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

**Avaliação da resistência de emendas dentadas para
madeira laminada colada**

CRISTIANE PRADO MARIN

Dissertação apresentada à Área de Interunidades em Ciências e Engenharia de Materiais, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Alves Dias

OK.

USP/IFSC/SBI

8-2-001731

São Carlos
2006

IFSC - SBI

CLASS.....

CUTTER.....

TOMBO.....

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

M337a Marin, Cristiane Prado
Avaliação da resistência de emendas dentadas para
madeira laminada colada / Cristiane Prado Marin. --
São Carlos, 2006.

Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de
São Carlos/Instituto de Física de São Carlos/Instituto
de Química de São Carlos-Universidade de São Paulo,
2006.

Área: Ciência e Engenharia de Materiais.
Orientador: Prof. Dr. Antonio Alves Dias

1. Madeira laminada colada. 2. Adesivos.
3. Peças estruturais. I. Título.

MEMBROS DA COMISSÃO JULGADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE **CRISTIANE PRADO MARIN**, APRESENTADA À ÁREA INTERUNIDADES CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS, UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, EM 11/04/2006.

COMISSÃO JULGADORA:

Prof. Dr. Antônio Alves Dias (Orientador e Presidente)

Profa. Dra. Akemi Ino - EESC / USP

Prof. Dr. José Antônio Matthiesen - UNESP

Dedico esta dissertação aos meus pais, Darci e Marta, e irmãos, Tatiane e Paulo pelo amor e apoio em todas as fases da minha vida, e ao Gustavo pelo amor, paciência e incentivo.

AGRADECIMENTOS

A Deus por tudo.

Aos meus pais Marta e Darci por permitirem que eu buscasse meus sonhos, me apoiando sempre. Aos meus irmãos Tatiane e Paulo por todos os momentos inesquecíveis.

À Escola de Engenharia de São Carlos pela oportunidade concedida.

Ao Prof. Dr. Antonio Alves Dias, por sua maravilhosa orientação técnica e pessoal, trazendo em um simples bate-papo aprendizado e amizade.

Ao amigo Maximiliano Azambuja pela fundamental ajuda em todas as fases do trabalho experimental, não medindo esforços para que tudo fosse realizado da melhor forma possível.

Aos amigos Pedro Gutemberg e Edna Moura pelas angústias e alegrias compartilhadas, e por serem pessoas tão especiais.

Aos funcionários do Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeira (LaMEM) pelo importante auxílio no desenvolvimento desta pesquisa.

Às empresas fornecedoras dos adesivos ALBA QUÍMICA e KEHL POLÍMEROS E BORRACHAS.

Ao Horto Florestal de Itirapina pelo fornecimento da madeira utilizada na pesquisa.

Ao CNPq pela bolsa de estudo concedida.

“Todas as coisas são difíceis antes de se tornarem fáceis”.

J. Norley

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	iv
LISTA DE TABELAS	vi
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	viii
LISTA DE SÍMBOLOS	x
RESUMO	xi
ABSTRACT	xii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1. MADEIRA DE REFLORESTAMENTO	4
2.1.1. <i>Pinus</i> na silvicultura brasileira	5
2.2. PEÇAS ESTRUTURAIS	6
2.3. CLASSIFICAÇÃO DE PEÇAS ESTRUTURAIS	9
2.3.1. Classificação visual	11
2.3.1.1. Defeitos	13
2.3.2. Classificação mecânica	19
2.3.2.1. Classificação por vibração transversal	21
2.4. EMENDAS DENTADAS	22
2.4.1. Pressão de colagem	27
2.4.2. O efeito do tipo de adesivo nas propriedades da emenda	29
2.5. ADESIVOS	31
2.5.1. Princípios de adesão	32

2.5.2. Qualidade do adesivo	34
2.6. O EFEITO DA LAMINAÇÃO NAS VIGAS DE MLC	35
2.6.1. Efeito do procedimento do ensaio de tração	36
2.6.2. Reforço de defeitos	37
2.6.3. Distribuição das lâminas de baixa resistência	37
2.7. CONCLUSÕES SOBRE A REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	37
3. MATERIAIS E MÉTODOS	39
3.1. MATERIAIS	39
3.1.1. Madeira	39
3.1.2. Adesivos	39
3.2. MÉTODOS	41
3.2.1. Classificação visual da madeira	41
3.2.2. Classificação mecânica da madeira	43
3.2.3. Seleção dos pares de peças para colagem das emendas	44
3.2.4. Confeção das emendas dentadas	45
3.2.5. Plano experimental	47
3.2.6. Métodos de Ensaios utilizados	48
3.2.7. Análise dos dados	50
4. RESULTADOS OBTIDOS E ANÁLISES	54
4.1 CLASSIFICAÇÃO VISUAL E MECÂNICA	54
4.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA	62
4.3 TRAÇÃO PARALELA EM PEÇAS DE TAMANHO ESTRUTURAL	69
4.4 ANÁLISE ENTRE OS TRATAMENTOS COM PERFIL VERTICAL	69
4.5 COMPARAÇÃO ENTRE OS TRATAMENTOS E O CONTROLE	73
4.6 ANÁLISE ENTRE OS PERFIS VERTICAL E HORIZONTAL	76
4.7 CLASSIFICAÇÃO PELO MODO DE RUPTURA	80
4.7.1 Relação com madeira de inverno e módulo de elasticidade	83

5. CONCLUSÕES	85
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87
APÊNDICE A – Preços médios de mercado dos adesivos	92

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Direção de aplicação de carga nos ensaios para obtenção do módulo de elasticidade. <i>Fonte: MACHADO (2000).</i>	20
Figura 2: Orientações de emendas dentadas. <i>Fonte: JOKERST (1981).</i>	24
Figura 3: Parâmetros geométricos da emenda dentada.	25
Figura 4: Parâmetros geométricos da emenda dentada, segundo a norma DIN 68140–71.	25
Figura 5: Tipos de emendas estruturais usadas nas indústrias canadenses: (A) Convencional, (B) Macho-fêmea e (C) Invertida. <i>Fonte: BUSTOS et al (2003).</i>	27
Figura 6: Tensões de flexão induzidas em um ensaio de tração. <i>Fonte: FALK & COLLING (1995).</i>	36
Figura 7: Exemplo de peça com 4 m classificada como SS e N°1 em diferentes trechos (de 1 m e 2 m).	42
Figura 8: Linha radial representativa para contagem do número de anéis e avaliação da porcentagem de madeira de inverno.	42
Figura 9: Ensaio de classificação mecânica “Vibração transversal”.	44
Figura 10: União de peças semelhantes para compor as vigas de 2 m.	44
Figura 11: Cortador tipo asa.	45
Figura 12: Parâmetros geométricos do perfil.	45
Figura 13: Aplicação de cola na peças.	46
Figura 14: Aplicação de pressão longitudinal na emenda dentada.	46
Figura 15: Detalhe do aplicador de carga, manômetro e posicionamento da peça a ser emendada.	47
Figura 16: Esquema de aplicação de pressão lateral nas duas peças.	47
Figura 17: Máquina de ensaio de tração horizontal.	49

