ruptura para todos os tratamentos, para as espécies Pinus (P) e Eucalipto (E).

Para promover a visualização da freqüência de ocorrência de modos de ruptura, para cada adesivo, e para cada espécie de madeira, construiu-se o gráfico mostrado na figura 3.26, podendo-se observar os picos de ocorrência.

Tabela 3.17: Freqüência dos modos de ruptura, Pinus (P) e Eucalipto (E).

Modo de Ruptura	TRATAMENTOS														Totalidade dos tratamentos	
	A		B		C		D		E		F		G			
	Cascorez		Cascophen (Hor)		Cascophen (Ver)		Mamona (PU)		Wonderbond		MUF		Purbond		P	E
	P	E	P	E	P	E	P	E	P	E	P	E	P	E		
1	1	5	2	7	0	7	4	4	0	5	9	8	1	2	17	38
2	5	4	1	2	3	5	9	3	1	6	5	4	0	5	24	29
3	3	3	6	5	7	1	10	8	4	2	4	0	8	7	42	26
4	12	8	13	4	14	5	2	5	14	6	7	5	12	1	74	34
5	2	4	1	4	1	3	0	4	3	5	0	3	0	5	7	28
6	2	1	2	3	0	4	0	1	3	1	0	5	4	5	11	20
Total	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	175	175

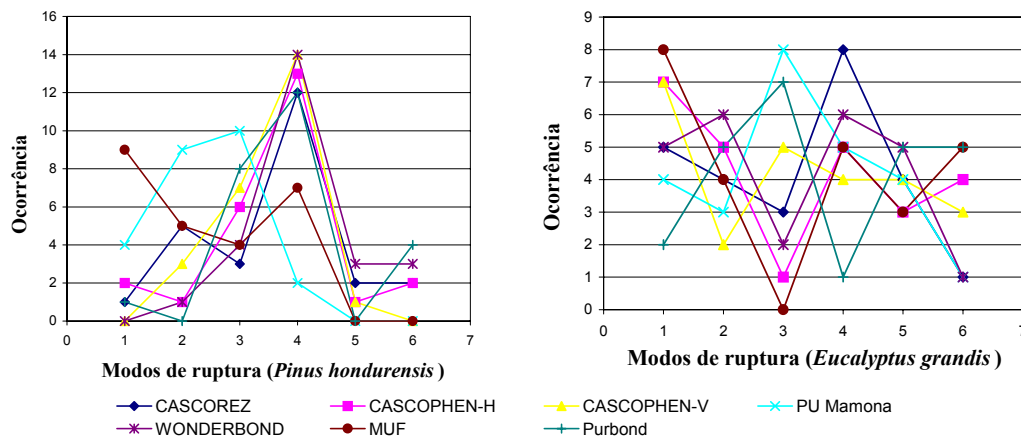


Figura 3.26 - Gráfico de frequência de ocorrência dos modos de ruptura.

Observa-se, para a espécie Pinus, que a maior parte, 74 lâminas de madeira, apresentou ruptura no modo 4, sendo as demais distribuídas nos outros modos. Para a espécie Eucaliptos, 38 lâminas e 34 lâminas apresentaram ruptura, respectivamente, nos modos 1 e 4. Observa-se, além disso, uma semelhança entre as quantidades de lâminas rompidas nos modos de ruptura 2, 3 e 5.

Para a espécie Pinus, com relação à qualidade da colagem, a maior incidência de rupturas no modo 1, que representa falha na colagem, ocorreu para o MUF. Além disso, as lâminas coladas com este adesivo apresentaram baixa resistência à tração, indicando que o mesmo não é adequado para o tipo de madeira utilizado. Provavelmente, isso ocorreu devido ao MUF, por possuir baixa viscosidade, ter sido absorvido demasiadamente pela madeira, prejudicando a resistência na linha de colagem. A maior ocorrência de peças com ruptura nos modos 3 e 4 (principalmente no modo 4) indica boa execução das emendas dentadas. Os adesivos que apresentaram maior resistência à tração (Wonderbond, Cascophen e Cascorez) também tiveram a maioria das rupturas no modo 4.

Observa-se, também, que alguns adesivos (tratamentos) apresentaram a maior parte das peças rompidas com modos de ruptura semelhantes para as duas espécies de madeira, tais como: adesivo cascorez (Modo 4), PU Mamona (Modo 3), Wonderbond (Modo 4) e MUF (Modo 1).

Nota-se, do mesmo modo, que para os dois perfis de emendas dentadas, vertical e horizontal, o adesivo Cascophen apresentou o modo 4 para a espécie de Pinus e apresentou modo 1 para a espécie de Eucaliptos.

Para a espécie Pinus e Eucaliptos, as maiores eficiências (picos) coincidem com as maiores ocorrências no modo de ruptura 3, 4 e 5, exceto, para a espécie Eucaliptos, para o adesivo Cascophen (perfil horizontal e vertical) e para o adesivo MUF, que apresentou picos com menores eficiências de colagem.

4 – AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO MECÂNICO EM DIFERENTES CONDIÇÕES DE UMIDADE PARA ADESIVOS ESTRUTURAIS

Este capítulo tem como objetivo avaliar apenas o desempenho mecânico em diferentes condições de umidade dos adesivos para uso estrutural, parte dos ensaios exigidos para a avaliação da durabilidade, por meio de ensaios de resistência ao cisalhamento e resistência à tração paralela às fibras da madeira, em corpos-de-prova isentos de defeitos, submetidos a três tratamentos distintos, que procuram caracterizar a eficiência do adesivo, tendo em vista distintas condições ambientais em que o mesmo pode ser utilizado. Doravante esses tratamentos serão denominados “seco”, “saturado” e “fervido”.

4.1 - MATERIAIS

4.1.1 - Madeiras

Foram utilizadas duas espécies de madeira: o *Pinus caribea hondurensis* e o *Eucaliptus grandis*. As características destas espécies foram apresentadas no capítulo anterior.

4.1.2 - Adesivos

Utilizaram-se os seguintes adesivos, cujas características já foram apresentados no capítulo anterior:

- **Cascophen** (à base de resorcinol-formol);
- **Purbond** (Purbond HB 312);
- **PU Mamona** (Adesivo poliuretano à base de óleo de mamona);

A descrição desses adesivos foi apresentada no item “3.1.2 – Adesivos”.

4.2 – MÉTODOS

Este item apresenta os procedimentos adotados e os ensaios realizados para avaliar a resistência ao cisalhamento em corpos-de-prova colados e a resistência à tração paralela em corpos-de-prova com e sem emendas dentadas, isentos de defeito.

Anteriormente, foram realizadas as etapas de classificação visual da madeira e classificação mecânica da madeira descritos nos itens “3.2.1 - Classificação visual da madeira” e “3.2.2 - Classificação mecânica da madeira”.

4.2.1 – Confeção dos corpos-de-prova colados

A madeira utilizada foi seca até o teor de umidade de equilíbrio (em torno de 12%).

Para o ensaio de cisalhamento, foram confeccionadas lâminas com 90 cm de comprimento. Foram prensadas 8 lâminas simultaneamente, coladas duas a duas. A pressão de colagem utilizada foi 0,4 MPa para a espécie Pinus, e 0,6 MPa para a espécie Eucaliptos, durante 24 horas, conforme ilustra a figura 4.1.



Figura 4.1 – Esquema de prensagem das lâminas de cisalhamento.

Posteriormente, as lâminas foram usinadas até atingir as dimensões dos corpos-de-prova de cisalhamento (Figura 4.2), e posteriormente foram distribuídos aleatoriamente pelos tratamentos (seco, saturado e fervido).



Figura 4.2 – Corpos-de-prova de cisalhamento distribuídos e numerados.

Para a confecção dos corpos-de-prova para o teste de resistência da emenda dentada foram utilizadas lâminas com dimensões nominais 3,5 cm x 6,5 cm x 52 cm, prensadas de

acordo com os procedimentos descritos no capítulo anterior, e entabados para cura, conforme ilustra a figura 4.3, por um período superior a 7 dias.

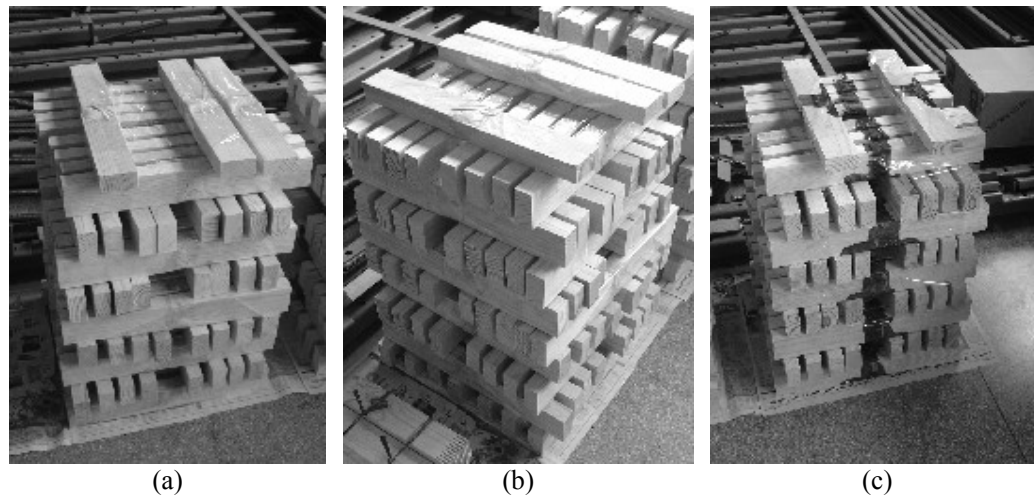


Figura 4.3 – Lâminas coladas entabados para cura.
Mamona (a), Purbond (b) e Cascophen (c)

Posteriormente, foi feita a usinagem das lâminas até atingir as dimensões dos corpos-de-prova (figura 4.4), que foram distribuídos aleatoriamente para a realização dos tratamentos seco, saturado e fervido.



Figura 4.4 – Corpos-de-prova colados de tração paralela.

4.2.2 – Tratamento dos corpos-de-prova

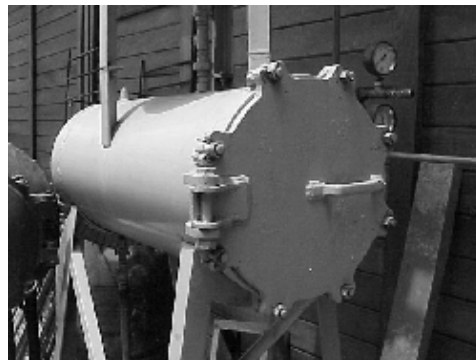
Os corpos-de-prova foram submetidos aos tratamentos citados na norma ASTM D 4688-99 “*Standard test Method for Evaluating Structural Adhesives for Finger Jointing Lumber*”.

Para o tratamento "seco", os corpos-de-prova, com o teor de umidade de equilíbrio com o ar (em torno de 12%), foram ensaiados de acordo com as recomendações da norma brasileira NBR 7190/97.

Para o tratamento "saturado", os corpos-de-prova foram introduzidos na autoclave de vácuo-pressão (figura 4.5), mantidos com vácuo inicial de 25 pol. Hg durante 30 minutos. Logo após, foram mantidos submersos pelo menos 5 cm em água na temperatura ambiente, com uma pressão de 20 kgf/cm², durante 2 horas (tomou-se o cuidado de utilizar espaçadores entre os corpos-de-prova, de modo que a água tivesse acesso livre a todas as suas superfícies). Os corpos-de-prova foram removidos da autoclave e colocados submersos na água em temperatura ambiente, até serem testados. Logo antes do teste, a superfície de cada corpo-de-prova foi seca superficialmente com toalhas de papel.



(a)



(b)

Figura 4.5 - Compressor para vácuo-pressão (a) e autoclave (b)

Para o tratamento "fervido", os corpos-de-prova foram introduzidos no caldeirão de fervura, com espaçadores, de modo que a água tivesse acesso livre a todas as superfícies. Depois os corpos-de-prova foram fervidos por 4 horas, e em seguida, foram secos em climatizadora com circulação de ar para um índice de umidade de 8% entre 18 a 20 horas. O ciclo de ferver e secar foram repetidos por 5 vezes, exceto durante o último ciclo, no qual os corpos-de-prova, após a fervura, foram mantidos submersos na água, resfriada até atingir a temperatura ambiente, até serem testados. Logo antes do teste, a superfície de cada corpo-de-prova foi seca superficialmente com toalhas de papel.

O processo da secagem em climatizadora (figura 4.6) foi monitorado pelo peso dos corpos-de-prova, e controlado pelo ajuste da abertura da entrada de ar.



Figura 4.6 – Corpos-de-prova nas prateleiras da climatizadora

4.2.3 - Ensaio de cisalhamento na lâmina de cola e de resistência da emenda dentada

Os ensaios de cisalhamento na lâmina de cola e de resistência da emenda dentada na tração paralela às fibras foram conduzidos de acordo com as recomendações da norma brasileira NBR 7190/97 “*Projeto de estruturas de madeira*”, quanto às dimensões dos corpos-de-prova e procedimentos de aplicação de força. Esses corpos-de-prova foram testados para os três tratamentos (seco, saturado e fervido).

Os corpos-de-prova de cisalhamento na lâmina de cola foram avaliados quanto à forma de ruptura quantificando-se a porcentagem de ruptura na madeira em função da área resistente ao cisalhamento.

Para o ensaio de resistência à tração de emendas dentadas, avaliaram-se os modos de ruptura de acordo com as recomendações da norma ASTM D 4688-99 “*Standard Test Method for Evaluating Structural Adhesives for Finger Jointing Lumber*”, citados no item 3.2.7 – “Forma de Análise dos Dados” do capítulo 3.

As avaliações de porcentagem de ruptura na madeira (para o ensaio de cisalhamento) e dos modos de ruptura (para o ensaio de resistência de emendas dentadas) foram feitas somente depois que os corpos-de-prova estarem secos.

4.2.4 - Ensaio de tração paralela às fibras

Para efeito de comparação com os resultados de resistência da emenda dentada foram feitos ensaios de tração paralela às fibras, de acordo com a norma brasileira NBR 7190/97 “*Projeto de estruturas de madeira*”, para o tratamento "seco". Como esses ensaios conduziram a uma grande porcentagem de corpos-de-prova com ruptura na garra, optou-se por reduzir a área da seção transversal do mesmo, de forma a se obter, efetivamente, a resistência da madeira na tração paralela às fibras. A figura 4.7 apresenta as dimensões dos corpos-de-prova da NBR 7190/97, e do corpo-de-prova proposto para o prosseguimento do trabalho. Esse último foi testado para os três tratamentos.

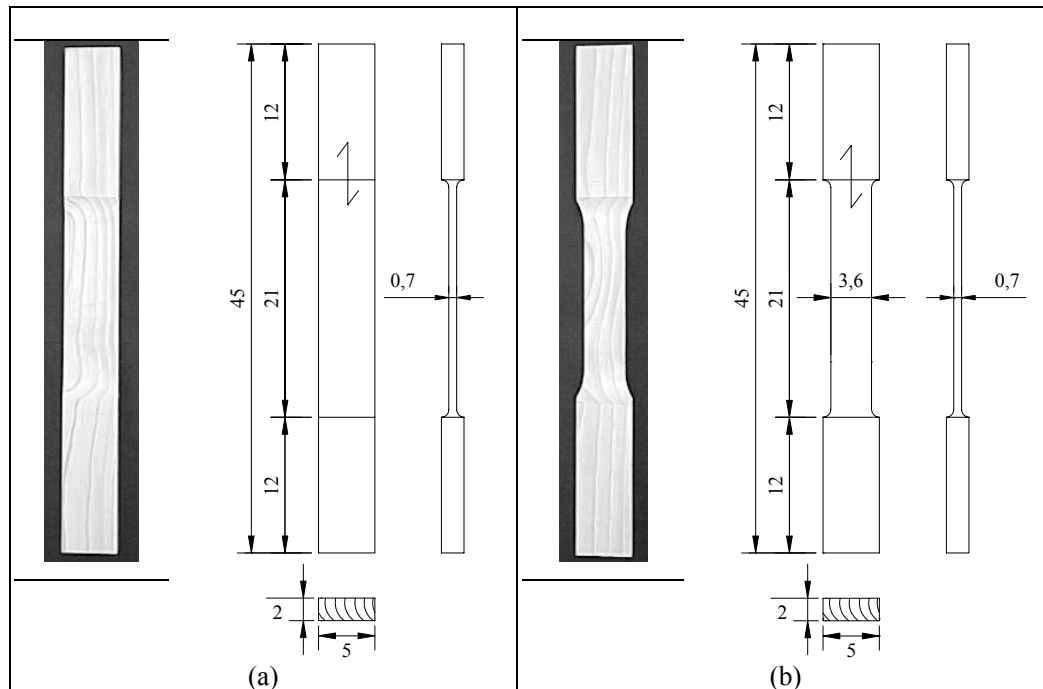


Figura 4.7 – (a) Corpo-de-prova da NBR 7190/97 e (b) corpo-de-prova proposto

4.2.5 - Plano experimental

A tabela 4.1 apresenta a quantidade de corpos-de-prova testados (total de 525), nos ensaios de cisalhamento na lâmina de cola e de resistência da emenda dentada, para cada tipo de adesivo, de espécie de madeira, de tratamento e de ensaio.

Tabela 4.1: Quantidade de corpos-de-prova testados (cisalhamento na lâmina de cola e resistência da emenda dentada).

Ensaio	Espécie de Madeira	TRATAMENTO									Total Parcial
		SECO			SATURADO			FERVIDO			
		Adesivos			Adesivos			Adesivos			
		Mamona	Purbond	Cas	Mamona	Purbond	Cas	Mamona	Purbond	Cas	
Cisalhamento na lâmina de cola	Pinus	25	-	25	25	-	25	25	-	25	150
	Eucalipto	25	-	25	25	-	25	25	-	25	150
Resistência da Emenda dentada	Pinus	25	25	25	25	25	25	25	25	25	225

Obs: Mamona (PU Mamona), Purbond e Cas (Cascophen)

Os testes de tração paralela às fibras foram feitos em 100 corpos-de-prova sem emendas dentadas, com as quantidades apresentadas na tabela 4.2, para cada tipo de corpo-de-prova, de espécie de madeira e de tratamento.

Tabela 4.2: Quantidade de corpos-de-prova testados (tração paralela às fibras).

Ensaio	Espécie de Madeira	TRATAMENTO			Total Parcial
		SECO	SATURADO	FERVIDO	
Tração paralela (NBR7190/97)	Pinus	25	-	-	25
Tração paralela (Proposta)	Pinus	25	25	25	75

Esses corpos-de-prova foram extraídos de peças de madeira classificadas visualmente e mecanicamente, tomando-se o cuidado de utilizar peças semelhantes quanto ao módulo de elasticidade, à quantidade de anéis de crescimento e proporção de madeira de inverno (no caso da madeira de Pinus), e à proporção de cerne (no caso da madeira de Eucalipto).

4.2.6 – Forma de análise dos dados

Para a avaliação dos resultados de resistência ao cisalhamento na lâmina de cola, foi usada uma análise dos dados por intermédio de um modelo geral linear, realizando-se uma análise de resíduos deste modelo. Com essa técnica estatística, pôde ser verificada a igualdade de variância, utilizando-se gráficos de resíduos contra valores estimados, e a normalidade da distribuição dos resultados, utilizando-se gráficos dos escores normais. No modelo geral linear, utilizou-se o fator representado por letras A, B e C, e seus níveis definidos por dígitos descritivos, a seguir:

- Espécie de madeira (Coluna A): **0** para Pinus e **1** para Eucalipto;
- Tipo de adesivo (Coluna B): **0** para Mamona e **1** para Cascophen;
- Tipo de tratamento (Coluna C): **1** para Seco, **0** para Saturado e **-1** para Fervido.

A tabela 4.3 representa a matriz modelo de planejamento empregada na pesquisa experimental.

Tabela 4.3: Matriz de planejamento – Cisalhamento na lâmina de cola.

GRUPOS	VARIÁVEIS			RESPOSTA (MPa)			
	Espécies de Madeiras	Adesivos	Tratamentos (seco, saturado, fervido)				
	A	B	C				
1	0	0	+1	Y _{1,1}	Y _{1,2}	...	Y _{1,25}
2	0	0	0	Y _{2,1}	Y _{2,2}	...	Y _{2,25}
3	0	0	-1	Y _{3,1}	Y _{3,2}	...	Y _{3,25}
4	0	1	+1	Y _{4,1}	Y _{4,2}	...	Y _{4,25}
5	0	1	0	Y _{5,1}	Y _{5,2}	...	Y _{5,25}
6	0	1	-1	Y _{6,1}	Y _{6,2}	...	Y _{6,25}
7	1	0	+1	Y _{7,1}	Y _{7,2}	...	Y _{7,25}
8	1	0	0	Y _{8,1}	Y _{8,2}	...	Y _{8,25}
9	1	0	-1	Y _{9,1}	Y _{9,2}	...	Y _{9,25}
10	1	1	+1	Y _{10,1}	Y _{10,2}	...	Y _{10,25}
11	1	1	0	Y _{11,1}	Y _{11,2}	...	Y _{11,25}
12	1	1	-1	Y _{12,1}	Y _{12,2}	...	Y _{12,25}

A primeira comparação foi feita entre os grupos 1 a 6, e a segunda comparação foi feita entre os grupos 7 a 12, respectivamente, para madeira Pinus e Eucalipto, com o objetivo de verificar o efeito dos adesivos e dos tratamentos. A terceira comparação foi feita entre todos os grupos (1 a 12), para verificar o efeito entre as espécies de madeira.

Nas três fases também foram efetuadas comparações de médias entre amostras de tamanhos iguais.

Os corpos-de-prova de cisalhamento na lâmina de cola foram avaliados quanto à forma de ruptura, observando-se a porcentagem de falha na madeira (P) na seção cisalhante, e classificados nos seguintes intervalos: $0\% \leq P < 20\%$; $20\% \leq P < 40\%$; $40\% \leq P < 60\%$; $60\% \leq P < 80\%$; e $80\% \leq P \leq 100\%$.

Para a avaliação dos resultados de resistência na emenda dentada colada, foi usada uma análise dos dados por intermédio de um modelo geral linear, realizando-se uma análise de resíduos deste modelo. Nesse modelo geral linear, utilizou-se o fator representado pelas letras A e B, e seus níveis definidos por dígitos descritos, a seguir:

- Tipos de adesivos (Coluna A): **-1** para PU Mamona, **0** para Purbond e **+1** para Cascophen;

- Tipo de tratamento (Coluna B): **+1** para Seco, **0** para Saturado e **-1** para Fervido.

A tabela 4.4 representa a matriz modelo de planejamento empregada na pesquisa experimental.

Tabela 4.4: Matriz de planejamento – Resistência de emendas dentadas coladas.

GRUPOS	VARIÁVEIS		RESPOSTA (MPa)			
	Adesivos (PU Mamona, Purbond e Cascophen)	Tratamentos (seco, saturado, fervido)				
	A	B				
1	-1	+1	Y _{1,1}	Y _{1,2}	...	Y _{1,25}
2	-1	0	Y _{2,1}	Y _{2,2}	...	Y _{2,25}
3	-1	-1	Y _{3,1}	Y _{3,2}	...	Y _{3,25}
4	0	+1	Y _{4,1}	Y _{4,2}	...	Y _{4,25}
5	0	0	Y _{5,1}	Y _{5,2}	...	Y _{5,25}
6	0	-1	Y _{6,1}	Y _{6,2}	...	Y _{6,25}
7	+1	+1	Y _{7,1}	Y _{7,2}	...	Y _{7,25}
8	+1	0	Y _{8,1}	Y _{8,2}	...	Y _{8,25}
9	+1	-1	Y _{9,1}	Y _{9,2}	...	Y _{9,25}

Para a avaliação dos resultados de resistência à tração paralela (sem emendas), foi usada uma análise dos dados por intermédio de um modelo geral linear, realizando-se uma análise de resíduos deste modelo. Nesse modelo geral linear, utilizou-se o fator representado pelas letras A, B e C, e seus níveis definidos por dígitos descritos, a seguir:

- Sem emendas (Coluna A): **0** para o corpo-de-prova estabelecido pela norma e **+1** para o corpo-de-prova proposto;
- Tipo de tratamento (Coluna B): **+1** para Seco, **0** para Saturado e **-1** para Fervido.

Tabela 4.5: Matriz de planejamento – Resistência à tração paralela.

GRUPOS	VARIÁVEIS		RESPOSTA (MPa)			
	Sem emendas (Norma, proposto)	Tratamentos (seco, saturado, fervido)				
	A	B				
10	0	+1	Y _{10,1}	Y _{10,2}	...	Y _{10,25}
11	+1	+1	Y _{11,1}	Y _{11,2}	...	Y _{11,25}
12	+1	0	Y _{12,1}	Y _{12,2}	...	Y _{12,25}
13	+1	-1	Y _{13,1}	Y _{13,2}	...	Y _{13,25}

A análise dos dados foi dividida em três fases: A primeira comparação foi feita entre os grupos 1 a 9, e a segunda comparação foi feita entre os grupos 10 a 13 com o objetivo de verificar o efeito, respectivamente, dos adesivos e dos tratamentos, e corpos-de-prova sem

emendas e tratamentos. A terceira comparação foi feita entre os grupos 11 a 13 versus os grupos 1 a 9, para verificar a eficiência dos tratamentos versus o controle.

Os corpos-de-prova, de resistência de emenda dentada, foram avaliados quanto aos modos de ruptura. As formas de ruptura dos corpos-de-prova de resistência à tração (sem emendas) foram avaliadas de três formas distintas: ruptura na garra, ruptura próxima à região da garra, e ruptura na região central do corpo-de-prova, respectivamente, doravante denominadas “Garra”, “Próximo” e “Corpo”, conforme a figura 4.8.

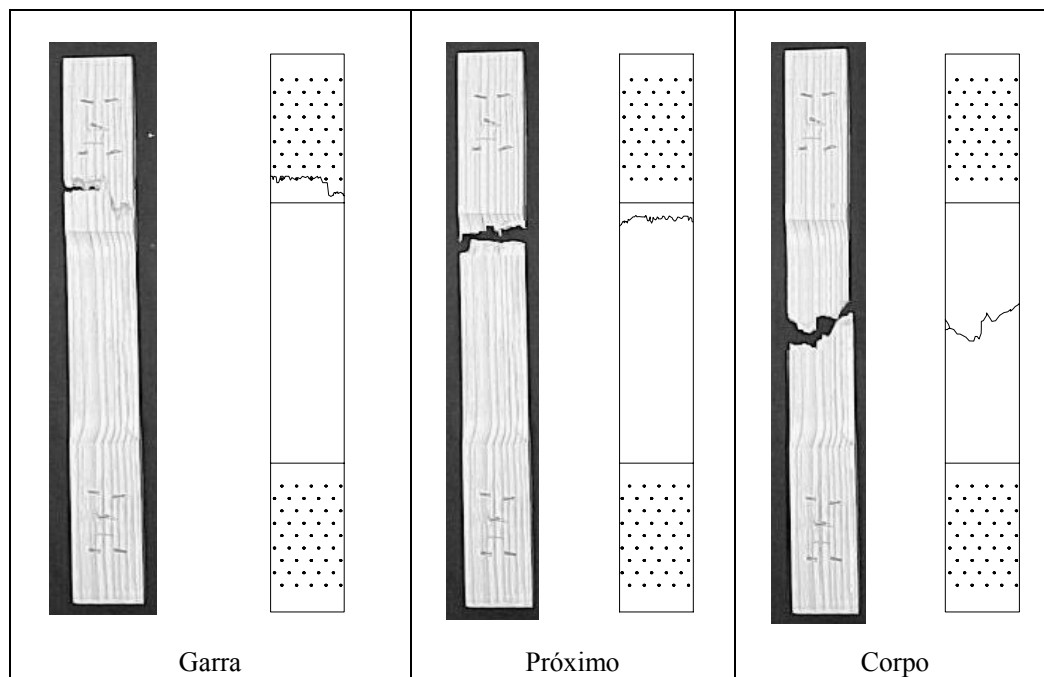


Figura 4.8 – Formas de ruptura à tração (sem emendas).

4.3 - RESULTADOS OBTIDOS

A tabela 4.6 e a tabela 4.7 apresentam, respectivamente para a madeira Pinus e Eucalipto, os valores obtidos nos ensaios de cisalhamento na lâmina de cola (resistência e porcentagem de falha na madeira).

Tabela 4.6: Resistência (MPa) ao cisalhamento e porcentagem de falha na madeira - Pinus

REPETIÇÕES	TRATAMENTOS					
	SECO		SATURADO		FERVIDO	
	Mamona	Cascophen	Mamona	Cascophen	Mamona	Cascophen
1	7,6 (0%)	11,4 (89%)	3,6 (0%)	6,8 (28%)	3,7 (7%)	6,6 (100%)
2	10,4 (3%)	9,7 (37%)	6,3 (0%)	2,2 (0%)	3,7 (0%)	6,4 (4%)
3	12,0 (2%)	9,3 (90%)	7,6 (0%)	7,1 (94%)	7,6 (0%)	5,2 (100%)
4	11,5 (12%)	11,5 (100%)	4,1 (0%)	4,8 (100%)	3,4 (0%)	2,2 (20%)
5	10,9 (9%)	12,2 (100%)	6,4 (0%)	4,4 (93%)	3,8 (0%)	5,4 (3)
6	9,8 (29%)	3,8 (50%)	7,5 (3%)	7,1 (93%)	5,6 (2%)	4,5 (65%)
7	8,8 (34%)	14,3 (25%)	3,8 (3%)	5,4 (100%)	6,8 (12%)	5,6 (90%)
8	11,3 (5%)	8,6 (48%)	5,6 (0%)	5,9 (3%)	5,5 (2%)	7,0 (13%)
9	11,7 (75%)	9,7 (100%)	6,3 (0%)	7,7 (50%)	7,0 (2%)	5,3 (55%)
10	11,0 (5%)	11,9 (71%)	6,4 (0%)	6,6 (33%)	3,5 (15%)	5,0 (12%)
11	10,2 (6%)	11,1 (21%)	6,7 (30%)	7,1 (30%)	4,7 (0%)	5,1 (30%)
12	5,9 (4%)	12,6 (19%)	7,2 (5%)	7,1 (40%)	2,1 (0%)	6,0 (100%)
13	3,4 (0%)	13,0 (7%)	3,5 (0%)	6,8 (90%)	6,1 (0%)	6,3 (30%)
14	13,6 (45%)	9,0 (-)	5,5 (0%)	8,1 (60%)	1,2 (0%)	5,2 (20%)
15	6,3 (6%)	1,6 (6%)	2,6 (0%)	4,7 (100%)	2,2 (0%)	6,4 (45%)
16	10,4 (8%)	15,4 (24%)	6,2 (0%)	8,2 (85%)	5,0 (0%)	7,1 (80%)
17	7,3 (5%)	15,9 (90%)	5,9 (4%)	6,5 (100%)	2,4 (0%)	5,2 (4%)
18	9,9 (30%)	10,7 (80%)	1,5 (0%)	7,2 (76%)	6,3 (15%)	6,3 (90%)
19	9,1 (8%)	10,3 (25%)	4,6 (0%)	6,1 (70%)	4,5 (4%)	7,8 (37%)
20	10,3 (10%)	10,7 (100%)	4,6 (2%)	5,3 (100%)	5,7 (0%)	4,6 (88%)
21	3,4 (0%)	11,4 (55%)	9,2 (10%)	7,7 (90%)	2,8 (0%)	4,9 (37%)
22	5,8 (8%)	7,6 (100%)	5,0 (10%)	5,2 (70%)	3,5 (0%)	5,1 (100%)
23	14,0 (10%)	11,9 (90%)	4,1 (3%)	5,2 (30%)	2,7 (0%)	7,2 (100%)
24	9,0 (8%)	13,3 (50%)	1,5 (0%)	6,3 (90%)	6,2 (0%)	7,6 (92%)
25	10,4 (12%)	11,6 (10%)	2,6 (0%)	7,4 (90%)	7,2 (10%)	5,8 (85%)
Média	9,4	10,7	5,1	6,3	4,5	5,7
Desvio Padrão	2,8	3,1	2,0	1,4	1,8	1,2
CV %	30	29	38	22	40	21

Tabela 4.7: Resistência (MPa) ao cisalhamento e porcentagem de falha na madeira - Eucalipto

REPETIÇÕES	TRATAMENTOS					
	SECO		SATURADO		FERVIDO	
	Mamona	Cascophen	Mamona	Cascophen	Mamona	Cascophen
1	9,4 (97%)	7,2 (100%)	5,4 (50%)	8,4 (-)	5,8 (90%)	7,3 (100%)
2	6,7 (72%)	7,4 (99%)	7,3 (100%)	6,6 (70%)	6,4 (64%)	5,4 (80%)
3	12,3 (89%)	8,6 (100%)	6,9 (100%)	7,4 (94%)	5,5 (42%)	7,3 (38%)
4	7,3 (100%)	9,4 (46%)	4,7 (100%)	6,9 (100%)	5,9 (100%)	5,8 (97%)
5	9,2 (100%)	7,3 (100%)	10,2 (100%)	6,3 (98%)	6,4 (100%)	7,3 (100%)
6	5,3 (100%)	9,9 (100%)	7,8 (0%)	5,1 (75%)	6,3 (85%)	5,3 (100%)
7	12,0 (90%)	9,6 (100%)	8,0 (100%)	8,0 (100%)	6,2 (100%)	5,4 (85%)
8	6,6 (100%)	5,5 (33%)	6,6 (85%)	4,5 (87%)	5,2 (100%)	6,8 (70%)
9	9,3 (100%)	11,8 (100%)	6,4 (3%)	10,8 (100%)	6,5 (100%)	4,9 (90%)
10	8,9 (100%)	9,2 (90%)	7,9 (5%)	9,5 (100%)	7,1 (100%)	6,3 (100%)
11	8,9 (100%)	11,0 (100%)	6,3 (30%)	6,0 (100%)	6,3 (100%)	7,8 (90%)
12	5,5 (55%)	10,4 (100%)	3,4 (2%)	6,5 (100%)	5,5 (10%)	3,9 (100%)
13	10,7 (100%)	9,7 (100%)	8,7 (90%)	4,4 (100%)	3,9 (100%)	6,4 (100%)
14	7,9 (100%)	7,7 (100%)	5,6 (0%)	8,1 (100%)	4,3 (100%)	7,3 (100%)
15	9,1 (100%)	9,5 (100%)	9,2 (3%)	7,3 (90%)	5,5 (100%)	7,2 (10%)
16	10,9 (90%)	10,9 (100%)	4,0 (0%)	5,4 (20%)	5,7 (30%)	4,9 (90%)
17	6,8 (100%)	9,1 (100%)	2,3 (0%)	8,0 (100%)	2,8 (100%)	4,8 (80%)
18	9,2 (37%)	1,1 (8%)	4,2 (0%)	7,5 (85%)	6,9 (100%)	6,2 (100%)
19	3,7 (100%)	9,0 (100%)	5,6 (100%)	10,4 (90%)	6,8 (0%)	4,5 (100%)
20	10,0 (100%)	9,0 (100%)	3,3 (0%)	7,4 (80%)	1,6 (100%)	2,1 (90%)
21	8,3 (100%)	7,5 (15%)	7,1 (0%)	10,9 (70%)	4,5 (100%)	4,8 (30%)
22	8,6 (100%)	11,8 (100%)	7,7 (8%)	7,5 (90%)	9,8 (100%)	2,0 (18%)
23	2,2 (11%)	8,3 (32%)	9,6 (5%)	7,4 (100%)	3,7 (100%)	7,4 (95%)
24	5,9 (100%)	6,7 (100%)	11,4 (100%)	7,0 (95%)	9,4 (-)	7,1 (100%)
25	14,6 (90%)	8,8 (100%)	7,2 (90%)	5,5 (95%)	6,5 (-)	4,6 (100%)
Média	8,4	8,7	6,7	7,3	5,8	5,7
Desvio Padrão	2,7	2,2	2,3	1,8	1,8	1,6
CV %	33	25	34	24	31	28

A tabela 4.8 apresenta os valores obtidos nos ensaios das emendas dentadas (resistência e os modos de ruptura).

Tabela 4.8: Resistência (MPa) de emendas dentadas à tração e modos de ruptura - Pinus.

Repetições	TRATAMENTOS								
	SECO			SATURADO			FERVIDO		
	Mamona	Purbond	Cascophen	Mamona	Purbond	Cascophen	Mamona	Purbond	Cascophen
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
	f_{t0} (MPa)	f_{t0} (MPa)	f_{t0} (MPa)	f_{t0} (MPa)	f_{t0} (MPa)	f_{t0} (MPa)	f_{t0} (MPa)	f_{t0} (MPa)	f_{t0} (MPa)
1	46,3 ⁽²⁾	53,6 ⁽⁴⁾	55,8 ⁽³⁾	20,6 ⁽¹⁾	23,8 ⁽¹⁾	30,6 ⁽⁴⁾	19,4 ⁽¹⁾	29,2 ⁽¹⁾	41,3 ⁽⁵⁾
2	52,1 ⁽³⁾	39,1 ⁽³⁾	45,6 ^(*)	27,2 ⁽¹⁾	30,5 ⁽¹⁾	34,3 ⁽⁴⁾	32,9 ⁽¹⁾	19,8 ⁽²⁾	30,0 ⁽⁴⁾
3	40,2 ⁽²⁾	49,2 ⁽⁴⁾	56,7 ⁽⁴⁾	33,5 ⁽¹⁾	15,5 ⁽¹⁾	38,0 ⁽⁴⁾	22,7 ⁽¹⁾	15,5 ⁽¹⁾	26,6 ⁽⁴⁾
4	40,4 ⁽³⁾	38,4 ⁽³⁾	57,5 ⁽⁶⁾	27,6 ⁽¹⁾	26,7 ⁽¹⁾	45,2 ⁽⁶⁾	20,8 ⁽¹⁾	20,8 ⁽¹⁾	38,1 ⁽⁴⁾
5	52,6 ⁽⁴⁾	47,9 ⁽²⁾	29,3 ⁽⁴⁾	18,0 ⁽¹⁾	21,5 ⁽³⁾	36,7 ⁽⁴⁾	34,5 ⁽¹⁾	21,4 ⁽²⁾	34,0 ⁽²⁾
6	45,4 ⁽⁴⁾	38,2 ⁽³⁾	51,7 ^(*)	29,0 ⁽¹⁾	23,4 ⁽²⁾	46,1 ⁽⁴⁾	36,4 ⁽¹⁾	14,5 ⁽¹⁾	39,9 ⁽²⁾
7	31,8 ⁽³⁾	32,4 ⁽³⁾	47,8 ⁽³⁾	34,5 ⁽³⁾	19,5 ⁽²⁾	24,0 ⁽⁴⁾	24,9 ⁽¹⁾	23,8 ⁽¹⁾	37,8 ⁽³⁾
8	45,4 ⁽³⁾	39,2 ⁽⁴⁾	38,5 ^(*)	38,0 ⁽²⁾	20,4 ⁽²⁾	39,2 ⁽⁴⁾	23,0 ⁽¹⁾	20,0 ⁽¹⁾	32,9 ⁽³⁾
9	49,1 ⁽³⁾	44,8 ⁽¹⁾	49,1 ⁽⁴⁾	17,5 ⁽³⁾	19,0 ⁽¹⁾	37,6 ⁽²⁾	27,2 ⁽¹⁾	16,3 ⁽¹⁾	34,8 ⁽³⁾
10	44,1 ⁽³⁾	46,9 ⁽⁴⁾	58,3 ⁽³⁾	38,8 ⁽³⁾	23,0 ⁽¹⁾	46,0 ⁽³⁾	28,6 ⁽¹⁾	30,1 ⁽³⁾	38,1 ⁽³⁾
11	46,6 ⁽¹⁾	32,1 ⁽¹⁾	54,8 ⁽⁴⁾	27,7 ⁽¹⁾	21,7 ⁽¹⁾	40,7 ⁽⁴⁾	28,5 ⁽¹⁾	25,1 ⁽²⁾	38,6 ⁽⁴⁾
12	49,2 ⁽⁴⁾	61,6 ⁽⁵⁾	51,0 ^(*)	30,3 ⁽¹⁾	22,0 ⁽¹⁾	38,3 ⁽⁴⁾	33,8 ⁽¹⁾	19,8 ⁽¹⁾	44,2 ⁽³⁾
13	34,0 ⁽¹⁾	49,0 ⁽³⁾	44,2 ⁽⁴⁾	42,3 ⁽²⁾	26,7 ⁽¹⁾	36,1 ⁽⁴⁾	10,8 ⁽¹⁾	26,8 ⁽²⁾	41,0 ⁽³⁾
14	60,3 ⁽³⁾	52,1 ⁽³⁾	39,3 ⁽⁴⁾	25,6 ⁽¹⁾	23,3 ⁽¹⁾	53,9 ⁽⁴⁾	39,2 ⁽³⁾	29,0 ⁽¹⁾	27,0 ⁽⁴⁾
15	47,5 ⁽⁶⁾	39,7 ⁽⁴⁾	46,0 ⁽⁴⁾	32,8 ⁽¹⁾	23,0 ⁽¹⁾	33,4 ⁽⁴⁾	34,8 ⁽¹⁾	27,8 ⁽³⁾	42,5 ⁽⁴⁾
16	45,3 ⁽³⁾	40,4 ⁽⁴⁾	54,5 ^(*)	32,9 ⁽¹⁾	31,9 ⁽³⁾	35,5 ⁽²⁾	20,9 ⁽³⁾	16,8 ⁽¹⁾	38,0 ⁽³⁾
17	42,6 ⁽³⁾	30,2 ⁽⁴⁾	62,3 ⁽⁴⁾	30,5 ⁽¹⁾	20,1 ⁽¹⁾	33,7 ⁽⁶⁾	29,6 ⁽¹⁾	14,0 ⁽¹⁾	31,2 ⁽⁵⁾
18	35,4 ⁽³⁾	47,4 ⁽⁴⁾	45,4 ^(*)	28,0 ⁽¹⁾	23,4 ⁽¹⁾	47,0 ⁽³⁾	23,5 ⁽¹⁾	18,3 ⁽¹⁾	38,4 ⁽⁴⁾
19	46,2 ⁽⁴⁾	43,5 ⁽³⁾	48,2 ⁽⁴⁾	24,7 ⁽¹⁾	32,0 ⁽²⁾	39,7 ⁽³⁾	31,0 ⁽¹⁾	24,1 ⁽⁴⁾	26,2 ⁽³⁾
20	41,7 ⁽³⁾	23,2 ⁽³⁾	53,2 ⁽⁴⁾	32,3 ⁽²⁾	29,3 ⁽¹⁾	29,3 ⁽³⁾	23,8 ⁽¹⁾	15,9 ⁽¹⁾	38,3 ⁽²⁾
21	44,8 ⁽⁴⁾	44,6 ⁽²⁾	66,5 ^(*)	30,3 ⁽¹⁾	15,8 ⁽¹⁾	30,4 ⁽⁴⁾	32,6 ⁽³⁾	25,4 ⁽¹⁾	31,0 ⁽⁴⁾
22	48,7 ⁽³⁾	36,8 ⁽³⁾	45,2 ⁽⁴⁾	25,4 ⁽¹⁾	25,8 ⁽³⁾	29,1 ⁽⁴⁾	39,9 ⁽¹⁾	25,7 ⁽²⁾	27,3 ⁽⁴⁾
23	54,4 ⁽⁴⁾	40,5 ⁽⁴⁾	42,5 ⁽⁴⁾	22,4 ⁽¹⁾	22,3 ⁽¹⁾	38,4 ⁽⁴⁾	11,4 ⁽¹⁾	21,3 ⁽¹⁾	40,5 ⁽⁵⁾
24	48,2 ⁽³⁾	48,2 ⁽³⁾	44,0 ⁽⁵⁾	29,2 ⁽²⁾	24,2 ⁽¹⁾	26,6 ⁽⁴⁾	28,6 ⁽¹⁾	23,5 ⁽¹⁾	39,5 ⁽⁵⁾
25	47,2 ⁽⁴⁾	53,3 ⁽²⁾	67,2 ⁽⁴⁾	35,6 ⁽¹⁾	24,3 ⁽¹⁾	45,5 ⁽²⁾	28,0 ⁽³⁾	29,4 ⁽³⁾	34,0 ⁽⁴⁾
Média	45,6	42,9	50,2	29,4	23,6	37,4	27,5	22,2	33,5
Desvio	6,3	8,5	8,8	6,2	4,3	7,2	7,7	5,0	5,3
CV %	14	20	18	21	18	19	28	23	16

(*) Ruptura na garra

A tabela 4.9 apresenta os valores obtidos nos ensaios de tração paralela às fibras (resistência e o modo de ruptura).

Tabela 4.9: Resistência (MPa) à tração paralela as fibras da madeira, para a espécie Pinus.

Repetições	TRATAMENTOS							
	SECO				SATURADO		FERVIDO	
	Norma		Proposta		Proposta		Proposta	
	A		B		C		D	
	f _{t0} (MPa)	Modo	f _{t0} (MPa)	Modo	f _{t0} (MPa)	Modo	f _{t0} (MPa)	Modo
1	47,2	Garra	120,0	Corpo	47,4	Garra	68,6	Corpo
2	70,8	Próximo	91,3	Garra	95,9	Corpo	49,6	Próximo
3	82,4	Próximo	73,8	Garra	91,8	Corpo	84,1	Corpo
4	89,4	Próximo	74,5	Corpo	81,3	Corpo	53,1	Corpo
5	83,7	Próximo	92,1	Próximo	73,5	Corpo	58,9	Corpo
6	60,5	Garra	120,2	Corpo	61,6	Corpo	57,7	Corpo
7	47,7	Garra	77,2	Corpo	60,1	Corpo	85,1	Garra
8	69,5	Garra	73,9	Corpo	84,8	Corpo	78,8	Corpo
9	112,3	Próximo	92,0	Corpo	80,8	Corpo	78,0	Próximo
10	97,2	Corpo	75,4	Corpo	49,0	Próximo	77,9	Corpo
11	86,8	Próximo	71,0	Corpo	101,0	Corpo	107,2	Corpo
12	94,2	Próximo	129,6	Próximo	43,4	Corpo	55,6	Corpo
13	83,9	Corpo	144,7	Corpo	74,5	Próximo	66,5	Corpo
14	96,1	Garra	83,1	Corpo	51,9	Garra	51,0	Corpo
15	107,4	Garra	87,2	Corpo	66,4	Garra	69,9	Corpo
16	90,0	Garra	93,3	Garra	92,6	Garra	56,2	Corpo
17	90,1	Garra	104,3	Corpo	47,0	Garra	124,1	Corpo
18	86,1	Garra	123,6	Corpo	48,0	Garra	57,0	Próximo
19	86,1	Garra	83,6	Corpo	81,0	Corpo	67,6	Corpo
20	88,6	Garra	78,8	Garra	47,1	Próximo	61,2	Corpo
21	77,4	Garra	92,1	Corpo	105,1	Corpo	52,2	Próximo
22	104,1	Garra	137,2	Corpo	75,0	Próximo	48,7	Garra
23	103,2	Garra	91,4	Próximo	66,1	Corpo	75,5	Próximo
24	72,2	Garra	90,9	Corpo	65,2	Corpo	75,0	Corpo
25	77,9	Garra	108,4	Próximo	91,6	Garra	70,9	Próximo
Média	84,2	-	96,4	-	71,3	-	69,2	-
Desvio Padrão	16,5	-	21,4	-	19,0	-	18,0	-
CV %	20	-	22	-	27	-	26	-

4.4 – ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.4.1 – Resistência ao cisalhamento na lâmina de cola

4.4.1.1 – Comparação de médias entre corpos-de-prova de cisalhamento colados (Mamona e Cascophen), na espécie Pinus.

Os gráficos das figuras C-7, C-8 e C-9 (anexo C) mostram um indicativo de distribuição normal e variância constantes. Desta forma, os dados foram tratados como dados paramétricos e a Análise de Variância (ANOVA) foi aplicada. A tabela 4.10 apresenta o quadro da ANOVA.

Tabela 4.10: Tabela ANOVA para resistência ao cisalhamento na lâmina colada, espécie Pinus.

Fonte	GL	SQ	QM	Razão
Adesivos (Mamona e Cascophen)	1	58,53	58,53	12,73
Tratamentos (Seco, saturado e fervido)	2	721,90	360,95	78,52
Erro	146	671,13	4,60	
Total	149	1451,56		

A razão observada com GL = (1, 146) é igual a 12,73. Como o valor de F tabelado, para um nível de confiança de 95%, é igual a 3,84 verifica-se que a razão observada cai na região de rejeição ($12,73 > 3,84$), podendo-se concluir que os dados fornecem evidência suficiente para rejeitar a hipótese nula, isto é, existe diferença significativa entre pelo menos duas médias das resistências ao cisalhamento na lâmina de cola para os adesivos testados. Pode-se observar também que a maior fonte de variação é devida ao tipo de tratamento (seco, saturado e fervido).

Para identificar as diferenças entre os tipos de adesivos e tratamentos, utilizou-se o método da “Diferença Menos Significativa” (LSD).

$$LSD = t_{\frac{\alpha}{2}, v} * \sqrt{\frac{2 * QM_{erro}}{n}} = 1,98 * \sqrt{\frac{2 * 4,60}{25}} = 1,20 \quad (4.1)$$

A tabela 4.11 apresenta as diferenças entre os valores médios da resistência para determinado adesivo e tratamento, que pode ser comparado com o valor do $LSD=1,20$. Nessa tabela, os valores médios estão dispostos em ordem decrescente.

Tabela 4.11: Diferença entre os valores médios das resistências para os adesivos/tratamentos.

	Cascophen (Seco)	Mamona (Seco)	Cascophen (Saturado)	Cascophen (Fervido)	Mamona (Saturado)	Mamona (Fervido)
Cascophen (Seco)	0,00					
Mamona (Seco)	1,38	0,00				
Cascophen (Saturado)	<u>4,46</u>	3,08	0,00			
Cascophen (Fervido)	<u>4,99</u>	3,61	<u>0,53</u>	0,00		
Mamona (Saturado)	5,61	<u>4,23</u>	1,15	0,62	0,00	
Mamona (Fervido)	6,22	<u>4,80</u>	1,75	1,22	<u>0,60</u>	0,00

Conforme pode ser observado na tabela 4.11, o adesivo Cascophen apresentou melhores resultados de resistência em relação ao adesivo PU Mamona para os tratamentos seco e fervido ($1,38 > 1,20$ e $1,22 > 1,20$), e resultados estatisticamente equivalentes no caso do tratamento saturado ($1,15 < 1,20$); salienta-se que, no caso dos tratamentos saturado e fervido, as diferenças observadas entre os dois adesivos ficaram próximas ao valor limite. Assim, pode-se concluir que o adesivo Cascophen apresentou desempenho superior.

Os dois adesivos apresentam, de maneira semelhante, resistência menor para os tratamentos saturado e fervido, em comparação ao tratamento seco (respectivamente: $4,46 > 1,20$ e $4,99 > 1,2$, para o Cascophen; $4,23 > 1,20$ e $4,80 > 1,20$, para o óleo de mamona). Também se observa, para os dois adesivos, que não existe diferença significativa estatisticamente entre os tratamentos saturado e fervido ($0,53 < 1,20$, para o Cascophen, e $0,60 < 1,20$, para o óleo de mamona).

A figura 4.9 mostra um esquema gráfico da diferença de resistência entre os adesivos.

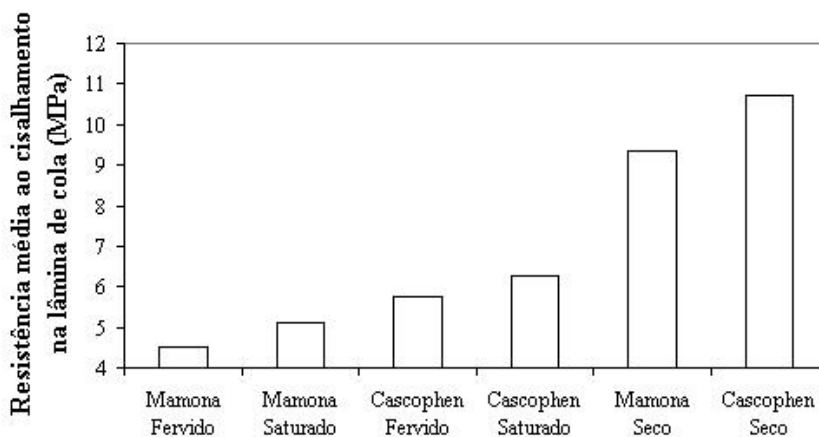


Figura 4.9 - Valores médios de resistência ao cisalhamento na lâmina de cola para os diferentes tratamentos, para a espécie Pinus.

4.4.1.2 – Comparação de médias entre corpos-de-prova de cisalhamento colados (Mamona e Cascophen), para espécie Eucalipto.

Os gráficos das figuras C-10, C-11 e C-12 mostram um indicativo de distribuição normal e variância constante. Desta forma, os dados foram tratados como dados paramétricos e a Análise de Variância (ANOVA) foi aplicada. A tabela 4.12 apresenta o quadro da ANOVA.

Tabela 4.12: Tabela ANOVA para resistência ao cisalhamento na lâmina colada, espécie Eucalipto.

Fonte	GL	SQ	QM	Razão
Adesivos (Mamona e Cascophen)	1	2,94	2,94	0,68
Tratamentos (Seco, saturado e fervido)	2	191,42	95,71	22,20
Erro	146	629,53	4,31	
Total	149	823,89		

A razão observada com $GL = (1, 146)$ é igual a 0,68. Como o valor de F tabelado, para um nível de confiança de 95%, é igual a 3,84 verifica-se que a razão observada cai na região de não rejeição ($0,68 < 3,84$), podendo-se concluir que os dados não fornecem evidência suficiente para rejeitar a hipótese nula, isto é, não existe diferença significativa entre as médias das resistências ao cisalhamento na lâmina de cola para os adesivos testados. Com relação às diferenças entre os tratamentos (seco, saturado e fervido), como $22,20 > 3,84$ (tabelado), podemos concluir que existem diferenças significativas entre pelo menos dois dos tratamentos (seco, saturado e fervido).

Para identificar essas diferenças entre os tipos de adesivos e tratamentos, utilizou-se o método da “Diferença Menos Significativa” (LSD).

$$LSD = t_{\frac{\alpha}{2}, v} * \sqrt{\frac{2 * QM_{erro}}{n}} = 1,98 * \sqrt{\frac{2 * 4,31}{25}} = 1,16 \quad (4.2)$$

A tabela 4.13 apresenta as diferenças entre os valores médios da resistência para determinado adesivo e tratamento, que pode ser comparado com o valor do $LSD=1,16$. Nessa tabela, os valores médios estão dispostos em ordem decrescente.

Tabela 4.13: Diferença entre as resistências médias dos adesivos.

	Cascophen (Seco)	Mamona (Seco)	Cascophen (Saturado)	Mamona (Saturado)	Mamona (Fervido)	Cascophen (Fervido)
Cascophen (Seco)	0,00					
Mamona (Seco)	0,29	0,00				
Cascophen (Saturado)	<u>1,36</u>	1,06	0,00			
Mamona (Saturado)	1,99	<u>1,69</u>	0,63	0,00		
Mamona (Fervido)	2,90	<u>2,60</u>	1,54	<u>0,91</u>	0,00	
Cascophen (Fervido)	<u>2,95</u>	2,70	<u>1,60</u>	0,96	0,05	0,00

Conforme pode ser observado na tabela 4.13, o adesivo PU Mamona apresentou resultados estatisticamente equivalentes ao adesivo Cascophen para os tratamentos seco, saturado e fervido ($0,29 < 1,16$, $0,63 < 1,16$ e $0,05 < 1,16$). Salienta-se que as diferenças observadas entre os dois adesivos ficaram longe do valor limite. Assim, pode-se concluir que os adesivos apresentaram desempenhos semelhantes.

Os dois adesivos apresentam, de maneira semelhante, resistência menor para os tratamentos saturado e fervido, em comparação ao tratamento seco (respectivamente: $1,36 > 1,16$ e $2,95 > 1,16$, para o Cascophen; $1,69 > 1,16$ e $2,60 > 1,16$, para o adesivo PU Mamona). Também se observa, para o adesivo PU Mamona, que não existe diferença significativa estatisticamente entre os tratamentos saturado e fervido ($0,91 < 1,16$). Nota-se, para o adesivo Cascophen, que o tratamento saturado apresentou melhor resultado que o tratamento fervido ($1,60 > 1,16$).

A figura 4.10 mostra um esquema gráfico da diferença de resistência entre os adesivos.

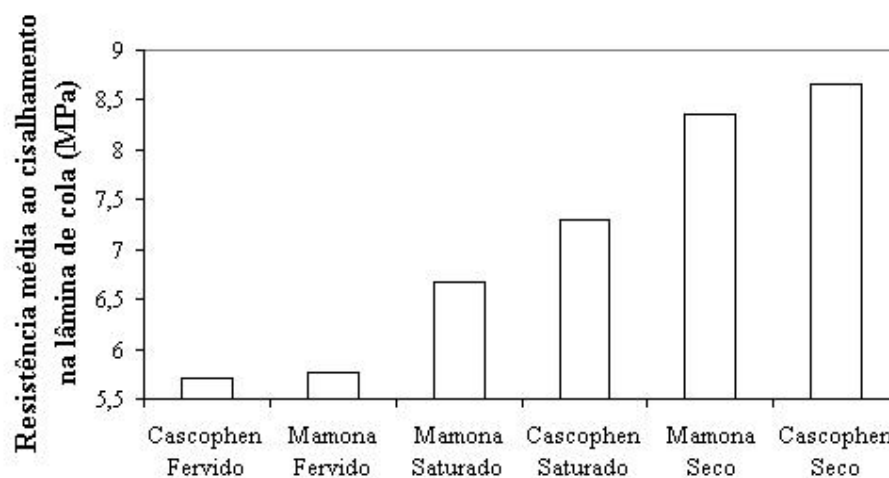


Figura 4.10 - Valores médios de resistência ao cisalhamento na lâmina de cola para os diferentes tratamentos, para a espécie Eucalipto.

4.4.1.3 – Comparação entre os valores médios das resistências para as duas espécies

Com a finalidade de comparar o desempenho dos adesivos, para os três tratamentos, em relação à espécie de madeira, a tabela 4.14 apresenta os valores médios das resistências obtidas pelos adesivos, nos três tratamentos, para as duas espécies. Também são apresentadas as razões entre a resistência do óleo de mamona e do Cascophen em cada tratamento, para o Pinus e o Eucalipto.

Tabela 4.14: Razão entre as resistências médias dos adesivos.