Figura 18: Vista superior da máquina de ensaio de tração horizontal, com as dimensões das garras (75 cm) e a dimensão tracionada livre (30 cm).	49
Figura 19: Detalhe da ruptura de uma peça em ensaio de tração paralela.	49
Figura 20: Máquina de ensaio DARTEC M1000/RC.	50
Figura 21: Ilustração das análises feitas.	51
Figura 22: Ilustração das seções A e B das peças controle	54
Figura 23: Histograma de frequências (perfil vertical).	70
Figura 24: Gráfico de probabilidade normal dos resíduos (perfil vertical).	70
Figura 25: Resíduos <i>versus</i> valor estimado (perfil vertical).	71
Figura 26: Grupos formados pela diferença significativa, organizados no sentido de maior para menor valor médio de resistência.	73
Figura 27: Valores médios de resistência para os diferentes tratamentos.	73
Figura 28: Comportamento da resistência à tração com o aumento das faixas de módulo de elasticidade (Bloco).	75
Figura 29: Histograma de frequências (perfis vertical e horizontal).	76
Figura 30: Gráfico de probabilidade normal dos resíduos (perfis vertical e horizontal).	77
Figura 31: Resíduos <i>versus</i> valor estimado (perfis vertical e horizontal).	77
Figura 32: Pontos com diferença significativa entre todos os blocos.	79
Figura 33: Valores médios de resistência para cada bloco.	80
Figura 34: Exemplos de rupturas ocorridas em cada modo.	80
Figura 35: Gráfico de ocorrências para cada modo de ruptura e adesivo.	81
Figura 36: Faixas de porcentagem de madeira de inverno para cada modo de ruptura.	83
Figura 37: Faixas de módulo de elasticidade para cada modo de ruptura.	84
Figura 38: Porcentagem de madeira de inverno <i>versus</i> módulo de elasticidade.	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Características geométricas dos perfis estruturais usados nas emendas dentadas pela indústria de MLC norte-americana.	24
Tabela 2: Valores médios de densidade aparente, resistência à compressão paralela, resistência à tração paralela e módulo de elasticidade para o <i>Pinus Hondurensis</i> . Fonte: NBR 7190.	39
Tabela 3: Limites relativos à proporção da área da seção transversal ocupada pelo nó. Fonte: CARREIRA (2003).	43
Tabela 4: Modos de ruptura em ensaios de tração paralela (ASTM D4688-99).	53
Tabela 5: Resultados da classificação visual e mecânica para as peças controle.	55
Tabela 6: Resultados da classificação visual e mecânica para as peças usadas com o adesivo Cascorez.	56
Tabela 7: Resultados da classificação visual e mecânica para as peças usadas com o adesivo Cascophen (emenda horizontal).	57
Tabela 8: Resultados da classificação visual e mecânica para as peças usadas com o adesivo Cascophen (emenda vertical).	58
Tabela 9: Resultados da classificação visual e mecânica para as peças usadas com o adesivo poliuretano à base de óleo de mamona.	59
Tabela 10: Resultados da classificação visual e mecânica para as peças usadas com o adesivo Wonderbond.	60
Tabela 11: Resultados da classificação visual e mecânica para as peças usadas com o adesivo MUF.	61
Tabela 12: Resultados dos ensaios de caracterização para as peças controle.	62
Tabela 13: Resultados dos ensaios de caracterização para as peças do lote do adesivo Cascorez.	63

Tabela 14: Resultados dos ensaios de caracterização para as peças	
do lote do adesivo Cascophen-H. _____	64
Tabela 15: Resultados dos ensaios de caracterização para as peças	
do lote do adesivo Cascophen-V. _____	65
Tabela 16: Resultados dos ensaios de caracterização para as peças	
do lote do adesivo poliuretano à base de óleo de mamona. _____	66
Tabela 17: Resultados dos ensaios de caracterização para as peças	
do lote do adesivo Wonderbond. _____	67
Tabela 18: Resultados dos ensaios de caracterização para as peças	
do lote do adesivo MUF. _____	68
Tabela 19: Valores médios para os lotes (resistência à compressão,	
umidade e densidade). _____	68
Tabela 20: Resultados dos ensaios de resistência à tração paralela (MPa). _____	69
Tabela 21: Tabela ANOVA (perfil vertical). _____	71
Tabela 22: Diferença entre as resistências médias dos adesivos. _____	72
Tabela 23: Resistências à tração médias e diferenças com relação ao controle. _____	74
Tabela 24: Eficiência entre as resistências médias dos adesivos e o controle. _____	75
Tabela 25: Tabela ANOVA (perfil vertical e horizontal). _____	77
Tabela 26: Quantidade de ocorrências para cada modo de ruptura. _____	81
Tabela 27: Quantidade de peças rompidas em cada modo de ruptura	
e tratamento. _____	82
Tabela A: Preços de mercado dos adesivos utilizados. _____	92

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

MLC – Madeira Laminada Colada

MUF - Melamina Uréia Formaldeído

NBR – Norma Brasileira

EUA – Estados Unidos da América

ASTM - American Society for Testing and Materials

SPIB - Southern Pine Inspection Bureau

MOE - Módulo de Elasticidade

DIN – Norma Alemã

PVA – polivinil acetato

MDF – composto 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 – poliuretano

WB – Wonderbond

Cps – corpos-de-prova

CV – coeficiente de variação

ANOVA - Análise de Variância

GL – grau de liberdade

SQ – soma dos quadrados

QM – quadrados médios

QME – quadrado médio do erro

Nº - número

LISTA DE SÍMBOLOS

L	comprimento
t	largura do dente
b	largura da ponta do dente
α	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
$t_{\theta/2, v}$	valor de estatística, tabelado
θ	erro
v	número de graus de liberdade da parcela do erro
n	número de observações dentro de um mesmo tratamento
$\overline{y_i}$	resistência média do lote controle
$\overline{y_j}$	resistência média do lote com emenda
k	número de tratamentos
s	desvio padrão
n_A	número de corpos-de-prova do controle
n_t	número de corpos-de-prova para cada tratamento