	Adesivos	TRATAMENTOS		
		SECO	SATURADO	FERVIDO
Resistência Pinus f_v (MPa)	Mamona	9,4	5,1	4,5
	Cascophen (controle)	10,7	6,3	5,7
Razão entre resistências (Pinus)	Mamona/Cascophen	0,88	0,81	0,79
Resistência Eucaliptos f_v (MPa)	Mamona	8,40	6,70	5,80
	Cascophen (Controle)	8,70	7,30	5,70
Razão entre resistências (Eucalipto)	Mamona/Cascophen	0,97	0,92	1,02

Para a espécie Pinus, observa-se que o adesivo de óleo de mamona apresentou resultados inferiores para todos os tratamentos (seco, saturado e fervido). As relações de resistência de 0,88, 0,81 e 0,79 indicam que o adesivo de Mamona apresenta um comportamento de durabilidade similar ao adesivo Cascophen, isto é, a razão entre as resistências não se alterou muito para os três tratamentos, apesar da maior razão ser observada para o tratamento seco.

Para a espécie Eucalipto, obtiveram-se razões de resistência próximas à unidade, para todos os tratamentos, denotando um comportamento semelhante para os dois adesivos, também em termos de durabilidade.

Com isso, evidencia-se que o adesivo de mamona apresentou melhores resultados de colagem para a espécie Eucalipto, em relação à espécie Pinus.

Com a finalidade de comparar a perda de resistência dos adesivos quando submetidos ao tratamento saturado e fervido, em relação ao tratamento seco, para cada espécie de madeira, a tabela 4.15 apresenta as razões entre a resistência com base no tratamento seco, para o Pinus e o Eucalipto.

Tabela 4.15: Perda de resistência - razão entre resistências com base no tratamento seco.

Espécies	Razões	Adesivos	
		PU Mamona	Cascophen
Pinus	Saturado/Seco	0,54	0,59
	Fervido/Seco	0,48	0,53
Eucalipto	Saturado/Seco	0,80	0,84
	Fervido/Seco	0,69	0,66

Observa-se, de maneira geral, que o adesivo PU Mamona apresentou resultados inferiores para todas as razões (Saturado/Seco e Fervido/Seco), exceto para a espécie Eucalipto na razão Fervido/Seco. As relações de resistência indicam que o adesivo PU Mamona apresenta um comportamento de durabilidade similar ao adesivo Cascophen, isto é, a razão entre as resistências não se alterou muito em relação aos tratamentos Saturado/Seco e Fervido/Seco. Além disso, pode-se observar que o adesivo PU Mamona e Cascophen apresentaram melhores razões para a espécie Eucalipto.

4.4.1.4 – Porcentagem de falha na madeira

Para a análise da porcentagem de falha na madeira (P), os resultados obtidos nos testes foram agrupados em intervalos a cada 20%. As figuras 4.11 e 4.12, respectivamente para as espécies Pinus e Eucalipto, mostram a distribuição percentual dos corpos-de-prova em cada um dos grupos, para cada tratamento.

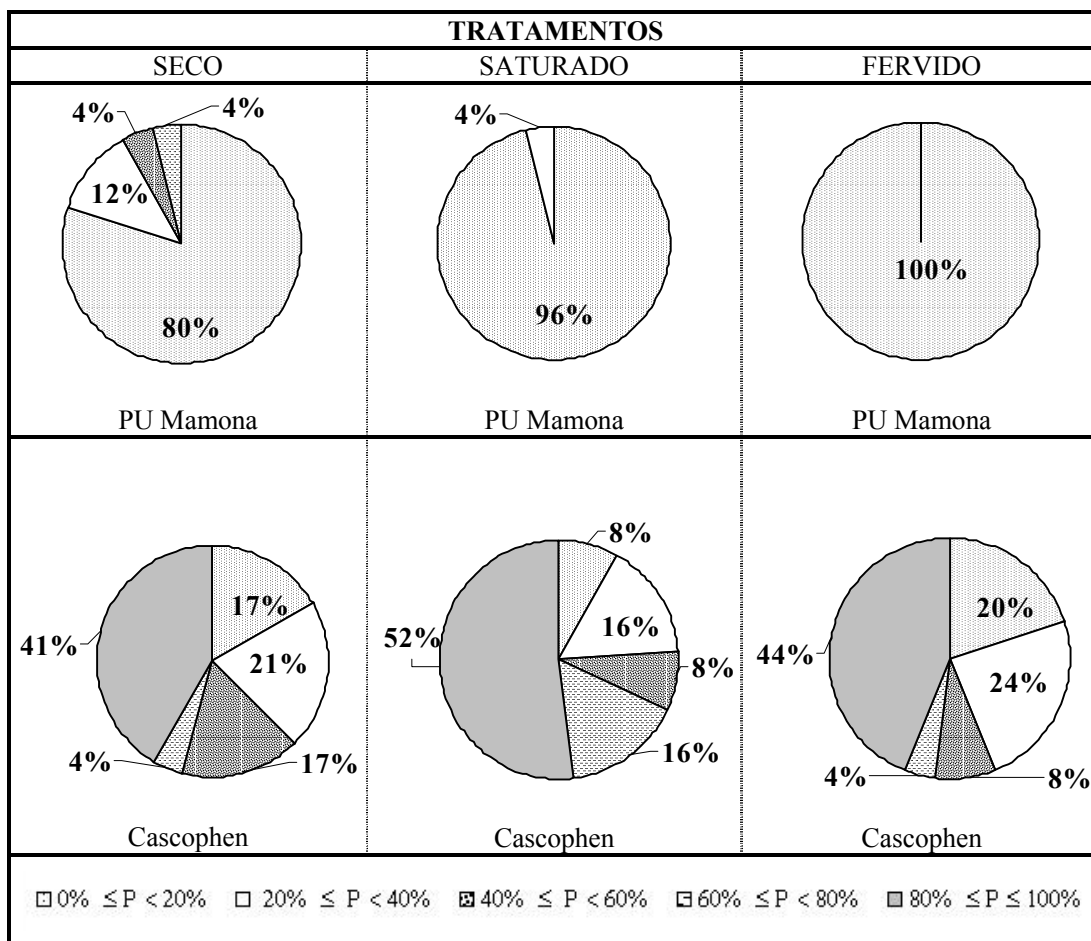


Figura 4.11 – Distribuição percentual em função da Porcentagem de ruptura na madeira na área cisalhante, espécie Pinus.
Cisalhamento na lâmina de cola.

Para a espécie Pinus, como pode ser observado na figura 4.11, o adesivo Cascophen apresentou maior distribuição percentual no intervalo 80% a 100% de falha na madeira, enquanto, o adesivo PU Mamona apresentou uma maior distribuição percentual no intervalo entre 0% a 20% de falha na madeira, para todos os tratamentos, indicando um melhor comportamento do Cascophen, para todos os tratamentos.

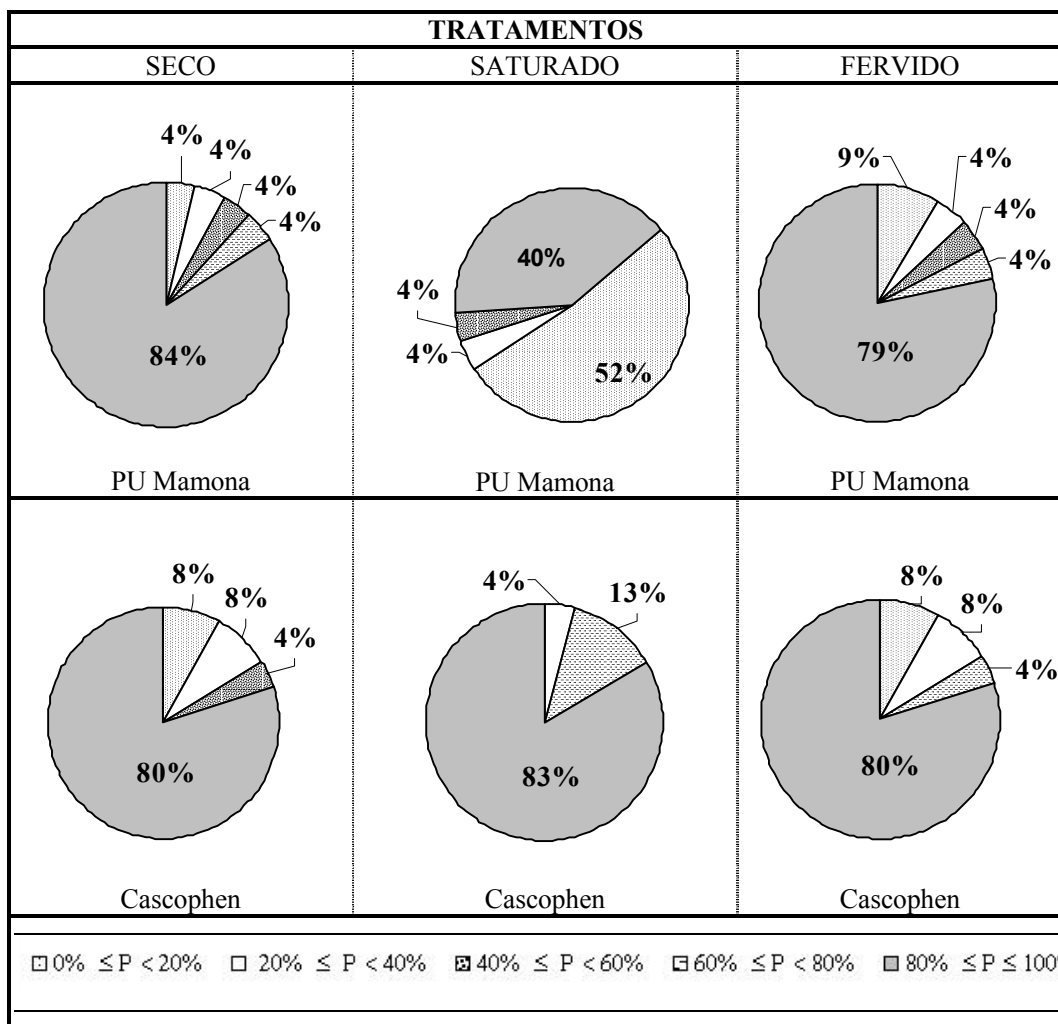


Figura 4.12 – Porcentagem de ruptura na madeira na área cisalhante, espécie Eucalipto.
Cisalhamento na lâmina de cola.

Para a espécie Eucalipto, como pode ser observado na figura 4.12, os adesivos Cascophen e PU Mamona apresentaram maior distribuição percentual no intervalo 80% a 100% de falha na madeira, para todos os tratamentos, exceto para o adesivo PU Mamona no tratamento saturado.

Comparando-se os modos de ruptura obtidos para a espécie Eucalipto em relação à espécie Pinus, pode-se concluir que os adesivos PU Mamona e Cascophen apresentaram um acréscimo de ruptura na região de madeira em relação à espécie Pinus.

4.4.2 - Resultados dos ensaios de tração paralela às fibras – espécie Pinus

4.4.2.1 – Resistência das emendas dentadas (PU Mamona, Purbond e Cascophen)

Os gráficos das figuras C-13, C-14 e C-15 (anexo C) mostram um indicativo de distribuição normal e variância constante. Desta forma, os dados foram tratados como dados paramétricos e a Análise de Variância (ANOVA) foi aplicada. A tabela 4.18 apresenta o quadro da ANOVA.

Tabela 4.16: Tabela ANOVA para resistência das emendas dentadas (PU Mamona, Purbond e Cascophen).

Fonte	GL	SQ	QM	Razão
Adesivos (PU Mamona, Purbond e Cascophen)	2	14459,9	7229,9	156,94
Tratamentos (Seco, saturado e fervido)	2	5060,7	2530,3	54,93
Erro	220	10135,2	46,1	
Total	224	29655,7		

Como o valor de F tabelado, para um nível de confiança de 95%, é igual a 3,95 verifica-se que a razão observada cai na região de rejeição ($156,94 > 3,84$), podendo-se concluir que os dados fornecem evidência suficiente para rejeitar a hipótese nula, isto é, existe diferença significativa entre pelo menos duas médias das resistências das emendas dentadas para os adesivos testados. Com relação às diferenças entre os tratamentos (seco, saturado e fervido), como $54,93 > 3,00$ (tabelado), podemos concluir que existem diferenças significativas entre os vários tratamentos (seco, saturado e fervido).

Para identificar essas diferenças, utilizou-se o método da “Diferença Menos Significativa” (LSD).

$$LSD = t_{\frac{\alpha}{2}, v} * \sqrt{\frac{2 * QM_{erro}}{n}} = 1,99 * \sqrt{\frac{2 * 46,1}{25}} = 3,82 \quad (4.3)$$

A tabela 4.17 apresenta a diferença entre os valores médios da resistência para determinado adesivo e tratamento, que pode ser comparado com o valor do $LSD=3,82$. Nessa tabela, os valores médios estão dispostos em ordem crescente: Pinus Cascophen Seco (PCSE), Pinus Mamona Seco (PMSE), Pinus Purbond Fervido (PPF), Pinus Cascophen Saturado (PCSA), Pinus Cascophen Fervido (PCF), Pinus Mamona Saturado (PMSA), Pinus Mamona Fervido (PMF), Pinus Purbond Saturado (PPSA) e Pinus Purbond Fervido (PPF).

Tabela 4.17: Diferença entre as resistências médias dos corpos-de-prova de tração sem emendas.

	PCSE	PMSE	PPSE	PCSA	PCF	PMSA	PMF	PPSA	PPF
PCSE	0,00								
PMSE	4,61	0,00							
PPSE	7,30	2,69	0,00						
PCSA	<u>12,78</u>	8,17	5,48	0,00					
PCF	<u>16,67</u>	12,06	9,37	<u>3,89</u>	0,00				
PMSA	20,79	<u>16,18</u>	13,49	8,02	4,13	0,00			
PMF	22,71	<u>18,10</u>	15,41	9,93	6,04	<u>1,91</u>	0,00		
PPSA	26,62	22,01	<u>19,32</u>	13,84	9,95	5,83	3,91	0,00	
PPF	28,01	23,40	<u>20,71</u>	15,23	11,34	7,22	5,30	<u>1,39</u>	0,00

Conforme pode ser observado na tabela 4.17, o adesivo Cascophen apresentou resultados estatisticamente superiores aos adesivos PU Mamona e Purbond para os tratamentos seco, saturado e fervido ($4,61 > 3,82$ e $7,30 > 3,82$ para o tratamento seco; $8,02 > 3,82$ e $13,84 > 3,82$ para o tratamento saturado; $6,04 > 3,82$ e $11,34 > 3,82$ para o tratamento fervido).

Os três adesivos apresentaram, de maneira semelhante, resistência menores para os tratamentos saturado e fervido, em comparação ao tratamento seco (respectivamente: $12,78 > 3,82$ e $16,67 > 3,82$, para o Cascophen; $16,18 > 3,82$ e $18,10 > 3,82$, para o adesivo PU Mamona; e $19,32 > 3,82$ e $20,71 > 3,82$, para o adesivo Purbond). Também se observa, para o adesivo PU Mamona e adesivo Purbond, que não existe diferença significativa estatisticamente entre os tratamentos saturado e fervido ($1,91 < 3,82$, para o adesivo PU Mamona; $1,39 < 3,82$, para o adesivo Purbond). Nota-se, para o adesivo Cascophen, que o tratamento saturado apresentou melhor resultado que o tratamento fervido ($3,89 > 3,82$); salienta-se que a diferença observada entre os dois tratamentos ficaram próximas ao valor limite.

A figura 4.13 mostra os valores médios de resistência de emendas dentadas à tração paralela às fibras da madeira para os diferentes tratamentos, para espécie Pinus.

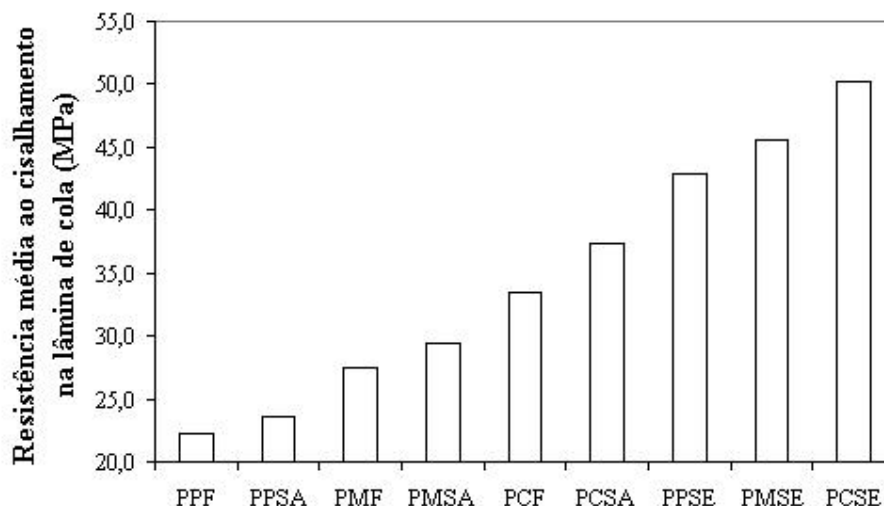


Figura 4.13 - Valores médios de resistência de emendas dentadas à tração paralela às fibras da madeira para os diferentes tratamentos, para espécie Pinus.

4.4.2.2 – Razão entre médias - Emendas dentadas (PU Mamona, Purbond e Cascophen)

A tabela 4.18 apresenta a razão entre as resistências médias para os adesivos PU Mamona, Purbond e Cascophen, para o tratamento Seco, Saturado e Fervido.

Tabela 4.18: Razão entre as resistências médias dos adesivos.

	Adesivos	TRATAMENTOS		
		SECO	SATURADO	FERVIDO
Resistência f_{i0} (MPa)	Mamona	45,6	29,4	27,5
	Purbond	42,9	23,6	22,2
	Cascophen	50,2	37,4	33,5
Razão entre resistências	Mamona/Purbond	1,06	1,25	1,24
	Mamona/Cascophen	0,91	0,79	0,82
	Purbond/Cascophen	0,85	0,63	0,66

Observa-se que o adesivo PU Mamona e o adesivo Purbond apresentaram resultados inferiores ao adesivo Cascophen para todos os tratamentos (seco, saturado e fervido). Além disso, nota-se que o adesivo PU Mamona apresenta resultados superiores ao adesivo Purbond para todos os tratamentos (seco, saturado e fervido). Pode-se concluir que o adesivo PU

Mamona apresentou um comportamento mais próximo ao adesivo Cascophen do que o adesivo Purbond.

Com a finalidade de comparar a perda de resistência dos adesivos quando submetidos ao tratamento saturado e fervido, em relação ao tratamento seco, para cada espécie de madeira, a tabela 4.19 apresenta as razões entre a resistência com base no tratamento seco.

Tabela 4.19: Perda de resistência - razão entre resistências com base no tratamento seco.

	ADESIVOS		
	PU Mamona	Purbond	Cascophen
Saturado/Seco	0,64	0,55	0,75
Fervido/Seco	0,60	0,52	0,67

Observa-se, de maneira geral, que o adesivo PU Mamona e adesivo Purbond apresentaram resultados inferiores para todas as razões (Saturado/Seco e Fervido/Seco). As relações de resistência indicam que o adesivo PU Mamona apresenta um comportamento de durabilidade próximo ao adesivo Cascophen, isto é, a razão entre as resistências inferior a 14% para a relação Saturado/Seco e inferior a 11% para a relação Fervido/Seco.

4.4.2.3 – Análise dos modos de ruptura - Emendas dentadas (PU Mamona, Purbond e Cascophen)

A tabela 4.20 apresenta a frequência de cada modo de ruptura para todos os tratamentos. Para promover a visualização da frequência de ocorrência de modos de ruptura, para cada adesivo, construíram-se os gráficos mostrados na figura 4.14, 4.15 e 4.16, podendo-se observar os picos de ocorrência.

Tabela 4.20: Frequência dos modos de ruptura, espécie Pinus.

Modo de Ruptura	TRATAMENTOS									Totalidade dos tratamentos
	SECO			SATURADO			FERVIDO			
	Mamona	Purbond	Cascophen	Mamona	Purbond	Cascophen	Mamona	Purbond	Cascophen	
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	
1	2	2	0	18	18	0	21	15	0	76
2	2	3	0	4	4	3	0	5	3	24
3	13	10	3	3	3	4	4	4	8	52
4	7	9	13	0	0	16	0	1	10	56
5	0	1	1	0	0	0	0	0	4	6
6	1	0	1	0	0	2	0	0	0	4
Total	25	25	19	25	25	25	25	25	25	218

Obs.: Ocorreram 7 rupturas na garra para o adesivo Cascophen Seco.

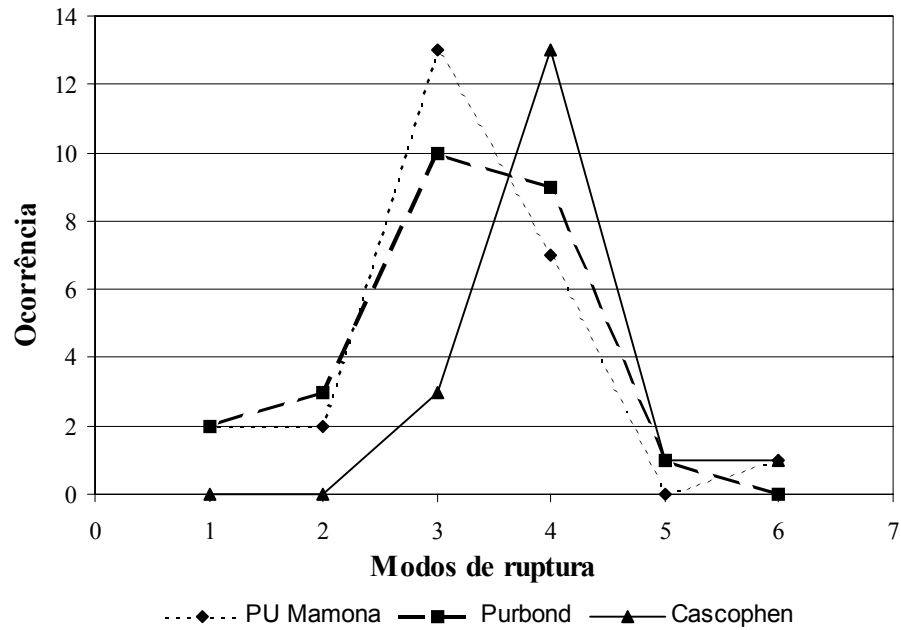


Figura 4.14 - Gráfico de frequência de ocorrência dos modos de ruptura "Seco".

Observação: 7 ocorrências de ruptura na garra para o Cascophen Seco.

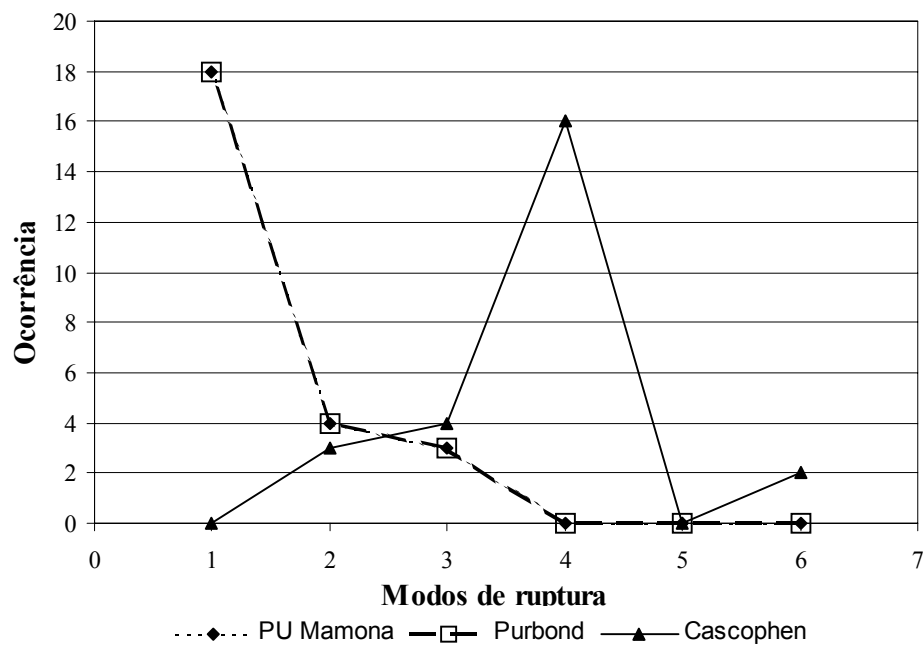


Figura 4.15 - Gráfico de frequência de ocorrência dos modos de ruptura "Saturado".

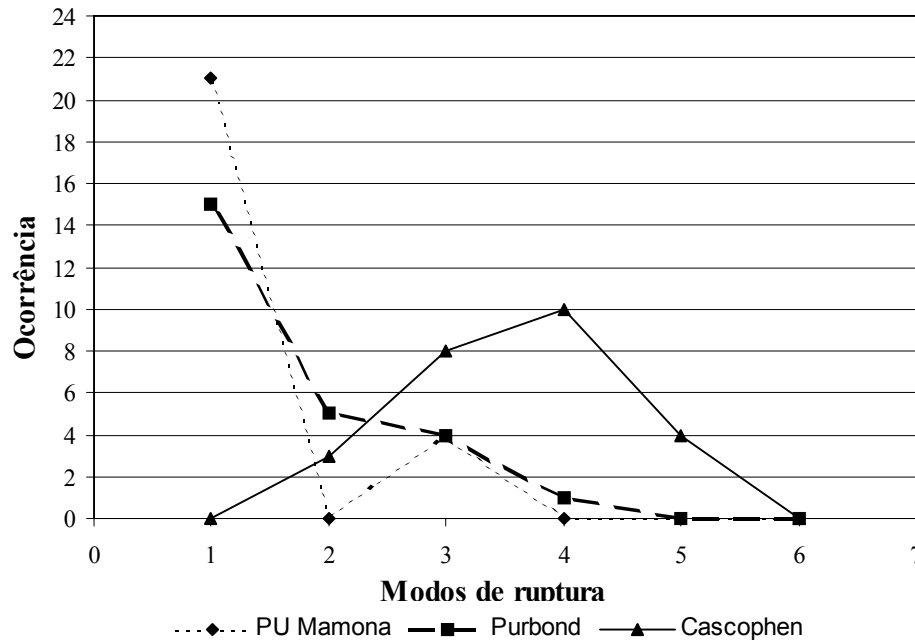


Figura 4.16 - Gráfico de frequência de ocorrência dos modos de ruptura “Fervido”.

Observa-se na tabela 4.20, que a maior parte das lâminas de madeira coladas com os adesivos poliuretanos apresentaram ruptura no modo 1. Além disso, nota-se uma semelhança entre as quantidades de lâminas rompidas nos modos de ruptura 3 e 4. Pode-se concluir, de maneira geral, que as colagens para os adesivos poliuretanos apresentam as maiores falhas de ruptura no modo 1, em relação ao adesivo Cascophen.

Observa-se, também, que o adesivo PU Mamona e o adesivo Purbond apresentaram peças rompidas com modos de ruptura semelhantes, modo 3 e modo 1, respectivamente, para o tratamento seco e para os tratamentos saturado e fervido, assim como o adesivo Cascophen apresentou a maior parte da peças rompidas no modo 3 para todos os tratamentos (seco, saturado e fervido). Com essas observações, pode-se concluir que o adesivo Cascophen apresentou os melhores modos de ruptura, seguido do adesivo PU Mamona e do adesivo Purbond.

4.4.2.4 – Resistência à tração (sem emendas)

Os gráficos das figuras C-16, C-17 e C-18 (anexo C) mostram um indicativo de distribuição normal e variância constante. Desta forma, os dados foram tratados como dados paramétricos e a Análise de Variância (ANOVA) foi aplicada. A tabela 4.21 apresenta o quadro da ANOVA.

Tabela 4.21: Tabela ANOVA para resistência à tração (sem emendas).

Fonte	GL	SQ	QM	Razão
Sem emendas	1	513,0	1858,1	5,26
Tratamentos (Seco, saturado e fervido)	2	11436,6	5718,3	16,18
Erro	96	33934,8	353,5	
Total	99	45884,3		

A razão observada com GL = (1, 96) é igual a 5,26. Como o valor de F tabelado, para um nível de confiança de 95%, é igual a 3,95 verifica-se que a razão observada cai na região de rejeição ($5,26 > 3,95$), podendo-se concluir que os dados fornecem evidência suficiente para rejeitar a hipótese nula, isto é, existe diferença significativa entre pelo menos duas médias das resistências à tração (sem emendas). Com relação às diferenças entre os tratamentos (seco, saturado e fervido), como $16,18 > 3,06$ (tabelado), podemos concluir que existem diferenças significativas entre os vários tratamentos (seco, saturado e fervido).

Para identificar essas diferenças, utilizou-se o método da “Diferença Menos Significativa” (LSD).

$$LSD = t_{\frac{\alpha}{2}, v} * \sqrt{\frac{2 * QM_{erro}}{n}} = 1,99 * \sqrt{\frac{2 * 353,5}{25}} = 10,58 \quad (4.4)$$

A tabela 4.22 apresenta a diferença entre os valores médios da resistência para determinado adesivo e tratamento, que pode ser comparado com o valor do $LSD=10,58$. Nessa tabela, os valores médios estão dispostos em ordem crescente.

Tabela 4.22: Diferença entre as resistências médias dos corpos-de-prova de tração sem emendas.