RESUMO

Uma das técnicas para viabilizar a utilização de madeira de reflorestamento é a fabricação de Madeira Laminada Colada (MLC), que consiste na colagem de lâminas de madeira. Essas lâminas são obtidas da união de peças, por meio de emendas dentadas coladas. Para um bom desempenho de estruturas de MLC, a escolha do adesivo é fundamental. Atualmente, o Cascophen é o adesivo mais utilizado. Nesse contexto, o objetivo dessa pesquisa foi avaliar a eficiência, quanto à resistência à tração de emendas dentadas, de adesivos (Cascophen, Wonderbond, Cascorez, Melamina uréia formaldeído e Poliuretano à base de óleo de mamona) na colagem de madeira da espécie *Pinus hondurensis*, utilizando um padrão de emenda com perfil vertical. Também foram feitas comparações entre os perfis vertical e horizontal usando apenas o adesivo Cascophen. Os trabalhos experimentais foram baseados em ensaios de tração em peças com dimensão estrutural. Foram testadas 150 peças emendadas e 25 peças sem emendas (para comparações), com dimensões nominais de 3,5 x 7 x 200 cm. As principais análises feitas foram as comparações entre todos os adesivos com perfil vertical e entre os perfis vertical e horizontal, e uma análise dos modos de ruptura e suas relações com a porcentagem de madeira de inverno e o módulo de elasticidade. A comparação entre todos os adesivos com perfil vertical revelou que apenas o Cascophen e o Cascorez não possuem diferenças estatísticas. O adesivo que mais se destacou foi o Wonderbond, que teve desempenho superior ao do Cascophen, inclusive. Também se concluiu que não existe diferença estatística significativa na resistência à tração dos perfis vertical e horizontal.

ABSTRACT

One of the techniques to allow for the use of reforestation lumber is the production of glued laminated timber (glulam), which consists of the gluing of lumber laminas. Those laminas are obtained of the union of pieces, through glued finger joints. For a good performance of glulam structures, the choice of the adhesive is fundamental. Traditionally, Cascophen is the most adhesive used in the production of glulam. In that context, the aim of the present research is to evaluate the efficiency, with relation to the strength, of adhesives (Cascophen, Wonderbond, Cascorez, Melamine urea formaldehyde and castor oil Polyurethane) in the gluing of *Pinus hondurensis* lumber, using a joint pattern with vertical profile. Comparisons between the vertical and horizontal profiles using only Cascophen adhesive were made. The experimental analyses were based on tensile tests in pieces with structural dimension. For this purpose, 150 joint pieces and 25 pieces without joints (for comparisons) with nominal dimensions of 3,5 x 7,0 x 200 cm were tested. The main analyses performed were the comparison among all the adhesives with vertical profile, the comparison between the vertical and horizontal profiles for the Cascophen adhesive and, finally, an analysis of the failure modes and their relations with both latewood percentage and elasticity modulus. The comparison among all the adhesives with vertical profile revealed that Cascophen and Cascorez do not have statistical differences. The best adhesive was Wonderbond, which had a better performance than Cascophen. Concerning the vertical and horizontal profiles, no significant statistical difference was found in the tensile strength.

1. INTRODUÇÃO

A produção mundial de madeira para fins estruturais encontra-se por volta de 10^9 toneladas por ano (MACÊDO 2000), o que torna este material muito importante no contexto mundial.

No Brasil, a existência de grandes superfícies de terra e as excepcionais condições climáticas favorecem a grande disponibilidade de madeira (reservas tropicais e de reflorestamento), que precisa ser explorada adequadamente. O país é reconhecido ainda pelo seu potencial tecnológico e estrutural dedicado ao reflorestamento com espécies de rápido crescimento, onde o *Pinus* e o *Eucalipto* se destacam.

Nesse contexto, a *madeira laminada colada* (MLC) apresenta-se como uma técnica indispensável para viabilizar a utilização de madeira de reflorestamento com finalidades estruturais, uma vez que defeitos como nós e rachaduras impossibilitam a utilização de peças maciças. Esta técnica consiste na colagem de lâminas unidas entre si por meio de emendas coladas. Na direção transversal, a emenda do tipo dentada é a mais utilizada atualmente.

Para um bom desempenho de estruturas de MLC, a escolha de um adesivo com boa resistência mecânica e resistência à ação do intemperismo é fundamental. Segundo MELO & CARRASCO (2004), para que o adesivo produza uma ligação resistente, deve-se analisar sua compatibilidade com o aderente. O adesivo à base de resina resorcinol, apesar de garantir uma boa ligação com elevada resistência mecânica e resistência à ação do intemperismo, apresenta um fator desfavorável:

custo muito alto, chegando a representar cerca de 30% do custo total da madeira laminada colada. É esse fato que torna a MLC um material pouco competitivo quando comparado a outros como o aço e o concreto.

Atualmente se encontra em desenvolvimento no Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira (LaMEM-SET-EESC-USP) um projeto de pesquisa com o objetivo de avaliar a aplicação de vários adesivos na fabricação de MLC com madeiras de reflorestamento, estudando a resistência das emendas dentadas, a durabilidade da colagem, e a resistência e rigidez de vigas. Inserido neste contexto, este trabalho enfoca o estudo da resistência à tração paralela em emendas dentadas com dimensão estrutural, em condições de temperatura ambiente e umidade padrão, usando *Pinus Hondurensis* e vários tipos de adesivos.

1.1. OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS

Esta dissertação está atrelada ao estudo de adesivos em emendas dentadas que permitam desenvolver um bom papel estrutural dentro da MLC e com um custo baixo, no sentido de disseminar o uso de MLC no país, tornando esse material mais viável e competitivo.

Pretendeu-se avaliar a eficiência de novos adesivos comerciais quanto à colagem da madeira, por meio de ensaios em emendas dentadas com dimensão estrutural, seguindo o padrão de perfil vertical. Para tanto, foram selecionados os principais adesivos existentes no mercado nacional: Melamina Uréia Formaldeído - MUF, Cascorez resistente à umidade, Poliuretano de óleo de mamona e o adesivo Wonderbond EPI WS 766-56. Como complemento foram feitas emendas dentadas usando o adesivo Cascophen RS, para dois padrões de emendas (vertical e horizontal).

Foram realizados ensaios de tração paralela em peças estruturais com emenda dentada, usando a espécie *Pinus hondurensis*. De acordo com as informações da NBR 7190-97, esta espécie se enquadra na classe de resistência C-25 (coníferas). A escolha dessa espécie foi devido à sua abundância na região Sul e Sudeste, pela localização nestas regiões das indústrias produtoras de MLC e por ser uma das espécies mais empregadas na construção de estruturas de MLC no Brasil.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. MADEIRA DE REFLORESTAMENTO

A exploração não racional das florestas nativas brasileiras vem provocando, especialmente a partir da segunda metade do século XX, crises ambientais.