	Proposta (seco)	Proposta (saturado)	Proposta (Fervido)
Proposta (seco)	0,00		
Proposta (saturado)	25,10	0,00	
Proposta (fervido)	27,20	2,10	0,00

A análise desses resultados (tabela 4.22) revela que não existe diferença significativa entre os corpos-de-prova de resistência à tração sem emendas quando submetidos aos tratamentos saturado e fervido ($2,10 < 10,58$). Além disso, mostra que o tratamento seco apresentou melhores resultados que os tratamentos saturado e fervido ($25,10 > 10,58$ para saturado; $27,20 > 10,58$ para fervido).

A figura 4.17 mostra um esquema gráfico da diferença de resistência entre os corpos-de-prova sem emendas.

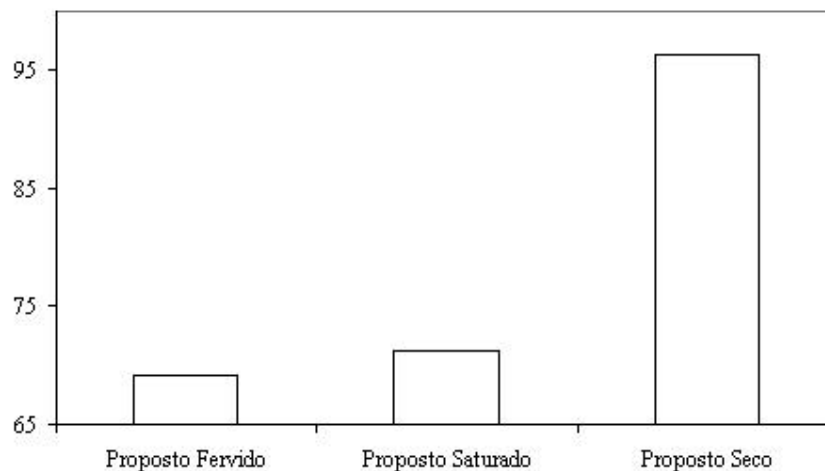


Figura 4.17 - Valores médios de resistência à tração paralela às fibras da madeira para os diferentes tratamentos, para espécie Pinus.

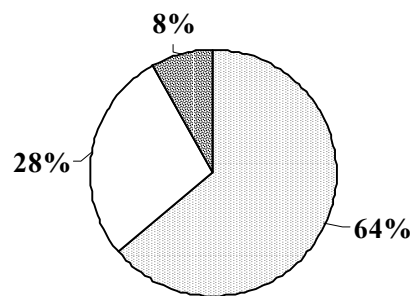
4.4.2.5 – Análise dos modos de ruptura - Resistência à tração (sem emendas)

A tabela 4.23 apresenta a frequência de cada modo de ruptura (Garra, Próximo e Corpo) em corpos-de-prova sem emendas dentadas, para o tratamento seco, nos corpos-de-prova Norma e Proposta. Além disso, apresenta a frequência de cada modo de ruptura, para os tratamentos saturado e fervido para os corpos-de-prova Proposta. Para promover a visualização da frequência de ocorrência dos modos de ruptura, construiu-se o gráfico (figura 4.30) de porcentagem de modo de ruptura (Garra, Próximo e Corpo).

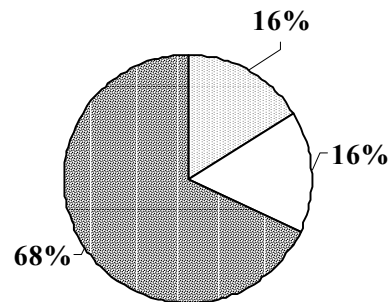
Tabela 4.23: Frequência dos modos de ruptura, sem emendas.

Modo de Ruptura	TRATAMENTOS				Totalidade dos tratamentos
	SECO		SATURADO	FERVIDO	
	Norma	Proposta	Proposta	Proposta	
Garra	16	4	7	2	29
Próximo	7	4	4	6	21
Corpo	2	17	14	17	50
Total	25	25	25	25	100

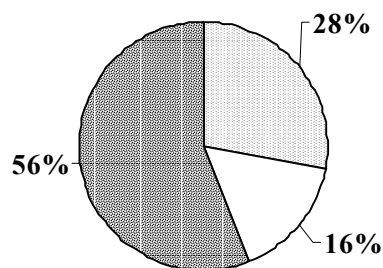
Observa-se na tabela 4.23, dois comportamentos distintos: no primeiro, para os corpos-de-prova Norma, a maior parte das rupturas aconteceu na região de garra, para o tratamento Seco; e no segundo, para os corpos-de-prova Proposta, a maior parte das rupturas ocorreu na região do corpo. Além disso, nota-se uma semelhança entre as quantidades de lâminas rompidas na região do Corpo, para os corpos-de-prova Proposta, em todos os tratamentos (seco, saturado e fervido).



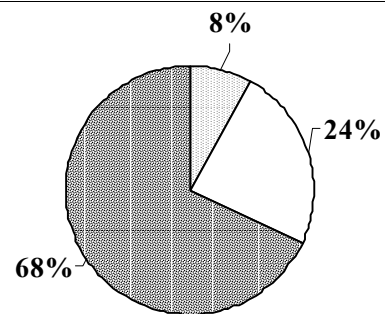
NORMA (SECO)



PROPOSTA (SECO)



PROPOSTA (SATURADO)



PROPOSTA (FERVIDO)

■ Garra □ Próximo ■ Corpo

Figura 4.18 – Porcentagem dos modos de ruptura. Resistência à tração paralela (sem emendas).

Os resultados obtidos, figura 4.18, apresentam para os corpos-de-prova Proposta, sem dúvida, uma porcentagem de ruptura na região do Corpo mais adequada em relação aos corpos-de-prova de Norma.

4.4.2.6 - Eficiência das emendas dentadas (PU Mamona, Purbond e Cascophen) em relação aos corpos-de-prova peças sem emendas.

A tabela 4.20 apresenta a eficiência das emendas dentadas coladas com os adesivos, PU Mamona, Purbond e Cascophen, em relação aos corpos-de-prova (proposta) sem emendas, para os tratamentos Seco, Saturado e Fervido.

Tabela 4.24: Eficiência dos adesivos PU Mamona, Purbond e Cascophen.

		TRATAMENTOS		
		SECO	SATURADO	FERVIDO
		f_{i0} (MPa)	f_{i0} (MPa)	f_{i0} (MPa)
Resistências	PU Mamona	45,6	29,4	27,5
	Purbond	42,9	23,6	22,2
	Cascophen	50,2	37,4	33,5
	Sem emenda (CP Proposto)	96,4	71,3	69,2
Eficiência	PU Mamona/Proposta	0,47	0,41	0,40
	Purbond/Proposta	0,45	0,33	0,32
	Cascophen/Proposta	0,52	0,52	0,48

A partir dos resultados mostrados na tabela 4.24, de maneira geral pode-se afirmar que a maior eficiência dos adesivos foi para o tratamento Seco. A eficiência do adesivo Cascophen não apresentou grandes alterações em relação aos outros tratamentos; de certa forma, mas em menor intensidade, o mesmo ocorreu para o adesivo de Mamona. Entretanto, o adesivo Purbond apresentou uma grande queda na eficiência, para os tratamentos saturado e fervido, em relação ao seco.

5 – VIGAS DE MADEIRA LAMINADA COLADA

Este capítulo tem como objetivo avaliar o desempenho estrutural da colagem das lâminas no produto final, isto é, em vigas de madeira laminada colada (MLC), por intermédio de ensaios de flexão. As vigas apresentam uma baixa relação vão/altura, inferior às relações utilizadas correntemente, com o intuito de que o estado limite último atingido fosse o de cisalhamento na cola. Foram obtidas, experimentalmente, a rigidez à flexão e a força de ruptura para as vigas, para avaliar a eficiência da colagem.

As vigas foram fabricadas com o adesivo poliuretano à base de mamona e o adesivo Purbond. Também foram confeccionadas vigas de MLC utilizando-se o adesivo comercial à base de resorcinol-formaldeído, para comparação.

5.1 – MATERIAIS E MÉTODOS

Este item apresenta os procedimentos adotados e os ensaios realizados para avaliar o comportamento à flexão de vigas de MLC. Foram realizados ensaios para caracterização das lâminas de madeira, ensaios de flexão nas vigas de MLC, ensaios de compressão e de tração paralela às fibras da madeira.

5.1.1 - Madeira

Foram utilizadas duas espécies de madeira: o *Pinus caribea hondurensis* e o *Eucaliptus grandis*. A característica destas espécies foi apresentada no capítulo 3.

Para a confecção das vigas de MLC, foram utilizadas lâminas com dimensões nominais iguais a 3,5 x 5,5 x 200 cm, com teor de umidade em torno de 12%.

5.1.2 - Adesivos

Utilizaram-se os adesivos seguintes, cujas características já foram apresentados no capítulo 3:

- **Cascophen** (à base de resorcinol-formol);

- **Purbond** (Purweld 665);
- **PU Mamona** (Adesivo poliuretano à base de óleo de mamona);

A descrição desses adesivos foi apresentada no item “3.1.2 – Adesivos”.

5.1.3 – Montagem das vigas

5.1.3.1 – Configuração das vigas

Foram confeccionadas 14 vigas retas de madeira laminada colada, sendo sete confeccionadas com a espécie *Eucalyptus Grandis* e outras sete com a espécie *Pinus caribea var. hondurensis*.

As vigas foram confeccionadas com dimensão nominal de 5,5 x 20 x 200 cm (8 lâminas de 3,5 x 5,5 cm). Para cada espécie, foram feitas 3 vigas com o adesivo poliuretano a base de óleo de mamona, 3 vigas com o adesivo a base de resorcinol formaldeído e 1 viga com o adesivo Purbond.

As vigas de MLC foram confeccionadas com as lâminas sendo dispostas de maneira seletiva: as de módulo de elasticidade mais elevados na parte externa, e, a de menor módulo, no centro da seção transversal.

As tabelas 5.1 e 5.2 mostram as propriedades das lâminas utilizadas em cada viga. A ordem de apresentação da lâmina corresponde à ordem de disposição na seção transversal da viga.

5.1.3.2 - Procedimento de colagem das vigas

Alguns procedimentos importantes quanto à seleção e ao processamento da madeira foram adotados, tais como: classificação visual; processamento das peças por intermédio de ferramentas perfeitamente afiadas e sem defeitos, obtendo-se superfícies planas e perpendiculares entre si. Este procedimento inicial garantiu uma colagem eficiente, reduzindo-se as imperfeições nas superfícies a serem coladas.

As aplicações dos adesivos utilizados na pesquisa foram realizadas seguindo-se as recomendações dos fabricantes.

Para realizar o procedimento de colagem das vigas, isto é, aplicação do adesivo em cada face da lâmina a ser colada e sua montagem na prensa, demorou-se cerca de 30 minutos por viga.

Tabela 5.1: Propriedades das lâminas utilizadas - vigas 1 a 7, espécie Pinus.

Número	Adesivo	Número	Classificação	Base	Altura	F. (MPa)
1	Mamona	1	SS-ND	56,6	37,3	18070
		2	SS-ND	56,6	39,2	15810
		3	SS-ND	56,6	36,8	14250
		4	SS-ND	56,6	32,3	11390
		5	NI-ND	56,6	36,7	13110
		6	SS-ND	56,6	37,5	16160
		7	SS-ND	56,6	38,9	16470
		8	SS-ND	56,6	37,5	20130
2	Mamona	9	SS-ND	57,1	38,4	17350
		10	SS-ND	57,1	37,9	15060
		11	SS-ND	57,1	34,2	14480
		12	SS-ND	57,1	36,5	10460
		13	SS-ND	57,1	36,5	13280
		14	SS-ND	57,1	37,3	14780
		15	SS-ND	57,1	37,8	17180
		16	SS-ND	57,1	38,9	18220
3	Mamona	17	SS-ND	65,9	38,8	18680
		18	SS-ND	65,9	35,4	14960
		19	SS-ND	65,9	36,2	13880
		20	SS-ND	65,9	35,7	10590
		21	SS-ND	65,9	38,7	13520
		22	SS-ND	65,9	38,1	14160
		23	SS-ND	65,9	37,8	17290
		24	SS-ND	65,9	37,3	18830
4	Cascophen	25	SS-ND	59,6	38,0	16420
		26	SS-ND	59,6	37,7	15350
		27	SS-ND	59,6	36,2	13480
		28	SS-ND	59,6	38,5	12070
		29	SS-ND	59,6	38,3	14260
		30	SS-ND	59,6	38,7	15020
		31	SS-ND	59,6	38,7	16240
		32	SS-ND	59,6	37,9	20030
5	Cascophen	33	SS-ND	52,3	39,2	17980
		34	SS-ND	52,3	38,5	15620
		35	SS-ND	52,3	38,4	14620
		36	SS-ND	52,3	36,1	13880
		37	SS-ND	52,3	34,7	11790
		38	SS-ND	52,3	38,2	15310
		39	SS-ND	52,3	37,9	16230
		40	SS-ND	52,3	37,8	19490
6	Cascophen	41	SS-ND	62,7	38,1	17360
		42	SS-ND	62,7	37,8	15250
		43	SS-ND	62,7	39,1	14330
		44	SS-ND	62,7	35,2	11360
		45	SS-ND	62,7	35,9	13270
		46	SS-ND	62,7	38,8	14480
		47	SS-ND	62,7	38,5	17040
		48	SS-ND	62,7	38,6	18210
7	Purbond	49	SS-ND	64,9	33,2	11500
		50	Nº1-ND	64,9	35,8	12080
		51	Nº3-ND	64,9	36,2	13990
		52	Nº3-ND	64,9	35,3	13940
		53	Nº3-ND	64,9	36,4	12340
		54	Nº3-ND	64,9	36,4	12940
		55	Nº1-ND	64,9	38,1	13280
		56	SS-ND	64,9	38,0	11860

Tabela 5.2: Propriedades das lâminas utilizadas - vigas 8 a 14, espécie Eucalipto.

Número	Adesivo	Número	Classificação	Base	Altura	F. (MPa)
8	Mamona	57	SS-ND	59,1	39,7	17471
		58	SS-ND	59,1	39,7	16535
		59	SS-ND	59,1	38,7	14152
		60	SS-ND	59,1	38,7	11231
		61	SS-ND	59,1	39,2	12632
		62	SS-ND	59,1	39,2	13205
		63	SS-ND	59,1	39,5	15020
		64	SS-ND	59,1	4,02	19549
9	Mamona	65	SS-ND	58,0	37,7	16381
		66	SS-ND	58,0	39,8	16916
		67	SS-ND	58,0	39,5	14882
		68	SS-ND	58,0	40,2	11847
		69	SS-ND	58,0	38,4	12428
		70	SS-ND	58,0	39,2	13566
		71	SS-ND	58,0	39,8	15372
		72	SS-ND	58,0	38,8	18909
10	Mamona	73	SS-ND	58,1	39,6	16726
		74	SS-ND	58,1	39,4	15267
		75	SS-ND	58,1	39,7	13871
		76	SS-ND	58,1	39,1	12581
		77	SS-ND	58,1	39,5	10971
		78	SS-ND	58,1	39,7	14078
		79	SS-ND	58,1	37,9	16064
		80	SS-ND	58,1	39,7	16597
11	Cascophen	81	SS-ND	59,0	37,9	15119
		82	SS-ND	59,0	40,1	15393
		83	SS-ND	59,0	37,6	13861
		84	SS-ND	59,0	38,5	12303
		85	SS-ND	59,0	38,5	11036
		86	SS-ND	59,0	38,1	14254
		87	SS-ND	59,0	39,7	16111
		88	SS-ND	59,0	39,3	18970
12	Cascophen	89	SS-ND	55,2	3,95	16277
		90	SS-ND	55,2	3,83	15788
		91	SS-ND	55,2	3,95	13133
		92	SS-ND	55,2	3,89	12509
		93	SS-ND	55,2	4,02	11796
		94	SS-ND	55,2	3,81	14203
		95	SS-ND	55,2	4,04	16614
		96	SS-ND	55,2	3,92	17026
13	Cascophen	97	SS-ND	54,8	38,9	17092
		98	SS-ND	54,8	38,9	16625
		99	SS-ND	54,8	39,3	14003
		100	SS-ND	54,8	39,8	11568
		101	SS-ND	54,8	39,2	12601
		102	SS-ND	54,8	39,0	13167
		103	SS-ND	54,8	38,4	15475
		104	SS-ND	54,8	39,6	16743
14	Purbond	105	SS-ND	58,6	38,9	15920
		106	SS-ND	58,6	39,2	15081
		107	SS-ND	58,6	39,7	13395
		108	SS-ND	58,6	38,8	12406
		109	SS-ND	58,6	39,7	11432
		110	SS-ND	58,6	39,1	14486
		111	SS-ND	58,6	39,3	16055
		112	SS-ND	58,6	40,5	16514

Foram utilizadas as pressões de colagem igual a 0,4 MPa para madeira de Pinus e igual

a 0,6 MPa para madeira de Eucalipto, aplicada por intermédio da prensa específica para colagem de MLC do LaMEM, e controlada com o auxílio de um torquímetro pré-calibrado. A figura 5.1 mostra a prensa para vigas de MLC.

Esta pressão foi aplicada por um tempo de 24 horas para todas as vigas coladas. Depois disto, às vigas foram retiradas da pressão e aplainadas lateralmente. A figura 5.2 mostra as vigas confeccionadas.



Figura 5.1 – Prensagem das vigas de MLC.

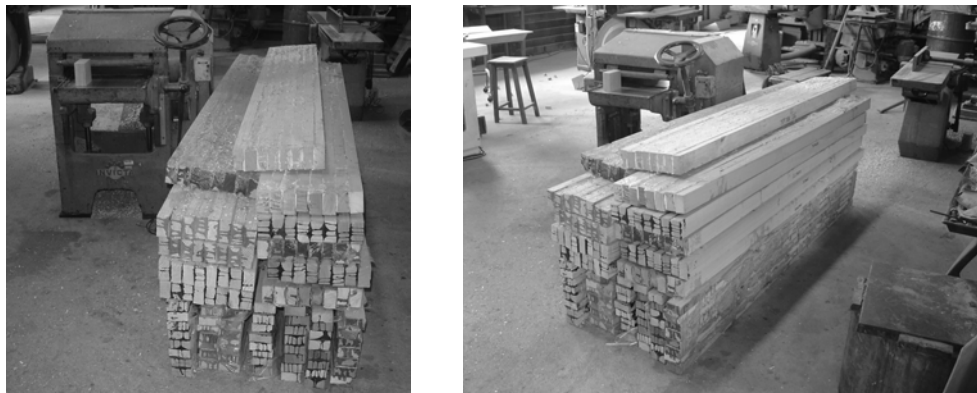


Figura 5.2 – Vigas de madeira laminada colada.

5.1.4 - Método de ensaio para caracterização das vigas

Adotou-se, inicialmente, um esquema estático de viga simplesmente apoiada com uma força aplicada no meio do vão, para realizar o ensaio de flexão. Entretanto, a força de carregamento provocou esmagamento na região de aplicação da carga e na região do apoio, como mostra a figura 5.3.



Figura 5.3 - Esquema estático do ensaio das vigas de MLC.

Para evitar esse esmagamento, a extensão do apoio foi aumentada, testando-se as variações mostradas na figura 5.4.

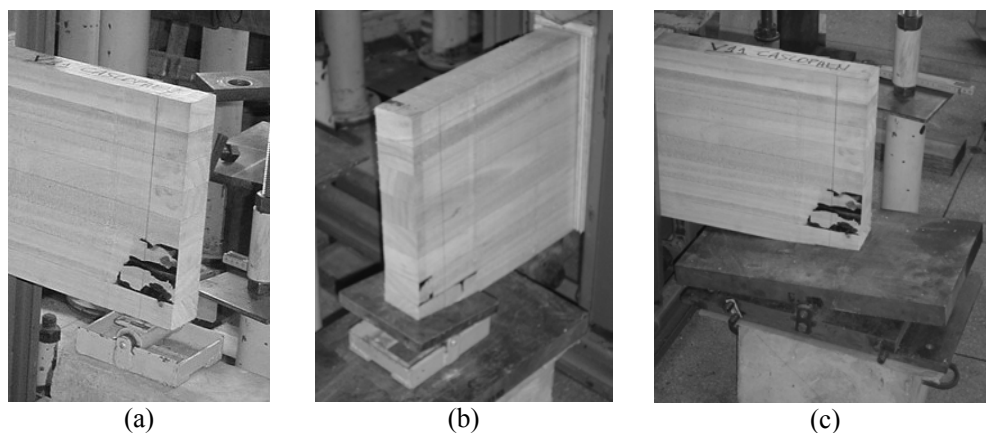


Figura 5.4 – Variações de apoios testados.

Notou-se que o apoio que aparece na figura 5.4.c mostrou-se mais adequado, tendo sido adotado para a realização dos ensaios. Os ensaios de flexão estática seguiram os procedimentos da norma ASTM D198-97 Methods of Static Tests of Timber in Structural Sizes, com esquema estático de viga simplesmente apoiada com duas forças aplicadas nos terços do vão. Utilizou-se um vão (L) variando entre 185 a 190 cm para as vigas (figura 5.5 e 5.6).

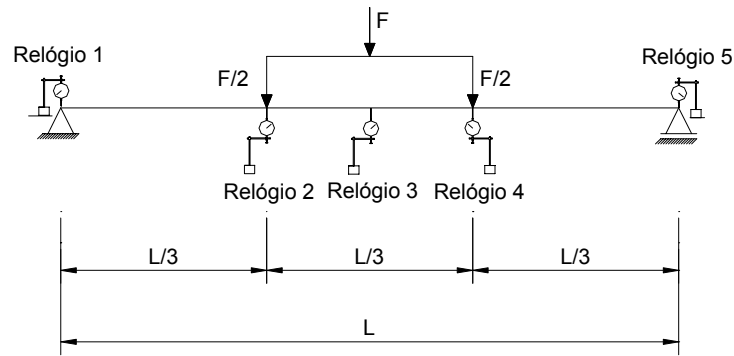


Figura 5.5 - Esquema estático do ensaio das vigas de MLC.



Figura 5.6 - Esquema estático das vigas de MLC ensaiadas.

Para a obtenção da rigidez à flexão, foi utilizado o esquema de carregamento da NBR 7190/97, tendo sido adotado como patamar superior dos ciclos o valor de força correspondente a um deslocamento no meio do vão igual a $L/300$.

Foram medidos os deslocamentos nos pontos indicados na figura 5.5 e 5.6, utilizando-se relógios comparadores com sensibilidade de centésimo de milímetro. Os relógios colocados nos apoios permitiram medir os deslocamentos devidos à deformação por compressão normal às fibras. No último ciclo de carregamento, após a retirada dos relógios, as vigas foram levadas à ruptura, avaliando-se os modos de ruptura ocorridos.

5.1.5 – Resistência ao cisalhamento na lâmina de cola

Após a realização dos ensaios de flexão, retiraram-se corpos-de-prova para avaliar a resistência ao cisalhamento na lâmina de cola, para efeito comparativo com os resultados obtidos no capítulo 4. Foram utilizados os corpos-de-prova para ensaios de cisalhamento na lâmina de cola (NBR-1790/97), e também uma configuração com maior dimensão (estrutural), como mostra a figura 5.7.

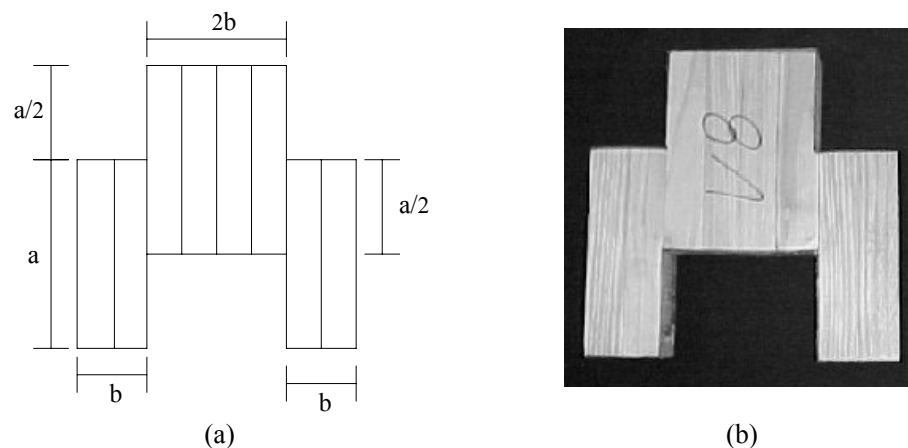


Figura 5.7 – (a) Esquema do corpo-de-prova de cisalhamento estrutural e (b) corpo-de-prova de Pinus.

5.2 - RESULTADOS OBTIDOS

5.2.1 – Ensaios de Flexão

A título de exemplificação, a tabela 5.3 apresenta os deslocamentos verticais do último ciclo de carregamento, para a viga 1. São referentes aos deslocamentos nos apoios (relógios 1 e 5), aos deslocamentos nos pontos de aplicação das forças (relógios 2 e 4), e no meio do vão (relógio 3).

Tabela 5.3: Deslocamentos verticais na viga 1, para o último ciclo de carregamento.

Carregamento		Leitura de deslocamentos verticais				
Ponto do ciclo	Força (kN)	Relógio 1 mm	Relógio 2 mm	Relógio 3 mm	Relógio 4 mm	Relógio 5 mm
71	9,93	0,02	0,09	0,10	0,09	0,06
82	19,85	0,04	0,16	0,18	0,17	0,09
83	29,78	0,06	0,23	0,26	0,24	0,11
84	39,71	0,08	0,30	0,34	0,31	0,13
85	49,63	0,09	0,37	0,42	0,38	0,15
86	59,56	0,11	0,44	0,49	0,45	0,17
87	69,49	0,13	0,53	0,60	0,54	0,20

A rigidez à flexão da viga foi caracterizada a partir dos valores obtidos nos pontos 71 a 87 do ciclo de carregamento, por meio de regressão linear, tendo sido determinado o valor do coeficiente angular da reta relativa à relação Força (F) x Deslocamento (v), de duas formas distintas:

- na primeira utilizou-se o deslocamento no meio do vão ($\delta_{3,abs}$), corrigido, descontando-se os deslocamentos nos apoios; essa relação foi denominada “F/v_{absoluta}”.

- na segunda utilizou-se o deslocamento relativo entre o deslocamento no meio do vão e os deslocamentos nos pontos de aplicação das forças ($\delta_{3,rel}$); esse deslocamento é devido à flexão do terço central, no qual o esforço cortante é nulo; essa relação foi denominada “ $F/v_{relativa}$ ”.

A tabela 5.4 mostra os deslocamentos $\delta_{3,abs}$ e $\delta_{3,rel}$ obtidos para a viga 1.

Tabela 5.4: Deslocamentos $\delta_{3,abs}$ e $\delta_{3,rel}$

Carregamento		Deslocamentos	
Ponto do ciclo	Carga (kN)	$\delta_{3,abs}$ cm	$\delta_{3,rel}$ cm
71	9,93	0,07	0,013
82	19,85	0,13	0,019
83	29,78	0,18	0,025
84	39,71	0,24	0,030
85	49,63	0,30	0,037
86	59,56	0,36	0,045
87	69,49	0,45	0,056

A tabela 5.5 apresenta informações a respeito das vigas testadas, e os resultados obtidos para as relações F/v , bem como as forças de ruptura para todas as vigas.

Tabela 5.5: Relações F/v e forças de ruptura.

Viga	Dimensão (cm)	Espécie	Adesivo	F_r (kN)	$F/v_{absoluta}$	$F/v_{relativa}$
1	(5,7x29,6x196,7)	Pinus	Mamona	160,48	160	1423
2	(5,7x29,8x196,5)	Pinus	Mamona	148,90	154	1032
3	(6,6x29,8x197,0)	Pinus	Mamona	62,87	73	491
4	(6,0x30,4x198,0)	Pinus	Cascophen	119,12	140	1354
5	(5,2x30,1x196,6)	Pinus	Cascophen	160,48	160	1120
6	(6,3x30,2x200,0)	Pinus	Cascophen	138,97	169	1120
7	(6,6x29,0x197,0)	Pinus	Purbond	148,90	130	881
8	(5,9x27,9x194,7)	Eucalipto	Mamona	99,27	151	1026
9	(5,8x27,7x196,0)	Eucalipto	Mamona	163,79	160	1232
10	(5,8x31,5x205,0)	Eucalipto	Mamona	153,20	154	1217
11	(5,9x31,0x200,0)	Eucalipto	Cascophen	145,51	232	1794
12	(5,5x31,4x200,0)	Eucalipto	Cascophen	129,05	148	1083
13	(5,5x31,3x200,0)	Eucalipto	Cascophen	99,27	139	1040
14	(5,9x31,5x19,60)	Eucalipto	Purbond	82,72	104	665

As vigas de MLC, de uma forma geral, apresentaram esmagamento pronunciado (compressão normal às fibras) na região dos apoios e nos pontos de aplicação das forças. Em alguns casos, esse foi o fator limitante da capacidade resistente da viga. Na ruptura, foram observadas quatro formas de ruptura:

- A** - ruptura predominante por cisalhamento na madeira, e em alguns trechos pequenos de linhas de cola alternadas;
- B** - Ruptura por cisalhamento na madeira e na linha de cola, alternadamente, e em proporções semelhantes;
- C** - Ruptura na linha de cola;
- D** - Ruptura por tração na borda inferior, propagando por cisalhamento;
- E** - Esmagamento na região do apoio.

As formas de ruptura A, B, D e E predominantes são ilustradas a seguir:



Figura 5.8 – Forma A: Ruptura predominante por cisalhamento na madeira, e em alguns trechos pequenos de linhas de cola alternadas.