Conforme TOMASELLI & SILVA (1996), citados por RAMPAZZO & SPONCHIADO (2000), essa redução da disponibilidade de espécies tradicionalmente utilizadas, levando a preços elevados das madeiras nativas do Centro-Oeste e Norte do país, indicam boas perspectivas para o reflorestamento. Além disso, a utilização da madeira de *pinus*, *eucalipto* e de outras não tradicionais vem se difundindo, no Brasil, graças às pressões ecológicas para o uso de recursos florestais renováveis, às condições climáticas adequadas, à alta produtividade de florestas plantadas de *eucalipto* e *pinus*, à idade de corte reduzida (15 a 20 anos) para serrarias e ao custo competitivo da madeira de reflorestamento em relação às nativas.

Paralelamente, a madeira de reflorestamento é pouco conhecida pelos profissionais executores de obras, quanto às suas propriedades físico-mecânicas e aos requisitos para o processamento e beneficiamento. Esse desconhecimento do material, atribuído também a preconceitos culturais, leva à pouca utilização na construção civil e na indústria madeireira, além de gerar a aplicação inadequada dos métodos e usos.

2.1.1. *Pinus* na silvicultura brasileira

Espécies de *Pinus* vêm sendo introduzidas no Brasil há mais de um século para variadas finalidades. Muitas delas foram trazidas pelos imigrantes europeus como curiosidade, para fins ornamentais e para produção de madeira. As primeiras introduções de que se tem notícia foram de *Pinus canariensis*, proveniente das Ilhas Canárias, e ocorreram no Rio Grande do Sul, em torno de 1880.

Somente em 1948, por meio do Serviço Florestal do Estado de São Paulo, foram introduzidas, para ensaios, as espécies americanas conhecidas nas origens como "pinheiros amarelos" que incluem *Pinus palustris*, *Pinus echinata*, *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*. Dentre essas, as duas últimas se destacaram pela facilidade nos tratos culturais, rápido crescimento e reprodução intensa no Sul e Sudeste do Brasil. Desde então, um grande número de espécies continuou sendo introduzido e estabelecido em experimentos no campo por agências do governo e empresas privadas, visando ao estabelecimento de plantios comerciais.

A diversidade de espécies testadas, provenientes não só dos Estados Unidos, mas também do México, da América Central, das ilhas caribenhas e da Ásia, foi fundamental para que se pudesse traçar um perfil das características de desenvolvimento de cada espécie para viabilizar plantios comerciais nos mais variados sítios ecológicos existentes no país.

Pinus caribaea é uma das espécies encontradas no Brasil, que abrange três variedades naturais: *caribaea*, *bahamensis* e *hondurensis*. A variedade *hondurensis* está entre os *Pinus* tropicais mais plantados no mundo. Isto pode ter relação com a grande amplitude de condições ambientais encontrada nas suas origens (América Central). Sua distribuição natural abrange altitudes desde o nível do mar até 1000 m, o que propicia a geração de variabilidade genética ligada à adaptação a variadas condições ecológicas. Entre as variações geográficas mais importantes está a

procedência litorânea e a das montanhas, no interior do continente. As espécies litorâneas localizam-se em áreas castigadas, anualmente, por furacões e tempestades tropicais. Assim, o material genético selecionado, naturalmente, ao longo de milênios nesse ambiente, deveria apresentar maior resistência aos ventos e menor propensão à quebra de fuste do que os procedentes do interior do continente. Essas diferenças ficaram evidentes nos experimentos de campo no Sudeste do Brasil onde, após a ocorrência de ventanias, somente as árvores de procedência litorânea permaneceram ilesas. No Brasil, esta variedade é plantada exclusivamente na região tropical, visto que não tolera geada.

Destaca-se que a variedade *hondurensis* é altamente propensa a produzir um padrão de crescimento apical acentuado (termina superiormente em pico), sem ramificação, denominado "foxtail" ou rabo-de-raposa, especialmente em regiões de alta precipitação.

2.2. PEÇAS ESTRUTURAIS

Sabe-se que um dos fatores que mais penaliza a madeira quando comparada com outros materiais de construção (por exemplo, o concreto ou o aço), é a elevada variabilidade dos valores das propriedades mecânicas das diversas espécies utilizadas para fins estruturais.

Essa variabilidade, apresentada também pela organização interna (anatomia) e pelas propriedades físicas, está diretamente ligada ao fato de a madeira resultar da atividade de crescimento de um ser vivo. Portanto, suas características (madeira de inverno, de verão, juvenil ou adulta) são condicionadas pela influência e concomitância de muitas variáveis, como a informação genética, a influência dos fatores edafoclimáticos (relativos ao tipo de solo e clima) que atuam

durante as fases de diferenciação celular e de crescimento da árvore, ou mesmo outros fatores ligados às características da árvore (por exemplo, a maior ou menor proximidade da copa). Tudo isso implica em variações de ordem anatômica (tipo, disposição e biometria dos elementos lenhosos) e de composição química, que se refletem nas suas propriedades mecânicas.

Outra causa de variabilidade das propriedades da madeira é ocorrência de defeitos (nós, bolsas de resina, fendas, etc.) que afetam principalmente as propriedades mecânicas.

Quanto aos fatores genéticos e edafoclimáticos, eles assumem uma importância significativa nas propriedades mecânicas da madeira por causa da ação primordial do lenho como garantia da segurança estrutural da própria árvore face às condições de crescimento (tipo de relevo, vento, neve). Isso explica porque corpos-de-prova retirados de árvores da mesma espécie, idade e local possam apresentar diferenças de resistência mecânica entre 10% e 50%, MACHADO (2000).

Segundo MACHADO (2000), as tentativas de modelação do comportamento mecânico da madeira não vêm obtendo sucesso, ainda, justamente por causa de sua grande variabilidade.

Antigamente, quando havia ampla oferta de material de grandes seções transversais para aplicações estruturais, a variabilidade da madeira era contornada pela seleção de espécies de reconhecida qualidade (em termos de propriedades físico-mecânicas), pelo dimensionamento antieconômico dos elementos estruturais, e simplesmente pela procedência.

Conseqüentemente, após décadas de utilização irracional, os materiais lenhosos hoje disponíveis provêm cada vez mais de plantações sujeitas à ação humana e com rotatividades mais curtas, originando madeira com maior ocorrência de defeitos.

Por isso ganha importância o desenvolvimento de metodologias de classificação de madeira para fins estruturais, permitindo a sua utilização competitiva em relação aos outros materiais de construção, quer na forma de elementos estruturais simples (madeira maciça), quer como parte de um derivado de madeira (vigas laminadas coladas). Nesse quesito, a classificação visual engloba a avaliação visual de defeitos e características que podem afetar a resistência de uma peça de madeira, impondo as normas de classificação limites quanto à presença e/ou grandeza desses parâmetros.