Figura 5.9 – Forma B: Ruptura por cisalhamento na madeira e na linha de cola, alternadamente, e em proporções semelhantes.

Na figura 5.10, não se evidenciou trecho significativo de ruptura, em uma mesma linha de cola, separando a viga, para nenhum dos três adesivos testados (PU Mamona, Purbond e Cascophen).



Figura 5.10 – Forma D: Ruptura por tração na borda inferior, propagando por cisalhamento.



Figura 5.11 – Forma E: Esmagamento na região do apoio.

As formas de ruptura são apresentadas na tabela 5.6.

Tabela 5.6: Formas de ruptura.

Viga	Espécie	Adesivo	Formas de ruptura
1	Pinus	Mamona	A
2	Pinus	Mamona	A
3	Pinus	Mamona	C
4	Pinus	Cascophen	A
5	Pinus	Cascophen	A
6	Pinus	Cascophen	A
7	Pinus	Purbond	D
8	Eucalipto	Mamona	E
9	Eucalipto	Mamona	E
10	Eucalipto	Mamona	B
11	Eucalipto	Cascophen	E
12	Eucalipto	Cascophen	E
13	Eucalipto	Cascophen	B
14	Eucalipto	Purbond	B

5.2.2 – Resistência ao cisalhamento na lâmina de cola

Os resultados do ensaio de resistência ao cisalhamento na lâmina de cola, de acordo com a NBR-7190/97, e também uma configuração com maior dimensão (estrutural), retirados das vigas de madeira laminada colada, e porcentagem de falha na madeira são apresentados na tabela 5.7 e 5.8.

Tabela 5.7: Resistência (MPa) ao cisalhamento e % de falha na madeira (corpos-de-prova retirados das vigas)

REPETIÇÕES	TRATAMENTO					
	SECO					
	PINUS			EUCALIPTO		
	Mamona	Purbond	Cascophen	Mamona	Purbond	Cascophen
1	13,0 (8%)	7,8 (48%)	13,9 (40%)	11,7 (100%)	11,1 (100%)	9,2 (100%)
2	10,4 (0%)	11,2 (50%)	12,9 (48%)	8,0 (90%)	10,2 (100%)	11,9 (100%)
3	9,7 (20%)	8,9 (100%)	11,9 (38%)	11,1 (97%)	10,3 (100%)	9,3 (80%)
4	12,1 (7%)	9,8 (44%)	12,4 (98%)	8,4 (100%)	10,5 (55%)	11,1 (100%)
5	9,2 (40%)	-	11,6 (100%)	9,9 (100%)	10,1 (100%)	10,4 (44%)
6	8,1 (10%)	-	7,4 (37%)	8,2 (90%)	7,3 (37%)	10,2 (100%)
7	8,5 (45%)	-	12,5 (90%)	11,1 (100%)	7,9 (0%)	11,0 (100%)
8	7,8 (0%)	-	12,8 (100%)	9,3 (100%)	-	10,0 (100%)
9	8,5 (0%)	-	12,3 (41%)	11,0 (100%)	-	10,6 (48%)
10	9,5 (0%)	-	13,3 (21%)	11,7 (80%)	-	9,4 (65%)
11	11,5 (0%)	-	10,4 (100%)	9,5 (100%)	-	9,1 (90%)
12	7,8 (0%)	-	8,9 (100%)	12,1 (95%)	-	9,5 (70%)
13	8,6 (0%)	-	8,3 (100%)	8,9 (30%)	-	11,0 (100%)
14	10,4 (0%)	-	12,6 (12%)	10,3 (100%)	-	7,6 (90%)
15	8,6 (0%)	-	12,4 (97%)	12,7 (90%)	-	8,4 (100%)
16	9,5 (0%)	-	14,6 (33%)	11,8 (100%)	-	7,5 (60%)
17	10,5 (5%)	-	11,7 (100%)	10,6 (90%)	-	12,1 (96%)
18	8,5 (0%)	-	12,3 (100%)	9,3 (85%)	-	11,9 (100%)
19	7,3 (0%)	-	11,3 (90%)	-	-	9,0 (95%)
20	12,4 (100%)	-	14,6 (97%)	-	-	10,6 (100%)
21	-	-	11,7 (65%)	-	-	
Média	9,6	9,4	11,9	10,3	9,6	10,0
Desvio Padrão	1,7	1,4	1,9	1,4	1,4	1,4
CV %	17	15	16	14	15	14

Tabela 5.8: Resistência (MPa) ao cisalhamento (estrutural) e % de falha na madeira (corpos-de-prova retirados das vigas).

Número da Viga	TRATAMENTO		f_v (MPa)	Média (MPa)
	Seco			
	Espécie	Adesivo		
1	Pinus	Mamona	10,9 ^(85%)	9,6
2	Pinus	Mamona	8,6 ^(0%)	
3	Pinus	Mamona	9,2 ^(5%)	
4	Pinus	Cascophen	10,3 ^(80%)	10,6
5	Pinus	Cascophen	10,5 ^(50%)	
6	Pinus	Cascophen	11,1 ^(40%)	
7	Pinus	Purbond	9,0 ^(65%)	9,0
8	Eucalipto	Mamona	8,2 ^(100%)	8,6
9	Eucalipto	Mamona	9,1 ^(50%)	
11	Eucalipto	Cascophen	8,8 ^(100%)	9,2
12	Eucalipto	Cascophen	8,8 ^(80%)	
13	Eucalipto	Cascophen	10,1 ^(100%)	
14	Eucalipto	Purbond	8,2 ^(100%)	8,2

A figura 5.7 apresenta a forma de ruptura dos corpos-de-prova de cisalhamento em tamanho estrutural.

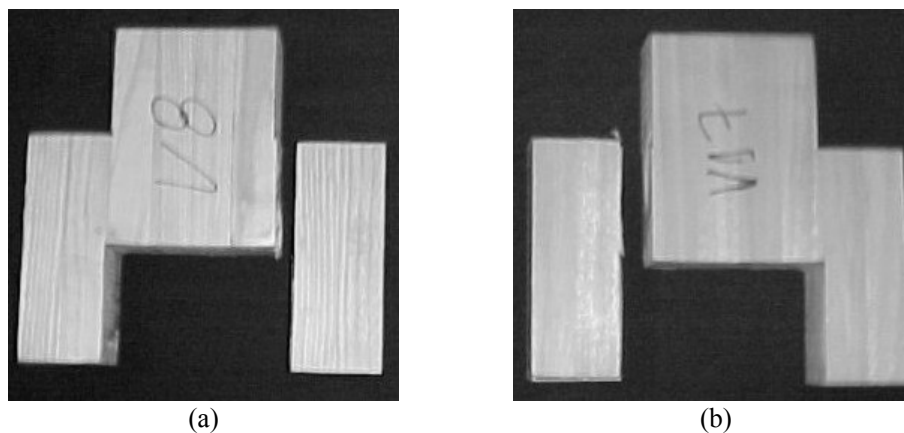


Figura 5.12 – Ruptura por cisalhamento na área cisalhante: Pinus (a) e Eucalipto (b)

5.3 - ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.3.1 - Ensaio de flexão das vigas

5.3.1.1 - Avaliação da rigidez à flexão

A primeira avaliação foi feita a partir dos valores “ $F/v_{absoluta}$ ”, considerando inclusive a deformação devida ao cisalhamento, de acordo com a equação 5.1. Para a obtenção dessa equação, foi utilizado um fator de forma igual a 1,2 para a seção retangular. Nessa equação, “L”

é o vão, “h” é a altura, tendo sido usada a relação E/G igual a 16.

$$EI_{\text{exp},1} = \frac{F}{\nu} \cdot L \cdot \left(\frac{23 \cdot L^2}{1296} + \frac{h^2 \cdot E}{60 \cdot G} \right) \quad 5.1$$

A segunda avaliação foi feita de posse dos valores “F/v_{relativa}”, se determinando os módulos de elasticidade à flexão EI_{exp,2} de acordo com a equação 5.2.

$$EI_{\text{exp},2} = \frac{F \cdot L^3}{432 \cdot \nu} \quad 5.2$$

A determinação EI_{teo} das vigas foi realizada com base nos valores de módulo de elasticidade, da altura e do posicionamento de cada lâmina. Seja uma viga genérica, como a mostrada na figura 5.13.

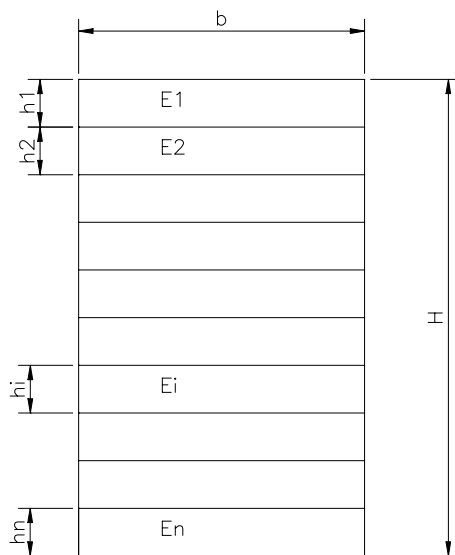


Figura 5.13 - Seção transversal genérica de uma viga em MLC.

Cada uma das lâminas possui uma altura h_i e módulo de elasticidade E_i , obtido na fase de caracterização dos materiais. A largura b é constante.

Foi utilizado o método da seção transformada para o cálculo da rigidez, considerando o módulo de elasticidade de cada lâmina (E_i). Para a homogeneização do material da seção transformada, foi utilizado um valor comum para o módulo de elasticidade das lâminas da viga (E_c), no caso o valor médio, sendo a largura equivalente de cada lâmina (b_{ci}) determinada pela equação 5.3:

$$b_{ci} = \frac{E_i}{E_c} \cdot b \quad 5.3$$

O valor teórico da rigidez à flexão (EI_{teo}) da viga foi calculado a partir da seção

transformada, como indicado na equação 5.4.

$$E \cdot I_{\text{teo}} = E_c \cdot \sum_{i=1}^n \left(\frac{b_{ci} \cdot h_i^3}{12} + b_{ci} \cdot h_i \cdot y_i^2 \right) \quad 5.4$$

sendo y_i a distância do centro de gravidade de cada lâmina até o centro de gravidade da seção, determinado a partir da seção transformada.

Com a finalidade de ilustrar o cálculo dos valores de EI_{teo} , um exemplo é apresentado na tabela 5.9:

Tabela 5.9: Cálculo do EI_{teo} da viga 1 de *Pinus*

Número da viga	Número da lâmina	Visual	b (cm)	h (cm)	E_i (kN/cm ²)	b_{ci} (cm)	y (cm)	I_r (cm ⁴)	EI (kN.cm ²)
1	1	SS-ND	5,66	3,73	1802	6,51	-13,3	28,2	6.793.093
	2	SS-ND	5,66	3,92	1581	5,71	-9,5	28,7	3.206.862
	3	SS-ND	5,66	3,68	1425	5,15	-5,7	21,4	995.882
	4	SS-ND	5,66	3,23	1139	4,11	-2,2	11,6	122.513
	5	N1-ND	5,66	3,67	1311	4,74	1,2	19,5	070.487
	6	SS-ND	5,66	3,75	1616	5,84	4,9	25,7	870.724
	7	SS-ND	5,66	3,89	1647	5,95	8,7	29,2	2.816.231
	8	SS-ND	5,66	3,75	2013	7,27	12,6	32,0	6.791.062
E_c					1567	EI_{teo}		21.666.855	

Os valores teóricos e experimentais de rigidez à flexão são apresentados na tabela 5.10.

Tabela 5.10: Resultados teóricos e experimentais de rigidez à flexão.

Viga	Espécie	Adesivo	Rigidez à flexão		
			EI_{teo} (kN.cm ²)	$EI_{\text{exp},1}$ (kN.cm ²)	$EI_{\text{exp},2}$ (kN.cm ²)
1	Pinus	Mamona	21.666.855	25.521.813	21.442.537
2	Pinus	Mamona	21.140.021	19.948.123	15.493.455
3	Pinus	Mamona	25.248.692	9.489.326	7.431.532
4	Pinus	Cascophen	23.612.413	22.995.510	20.826.125
5	Pinus	Cascophen	20.667.949	20.825.018	16.849.441
6	Pinus	Cascophen	24.254.795	23.124.501	17.777.829
7	Pinus	Purbond	16.007.995	16.007.995	13.340.428
8	Eucalipto	Mamona	16.834.870	18.769.521	14.964.572
9	Eucalipto	Mamona	17.420.123	20.242.264	18.348.277
10	Eucalipto	Mamona	24.111.811	22.787.514	20.885.231
11	Eucalipto	Cascophen	23.692.532	31.890.999	28.485.491
12	Eucalipto	Cascophen	22.971.937	20.451.837	17.199.895
13	Eucalipto	Cascophen	22.725.264	19.175.735	16.506.056
14	Eucalipto	Purbond	24.014.082	13.555.741	9.907.146

A eficiência da laminação pode ser entendida como a relação entre a rigidez

experimental e a rigidez teórica. Assim, a eficiência η é obtida por:

$$\eta = \frac{EI_{exp}}{EI_{teo}} \quad 5.5$$

A tabela 5.11 indica os valores de eficiência obtidos para as vigas.

Tabela 5.11: Valores de eficiência das vigas da espécie Pinus Caribea

Viga	Espécie	Adesivo	Relação vão/altura	Eficiência	
				$\eta_{exp,1}$	$\eta_{exp,2}$
1	Pinus	Mamona	6,3	1,18	0,99
2	Pinus	Mamona	6,3	0,94	0,73
3	Pinus	Mamona	6,3	0,38	0,29
4	Pinus	Cascophen	6,2	0,97	0,88
5	Pinus	Cascophen	6,2	1,01	0,82
6	Pinus	Cascophen	6,3	0,95	0,73
7	Pinus	Purbond	6,4	1,05	0,83
8	Eucalipto	Mamona	6,6	1,11	0,89
9	Eucalipto	Mamona	6,7	1,16	1,05
10	Eucalipto	Mamona	6,2	0,95	0,87
11	Eucalipto	Cascophen	6,1	1,35	1,20
12	Eucalipto	Cascophen	6,1	0,89	0,75
13	Eucalipto	Cascophen	6,1	0,84	0,73
14	Eucalipto	Purbond	5,9	0,56	0,41

Na condução dos ensaios de flexão, notou-se, para todas as vigas ensaiadas, uma deformação pronunciada na região do apoio e de aplicação da carga, por compressão normal às fibras. Isso influenciou significativamente os deslocamentos medidos.

A ocorrência dessas deformações excessivas é devida, principalmente, pela menor relação vão/altura das vigas testadas, comparando-se com os elementos estruturais normalmente usados.

Assim, os resultados e as análises efetuadas neste item são apenas de caráter exploratório e para comparação.

De uma maneira geral, os resultados obtidos para a eficiência $\eta_{exp,2}$ são mais adequados que os resultados obtidos para a eficiência $\eta_{exp,1}$, para o qual foram obtidos alguns valores sem sentido físico, isto é, eficiência muito superior a 1. Um valor de eficiência um pouco superior a 1 é aceitável, devido aos erros experimentais e à possível influência do adesivo.

Para a espécie Pinus, na tabela 5.11, observa-se que a viga 1 confeccionada com o adesivo PU Mamona obteve valor de eficiência próximo da unidade para $\eta_{exp,2}$, enquanto, na viga 2, a eficiência foi semelhante ao valor obtido para as viga 6 colada com o adesivo Cascophen. Nota-se também que a viga 3 apresentou eficiência inferior à esperada devido à

presença de defeito de colagem na viga antes de ser ensaiada. Para as vigas confeccionadas com o adesivo Cascophen, nota-se uma eficiência, $\eta_{\text{exp},2}$, semelhante entre as vigas 4 e 5. A viga colada com o adesivo Purbond apresentou eficiência semelhante às vigas coladas com o adesivo Cascophen.

Para a espécie Eucalipto, na tabela 5.11, observa-se valores de eficiência semelhantes para $\eta_{\text{exp},2}$ para as vigas 8 e 10 (confeccionadas com o adesivo PU Mamona) e para as vigas 12 e 13 (confeccionadas com o adesivo Cascophen), com resultados superiores para as vigas confeccionadas com o adesivo PU Mamona. Nota-se, também, que as vigas 9 (PU Mamona) e 11 (Cascophen) obtiveram resultados superiores ao valor limite. A viga confeccionada com o adesivo Purbond apresentou resultados de eficiência inferiores às vigas coladas com o adesivo Cascophen.

5.3.1.2 - Avaliação da ruptura das vigas

Para avaliação da ruptura das vigas, por simplificação, foram utilizadas as equações clássicas da Resistência dos Materiais, apesar de não ser mais válida a hipótese de proporcionalidade entre as tensões e deformações (Lei de Hooke).

Determinou-se a tensão de cisalhamento máxima (τ_{max}) nas vigas, na ruptura, de seção transversal retangular, de largura b e altura h , a partir do esforço cortante (V_{max}) nos trechos situados entre cada apoio e a força adjacente à ele, correspondente à força de ruptura, pela equação 5.6.

$$\tau_{\text{max}} = \frac{3 V_{\text{max}}}{2 bh} \quad 5.6$$

A tensão normal máxima (σ_{max}), paralela às fibras da madeira, foi determinada por intermédio da equação 4, a partir do momento máximo (M_{max}) no trecho entre as forças aplicadas, correspondente ao momento provocado pela força de ruptura.

$$\sigma_{\text{max}} = \frac{6.M_{\text{max}}}{b.h^2} \quad 5.7$$

A tabela 5.12 apresenta os valores obtidos para F_r , M_{max} , τ_{max} e σ_{max} , bem como as formas de ruptura.

Tabela 5.12: Valores obtidos para F_r (kN), M_{max} (kN.m), τ_{max} (MPa) e σ_{max} (MPa).

Viga	Espécie	Adesivo	F_r (kN)	M_{max} (kN.m)	Formas Ruptura	τ_{max} (MPa)	σ_{max} (MPa)
1	Pinus	Mamona	160,48	47,26	A	7,18	60,34
2	Pinus	Mamona	148,90	43,80	A	6,57	52,00
3	Pinus	Mamona	62,87	18,55	C	2,40	20,09
4	Pinus	Cascophen	119,12	35,34	A	4,93	40,66
5	Pinus	Cascophen	160,48	47,24	A	7,65	63,28
6	Pinus	Cascophen	138,97	41,69	A	5,50	46,17
7	Pinus	Purbond	148,9	43,93	D	5,86	50,45
8	Eucalipto	Mamona	99,27	29,78	E	4,52	39,94
9	Eucalipto	Mamona	163,79	48,05	E	7,64	68,36
10	Eucalipto	Mamona	153,2	47,24	B	6,29	51,95
11	Eucalipto	Cascophen	145,51	43,65	E	5,97	48,85
12	Eucalipto	Cascophen	129,05	38,71	E	5,58	45,02
13	Eucalipto	Cascophen	99,27	29,78	B	4,34	35,11
14	Eucalipto	Purbond	82,72	24,27	B	3,36	26,43

O desempenho estrutural das vigas de madeira laminada colada foi analisado considerando-se a forma de ruptura, tensão de cisalhamento máxima (τ_{max}) e tensão normal máxima (σ_{max}) atuantes.

Na tabela 5.12, nota-se para espécie Pinus, uma predominância na forma de ruptura por cisalhamento predominante na madeira, com exceção da viga 3, que apresentou defeito de fabricação notável mesmo antes da realização dos ensaios de flexão; e da viga 7 que rompeu por tração na borda inferior. Para as outras vigas, os adesivos apresentaram comportamento semelhante, mostrando um bom comportamento dos mesmos, tendo em vista que a ruptura foi predominante por cisalhamento na madeira, ou ocorreu por tração. Também, pôde ser observado que os valores atuantes de tensão de cisalhamento máxima τ_{max} foram menores que os valores obtidos no capítulo 4 para a resistência ao cisalhamento na lâmina de cola (f_v), que foram iguais a 9,4 MPa (PU Mamona) e 10,7 MPa (Cascophen). No capítulo 3, foi obtido um valor médio para a resistência à tração paralela às fibras da madeira (f_{t0}), igual a 79,5 MPa, enquanto que a viga 7 rompeu por tração com um valor de tensão normal igual 50,45 MPa.

Para a espécie Eucalipto, como mostra a tabela 5.12, obteve-se uma predominância de uma forma de ruptura por esmagamento no apoio, o que não indica um problema na colagem, mas sim uma característica da madeira. Essa forma de ruptura, observada em 4 vigas, não era esperada. Também, pôde ser observado que os valores atuantes de tensão de cisalhamento máxima τ_{max} foram menores que os valores obtidos no capítulo 4 para a resistência ao cisalhamento na lâmina de cola (f_v), iguais a 8,4 MPa (PU Mamona) e 8,7 MPa (Cascophen), para a espécie Eucalipto. Os valores de σ_{max} foram menores que os valores obtidos no capítulo 3

para a resistência à tração paralela às fibras da madeira (f_{t0}), igual a 77,4 MPa para a espécie Eucalipto, para todas as vigas ensaiadas.

5.3.2 - Resistência ao cisalhamento na lâmina de cola

A tabela 5.13 apresenta os valores de resistência ao cisalhamento na lâmina de cola para os corpos-de-prova (CP) retirados das vigas, corpos-de-prova com dimensão estrutural e corpos-de-prova apresentados no capítulo 4.

Tabela 5.13: Resistência ao cisalhamento na lâmina de cola.

Resistência ao cisalhamento na lâmina de cola (MPa)	TRATAMENTO					
	SECO					
	PINUS			EUCALIPTO		
	Mamona	Purbond	Cascophen	Mamona	Purbond	Cascophen
CP (vigas)	9,6	9,4	11,9	10,3	9,6	10,0
Estrutural (vigas)	9,6	9,0	10,6	8,6	8,2	9,2
CP (cap. 4)	9,4	-	10,7	8,4	-	8,7

Os corpos-de-prova apresentaram resultados semelhantes aos corpos-de-prova obtidos no capítulo 4. Nota-se que os corpos-de-prova retirados das vigas possuem resistência superior aos corpos-de-prova do capítulo 4; isto indica que o procedimento de colagem das vigas foi eficiente.

A figura 5.14 apresenta, para as espécies Pinus e Eucalipto, a distribuição percentual dos corpos-de-prova em cada um dos grupos, para o tratamento Seco.

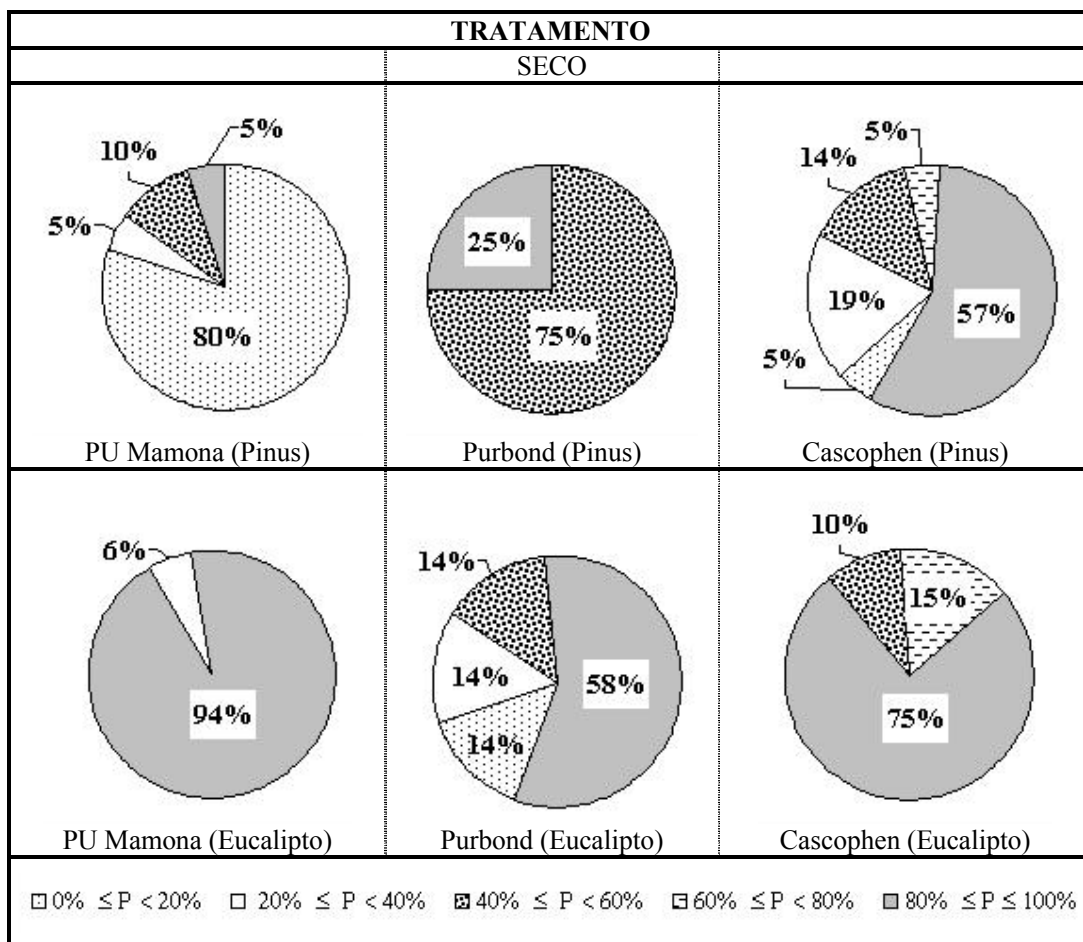


Figura 5.14 – Distribuição percentual em função da Porcentagem de ruptura na madeira na área cisalhante.
Cisalhamento na lâmina de cola.

Nota-se para os adesivos Cascophen e PU Mamona um comportamento semelhante aos resultados obtidos no capítulo 4. Para o adesivo Purbond, onde a quantidade de corpos-de-prova retirados foi inferior aos demais adesivos, os resultados indicam um desempenho melhor quando aplicado à espécie Eucalipto.

6 – CONCLUSÕES

Várias conclusões obtidas nesse trabalho foram comentadas no decorrer dos capítulos anteriores. A seguir, estão destacadas as principais, separadas pelos tópicos estudados.

Resistência de emendas dentadas com dimensão estrutural

Para a espécie Pinus, a comparação entre todos os adesivos com perfil vertical mostrou que entre o adesivo Cascophen e o adesivo Cascorez, e entre o adesivo Purbond e o adesivo Poliuretano à base de óleo de Mamona, não existem diferenças estatísticas. O adesivo que mais se destacou foi o adesivo poliuretano Wonderbond, com desempenho superior inclusive ao Cascophen, adesivo de uso tradicional na fabricação de madeira laminada colada, seguidos dos adesivos: Cascorez, Purbond, Poliuretano à base de óleo de Mamona, e MUF.

Para a espécie Eucalipto, a comparação entre todos os adesivos com perfil vertical revelou semelhança entre os diversos adesivos. Pode ser destacado que entre o adesivo Purbond e Wonderbond, e entre o adesivo Wonderbond e o adesivo Poliuretano à base de óleo de Mamona, não existem diferenças estatísticas. O adesivo que mais se destacou foi o adesivo Purbond, seguido dos adesivos Wonderbond, Cascorez, Cascophen, Poliuretano à base de óleo de Mamona, e MUF.

A tabela 6.1 apresenta a eficiência das emendas coladas (razão entre as resistências da lâmina com emenda dentada e a da lâmina sem emenda) para os adesivos testados, repetindo os valores apresentados anteriormente na tabela 3.16.

Tabela 6.1: Eficiência (η) das emendas coladas

	ADESIVOS						
	A	B	C	D	E	F	G
Eficiência η (%)	Cascorez	Cascophen (Horizontal)	Cascophen (Vertical)	PU Mamona	Wonderbond	MUF	Purbond
η_1 - Pinus	70	67	70	57	79	33	58
η_2 - Eucaliptos	74	73	73	70	77	64	83
Razão (η_1/η_2)	0,95	0,92	0,96	0,81	1,03	0,52	0,70

Os adesivos poliuretanos Wonderbond e Purbond apresentaram a melhor eficiência de colagem para as madeiras de Pinus e de Eucalipto, respectivamente. A análise das razões entre

as eficiências de colagem indicou que os adesivos Cascorez e Cascophen possuem eficiências de colagem semelhantes quando aplicados às duas espécies. Por outro lado, os adesivos Poliuretano à base de óleo de Mamona, MUF e Purbond, possuem resultados melhores quando aplicados à espécie de Eucalipto.

Não ocorreu diferença estatisticamente significativa nos resultados obtidos para os perfis horizontal e vertical, ambos colados com Cascophen, para as duas espécies. Para a espécie Pinus, a resistência média do perfil vertical (55,6 MPa) foi ligeiramente superior à do perfil horizontal (53,6 MPa). Para a espécie Eucalipto, a resistência média do perfil vertical (56,4 MPa) foi quase igual à do perfil horizontal (56,6 MPa).

A análise dos modos de ruptura para o adesivo poliuretano à base de óleo de Mamona apresentou uma predominância de ruptura no modo 3, para ambas as espécies. Entretanto, a eficiência foi melhor para a espécie Eucalipto.

Para a espécie Pinus, de maneira geral os adesivos que apresentaram a maioria das rupturas no modo 4 também tiveram maior resistência à tração, (Wonderbond, Cascophen, Purbond e Cascorez). A maior incidência de rupturas no modo 1, que representa falha na colagem, ocorreu para o MUF. Este adesivo apresentou baixa resistência à tração, indicando que o mesmo não é adequado para o tipo de madeira utilizado.

Para a espécie Eucalipto, os adesivos MUF e Cascophen apresentaram a maior incidência de rupturas no modo 1. Entretanto, nesse caso, o adesivo MUF apresentou resultados mais eficientes de resistência à tração do que quando aplicado à espécie Pinus.

Alguns adesivos apresentaram uma predominância de peças rompidas com modos de ruptura semelhantes para as duas espécies de madeira, tais como: Adesivo Cascorez (Modo 4), Poliuretano à base de óleo de Mamona (Modo 3), Wonderbond (Modo 4) e MUF (Modo 1). E para a maioria dos casos, as ocorrências nos modos de ruptura 3, 4 e 5 correspondem às maiores resistências à tração, como era de se esperar, pois indicam uma boa colagem.

Avaliação do desempenho mecânico em diferentes condições de umidade para adesivos estruturais

Com relação aos ensaios de cisalhamento, as conclusões principais são:

- Para a espécie Pinus, o adesivo Cascophen apresentou melhores resultados de resistência em relação ao adesivo Poliuretano à base de óleo de Mamona para os tratamentos seco e fervido, e resultados estatisticamente equivalentes no caso do tratamento saturado. Os dois adesivos não apresentam diferença significativa estatisticamente entre os tratamentos saturado e fervido;
- Para a espécie Eucalipto, o adesivo Poliuretano à base de óleo de Mamona apresentou comportamento equivalente ao adesivo Cascophen para todos os tratamentos;

- a análise da porcentagem de falha na madeira indicou um melhor comportamento dos adesivos para a espécie Eucalipto, em relação à espécie Pinus. Comparando os dois adesivos, conclui-se que o adesivo à base de óleo de Mamona teve um desempenho semelhante ao do adesivo Cascophen para a espécie Eucalipto, e inferior para a espécie Pinus.

A tabela 6.2 mostra os valores da razão entre as resistências médias ao cisalhamento na lâmina de cola para o adesivo Cascophen e o adesivo Poliuretano à base de óleo de Mamona, repetindo os valores da razão apresentados na tabela 4.15.

Tabela 6.2: Razão entre as resistências médias dos adesivos.

	Adesivos	TRATAMENTOS		
		SECO	SATURADO	FERVIDO
Razão entre resistências (Pinus)	Mamona/Cascophen	0,88	0,81	0,79
Razão entre resistências (Eucalipto)	Mamona/Cascophen	0,97	0,92	1,02

Na tabela 6.2, para a espécie Pinus, as relações de resistência indicam que o adesivo de Mamona apresenta um comportamento de durabilidade similar ao adesivo Cascophen. Para a espécie Eucalipto, obtiveram-se razões de resistência próximas à unidade, para todos os tratamentos, denotando um comportamento semelhante para os dois adesivos, também em termos de durabilidade.

A tabela 6.3 apresenta a eficiência dos adesivos testados nos ensaios de resistências à tração das emendas dentadas em corpos-de-prova, em relação à resistência à tração dos corpos-de-prova (proposta) sem emendas, para os tratamentos Seco, Saturado e Fervido, realizados apenas para a espécie Pinus.

Tabela 6.3: Eficiência dos adesivos para as emendas dentadas em corpos-de-prova, para os tratamentos seco, saturado e fervido – Espécie: Pinus

Eficiências	TRATAMENTOS		
	SECO	SATURADO	FERVIDO
	f_{t0} (MPa)	f_{t0} (MPa)	f_{t0} (MPa)
Poliuretano à base de óleo de Mamona/Proposta	0,47	0,41	0,40
Purbond/Proposta	0,45	0,33	0,32
Cascophen/Proposta	0,52	0,52	0,48

Pode-se afirmar, de maneira geral, que a maior eficiência dos adesivos foi para o tratamento Seco. A eficiência do adesivo Cascophen não apresentou grandes alterações em relação aos tratamentos; de certa forma, mas em menor intensidade, o mesmo ocorreu para o

adesivo de Mamona. Entretanto, o adesivo Purbond apresentou uma grande queda na eficiência, para os tratamentos saturado e fervido, em relação ao seco.

Com relação aos ensaios de tração paralela (sem emendas), realizado apenas para a espécie Pinus, pode-se concluir que os corpos-de-prova da NBR 7190/97 apresentaram a maior parte da ruptura na região das garras, ao contrário dos corpos-de-prova do modelo proposto, que apresentou a maior parte das rupturas na região central, indicando ser este mais adequado, para a madeira utilizada no trabalho. Os ensaios conduzidos com o corpo-de-prova proposto mostraram que não ocorreu diferença significativa entre os tratamentos saturado e fervido, os quais apresentaram resultados inferiores ao do tratamento seco devido à influência do teor de umidade na resistência.

Em relação aos ensaios de flexão em vigas de madeira laminada colada

Com relação à avaliação da forma da ruptura das vigas, para a espécie Pinus, nota-se uma maior incidência de ruptura por cisalhamento predominantemente na madeira, com exceção da viga 3, que apresentou defeito de fabricação notável mesmo antes da realização dos ensaios de flexão, e da viga 7 que rompeu por tração na borda inferior. Isto indica um bom comportamento da colagem, com exceção da viga 3.

Para a espécie Eucalipto, ocorreu uma predominância de ruptura por esmagamento no apoio, o que não indica um problema na colagem, mas sim uma fragilidade da madeira. Essa forma de ruptura, observada em 4 vigas, não era esperada.

Os corpos-de-prova de resistência na lâmina de cola, isentos de defeito, retirados das vigas, apresentaram, para os adesivos Cascophen e Poliuretano à base de óleo de Mamona, resistência superior aos corpos-de-prova do capítulo 4. Isto indica que o procedimento de colagem das vigas foi eficiente. Por outro lado, os valores obtidos para os corpos-de-prova com dimensão estrutural são semelhantes aos valores obtidos no capítulo 4. Além disso, tem-se um indicativo que o adesivo Purbond apresenta um melhor desempenho quando aplicado à espécie Eucalipto.

De maneira geral, como conclusão final, específica ao poliuretano à base de óleo de Mamona, pode-se destacar que o mesmo teve um comportamento aceitável em relação ao adesivo Cascophen, principalmente para a espécie Eucalipto. Também se mostrou adequado na avaliação do desempenho mecânico em diferentes condições de umidade. Isso, aliado à sua trabalhabilidade, que foi observada no decorrer do trabalho, o indicam como uma alternativa tecnicamente viável para o emprego em MLC, desde que respeitadas as suas características de resistência.

7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AITC 117 - AMERICAN INSTITUTE of TIMBER CONSTRUCTION (2001) “*Standard specifications for structural glued laminated timber of softwood species manufacturing requirements*”.
- ALBUQUERQUE NOGUEIRA, M. C. J. (1991). “*Indicações para o emprego de dezesseis espécies de eucalipto na construção civil*”. São Carlos-SP. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo 116p.
- AMERICAN PLYWOOD ASSOCIATION (2000). “*Glulam Product Guide*. Tacoma”, Washington, EUA.
- AMERICAN SOCIETY for TESTING and MATERIALS (1981). ASTM D905-49. – “*Standard Test Methods for Strength properties of adhesive bonds in shear by compression loading*”.
- AMERICAN SOCIETY for TESTING and MATERIALS (1987). ASTM D906. “*Strength Properties of Adhesives in Plywood type Construction in shear by tension loading*”.
- AMERICAN SOCIETY for TESTING and MATERIALS (1993). ASTM D245 “*Standard Practice for Establishing Structural Grades and Related Allowable Properties for Visually Graded Lumber*”.
- AMERICAN SOCIETY for TESTING and MATERIALS (1994). ASTM D143 “*Standard Methods of Testing Small Clear Specimens of Timber*”.
- AMERICAN SOCIETY for TESTING and MATERIALS (1996). ASTM D3434 “*Standard Test Method for Multiple-Cycle Accelerated Aging Test (Automatic Boil Test) for Exterior Wet Use Wood Adhesives*”.
- AMERICAN SOCIETY for TESTING and MATERIALS (1996). ASTM D3737. – “*Standard Practice for Establishing Stresses for Structural Glued Laminated Timber*”.
- AMERICAN SOCIETY for TESTING and MATERIALS (1997). ASTM D198-84 – “*Standard Methods of Static Test of Timber in Structural Sizes*”.
- AMERICAN SOCIETY for TESTING and MATERIALS (1999). ASTM D 4688-99 “*Standard test Method for Evaluating Structural Adhesives for Finger Jointing Lumber*”

- AMERICAN SOCIETY for TESTING and MATERIALS (2002). AITC A190.1 “*American National Standard for wood products – Structural Glued Laminated Timber*”.
- AMERICAN SOCIETY for TESTING and MATERIALS (2003). ASTM D2559-03. – “*Standard Specification for Adhesives for structural laminated wood Products for use under exterior (wet use) exposure conditions*”.
- ARAÚJO, L.C.R. (1992). “*Caracterização química e mecânica de poliuretanas elastoméricas baseadas em materiais oleoquímicos*”. Dissertação de Mestrado. Instituto de Química de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos, 1992.
- ARAÚJO, L.C.R. (1998). “*Contribuição ao estudo dos poliuretanos flexíveis derivados de óleo de mamona determinando suas propriedades físicas e químicas*”. Tese de Doutorado, 103p. Instituto de Química de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1997). NBR 7190– “*Projeto de estruturas de madeira*”. Rio de Janeiro.
- AYARKWA, J.; HIRASHIMA, Y.; SASAKI, Y.; ANDO, K. (2000). Effect of glue type on flexural and tensile properties of finger-jointed tropical African hardwoods. *Forest Prod. J.* 50 (10): 59-68.
- AZAMBUJA, M.A. (2002). “*Avaliação do adesivo poliuretano à base de mamona para fabricação de madeira laminada colada (MLC)*”. Dissertação de Mestrado, 116p. Interunidades - Instituto de Química de São Carlos, Instituto de Física de São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Carlos, São Carlos.
- BARADIT, E. ; FUENTEALBA, C. (2000). “*Determinacion de las Constantes Elásticas del Pinus radiata por Ultrasonido.*” VII Encontro Brasileiro em Madeiras e Estruturas de Madeira, São Carlos, SP.
- BONO, C. T. (1996). “*Madeira laminada colada na arquitetura: Sistematização de obras executadas no Brasil.*” São Carlos. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- BROUGHTON, J.G.; HUTCHINSON, A.R.(2001). “*Adhesive systems for structural connections in timber*”. Joining Technology Reserch Centre, Oxford Brookes University, Gipsy Lane, Headington Campus, Oxford OX3 OBP, UK. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, Volume 21, Edição 3, Páginas 177-186.
- BUSTOS, C.; BEAUREGARD, R.; MOHAMMAD, M.; HERNÁNDEZ, R. E. (2003). Structural performance of finger-jointed black spruce wood lumber with different joint configurations. *Forest Prod. J.* 53 (9): 72-76.

- CALIL JUNIOR, C. “*O potencial da utilização do pinus na construção civil*”. *Téchne*, São Paulo - SP, v. 10, n. 60, p. 44-48, 2002.
- CARLO, E. (2003), “*Desenvolvimento e caracterização de um poliuretano monocomponente baseado em óleo vegetal com processo de cura pela umidade do ar*”. Dissertação de Mestrado, 207p. Interunidades - Instituto de Química de São Carlos, Instituto de Física de São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Carlos, São Carlos.
- CARPINETTI, L.C.R. (2003). “*Planejamento e análise de experimentos*”. Apostila código 03088. Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de engenharia de produção, 223p.
- CARREIRA, M. R. (2003). “*Critérios para classificação visual estrutural de peças de pinus spp*”. Dissertação de Mestrado, 182p, - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, SP.
- CASCOPHEN (2001). “*Adesivo à base de resorcinol-formol, para cura à temperatura ambiente, especialmente indicado para colagens de madeira à prova d'água.*” Alba Química, São Paulo.
- CHEN, G. (2001). Two-part polyurethane adhesive for structural finger joints. *Wood Adhesives 2000. Session 2A: Industrial applications of isocyanates and polyurethanes.* Forest Prod. Soc., Madison, WI. pp. 15-16.
- CHEUNG, A. B. ; CALIL Jr. C. ; CARREIRA, M. R. ; MARTINEZ, M. (2002). “*Avaliação da resistência à tração de emendas dentadas em peças de madeira de dimensões estruturais*”. *Revista Ciência y Tecnología*, Chile (no prelo).
- CHRISTIANSEN, A.W.; VICK, C.B. (2000). “*Hydroxymethylated resorcinol coupling agent for wood surfaces to produce exterior durable bonds*”. *Silanes and Other Coupling Agents*, vol. 2, pp. 193-208. Ed. K. L. Mittal, VSP.
- CLARO NETO, S. (1997). “*Caracterização físico-química de um poliuretano derivado do óleo de mamona utilizado para implantes ósseos*”. São Carlos-SP. Tese de Doutorado, 127p. Instituto de Química de São Carlos. Universidade de São Paulo.
- COIADO, B. P.; DIAS, A. A. “*Avaliação da resistência à tração paralela às fibras de peças de madeira de pinus sp com dimensões estruturais e classificadas visualmente*”. In: IX ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 2004, Cuiabá-MT. Anais: Cuiabá: ed. UFMT, 2004. v. Cd-rom. p. 10p.
- COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION (1995). “*Design of timber structures*”. EUROCODE 5, Brussels.

- DESAI, S.D.; PATEL, J.V.; SINHÁ, V.K. (2003). “*Polyurethane adhesive system from biomaterial-based polyol for bonding wood*”. *Internacional Journal of Adhesives*, may.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NURMUNG (1971). DIN 68140-1– “Keilzinkenverbindungen von Holz”, Berlin.
- DUARTE, R. S.; MANTILLA CARRASCO, E.V. (2006), “Avaliação experimental da resistência à flexão de vigas de madeira laminada colada com emendas tipo finger joint nas lâminas”. XXXII Jornadas Sulamericanas de Engenharia Estrutural, 22 a 26 de maio de 2006, Campinas-SP, Brasil.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (1995), “*Finger jointed structural timber CEN-EN 385 – Performance requirements and minimum production requirements*”. Bruxelas. 17p.
- GABRIEL, C. S. M. ; BALLARIN, A. W. (2000). “*Determinação do módulo de elasticidade da madeira de pinus taeda com o uso do método não-destrutivo das ondas de tensão.*” VII Encontro Brasileiro em Madeiras e Estruturas de Madeira, São Carlos, SP.
- GALLIGAN, L. W. ; MCDONALD, K. A. (2000). “*Machine grading of lumber – Practical concerns for lumber producers.*” Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-7 USDA, Department of Agriculture, Forest Service, Madison, WI.39 p.
- GEORGE, B.; SIMON, C.; PROPERZI, M.; PIZZI, A.; ELBEZ, G. (2003). “*Comparative creep characteristics of structural glulam wood adhesives*”. ENSTIB, University of Nancy 1, 27, rue du Merle Blanc, B.P. 1011, 88051 EPINAL Cedex 9 (pizzi@enstib.uhp-nancy.fr), France. *Holz als Roh-und Werkstoff*, volume 61, páginas 79-80, February, 2003.
- HENRIQUES DE JESUS, J.M. (2000). “*Estudo do adesivo poliuretano à base de mamona em madeira laminada colada (MLC).*” Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos.
- HERNANDEZ, R. (1998). “*Analisis of Strain in Finger-Jointed Lumber.*” in: 5th World Conference on Timber Engineering, Montreux, Switzerland.
- JAYNE, B.A. (1959). *Vibrational properties of wood as indices of quality*. *Forest Products Journal*. 9(11).
- LANGE, D.; FIELDS, J. D.; STIRN, S. A. (2001). Fingerjoint application potentials for one-part polyurethanes. *Wood Adhesives 2000*. Session 2A: Industrial applications of isocyanates and polyurethanes. *Forest Prod. Soc.*, Madison, WI. pp. 17-18.
- LARA-PALMA, H. A. ; BALLARIN, A. W. (2003). “*Propriedades de contração na madeira juvenil e adulta de Pinus taeda L.*” *Scientia Forestalis*, Piracicaba - SP, n. 64, p. 13-22.

- LE COURRIER DU BOIS (1987). “*Le bois lamell-colle*”. *Realisations spectaculaires en bois lamelle-colle*. Bruxelles, Belgique nº 77, p.21-23.
- LOUW, F. (1964). “*Finger-jointing techniques and applications*”. Timber Research Unit, CSRI, Pretoria, Nº RU 1.34.
- MACEDO, A. N. (1996). “*Estudo de emendas dentadas em madeira laminada colada (MLC): Avaliação de método de ensaio*.” Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, SP.
- MACÊDO, A. N. (1996). “*Estudo de emendas dentadas em madeira laminada colada (MLC); avaliação de método de ensaio*”. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos, 115p.
- MANTILLA CARRASCO, E. V. (1989). “*Resistência, Elasticidade e Distribuição de Tensões nas Vigas Retas de Madeira Laminada Colada (MLC)*”. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, 348p, Universidade de São Paulo. São Carlos, SP.
- MANTILLA CARRASCO, E.V. (1984). “*Ligações estruturais de madeira por adesivos*.” Dissertação de Mestrado, 2v - 221p. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- MARTÍNEZ, ESPINOSA M. (2002). “*Desenvolvimento de um modelo estatístico para aplicação no estudo de fadiga em emendas dentadas de madeira*”. Tese de Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais. Instituto de Física e Química de São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos-SP. Universidade de São Paulo.
- MOODY, R. C. (1977). “*Improved Utilization of Lumber in Glued Laminated Beams*”. Research paper FPL 292, Forest Products Laboratory, Madison, WI.
- MOTTA BEZ, R.; SZÜCS, C. P. (2002) “Análise do desempenho de vigas maciças de Angelim Pedra e vigas de Eucalipto Grandis em MLC multidirecional: um estudo comparativo”. VIII EBRAMEM - 24 a 26 julho de 2002 - Uberlândia-MG, Faculdade de Engenharia Civil – UFU.
- OLIVEIRA, F. G. R & SALES (2005). “Contribuição ao estabelecimento de parâmetros para ensaios não-destrutivos em madeira serrada por meio de ondas de ultra-som”. Tese de doutorado, Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Interunidades, Ciência e Engenharia de Materiais, 91p., São Carlos, Brasil.
- OLIVEIRA, J. T.; FREITAS, A. R. (1995). “*Painéis à base de madeira*”. *Escola Politécnica da USP*. Departamento de Engenharia de Construção Civil, EPUSP, São Paulo, 1995.

- OLMOS, M.A.C. (1992). “*Equipamento e processo de fabricação de chapas aglomeradas a partir de resíduos de madeira*”. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos-SP.
- PROPERZI, M.; PIZZI, A.; UZIELLI, L. (2003). “*Comparative wet wood glueing performance of different types of Glulam wood adhesives*”. ENSTIB, University of Nancy 1, 27, rue du Merle Blanc, B.P. 1011, 88051 EPINAL Cedex 9 (pizzi@enstib.uhp-nancy.fr), France. *Holtz als Roh-und Werkstoff*, volume 61, páginas 77-78, February.
- RAMMER, D.R. (1998). “*Shear Strength of Glued-Laminated Timber Beams and Panels*”, Forest Products Laboratory, USDA Forest Service. Department of Agriculture, Forest Products Laboratory, 1998.
- RAMMER, D.R. and SOLTIS, L.A., (1994). “*Experimental Shear Strength of Glued-Laminated Beams*, Res. Pap. FPL-RP-527. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Products Laboratory, 1994.
- RAMMER, D.R.; SOLTIS, L.A. and LEBOW, P. K. (1996). “*Experimental Shear Strength of Solid-Sawn Douglas Fir Beams*, Res. Pap. FPL-RP-5. Madison, Department of Agriculture, Forest Products Laboratory, 1996.
- RICHTER, K.; SCHIRLE, M.A. (2002). “*Interaction of 1 K PUR Adhesives and different Wood Surface Parameters*”. Wood Adhesion and Glued Products, Wood Composites & Chemistry Competence Centre Austria, COST E13, Vienna, 137 – 147.
- _____ “*Behaviour of 1 K PUR adhesives under increased moisture and temperature conditions*”. Wood Adhesion and Glued Products, Wood Composites & Chemistry Competence Centre Austria, COST E13, Vienna, 149 – 154.
- ROCCO, F. A.; SALES, A. (1998). “*Materiais Derivados de Madeira: Processos e aplicações*”. Notas de Aula, segundo semestre. LaMEM – EESC/IQSC/IFSC –USP, São Carlos.
- ROCCO, F. A.; SALES, A. (1998). “*Materiais Derivados de Madeira: Processos e aplicações*”. Notas de Aula, segundo semestre. LaMEM – EESC/IQSC/IFSC –USP.
- RODRIGUES, W. (2004). “*Estudo de um tipo especial de resina poliuretana derivada de óleo de mamona como agente modificador da madeira*”. Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, USP, Brasil.
- ROSS, J. R. ; PELLERIN, R. F. (1994). “*Nondestructive testing for assessing wood members in structures*”. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-70 USDA, Department of Agriculture, Forest Service, Madison, WI.42 p.

- ROSS, J. R.; RITTER, M.A.; SCHAD, K.C. (1996). “*Determining in-place modulus of elasticity of stress-laminated timber decks using NDE*”. In National conference on wood transportation structures; Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.
- RUSSELL, C. ; HERNANDEZ, R. ; LIU, Y. J. (1999). *Wood handbook—Wood as an engineering material - Chapter 11 - Glued Structural Members*. Was., D.C., FPL – FS – USDA, Department of Agriculture, Forest Service, Madison.
- SALES, A. (1991). “*Características de resistência mecânica de algumas espécies de eucalipto do estado de São Paulo*”. São Carlos-SP. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, 204p.
- SANDERS, C.L., (1996). “The Effects of Testing Conditions on the Measured Shear Strength of Wood Beams, MS special project, Washington State University, Pullman, WA, 1996.
- SILVA, S. A. M. (2003) “Chapa de média densidade (MDF) fabricada com poliuretana monocomponente derivada de óleo de mamona - caracterização por método destrutivo e por ultra-som”, Doutorado em Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, Brasil.
- SOMANI, K. P.; KANSARA, S.S.; PATEL, N.K.; RAKSHIT, A.K. (2003) “*Castor oil based polyurethane adhesives for wood-to-wood bonding.*” *Internacional Journal of Adhesion & Adhesives*, 269-275, 12 March.
- SOUTHERN PINE INSPECTION BUREAU (1994). “*Standard Grading Rules for Southern Pine Lumber*”. Pensacola, Fla.
- SZÜCS, C. A. (1992) Entalhes múltiplos, determinação da geometria, da pressão de colagem e do enfraquecimento causado. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 4., São Carlos. *Anais* São Carlos: LaMEM-EESC-USP, v.3. p.21-31.
- VERREAULT, C. (1999). Performance evaluation of green gluing for finger jointing. Internal Rept. CFS-VA # 2295. Forintek Canada Corp., Ste-Foy, QC, Canadá. 59 pp.
- VICK, C. B.; RICHTER, K.; RIVER, B.H.; FRIED, A.R. (1995). “*Hydroxymethylated resorcinol coupling agent for enhanced durability of bisphenol-A-epoxy bonds to Sitka spruce*”. *Wood Fiber Science* 27,1,2-12.
- VICK, C.B. (1999). “*Bonding Wood an Wood Products*”. In *Wood Handbook: Wood as an Engineering Material*. Forest Products Laboratory USDA/FS. Cap.9, Washington.

- VICK, C.B.; OKKONEN, E.A. (1998). “*Strength and durability of one-part polyurethane adhesive bonds to wood*”. Forest Products Journal, vol. 48 (11/12), páginas 71-76.
- VICK, C.B.; OKKONEN, E.A. (2000). “*Durability of one-part polyurethane bonds to wood improved by HMR coupling agent*”. Forest Products Journal, vol. 50 (10), páginas 69-75, <http://www.fpl.fs.fed.us>.
- VICK, C.B.; RICHTER, K.; RIVER, B.H. (1996). Patent 5,543,487: “*Hydroxymethylated resorcinol coupling agent and method for bonding*”.
- ZHANG, L.; DING, H. (1997). “*Study on the Properties, Morphology, and Applications of Castor Oil Polyurethane-Poly (methyl methacrylate) IPNs*”. Department of Chemical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin, Republic of China, Journal of Applied Polymer Science, volume 64, page 1393 – 1401, 16 May.

ANEXO A

Madeira: *Pinus hondurensis*

Tabela A-1: Quantidade de anéis por polegada, nas seções à esquerda e à direita da emenda;

Tabela A-2: Porcentagem de madeira de inverno nas seções à esquerda e à direita da emenda;

Tabela A-3: Classificação visual das peças utilizadas em cada lâmina;

Tabela A-4: MOE (GPA) nas peças utilizadas em cada lâmina (vibração transversal);

Tabela A-5: Resultados dos ensaios de caracterização de Umidade (%);

Tabela A-6: Resultados dos ensaios de caracterização de densidade, ρ_{ap} (g/cm³);

Tabela A-7: Resultados dos ensaios de caracterização de resistência à compressão, f_{c0} (MPa).

Tabela A-1: Quantidade de anéis por polegada, nas seções à esquerda e à direita da emenda.