Conforme GALLIGAN & GREEN (1980), citados por MACHADO (2000), a necessidade de se implementar sistemas de classificação visual já é referida no ano de 1800. Ainda segundo os mesmos autores, uma primeira classificação foi posta em prática em 1833, no estado do Maine (EUA), mas somente em 1902 se iniciou, também nos EUA, um estudo sistemático para associar valores de resistência mecânica às classes de qualidade derivadas da qualificação visual. Nesse estudo foi adotado o ensaio de corpos-de-prova de dimensão estrutural provenientes de 11 espécies florestais comercializadas nos EUA.

Deste processo resultou, em 1912, o aparecimento de um sistema de classificação que veio a constituir a base da elaboração da norma ASTM D 245-27, uma das primeiras a se poder considerar como uma verdadeira norma de classificação visual de madeiras para estruturas.

Em relação à Europa, somente por volta dos anos 30 apareceram as primeiras normas desenvolvidas segundo essa metodologia (associando propriedades mecânicas às classes de qualidade), GLOS (1995) citado por MACHADO (2000).

A vantagem do ensaio sobre madeira de dimensão estrutural reside em se estudar a ação conjunta de defeitos, traduzindo de forma mais realista a

irrelevância de alguns defeitos na presença de outros, para as propriedades mecânicas da madeira.

O aumento da procura de madeira, principalmente depois da II Guerra Mundial, e a crescente necessidade de otimização dos recursos florestais implicou na revisão das normas de classificação, especificamente na questão da metodologia, GALLIGAN & GREEN (1980) citados por MACHADO (2000). A partir do final dos anos 70 se começam a implementar esquemas de classificação baseados no ensaio de corpos-de-prova de dimensão estrutural.

BARRETT *et al.* (1995), citados por MACHADO (2000), apontam que a realização de ensaios sobre corpos-de-prova de dimensão estrutural, comparado com corpos-de-prova em tamanho reduzido isentos de defeitos, leva a uma melhora de 2 a 3 vezes na capacidade resistente dos elementos de madeira.

2.3. CLASSIFICAÇÃO DE PEÇAS ESTRUTURAIS

A madeira, como qualquer outro material de construção, requer um controle de qualidade em função do uso para o qual se destina. No caso de madeira para uso estrutural, este controle implica em garantir certa resistência e rigidez das peças classificadas. As regras de classificação são os instrumentos que permitem garantir o controle de qualidade e a normalização necessários.

Essas regras não têm por objetivo selecionar as peças de melhor qualidade e descartar as de qualidade inferior, mas sim permitir a utilização de ambas, empregando as de melhor qualidade nos locais de maior solicitação e as de qualidade inferior em locais menos solicitados, possibilitando assim a utilização racional do material.

A qualidade de um material é definida por características que devem ser controladas durante a fabricação, sendo algumas mensuráveis (umidade, densidade - real, básica e aparente -, resistência e elasticidade) e outras apenas qualitativas (defeitos de crescimento e secagem tais como nós, inclinação da fibra, abaulamento, arqueadura, fendilhamento), chamadas de “variáveis” e “atributos”, respectivamente, por MESEGUER (1991) citado por FREITAS (2004).

Para a realização da avaliação de peças estruturais de madeira em tamanho real, podem ser aplicadas duas diferentes metodologias: classificação visual (atributos) e classificação mecânica (variáveis).

Segundo estes sistemas, um lote de madeira é dividido em classes de qualidade associadas a valores característicos de resistência mecânica. Para tanto, são realizados, sobre madeira de dimensão estrutural, ensaios físico-mecânicos que permitem relacionar as propriedades físico-mecânicas com os defeitos da madeira (classificação visual) ou com a rigidez à flexão apresentada por esse elemento (classificação mecânica).

Na classificação da madeira, fatores como fadiga humana, treinamento inadequado e condições de trabalho ruins (barulho, poeira, etc.) podem levar a julgamentos inadequados e decisões incorretas quanto ao processamento. Segundo pesquisas de JOHANSSON *et al.* (1998), citados por MACHADO (2000), a classificação efetuada em indústrias de laminado colado, em muitas ocasiões, atribuída uma classe de qualidade mais elevada que a atribuída na classificação em laboratório (mais demorada e rigorosa). O “scaneamento” eletrônico e sistemas controlados por computador são tipos de classificação que, além de evitar erros humanos, aproveitam o avanço da automação das técnicas de processamento.

2.3.1. Classificação visual

Os métodos visuais consistem em selecionar individualmente as peças por sua aparência. Estes métodos se baseiam no princípio – determinado experimentalmente – de que os defeitos afetam a resistência e a rigidez das peças de madeira.

Esses defeitos da madeira são irregularidades ou imperfeições que afetam suas propriedades físicas e mecânicas, determinando, geralmente, uma limitação em seu uso. Para efeitos da classificação visual que aqui se apresenta, se considera como tais aquelas características que reduzem a resistência mecânica e a rigidez das peças que estão destinadas a cumprir uma função estrutural.

As regras de classificação, portanto, especificam tolerâncias para os tipos de defeitos, seu tamanho, quantidade e posição, que devem ser comparados visualmente pelo classificador, peça por peça. Com o auxílio de regras de classificação, estas características de crescimento são usadas para selecionar a madeira em classes de qualidade visual.

Todos os sistemas de classificação estrutural são baseados no uso de um estimador para avaliar as propriedades mecânicas da madeira. Na classificação visual, a dimensão dos defeitos (em particular, os nós) e a densidade são utilizadas como estimador para avaliar as propriedades mecânicas da madeira.

Na América do Norte, a classificação visual de peças estruturais de madeira é realizada por meio de regras escritas por uma associação de indústrias que representam uma determinada região onde as espécies são colhidas. Geralmente, a associação de indústrias mantém um serviço de controle de qualidade supervisionando, nas serrarias associadas, o material classificado de acordo com suas regras de classificação.

Por exigência da *National Grading Rule*, todas as agências de classificação visual devem adotar os critérios da norma ASTM D 245-27 para o estabelecimento de suas regras de classificação visual (CARREIRA *et al.*, 2004a). Essa norma foi derivada do conjunto de regras básicas de classificação visual desenvolvido pelo *USDA Forest Service* e pelo *Forest Products Laboratory* em 1923. De acordo com MADSEN (1992), citado por CARREIRA *et al.* (2004a), a norma ASTM D 245-93 trata somente da classificação estrutural e, além disso, é limitada à classificação visual, que na América do Norte é feita em 95 a 98% da madeira produzida.

O *Southern Pine Inspection Bureau* (SPIB) é uma organização sem fins lucrativos, dedicada à manutenção de normas de qualidade para a indústria de *Southern Pine* dos Estados Unidos. Uma função importante dessa organização é a formulação e publicação de regras de classificação para o *Southern Pine*. De acordo com o SPIB (1994), mais de 95% da produção industrial de *Pinus* é classificada e comercializada de acordo com essas regras. O comitê também mantém uma equipe de supervisores da qualidade, que inspeciona as práticas de classificação nas serrarias associadas, além de, por meio de treinamento dos classificadores, auxiliar as serrarias na manutenção de um alto grau de eficiência na classificação.

A classificação visual é realizada pelo exame das quatro faces e das duas extremidades de cada peça. A localização e a natureza dos nós, bem como outras características aparentes na superfície da madeira, são avaliadas em todo o comprimento da peça. A medição dos defeitos é realizada visualmente, ou seja, sem o auxílio de nenhuma ferramenta. CARREIRA (2003) apresenta em seu trabalho os critérios e as técnicas do SPIB para a medição dos defeitos.

2.3.1.1. Defeitos

A normalização dos defeitos, ou seja, a definição exata de sua terminologia e padronização, é primordial para a classificação das madeiras em categorias de qualidade, com finalidades tanto comerciais quanto tecnológicas. Somente com base na sua perfeita identificação, assim como em critérios normalizados para localização, grupamento e dimensionamento dos mesmos, é que poderão ser definidas especificações de qualidade de madeiras, para efeitos de emprego, controle de qualidade e classificação por categorias.

O critério de classificação dos defeitos, conforme as causas de sua ocorrência, permite distinguir os quatro grupos seguintes:

- a) *Defeitos de crescimento*: provocados por alterações no crescimento e estrutura fibrosa do material;
- b) *Defeitos de secagem*: conseqüentes de secagem mal conduzida. Provocados por efeitos de retratilidade do material, quando perde sua umidade nos processos de secagem natural ou artificial;
- c) *Defeitos de produção*: decorrentes do desdobro e aparelhamento das peças;
- d) *Defeitos de alteração*: provocados por agentes de deterioração, como fungos, insetos etc.

Dos quatro grupos apresentados, o único no qual o homem não contribui para o aparecimento é o dos defeitos de crescimento, inerentes ao organismo vivo em desenvolvimento. Todos os outros três podem ser minimizados ou eliminados, através de adequados processos de abate das árvores, secagem das toras, serragem das peças e posterior aplicação de produtos preservativos para evitar a deterioração por fungos e/ou insetos (FREITAS 2004).

A seguir serão mais bem explicados os quatro grupos de defeitos.

a) Defeitos de crescimento

Nós

Resultantes do envolvimento de ramos de árvore primitiva, vivos ou mortos, e fortalecidos por novas e sucessivas camadas de crescimento do lenho.

Nós vivos são os que têm continuidade com o tecido lenhoso envolvente e nós mortos são os descolados e não aderentes ao tecido lenhoso. São ainda denominados nós alterados, viciados, podres e sãos, conforme apresentem ou não alteração e apodrecimento.

É o defeito com mais destaque nas madeiras de obra. Se não for levado em consideração, pode ser o mais prejudicial, causando dificuldades tanto técnicas como administrativas, embora muitas vezes não apresente qualquer inconveniente no emprego estrutural do material. Sob este ponto de vista, sua influência no desempenho da peça em serviço vai depender de seu tipo, dimensões, localização na peça e solicitação mecânica atuante. De qualquer maneira, os nós frouxos alterados devem ser retirados de peças com responsabilidade estrutural.

A presença de um nó vivo, são, seco e aderente, pouco prejudica a resistência da madeira na compressão: no máximo em 20%, quando situado a meia altura da peça, sobre uma aresta e com dimensão da ordem de $1/7$ da menor dimensão na seção resistente.

Na tração, ao contrário, os nós têm influência considerável, mesmo quando sãos e aderentes, o que é consequência da baixa resistência que o lenho apresenta quando solicitado a tração em uma direção acentuadamente oblíqua em relação ao fio das fibras, como acontece na vizinhança desses defeitos.

A resistência ao cisalhamento praticamente não é afetada pela presença de nós; podem até favorecê-la, quando quebram a continuidade das fendas que tendem a reduzi-la. As especificações não impõem redução de suas dimensões na linha média das vigas junto aos apoios, onde as tensões tangenciais são máximas.

O que as especificações geralmente proíbem são os nós agrupados, por não ser fácil estabelecer um critério de medição somatória que se ajuste à depreciação que causam – pelo menos não são permitidos dois ou mais nós com as dimensões máximas admissíveis.

Desvios de veio, fibras torcidas

As madeiras são ditas de veio linheiro quando o desenvolvimento longitudinal de suas fibras é sensivelmente paralelo ao eixo vertical do tronco. Os desvios de veio são devidos a um crescimento acelerado de fibras periféricas enquanto permanece estacionário o crescimento interno.

Nas peças estruturais de madeira, o desvio de veio é avaliado pelo afastamento angular das fibras em relação a uma linha paralela ao eixo ou às arestas da peça. Pode resultar ou de operações de serragem, nas quais os planos de corte não são paralelos ao veio da madeira, ou do aproveitamento de toras encurvadas.

As fibras torcidas, ou fio torcido, resultam de uma orientação anormal das células lenhosas que, em vez de se disporem paralelas à medula, se distribuem segundo uma espiral em torno dela. Acontece normalmente no lenho próximo das raízes.

Os desvios de veio e as fibras torcidas acentuam e perturbam consideravelmente a já preocupante anisotropia do material. Têm grande importância na seleção do material para estruturas, pois, além de alterar consideravelmente a resistência das peças, são responsáveis pelos empenos em

forma de arco ou hélice – mesmo para pequenas flutuações de umidade, tanto mais que são muito freqüentes os dois defeitos ocorrerem associados na mesma peça.

Frente a variações de umidade, os desvios de fibras provocam tensões internas que têm grandezas proporcionais às dimensões das peças. A redução de resistência devida a esses dois defeitos será sempre maior em peças estruturais que a determinada em corpos-de-prova normalizados.

Ventos

São deslocamentos, separações com descontinuidade, entre fibras ou entre anéis de crescimento. São provocados, durante a vida do vegetal, por paralisações de crescimento, golpes (de vento) ou ações dinâmicas.

Devem ser descartadas as peças com finalidade estrutural que apresentem esse defeito.

b) Defeitos de secagem

Rachaduras

Aberturas radiais de grande extensão no topo de toras ou peças, produzidas por agentes mecânicos ou más condições de secagem.

Fendas

Pequenas aberturas radiais do topo das peças resultantes da movimentação ou secagem.

As fendas em geral, tal como os nós, são defeitos freqüentes em peças de madeira, principalmente as radiais, formadas durante o processo de secagem, resultantes das tensões que se introduzem na madeira devido à desigual retração da massa lenhosa. As camadas periféricas que secam mais depressa ficam sujeitas

a esforços de tração transversal que tendem a romper a madeira segundo planos radiais. As fendas liberam tanto essas tensões como aquelas de compressão que ocorrem no núcleo interno pelo efeito de cintamento das camadas externas.