Grupo	TRATAMENTOS							
	A	B	C	D	E	F	G	H
	Cascorez	Cascophen (Hor)	Cascophen (Ver)	PU Mamona	Wonderbond	MUF	Purbond	Controle
1	5 - 5	4 - 3	2 - 1	6 - 6	3 - 5	6 - 5	5 - 5	4 - 5
2	3 - 3	3 - 4	3 - 3	5 - 5	4 - 3	5 - 6	3 - 3	3 - 4
3	5 - 6	5 - 4	6 - 4	7 - 5	4 - 5	5 - 5	5 - 6	5 - 4
4	5 - 5	4 - 4	2 - 7	4 - 5	3 - 6	5 - 5	5 - 5	4 - 7
5	3 - 4	4 - 5	6 - 4	4 - 7	4 - 6	4 - 7	3 - 4	3 - 5
6	2 - 3	4 - 7	4 - 4	6 - 6	3 - 3	3 - 3	2 - 3	4 - 1
7	4 - 4	4 - 5	5 - 5	6 - 3	3 - 3	5 - 3	4 - 4	5 - 5
8	2 - 4	5 - 3	3 - 3	8 - 6	3 - 4	5 - 6	2 - 4	5 - 6
9	3 - 3	3 - 6	3 - 4	6 - 5	3 - 4	4 - 6	3 - 3	5 - 5
10	5 - 6	4 - 5	4 - 2	5 - 4	5 - 5	4 - 5	5 - 6	5 - 5
11	4 - 2	6 - 4	3 - 6	4 - 5	3 - 4	4 - 5	4 - 2	6 - 7
12	4 - 5	4 - 3	4 - 4	5 - 6	5 - 4	6 - 6	4 - 5	3 - 4
13	5 - 5	5 - 7	4 - 5	4 - 5	5 - 3	6 - 5	5 - 5	4 - 6
14	6 - 6	3 - 5	6 - 6	5 - 8	6 - 6	3 - 5	6 - 6	3 - 3
15	5 - 5	6 - 3	3 - 7	5 - 4	4 - 3	6 - 3	5 - 5	3 - 3
16	4 - 4	5 - 3	4 - 5	5 - 5	7 - 5	4 - 6	4 - 4	6 - 6
17	4 - 5	4 - 5	6 - 6	5 - 5	5 - 4	5 - 5	4 - 5	5 - 5
18	6 - 6	5 - 4	7 - 5	5 - 7	6 - 7	6 - 6	6 - 6	4 - 5
19	6 - 4	3 - 6	5 - 5	4 - 5	4 - 6	4 - 7	6 - 4	5 - 4
20	3 - 5	7 - 6	6 - 5	4 - 4	5 - 5	7 - 7	3 - 5	5 - 6
21	3 - 3	4 - 6	5 - 4	6 - 6	4 - 3	7 - 4	3 - 3	5 - 7
22	6 - 6	6 - 5	8 - 5	6 - 5	6 - 6	6 - 8	6 - 6	4 - 4
23	6 - 6	7 - 6	6 - 6	5 - 5	6 - 5	6 - 6	6 - 6	4 - 6
24	5 - 9	4 - 7	7 - 5	4 - 8	5 - 5	6 - 4	5 - 9	9 - 5
25	5 - 5	5 - 6	4 - 8	8 - 8	5 - 3	6 - 5	5 - 5	5 - 6

Tabela A-2: Porcentagem de madeira de inverno nas seções à esquerda e à direita da emenda

Grupo	TRATAMENTOS							
	A	B	C	D	E	F	G	H
	Cascorez	Cascophen (Hor)	Cascophen (Ver)	PU Mamona	Wonderbond	MUF	Purbond	Controle
1	24 - 18	37 - 26	8 - 9	30 - 31	9 - 22	45 - 28	45 - 45	14 - 23
2	12 - 18	9 - 18	12 - 17	19 - 20	16 - 13	22 - 24	32 - 32	10 - 15
3	45 - 41	29 - 36	27 - 27	27 - 29	27 - 29	25 - 26	26 - 35	33 - 27
4	45 - 41	35 - 28	18 - 20	25 - 27	23 - 23	31 - 30	21 - 21	28 - 56
5	18 - 12	24 - 22	25 - 21	18 - 21	14 - 13	16 - 16	17 - 20	23 - 52
6	10 - 14	33 - 33	31 - 27	39 - 25	15 - 13	18 - 15	13 - 19	27 - 10
7	25 - 25	15 - 18	19 - 29	24 - 20	23 - 23	17 - 18	41 - 31	26 - 14
8	18 - 17	9 - 6	12 - 13	30 - 32	22 - 23	26 - 29	15 - 16	13 - 16
9	15 - 12	21 - 21	19 - 18	31 - 30	13 - 17	23 - 25	35 - 38	16 - 17
10	35 - 38	15 - 18	16 - 10	24 - 32	39 - 41	31 - 33	23 - 19	26 - 17
11	19 - 20	42 - 36	34 - 33	17 - 21	24 - 27	13 - 19	26 - 7	34 - 40
12	15 - 13	14 - 14	28 - 27	24 - 23	29 - 23	24 - 26	29 - 25	16 - 17
13	25 - 28	49 - 53	15 - 27	24 - 21	20 - 21	40 - 25	16 - 16	20 - 40
14	19 - 20	48 - 39	25 - 25	28 - 32	25 - 25	26 - 27	35 - 35	13 - 14
15	37 - 43	41 - 40	13 - 12	23 - 23	16 - 19	34 - 37	28 - 28	17 - 21
16	30 - 31	28 - 18	14 - 20	24 - 19	41 - 41	37 - 36	19 - 19	24 - 20
17	17 - 17	16 - 16	36 - 34	39 - 47	34 - 35	23 - 25	29 - 16	14 - 19
18	24 - 18	20 - 19	12 - 13	34 - 39	26 - 27	54 - 58	25 - 23	19 - 29
19	36 - 34	17 - 22	18 - 28	28 - 34	33 - 29	19 - 23	25 - 14	18 - 19
20	20 - 25	32 - 38	40 - 47	24 - 25	26 - 28	39 - 43	15 - 16	38 - 55
21	33 - 47	30 - 22	12 - 28	20 - 22	11 - 14	18 - 18	15 - 15	22 - 28
22	21 - 21	42 - 48	21 - 25	27 - 28	44 - 44	50 - 59	31 - 31	14 - 26
23	34 - 32	23 - 22	29 - 27	27 - 27	52 - 36	35 - 29	33 - 33	17 - 19
24	45 - 46	32 - 37	50 - 40	37 - 40	28 - 29	35 - 35	24 - 22	40 - 30
25	38 - 42	31 - 32	44 - 39	46 - 47	20 - 17	36 - 44	40 - 37	46 - 51

Tabela A-3: Classificação visual das peças utilizadas em cada lâmina

Grupo	TRATAMENTOS							
	A	B	C	D	E	F	G	H
	Cascorez	Cascophen (Hor)	Cascophen (Ver)	PU Mamona	Wonderbond	MUF	Purbond	Controle
1	SS - SS	SS - SS	SS - N1	SS - N1	N2 - SS	SS - SS	SS - SS	SS - SS
2	SS - SS	SS - SS	SS - SS	SS - SS	N2 - N3	SS - SS	SS - SS	N1 - N1
3	SS - SS	SS - SS	N2 - N2	SS - SS	SS - N1	SS - SS	SS - SS	N2 - N2
4	N2 - SS	SS - SS	SS - SS	SS - SS	N1 - N1	SS - SS	SS - SS	SS - SS
5	SS - SS	SS - SS	SS - N3	SS - SS	SS - SS	N2 - SS	N2 - SS	N1 - N1
6	N2 - N2	SS - SS	SS - SS	SS - SS	SS - SS	SS - SS	SS - SS	SS - SS
7	SS - SS	SS - SS	N2 - N2	N3 - N3	SS - N3	SS - SS	SS - SS	N1 - N1
8	SS - SS	SS - N3	SS - SS	SS - SS	SS - SS	SS - SS	SS - SS	SS - SS
9	N2 - SS	SS - SS	SS - SS	N1 - SS	SS - SS	SS - SS	SS - SS	SS - SS
10	SS - SS	N1 - N3	N3 - N3	SS - SS	SS - SS	SS - N1	SS - N1	N2 - N2
11	SS - SS	SS - SS	SS - SS	SS - SS	N1 - SS	SS - SS	SS - SS	SS - SS
12	SS - SS	N1 - N2	SS - SS	SS - SS	SS - SS	SS - SS	SS - SS	SS - SS
13	SS - SS	SS - SS	SS - SS	N1 - N1	SS - SS	N2 - N2	N2 - N2	SS - SS
14	N1 - N1	N2 - SS	SS - SS	SS - SS	N1 - N1	SS - SS	SS - SS	SS - SS
15	SS - SS	SS - SS	SS - SS	SS - SS	SS - N2	SS - SS	SS - SS	SS - SS
16	SS - N2	SS - SS	N1 - SS	N1 - SS	SS - SS	SS - SS	SS - SS	N1 - N1
17	N2 - N2	SS - SS	N1 - SS	SS - SS	SS - SS	SS - SS	SS - SS	N1 - N1
18	N1 - N1	N3 - SS	N1 - N1	SS - SS	SS - SS	N2 - N1	N2 - N1	SS - SS
19	SS - SS	SS - SS	N2 - N2	SS - SS	SS - N1	SS - SS	SS - SS	N1 - N1
20	SS - N1	SS - SS	N2 - N2	SS - N2	SS - SS	SS - SS	SS - SS	SS - SS
21	SS - SS	N2 - N1	N1 - SS	SS - N1	SS - N2	SS - SS	SS - SS	N1 - N1
22	SS - SS	N1 - SS	SS - SS	N2 - N1	SS - SS	N1 - SS	N1 - SS	N2 - N2
23	N3 - N2	N1 - N2	SS - SS	SS - SS	SS - SS	SS - SS	SS - SS	N1 - N1
24	SS - SS	SS - SS	SS - SS	SS - SS	SS - SS	N1 - N1	N1 - N1	N2 - N2
25	SS - SS	SS - N3	SS - SS	SS - SS	SS - SS	SS - SS	SS - SS	N1 - N1

Tabela A-4: MOE (GPa) nas peças utilizadas em cada lâmina (vibração transversal).

Grupo	TRATAMENTOS							
	A	B	C	D	E	F	G	H
	Cascorez	Cascophen (Hor)	Cascophen (Vert)	Mamona (PU)	Wonderbond	MUF	Purbond	Controle
1	9,3 - 9,4	9,3 - 9,4	6,4 - 7,1	8,5 - 8,5	7,6 - 8,4	9,3 - 9,4	10,0 - 10,0	8,4 - 8,4
2	10,0 - 10,0	9,6 - 9,6	10,0 - 10,0	10,0 - 10,0	10,0 - 10,3	10,0 - 10,0	10,0 - 10,0	10,0 - 10,0
3	10,0 - 11,1	10,0 - 10,0	10,0 - 10,0	10,0 - 10,0	10,0 - 10,0	10,0 - 10,0	10,0 - 10,0	10,0 - 10,0
4	10,6 - 10,9	10,5 - 10,8	10,2 - 10,5	10,5 - 10,8	10,5 - 10,5	10,3 - 11,0	10,0 - 10,0	10,0 - 10,0
5	10,8 - 10,8	10,7 - 10,8	10,9 - 11,2	11,0 - 11,0	10,8 - 11,0	10,8 - 10,9	10,0 - 10,0	10,1 - 10,1
6	11,4 - 11,6	11,4 - 11,4	11,1 - 11,3	11,1 - 11,2	11,1 - 11,8	11,1 - 11,2	10,0 - 10,0	10,5 - 10,5
7	11,9 - 12,0	11,8 - 12,0	11,6 - 12,1	11,5 - 12,1	11,6 - 11,7	11,8 - 11,8	10,9 - 10,9	10,6 - 10,6
8	12,0 - 12,1	11,9 - 12,8	12,1 - 12,4	11,9 - 12,0	12,0 - 12,2	11,9 - 11,9	11,0 - 14,2	10,8 - 10,8
9	12,5 - 12,6	12,5 - 14,1	12,4 - 12,5	12,4 - 12,6	12,6 - 12,7	12,6 - 12,8	11,0 - 11,0	11,2 - 11,2
10	12,8 - 13,2	12,6 - 12,7	12,6 - 12,9	12,7 - 12,8	12,7 - 12,7	12,7 - 12,7	11,4 - 11,4	11,2 - 11,2
11	13,0 - 13,2	12,8 - 13,5	13,0 - 13,4	12,9 - 13,0	12,8 - 12,9	12,8 - 12,8	11,4 - 13,5	11,8 - 11,8
12	13,2 - 13,2	13,2 - 13,7	13,0 - 13,4	13,3 - 13,4	13,0 - 13,5	13,3 - 13,4	11,6 - 15,5	12,1 - 12,1
13	13,7 - 13,9	13,7 - 15,4	13,7 - 14,7	13,5 - 13,6	13,5 - 13,5	13,7 - 14,0	12,0 - 12,0	12,3 - 12,3
14	14,0 - 14,3	13,8 - 14,0	14,0 - 14,3	13,9 - 14,0	13,9 - 14,1	14,1 - 14,1	12,0 - 12,0	12,6 - 12,6
15	14,3 - 14,4	14,2 - 14,3	14,3 - 15,0	14,1 - 14,5	14,1 - 14,1	14,2 - 14,3	12,0 - 12,0	12,9 - 12,9
16	14,5 - 14,6	14,6 - 14,6	14,4 - 14,9	14,3 - 14,6	14,5 - 14,6	14,5 - 14,6	13,3 - 13,3	13,2 - 13,2
17	14,7 - 14,8	14,8 - 15,1	14,7 - 15,0	14,7 - 14,9	14,7 - 16,2	14,7 - 16,2	14,0 - 14,0	13,5 - 13,5
18	15,3 - 15,5	15,1 - 15,1	15,0 - 15,0	15,0 - 15,0	15,0 - 15,1	14,9 - 14,9	14,0 - 14,0	13,6 - 13,6
19	15,4 - 15,5	15,6 - 15,6	15,6 - 15,6	15,4 - 15,4	15,5 - 15,6	15,5 - 15,5	14,1 - 14,3	13,9 - 13,9
20	15,7 - 15,7	15,8 - 16,1	15,6 - 18,8	15,7 - 15,7	15,7 - 15,8	15,8 - 15,8	14,7 - 15,9	14,2 - 14,2
21	16,2 - 16,2	16,0 - 16,1	16,2 - 16,6	16,2 - 16,2	15,9 - 16,3	15,9 - 16,0	14,7 - 14,7	14,5 - 14,5
22	16,6 - 17,6	16,2 - 16,4	16,4 - 16,4	16,2 - 16,3	16,7 - 16,9	16,4 - 16,7	15,8 - 15,8	14,8 - 14,8
23	17,4 - 15,6	17,5 - 17,6	17,6 - 17,8	17,3 - 17,3	16,9 - 17,5	16,9 - 16,9	15,9 - 15,9	15,0 - 15,0
24	18,7 - 18,8	18,2 - 18,2	18,0 - 18,1	17,9 - 18,1	18,6 - 18,6	18,6 - 18,6	18,1 - 18,1	15,1 - 15,1
25	18,8 - 19,2	15,9 - 16,0	19,5 - 20,0	21,3 - 22,1	19,2 - 20,7	20,2 - 21,3	19,3 - 14,7	15,4 - 15,4

Tabela A-5: Resultados dos ensaios de caracterização de Umidade (%)

Bloco	TRATAMENTOS							
	A	B	C	D	E	F	G	H
	Cascorez	Cascophen (Hor)	Cascophen (Ver)	PU Mamona	Wonderbond	MUF	Purbond	Controle
1	12,9	11,2	12,9	13,1	10,7	12,5	13,5	13,4
2	13,3	13,4	11,5	14,0	11,6	13,2	14,1	12,3
3	12,4	13,1	12,6	13,4	10,9	13,4	13,2	12,3
4	13,1	10,0	12,5	13,7	10,5	13,2	13,1	11,5
5	13,8	10,7	11,9	13,6	11,1	12,2	12,1	12,2
6	12,2	11,3	12,1	13,2	10,9	13,0	13,5	13,6
7	11,2	13,6	13,6	14,1	10,5	13,6	12,5	14,3
8	14,0	14,0	11,7	13,6	10,3	13,0	13,7	11,6
9	12,5	11,3	12,6	13,8	11,7	12,9	13,2	13,5
10	13,1	10,6	13,2	13,2	11,2	13,0	12,6	12,1
11	14,2	11,4	14,1	13,7	10,6	13,2	11,5	11,6
12	13,7	11,8	13,2	13,0	10,5	12,8	13,3	12,2
13	13,4	11,6	12,6	13,8	11,1	12,6	13,2	13,4
14	13,8	10,6	12,9	14,0	11,2	12,7	13,2	14,2
15	13,7	10,5	13,6	12,8	10,6	12,9	13,3	12,7
16	11,8	12,5	12,0	13,9	10,2	12,5	12,8	13,9
17	14,3	10,2	12,0	13,6	11,2	12,6	11,1	12,4
18	13,4	11,4	13,0	13,8	11,0	13,1	12,6	14,1
19	13,0	11,5	13,6	13,2	11,3	14,0	13,3	14,6
20	14,2	11,1	13,2	12,9	11,3	12,9	11,9	12,9
21	14,2	11,2	12,4	13,9	10,3	13,3	12,5	13,1
22	11,9	11,5	13,6	14,1	11,6	13,7	13,3	14,8
23	13,0	10,6	12,9	13,2	11,8	14,1	12,9	13,9
24	12,9	11,2	12,3	13,7	11,1	12,4	13,7	13,2
25	13,8	9,5	13,6	14,4	11,5	13,1	12,9	13,7
Média	13,2	11,4	12,8	13,6	11,0	13,0	12,9	13,1
Desvio	0,8	1,1	0,7	0,4	0,5	0,5	0,7	1,0
CV %	6,3	9,8	5,4	3,1	4,2	3,6	5,4	7,4

Tabela A-6: Resultados dos ensaios de caracterização de densidade, ρ_{ap} (g/cm³).

Grupo	TRATAMENTOS							
	A	B	C	D	E	F	G	H
	Cascorez	Cascophen (Hor)	Cascophen (Ver)	PU Mamona	Wonderbond	MUF	Purbond	Controle
1	0,35	0,36	0,32	0,42	0,40	0,39	0,62	0,34
2	0,44	0,46	0,31	0,56	0,52	0,44	0,60	0,44
3	0,41	0,46	0,31	0,48	0,51	0,44	0,46	0,41
4	0,34	0,36	0,29	0,41	0,58	0,45	0,49	0,31
5	0,48	0,41	0,32	0,41	0,49	0,43	0,53	0,47
6	0,38	0,44	0,37	0,39	0,48	0,40	0,59	0,38
7	0,34	0,54	0,33	0,42	0,48	0,39	0,68	0,33
8	0,31	0,47	0,24	0,45	0,51	0,38	0,49	0,31
9	0,32	0,38	0,37	0,48	0,51	0,47	0,64	0,31
10	0,53	0,38	0,33	0,39	0,56	0,45	0,62	0,51
11	0,43	0,43	0,40	0,42	0,57	0,41	0,43	0,38
12	0,49	0,37	0,40	0,38	0,57	0,52	0,56	0,47
13	0,50	0,44	0,40	0,39	0,46	0,41	0,55	0,49
14	0,40	0,37	0,33	0,44	0,59	0,45	0,58	0,39
15	0,46	0,28	0,37	0,39	0,49	0,43	0,47	0,44
16	0,45	0,43	0,31	0,47	0,60	0,47	0,60	0,44
17	0,57	0,33	0,39	0,50	0,53	0,39	0,43	0,57
18	0,38	0,37	0,46	0,40	0,54	0,54	0,58	0,37
19	0,48	0,42	0,42	0,49	0,55	0,50	0,56	0,49
20	0,38	0,46	0,41	0,39	0,56	0,52	0,46	0,38
21	0,55	0,43	0,36	0,48	0,41	0,40	0,51	0,56
22	0,32	0,54	0,44	0,49	0,65	0,50	0,59	0,29
23	0,47	0,43	0,44	0,49	0,63	0,54	0,50	0,47
24	0,52	0,44	0,39	0,51	0,64	0,48	0,69	0,52
25	0,60	0,33	0,43	0,59	0,67	0,67	0,68	0,60
Média	0,44	0,41	0,37	0,45	0,54	0,46	0,56	0,43
Desvio	0,08	0,06	0,06	0,06	0,07	0,07	0,08	0,09
CV %	19	15	15	13	13	14	14	21

Tabela A-7: Resultados dos ensaios de caracterização de resistência à compressão, f_{c0} (MPa)

Grupo	TRATAMENTOS							
	A	B	C	D	E	F	G	H
	Cascorez	Cascophen (Hor)	Cascophen (Ver)	PU Mamona	Wonderbond	MUF	Purbond	Controle
1	33,8	37,6	44,7	43,8	26,7	39,7	49,8	55,0
2	35,2	33,3	29,0	54,3	35,2	37,6	41,3	48,1
3	39,4	46,9	32,0	52,4	36,2	39,6	36,5	28,6
4	47,5	40,1	37,7	42,6	41,9	39,3	38,2	33,0
5	37,2	45,7	32,1	40,3	32,2	43,5	40,1	49,5
6	39,2	53,9	32,1	42,3	32,9	39,2	42,8	48,0
7	32,9	39,1	39,0	40,0	36,7	37,6	47,6	35,3
8	33,1	39,7	34,0	52,8	38,8	36,7	32,5	35,1
9	33,0	39,9	31,2	51,5	35,7	45,5	43,7	51,1
10	42,7	39,5	32,2	43,6	35,2	43,7	46,6	49,5
11	31,0	48,0	35,2	43,0	41,7	41,9	31,1	30,4
12	33,9	37,7	43,6	44,0	40,0	46,6	43,0	45,5
13	52,7	50,2	45,9	42,2	34,7	42,7	34,9	48,4
14	41,4	36,4	45,0	51,1	45,9	44,0	41,5	27,9
15	46,5	29,5	35,8	46,6	36,3	39,4	33,1	51,4
16	50,1	47,9	31,2	51,8	44,4	53,3	39,1	50,0
17	44,4	33,4	39,3	57,0	41,3	35,5	37,5	56,0
18	43,8	42,3	47,8	46,6	43,1	55,9	43,7	50,7
19	53,6	36,3	43,7	56,0	42,8	49,3	43,7	56,6
20	50,8	52,5	47,9	44,5	41,3	55,2	35,6	36,2
21	56,3	49,8	45,8	50,6	31,7	32,9	34,8	36,0
22	37,8	57,3	40,0	57,2	48,4	48,5	45,5	48,8
23	47,6	49,5	48,4	48,7	47,3	54,5	38,7	45,0
24	57,0	45,7	46,1	47,6	51,0	47,2	52,3	46,8
25	64,3	31,7	47,6	68,3	46,9	62,3	51,6	56,5
Média	43,4	42,6	39,5	48,7	39,5	44,5	41,0	44,8
Desvio	9,0	7,4	6,6	6,7	6,0	7,4	5,9	9,1
CV %	21	18	17	14	15	17	14	20

ANEXO B

Madeira: *Eucalyptus grandis*

- Tabela B-1: Quantidade de madeira cerne (%);
- Tabela B-2: Resultados da classificação mecânica, MOE estático;
- Tabela B-3: Resultados dos ensaios de caracterização de Umidade (%);
- Tabela B-4: Resultados dos ensaios de caracterização de densidade, ρ_{ap} (g/cm³);
- Tabela B-5: Resultados dos ensaios de resistência à compressão, $f_{c,0}$ (MPa).

Tabela B-1: Quantidade de madeira cerne (%)

Grupo	TRATAMENTOS							
	A	B	C	D	E	F	G	H
	Cascorez	Cascophen (Hor)	Cascophen (Ver)	PU Mamona	Wonderbond	MUF	Purbond	Controle
1	100 - 100	100 - 100	55 - 29	91 - 100	100 - 100	100 - 100	100 - 100	100 - 100
2	100 - 100	100 - 100	100 - 100	100 - 100	100 - 100	100 - 100	100 - 100	100 - 100
3	61 - 68	100 - 100	100 - 100	98 - 100	100 - 100	100 - 100	100 - 100	85 - 100
4	100 - 100	100 - 100	100 - 100	100 - 100	26 - 46	100 - 100	100 - 46	100 - 100
5	100 - 100	100 - 100	98 - 95	100 - 84	39 - 35	100 - 100	100 - 100	100 - 100
6	100 - 100	100 - 100	100 - 100	100 - 100	100 - 100	100 - 100	100 - 100	53 - 18
7	100 - 100	92 - 82	100 - 100	100 - 100	100 - 100	100 - 100	100 - 2	100 - 92
8	100 - 85	60 - 85	100 - 100	100 - 100	100 - 79	100 - 100	26 - 21	94 - 53
9	24 - 51	100 - 100	100 - 100	52 - 38	100 - 100	97 - 95	55 - 58	96 - 60
10	100 - 100	24 - 13	100 - 100	100 - 100	72 - 72	91 - 98	79 - 74	100 - 100
11	95 - 99	100 - 100	100 - 100	98 - 100	91 - 97	71 - 88	42 - 39	100 - 100
12	100 - 100	93 - 93	100 - 100	100 - 100	100 - 100	100 - 100	84 - 100	100 - 100
13	100 - 100	98 - 97	47 - 23	100 - 100	100 - 88	86 - 90	91 - 98	59 - 100
14	100 - 100	39 - 40	66 - 77	100 - 100	56 - 55	59 - 55	28 - 100	54 - 100
15	100 - 100	100 - 100	44 - 33	64 - 68	100 - 100	70 - 70	96 - 40	50 - 100
16	100 - 100	100 - 100	90 - 85	100 - 100	100 - 100	0 - 11	58 - 42	71 - 74
17	100 - 100	100 - 100	70 - 68	65 - 66	100 - 94	100 - 100	88 - 100	63 - 100
18	100 - 100	81 - 99	100 - 100	100 - 100	37 - 39	48 - 49	100 - 84	100 - 74
19	100 - 100	100 - 100	100 - 100	73 - 100	100 - 96	97 - 93	64 - 100	67 - 100
20	20 - 52	100 - 100	100 - 100	73 - 79	100 - 100	30 - 30	100 - 100	100 - 100
21	91 - 91	100 - 98	100 - 53	10 - 29	97 - 98	95 - 94	8 - 100	100 - 100
22	80 - 89	95 - 81	100 - 100	100 - 70	100 - 100	88 - 72	87 - 88	100 - 54
23	59 - 82	42 - 68	100 - 49	97 - 100	98 - 100	100 - 100	89 - 100	100 - 100
24	59 - 59	100 - 100	81 - 60	96 - 96	34 - 98	31 - 50	100 - 100	39 - 100
25	58 - 53	96 - 71	73 - 78	100 - 93	75 - 100	83 - 100	100 - 100	68 - 55

Tabela B-2: Resultados da classificação mecânica, MOE estático.

Grupo	TRATAMENTOS							
	A	B	C	D	E	F	G	H
	Cascorez	Cascophen (Hor)	Cascophen (Ver)	PU Mamona	Wonderbond	MUF	Purbond	Controle
1	10,6 - 10,7	9,9 - 10,0	10,4 - 10,8	10,4 - 10,8	10,1 - 10,6	9,2 - 9,5	8,6 - 8,6	10,4 - 10,4
2	10,8 - 11,0	10,0 - 10,1	10,9 - 11,0	10,8 - 10,9	11,6 - 11,7	9,7 - 9,8	11,0 - 11,0	10,5 - 10,5
3	11,1 - 11,7	11,0 - 11,0	11,2 - 11,3	11,1 - 11,1	12,2 - 12,2	10,3 - 10,3	11,0 - 11,0	11,2 - 11,2
4	12,3 - 12,3	11,7 - 11,8	11,9 - 12,1	12,1 - 12,1	12,5 - 12,5	10,7 - 10,8	11,9 - 11,9	11,9 - 11,9
5	12,3 - 12,4	11,8 - 11,8	12,3 - 12,6	12,4 - 12,4	12,5 - 12,8	11,5 - 11,5	12,9 - 12,9	12,3 - 12,3
6	12,4 - 12,6	11,9 - 11,9	12,4 - 12,4	12,6 - 12,6	12,9 - 12,9	12,2 - 12,2	12,9 - 12,9	12,3 - 12,3
7	12,9 - 13,0	12,3 - 12,8	13,0 - 13,0	12,8 - 12,8	13,2 - 13,2	12,2 - 12,3	13,0 - 13,0	12,7 - 12,7
8	13,2 - 13,2	12,6 - 12,7	13,2 - 13,2	13,0 - 13,1	13,2 - 13,7	12,6 - 12,7	14,0 - 14,0	13,1 - 13,1
9	13,4 - 13,7	13,1 - 13,1	13,2 - 13,5	13,3 - 13,4	13,5 - 13,5	12,9 - 13,0	14,4 - 14,4	13,3 - 13,3
10	13,6 - 13,6	13,4 - 14,0	13,5 - 13,6	13,7 - 13,7	13,5 - 13,8	13,1 - 13,3	14,7 - 14,7	13,5 - 13,5
11	13,8 - 14,0	13,5 - 13,9	13,9 - 13,9	14,0 - 15,0	13,8 - 13,8	13,3 - 13,3	15,2 - 15,2	13,8 - 13,8
12	14,0 - 14,7	14,1 - 14,4	14,0 - 14,0	14,2 - 14,3	14,0 - 14,1	11,7 - 14,9	15,4 - 15,4	14,1 - 14,1
13	14,1 - 14,1	14,2 - 14,4	14,2 - 15,0	14,4 - 14,4	14,2 - 14,3	13,6 - 13,7	15,6 - 15,6	14,3 - 14,3
14	14,2 - 14,2	14,3 - 14,5	14,4 - 14,7	14,4 - 14,5	14,3 - 15,0	14,1 - 15,0	16,2 - 16,2	14,4 - 14,4
15	14,3 - 14,4	14,4 - 14,4	14,8 - 15,0	14,7 - 14,8	14,6 - 14,6	14,2 - 14,6	16,3 - 16,3	14,6 - 14,6
16	14,8 - 14,8	14,5 - 14,7	14,7 - 15,0	14,9 - 14,9	14,7 - 14,7	14,3 - 15,0	16,4 - 16,4	14,8 - 14,8
17	14,8 - 14,8	14,9 - 14,9	15,2 - 15,2	15,2 - 15,3	14,9 - 15,4	15,0 - 15,0	16,5 - 16,5	15,0 - 15,0
18	15,2 - 15,2	15,1 - 15,9	15,3 - 15,31	15,5 - 15,6	15,1 - 15,1	15,2 - 15,6	16,5 - 16,5	15,4 - 15,4
19	15,5 - 15,5	15,5 - 15,5	15,9 - 16,0	15,6 - 15,7	15,4 - 15,9	15,2 - 15,5	16,6 - 16,6	15,6 - 15,6
20	15,6 - 15,7	15,6 - 15,7	16,1 - 16,2	15,8 - 16,0	15,9 - 15,9	15,9 - 15,9	16,7 - 16,7	15,9 - 15,9
21	16,0 - 17,0	16,1 - 16,9	16,2 - 16,8	16,1 - 16,3	16,1 - 16,2	16,1 - 16,2	16,9 - 16,9	16,3 - 16,3
22	16,5 - 16,9	16,2 - 16,3	16,6 - 16,7	16,4 - 16,6	16,3 - 16,5	16,4 - 16,5	17,6 - 17,6	16,5 - 16,5
23	16,5 - 16,5	16,3 - 16,3	16,9 - 17,3	16,6 - 16,6	16,5 - 16,5	16,7 - 16,7	17,7 - 17,7	16,6 - 16,6
24	16,6 - 16,6	17,2 - 17,8	17,1 - 17,1	16,8 - 16,8	17,0 - 17,0	17,1 - 17,1	17,9 - 17,9	17,1 - 17,1
25	17,6 - 17,8	17,3 - 17,9	19,0 - 19,3	17,5 - 17,8	17,0 - 17,0	19,3 - 20,5	19,3 - 19,3	18,2 - 18,2

Tabela B-3: Resultados dos ensaios de caracterização de Umidade (%)

Grupo	TRATAMENTOS							
	A	B	C	D	E	F	G	H
	Cascorez	Cascophen (Hor)	Cascophen (Ver)	PU Mamona	Wonderbond	MUF	Purbond	Controle
1	17,0	16,0	15,0	15,0	15,5	15,5	13,5	15,5
2	16,2	14,4	15,1	14,1	15,0	13,4	14,1	15,9
3	16,7	14,9	15,2	14,6	14,3	13,7	13,2	15,2
4	16,5	15,3	15,2	15,2	14,4	16,5	13,1	15,5
5	15,5	15,0	15,7	15,3	15,5	15,5	12,1	16,9
6	16,3	16,4	15,1	13,7	15,3	16,2	13,5	14,3
7	16,2	---	14,9	14,1	16,1	16,0	12,5	15,8
8	15,5	14,0	15,6	14,8	15,0	15,4	13,7	16,0
9	16,9	14,9	14,2	15,2	15,3	15,0	13,2	15,6
10	16,4	14,7	13,9	14,5	15,0	14,9	12,6	14,9
11	16,6	15,2	13,4	15,6	14,6	16,7	11,5	14,8
12	16,9	15,5	14,7	15,1	15,5	14,2	13,3	15,6
13	14,0	15,6	14,4	14,8	14,3	15,7	13,2	14,4
14	15,1	16,1	15,9	14,5	13,7	14,2	13,2	16,0
15	15,9	15,4	15,4	14,9	14,0	16,2	13,3	16,3
16	16,0	---	---	15,1	14,7	16,2	12,8	15,2
17	17,0	15,3	14,6	18,2	17,5	13,4	11,1	15,0
18	14,7	15,1	15,0	14,5	15,2	13,6	12,6	14,0
19	---	15,2	15,2	14,6	14,1	15,0	13,3	14,2
20	16,9	16,1	15,1	15,3	16,6	14,4	11,9	16,5
21	15,4	14,9	13,8	13,6	13,2	15,0	12,5	14,9
22	16,4	15,8	15,4	14,6	13,4	15,3	13,3	17,3
23	15,3	---	15,2	14,3	15,9	13,6	12,9	---
24	15,8	14,4	15,9	14,2	16,0	13,4	13,7	16,1
25	16,1	15,3	15,2	14,4	13,4	15,7	12,9	16,8
Média	16,1	15,3	15,0	14,8	14,9	15,0	12,9	15,5
Desvio	0,8	0,6	0,6	0,9	1,0	1,1	0,7	0,9
CV %	5	4	4	6	7	7	5	6

Tabela B-4: Resultados dos ensaios de caracterização de densidade, ρ_{ap} (g/cm³).