Em peças submetidas a tração axial, onde não existam desvios de fibras ou fibras torcidas, as fendas, por se orientarem paralelamente ao eixo das peças, praticamente não têm efeito desfavorável sobre a resistência.

Na compressão axial, podem ocasionar rupturas prematuras, pois separam grupos de fibras onde se concentram as tensões.

No cisalhamento, equivalem a uma redução da seção resistente. Pode-se dizer que este defeito é o que mais afeta a resistência ao cisalhamento.

É evidente, portanto, que o efeito das fendas sobre a resistência de madeiramentos sujeitos a flexão depende da maior ou menor distância a que se encontram do plano neutro, onde as tensões de cisalhamento longitudinal são máximas. Quando situadas junto do bordo de compressão ou do bordo de tração, o seu efeito pode ser considerado reduzido ou nulo, a menos que ocorra em zonas de fibras desviadas ou torcidas. Em geral, nas especificações de qualidade da madeira, não são permitidas fendas em zonas próximas aos apoios até uma distância de seis vezes a altura da peça, e em uma faixa central igual à metade daquela dimensão.

Fendilhamento

Pequenas aberturas ao longo das peças resultantes da secagem.

Abaulamento

Empenamento no sentido da largura da peça, expresso pelo comprimento máximo do arco respectivo.

Arqueamento

Encurvamento longitudinal das peças provocado por operações de secagem ou defeitos de serragem.

Encurvamento

Encurvamento lateral das peças.

c) Defeitos de produção

Compreendem as fraturas, rachaduras, fendas e machucaduras ocorridas no abate e na derrubada das árvores, e os cantos esmoados, camadas de cortiça e fibras cortadas, introduzidos pelo desdobro e serragem das peças.

Os defeitos de produção são rigorosamente limitados nas especificações de qualidade do material, tanto para fins comerciais quanto para tecnológicos. O prejuízo causado pelos mesmos sobre a resistência das peças atende às mesmas considerações desenvolvidas para os defeitos naturais e de secagem.

d) Defeitos de alteração

O ataque de predadores, fungos e insetos causa, muitas vezes, reduções consideráveis na seção resistente de peças estruturais. Tem ainda um efeito de reforço e agravamento dos demais defeitos preexistentes.

Pelo menos dois grandes inconvenientes recomendam sua exclusão em peças destinadas a estruturas: a impossibilidade de estimar-se, por inspeção visual, seu desenvolvimento e, mesmo quando se tomam medidas de profilaxia adequada, o risco de que um ataque incipiente ou debelado de início possa desenvolver-se no futuro até comprometer a segurança.

A necessidade do tratamento de conservação em peças estruturais, contra o ataque de fungos e insetos, torna-se inevitável, na medida em que é irreversível a tendência para o emprego de seções resistentes cada vez mais reduzidas, pela adoção de tensões de segurança mais elevadas e utilização de ligações mais eficientes. Resulta, então, uma margem menor para aceitação de defeitos que se possam agravar com o tempo, como é o caso em questão.

As especificações americanas (ASTM) excluem todos os defeitos apontados, na maior parte das categorias de qualidade, admitindo, no entanto, nós podres e até ardiduras em algumas categorias, desde que suas extensões sejam limitadas. Nos casos em que as estruturas se situam em ambiente propício ao desenvolvimento de deterioração, recomendam sua inspeção regular e substituição das peças em que ocorram incidências. Aconselham medidas para baixar a umidade nas peças de madeira (ventilação adequada, drenagem adequada de águas pluviais) ou o emprego de madeiras tratadas com produtos preservativos ou o uso de peças de cerne de espécies lenhosas com elevada durabilidade natural.

2.3.2. Classificação mecânica

A classificação mecânica consiste na rápida determinação da rigidez de uma peça de madeira, introduzindo-se ou uma força variável (abaixo daquela correspondente ao limite de proporcionalidade), de forma a atingir uma deformação fixa, ou uma força constante sendo medida a deformação do elemento.

Conforme SUNLEY & HUDSON (1964), citados por MACHADO (2000), este sistema de classificação de madeira começou a ser desenvolvido por volta dos anos 60, baseando-se na correlação existente entre o módulo de elasticidade e a tensão de ruptura à flexão.

Geralmente este tipo de classificação é considerado mais preciso que a aplicação das normas de classificação visual, devido a considerar a influência dos defeitos (visíveis e não visíveis) diretamente numa propriedade mecânica e também por considerar de forma mais eficaz a possível interação de defeitos. BROWN *et al.* (1997), citados por MACHADO (2000), relatam a possibilidade de se obter coeficientes de variação da ordem de 11%, quando comparados com os 25% normalmente associados a classes de qualidade derivadas da classificação visual.

O sucesso deste tipo de classificação (capacidade de estimar a resistência de um elemento e de constituir lotes de material homogêneo em termos de propriedades mecânicas) depende, no entanto, fortemente da espécie florestal em questão, principalmente da correlação entre o módulo de elasticidade aparente e a tensão de ruptura à flexão.

No entanto, para a maioria das espécies vegetais, verifica-se que o coeficiente de determinação é baixo e bastante dependente da forma como o módulo de elasticidade é medido (figura 1).

Figura 1: Direção de aplicação de carga nos ensaios para obtenção do módulo de elasticidade. *Fonte: MACHADO (2000).*

Atualmente existem diversas técnicas de avaliação não-destrutiva que podem ser utilizadas para a classificação estrutural da madeira, entre elas: ultrassom, MSR, scanner, raios X, “stress wave” e vibração transversal. Todas as

técnicas de avaliação não-destrutiva se baseiam no uso de um estimador para avaliar as propriedades mecânicas da madeira.

2.3.2.1. Classificação por vibração transversal

A avaliação não-destrutiva por meio da técnica de vibração transversal é baseada na relação existente entre a rigidez à flexão e a frequência natural de vibração do material. Este método consiste na aplicação de um golpe em uma peça de madeira bi-apoiada, tendo um apoio em forma de lâmina em uma de suas extremidades e uma célula de carga na outra. A peça de madeira irá vibrar na sua frequência natural de vibração até que a vibração cesse em função do amortecimento. A célula de carga capta a vibração da viga e transfere o sinal a um circuito condicionador que amplifica e filtra o mesmo. Amplificado, o sinal é digitalizado e enviado a um microcomputador que determina a frequência do sinal oscilante (CARREIRA *et al.*, 2004b). A frequência de vibração da peça de madeira depende do módulo de elasticidade da madeira, do vão, da densidade e do tipo de apoio.