Grupo	TRATAMENTOS							
	A	B	C	D	E	F	G	H
	Cascorez	Cascophen (Hor)	Cascophen (Ver)	PU Mamona	Wonderbond	MUF	Purbond	Controle
1	0,48	0,46	0,53	0,53	0,54	0,50	0,62	0,65
2	0,54	0,55	0,51	0,57	0,53	0,49	0,60	0,45
3	0,57	0,55	0,47	0,51	0,55	0,47	0,46	0,56
4	0,59	0,53	0,62	0,55	0,52	0,56	0,49	0,62
5	0,57	0,48	0,56	0,49	0,57	0,44	0,53	0,52
6	0,56	0,61	0,48	0,51	0,56	0,65	0,59	0,55
7	0,56	0,65	0,45	0,49	0,52	0,50	0,68	0,49
8	0,59	0,55	0,54	0,57	0,54	0,58	0,49	0,60
9	0,53	0,62	0,47	0,59	0,45	0,57	0,64	0,59
10	0,52	0,62	0,50	0,65	0,58	0,56	0,62	0,67
11	0,52	0,47	0,44	0,64	0,52	0,58	0,43	0,64
12	0,58	0,57	0,57	0,56	0,57	0,63	0,56	0,58
13	0,49	0,51	0,61	0,58	0,61	0,53	0,55	0,49
14	0,48	0,65	0,65	0,53	0,64	0,57	0,58	0,51
15	0,58	0,58	0,60	0,60	0,56	0,69	0,47	0,64
16	0,59	0,53	0,52	0,50	0,56	0,52	0,60	0,45
17	0,57	0,62	0,55	0,47	0,54	0,48	0,43	0,51
18	0,55	0,56	0,53	0,58	0,53	0,53	0,58	0,57
19	0,57	0,55	0,51	0,59	0,54	0,59	0,56	0,50
20	0,55	0,47	0,57	0,57	0,69	0,55	0,46	0,53
21	0,55	0,61	0,64	0,55	0,56	0,53	0,51	0,56
22	0,68	0,56	0,59	0,57	0,49	0,59	0,59	0,60
23	0,59	0,63	0,57	0,58	0,60	0,62	0,50	0,56
24	0,53	0,61	0,58	0,57	0,55	0,57	0,69	0,58
25	0,67	0,62	0,73	0,60	0,63	0,52	0,68	0,54
Média	0,56	0,57	0,55	0,56	0,56	0,55	0,56	0,56
Desvio	0,05	0,06	0,07	0,05	0,05	0,06	0,08	0,06
CV %	9	10	12	8	9	11	14	11

Tabela B-5: Resultados dos ensaios de resistência à compressão, $f_{c,0}$ (MPa)

Grupo	TRATAMENTOS							
	A	B	C	D	E	F	G	H
	Cascorez	Cascophen (Hor)	Cascophen (Ver)	PU Mamona	Wonderbond	MUF	Purbond	Controle
1	37,5	44,0	45,2	44,3	40,4	33,9	49,8	57,7
2	35,6	39,5	40,9	46,8	44,0	33,6	41,3	39,1
3	44,1	46,0	29,5	44,6	45,4	38,0	36,5	48,8
4	50,6	46,8	42,7	43,4	46,3	42,2	38,2	46,4
5	40,8	41,7	48,6	43,2	46,9	36,3	40,1	39,8
6	46,6	40,3	39,9	42,7	45,4	47,8	42,8	47,8
7	48,8	52,0	38,0	43,2	42,0	39,4	47,6	41,2
8	43,3	57,7	41,8	52,7	44,1	44,5	32,5	46,7
9	40,2	48,3	34,2	52,1	39,5	40,4	43,7	51,4
10	46,2	41,3	43,0	61,0	49,1	44,3	46,6	55,0
11	42,5	42,5	38,8	43,0	45,8	37,8	31,1	51,3
12	46,0	44,0	49,1	46,3	50,0	34,8	43,0	43,8
13	48,9	47,2	45,8	42,4	52,7	41,9	34,9	52,7
14	45,3	50,1	50,1	49,3	51,3	44,4	41,5	51,3
15	45,9	50,5	42,1	58,6	50,2	55,3	33,1	48,5
16	43,6	42,3	48,2	46,0	51,2	37,8	39,1	41,3
17	42,0	50,5	44,0	42,5	44,5	33,5	37,5	48,5
18	54,5	53,6	45,5	53,5	45,5	45,0	43,7	44,4
19	49,4	50,8	49,3	52,5	46,4	38,5	43,7	46,3
20	44,1	44,1	49,8	48,9	56,7	49,9	35,6	46,2
21	48,5	55,3	55,8	46,5	52,5	44,6	34,8	45,4
22	51,7	48,3	49,8	56,5	39,1	42,9	45,5	44,0
23	45,0	53,0	45,8	55,1	49,2	50,1	38,7	48,1
24	43,4	52,3	38,4	55,0	47,5	52,6	52,3	48,7
25	50,3	47,3	57,0	52,9	53,8	42,0	51,6	43,0
Média	45,4	47,6	44,5	48,9	47,2	42,0	41,0	47,1
Desvio	4,4	5,0	6,3	5,7	4,5	6,0	5,9	4,6
CV %	10	10	14	12	10	14	14	10

ANEXO C

- Figura C-1: Histograma de freqüências, para a espécie Eucaliptos (perfil vertical);
- Figura C-2: Gráfico de probabilidade normal dos resíduos, para a espécie Eucaliptos (perfil vertical);
- Figura C-3: Resíduos versus valor estimado, para a espécie Eucalipto (perfil vertical);
- Figura C-4: Histograma de freqüências, para os resíduos da espécie Pinus (perfil vertical);
- Figura C-5: Gráfico de probabilidade normal dos resíduos, para espécie Eucaliptos (perfil vertical);
- Figura C-6: Resíduos versus valor estimado, para espécie Eucaliptos (perfil vertical);
- Figura C-7: Histograma de freqüências, para espécie Pinus;
- Figura C-8: Gráfico de probabilidade normal dos resíduos, para espécie Pinus;
- Figura C-9: Gráfico dos resíduos versus valores estimados, para espécie Pinus;
- Figura C-10: Histograma de freqüências dos resíduos, para a espécie Eucalipto;
- Figura C-11: Gráfico de probabilidade normal dos resíduos, para a espécie Eucalipto;
- Figura C-12: Gráfico dos resíduos versus valores estimados, para a espécie Eucalipto;
- Figura C-13: Histograma de freqüências dos resíduos;
- Figura C-14: Gráfico de probabilidade normal dos resíduos;
- Figura C-15: Gráfico dos resíduos versus valores estimados;
- Figura C-16: Histograma de freqüências dos resíduos;
- Figura C-17: Gráfico de probabilidade normal dos resíduos;
- Figura C-18: Gráfico dos resíduos versus valores estimados.

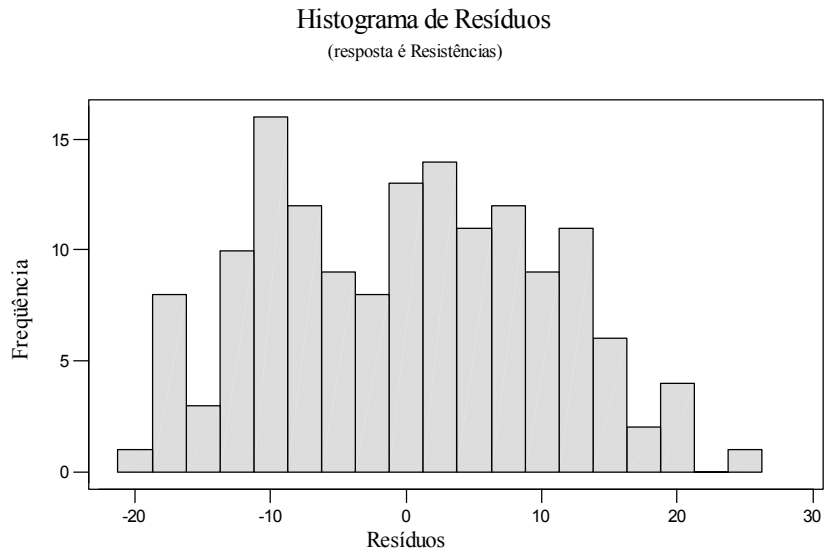


Figura C-1: Histograma de frequências, para a espécie Eucaliptos (perfil vertical).

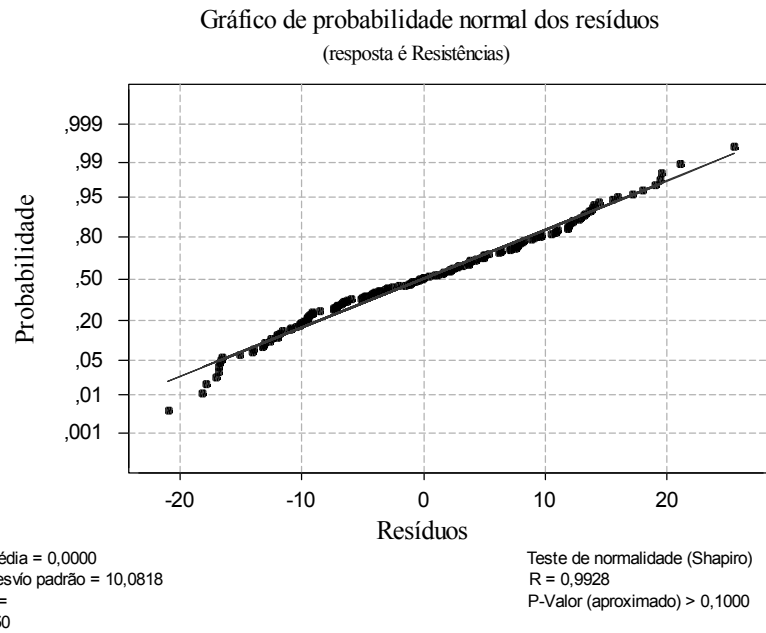


Figura C-2: Gráfico de probabilidade normal dos resíduos, para a espécie Eucaliptos (perfil vertical).

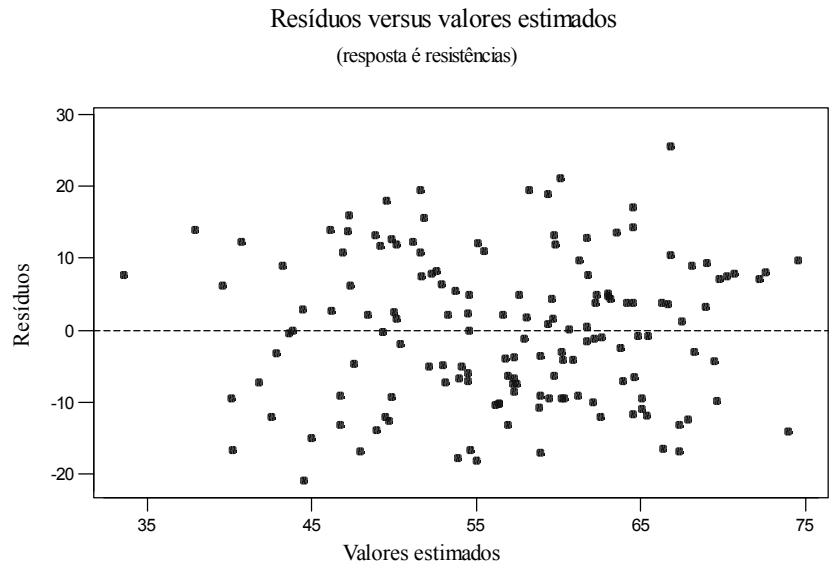


Figura C-3: Resíduos versus valor estimado, para a espécie Eucalypto (perfil vertical).

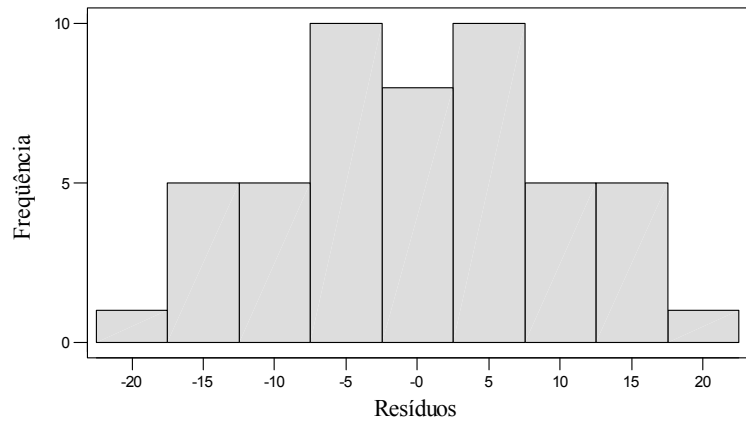


Figura C-4: Histograma de freqüências, para os resíduos da espécie Pinus (perfil vertical).

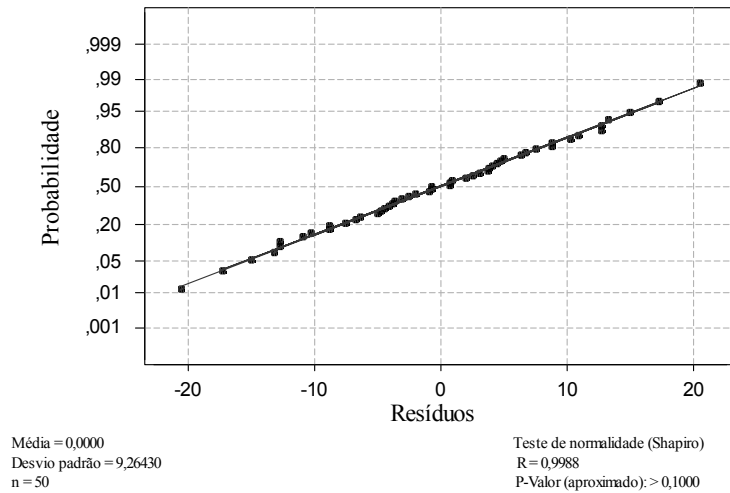


Figura C-5: Gráfico de probabilidade normal dos resíduos, para espécie Eucaliptos (perfil vertical).

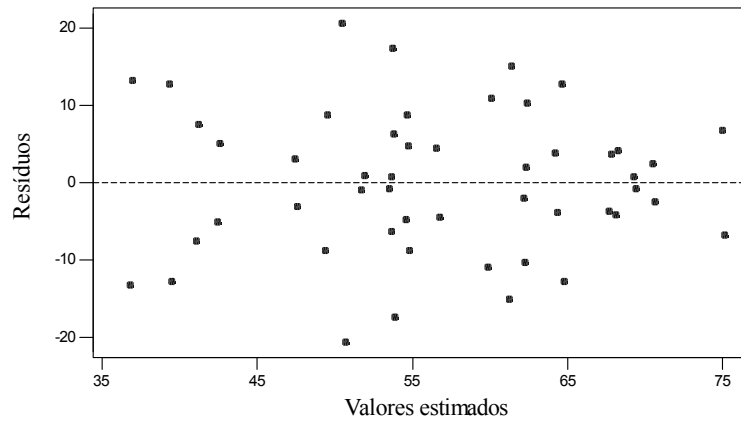


Figura C-6: Resíduos versus valor estimado, para espécie Eucaliptos (perfil vertical).

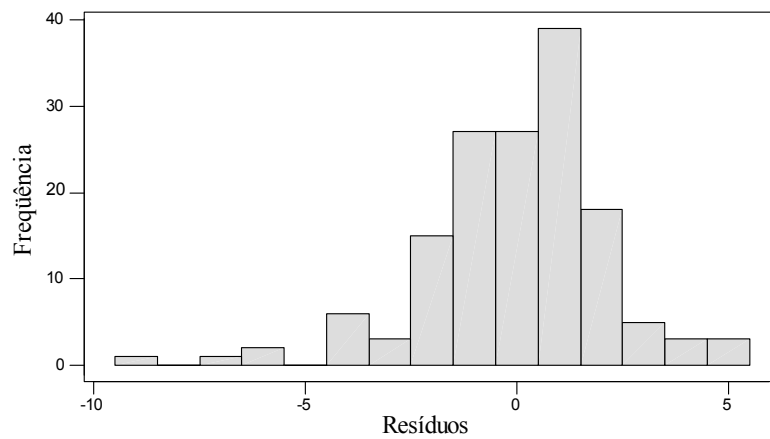


Figura C-7: Histograma de freqüências, para espécie Pinus.

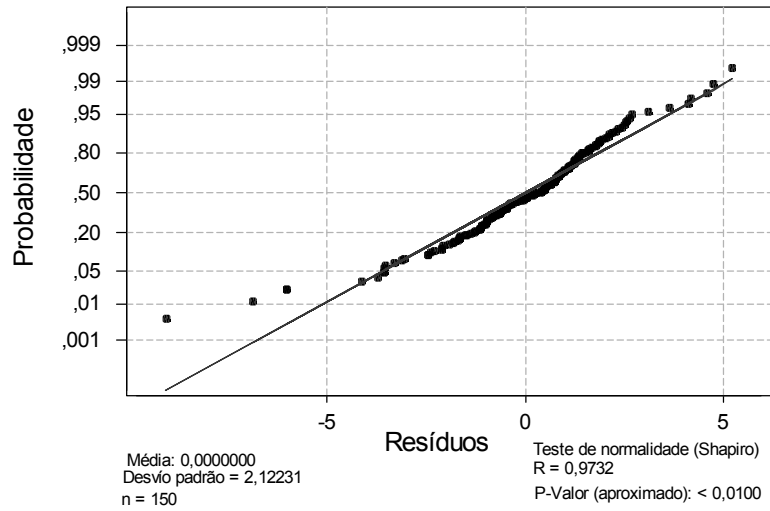


Figura C-8: Gráfico de probabilidade normal dos resíduos, para espécie Pinus.

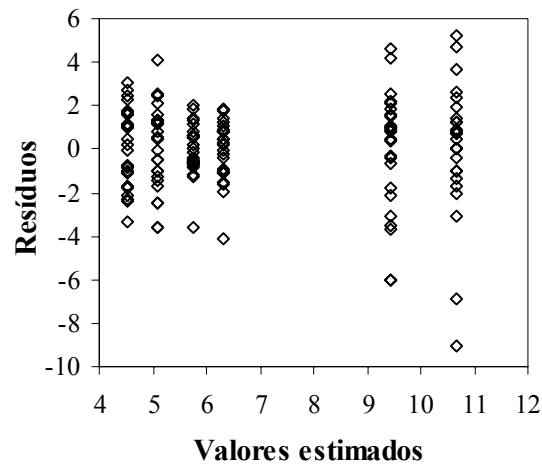


Figura C-9: Gráfico dos resíduos versus valores estimados, para espécie Pinus.

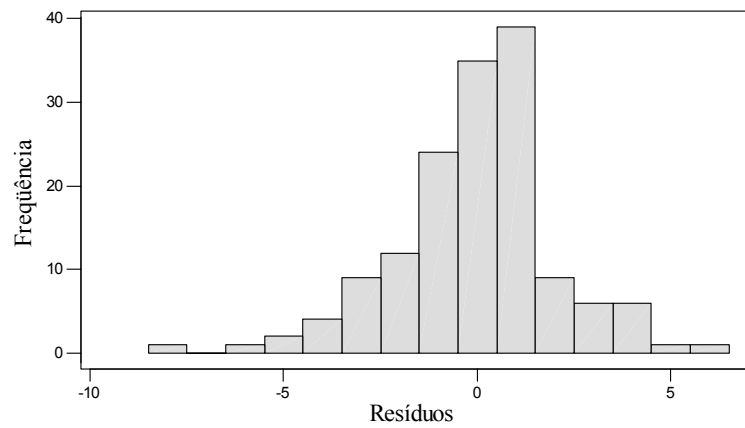


Figura C-10: Histograma de freqüências dos resíduos, para a espécie Eucalipto.

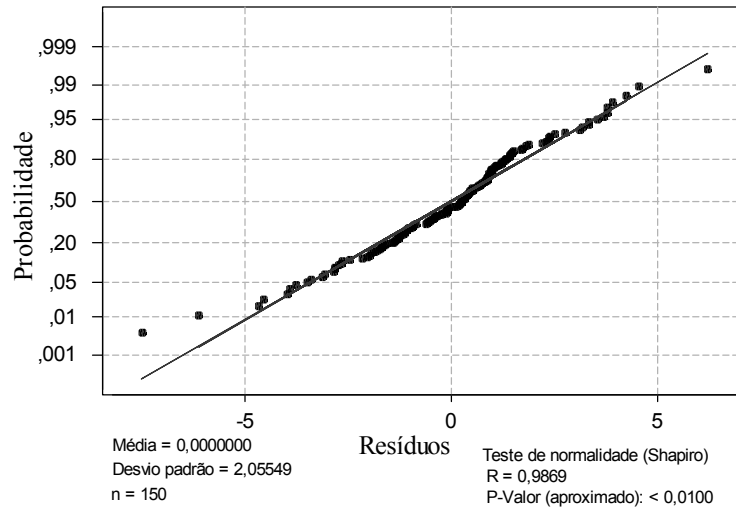


Figura C-11: Gráfico de probabilidade normal dos resíduos, para a espécie Eucalipto.

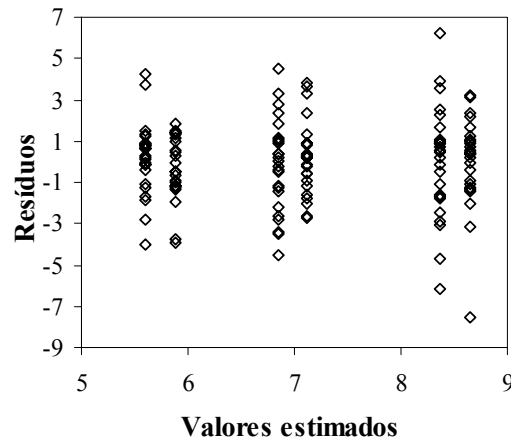


Figura C-12: Gráfico dos resíduos versus valores estimados, para a espécie Eucalipto.

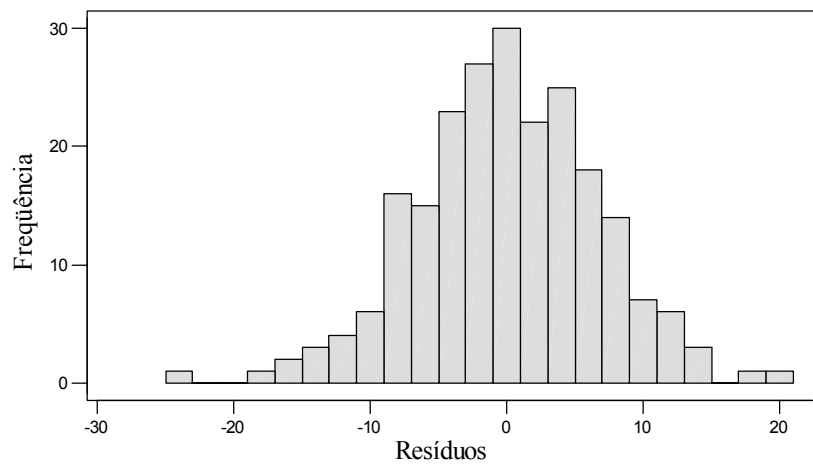


Figura C-13: Histograma de freqüências dos resíduos.

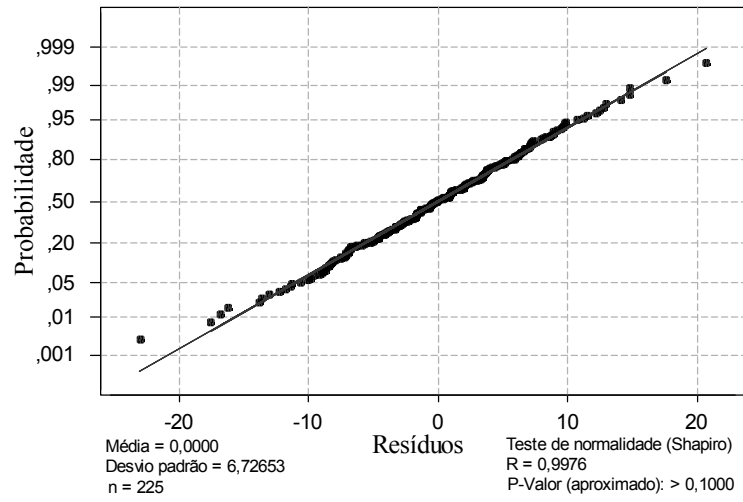


Figura C-14: Gráfico de probabilidade normal dos resíduos.

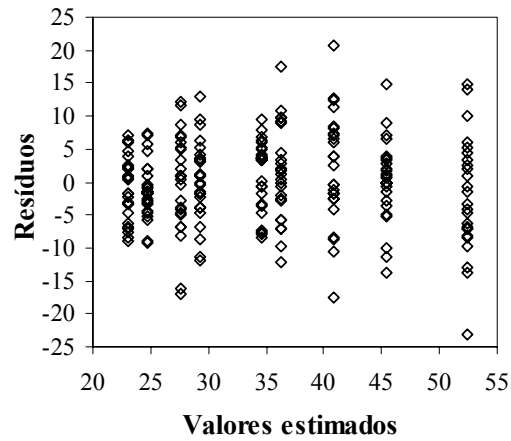


Figura C-15: Gráfico dos resíduos versus valores estimados.

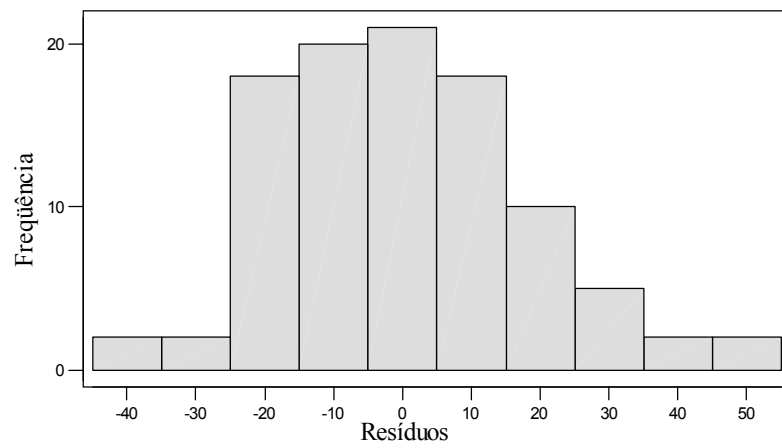


Figura C-16: Histograma de frequências dos resíduos.

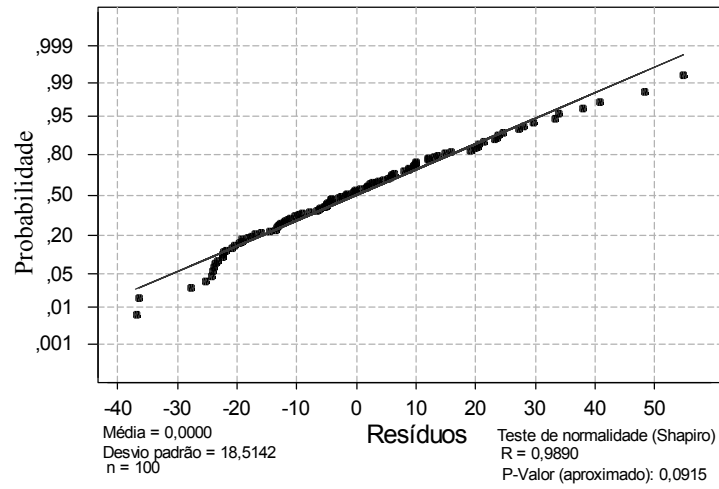


Figura C-17: Gráfico de probabilidade normal dos resíduos.

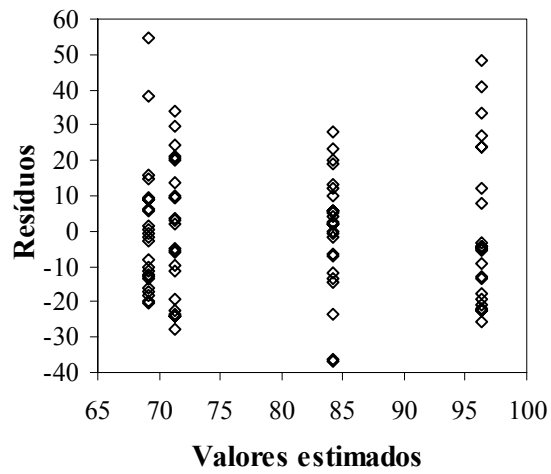


Figura C-18: Gráfico dos resíduos versus valores estimados.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)