ROSS *et al.* (2000), citados por CARREIRA *et al.* (2004b), testaram 159 toras de pequeno diâmetro de *red pine* e *jack pine* utilizando as técnicas de *stress wave*, vibração transversal e flexão estática com o objetivo de verificar a validade destas técnicas a toras de pequeno diâmetro e concluíram que ambos os métodos são bastante eficientes.

CALIL JR & MINÁ (2003) realizaram testes de flexão estática e de vibração transversal em 326 peças de *southern pine* com seção transversal de 3,81 x 13,97 cm e 302,00 cm de comprimento e obtiveram para o coeficiente de correlação um valor de 0,98, concluindo que o método de vibração transversal é bastante eficiente.

Pela análise dos resultados, CARREIRA *et al.* (2004b), concluiu que a técnica de vibração transversal apresentou-se como um método expedito e de elevada confiabilidade para a estimativa do MOE de peças estruturais de madeira, visto que o valor do coeficiente angular da reta de regressão é muito próximo de 1,0.

2.4. EMENDAS DENTADAS

A madeira exhibe sua maior resistência na direção paralela às fibras e o desenvolvimento de emendas que possam transmitir uma proporção significativa desta resistência é o objetivo de muitos programas de pesquisa. O desafio está no fato de que, com as técnicas e adesivos existentes, a madeira pode não ser colada suficientemente bem nas pontas das fibras. Já na lateral das fibras, a colagem é mais fácil e eficiente, com a maioria dos adesivos.

Por isso, ao longo do tempo, as extremidades das peças a serem unidas tiveram que ser modificadas de modo que as emendas coladas fossem feitas na lateral das fibras. Ao mesmo tempo, a área colada se tornou maior, melhorando a capacidade de carga da emenda.

Muitos tipos de emendas foram projetados, testados e descartados. Algumas formas de emendas eram de difícil execução, outras de difícil colagem ou, na maioria das vezes, não demonstravam eficiência.

As primeiras emendas desenvolvidas para MLC foram as emendas de topo. Elas são de fácil execução, porém apresentam colagem deficiente, sendo menos eficientes, em termos de resistência (MACÊDO 1996).

Para suprir as limitações de resistência das emendas de topo, foram desenvolvidas as emendas biseladas. Contudo, este tipo de emenda é bastante

oneroso, uma vez que, para atingir uma boa proporção de resistência da madeira maciça, é necessário que o corte do bisel apresente uma baixa inclinação, da ordem de 1:10.

Com o objetivo de substituir as emendas biseladas, foram criadas as emendas dentadas. A primeira referência de uso de emendas dentadas em aplicação estrutural foi de Egnér e Jagfeld, do Otto Graf Institute em Stuttgart, na Alemanha (JOKERST, 1981). Eles avaliaram os resultados obtidos em ensaios feitos nas peças com emenda dentada de uma ponte, construída nos anos 40, depois de 10 anos de uso. Desde aquele tempo, o uso de emendas dentadas tem constantemente aumentado tanto em aplicações estruturais quanto não estruturais.

A classificação da emenda dentada como estrutural e não estrutural é baseada no tipo de utilização e, como a geometria afeta a capacidade de transmitir esforços, também na sua forma e aparência. As emendas não estruturais possuem, geralmente, dentes curtos com as pontas grossas, enquanto que nas estruturais os dentes são mais longos e com pontas relativamente afiadas.

A geometria da emenda dentada tem provado ser a variável mais crítica na determinação da resistência da emenda (FISSETTE 1988). O desempenho de uma emenda dentada depende de quatro variáveis interdependentes: comprimento, largura do dente, largura da ponta do dente e inclinação.

Um outro fator que pode afetar o desempenho é a orientação da emenda dentada com relação à largura e à espessura de uma peça. Segundo CHEUNG *et al.* (2002), na Europa, a orientação mais utilizada é a vertical (figura 2a), enquanto que nos Estados Unidos, Canadá e Austrália utiliza-se a orientação horizontal (figura 2b).

Um outro tipo de emenda dentada, cujo plano de corte dos dentes é feito num ângulo de 45° com o plano da tábua (figura 2c), foi desenvolvido na Finlândia com o propósito principal de reduzir os problemas inerentes à colagem da emenda

(JOKERST 1981). Neste caso, nenhum dente fino e flexível fica na superfície. Além disso, todos os dentes são suficientemente rígidos para resistir à pressão de colagem e fortes ligações são obtidas em toda a emenda, sem aplicação de pressão lateral.

Figura 2: Orientações de emendas dentadas. Fonte: JOKERST (1981)

De acordo com HERNANDEZ (1998), a indústria de MLC, na América do Norte, utiliza mais frequentemente os dentes das emendas com 26,30 mm e com 28,30 mm de comprimento. Os outros dados geométricos dos perfis mais utilizados na América do Norte estão na tabela 1, complementados pela figura 3.

Tabela 1: Características geométricas dos perfis estruturais usados nas emendas dentadas pela indústria de MLC norte-americana.

Parâmetro	Perfil 1	Perfil 2
L - comprimento (mm)	28,30	26,30
t - largura do dente (mm)	6,98	6,73
b - largura da ponta do dente (mm)	0,81	0,76
α - inclinação do dente	1:10,60	1:10,90

Figura 3: Parâmetros geométricos da emenda dentada.

Segundo MACÊDO (1996), a geometria com 20 mm de comprimento (figura 4), correspondente à indicação da Norma DIN 68140-71, é considerada adequada, sendo um perfil muito utilizado na tecnologia de MLC.

Figura 4: Parâmetros geométricos da emenda dentada, segundo a norma DIN 68140-71.

Segundo JOKERST (1981), as emendas verticais apresentam um desempenho melhor na flexão e tração do que as emendas horizontais. A razão disso é que, no perfil horizontal, os dois dentes externos transmitem a maioria da

carga, ficando numa situação crítica. Com a orientação vertical, as tensões são distribuídas mais uniformemente por todos os dentes da emenda.

PELLERIN (1970), citado por JOKERST (1981), encontrou que as resistências à tração para o perfil vertical e horizontal foram praticamente iguais. É possível, em emendas feitas com certos cuidados, que as diferenças na resistência devido à orientação sejam insignificantes.

ROTH (1970) citado por JOKERST (1981) afirma que as emendas inclinadas 45° apresentam resultados significativamente melhores na flexão e semelhantes na tração, em comparação com as orientações vertical e horizontal.

CHEUNG *et al* (2002) testaram 28 peças em ensaios de tração paralela às fibras, com emendas dentadas de madeira da espécie *Pinus taeda*, sendo 14 com perfil vertical e 14 com perfil horizontal. O adesivo usado em ambas as emendas foi o Resorcinol-Formaldeído (Cascophen RS-216-M). Para avaliar a eficiência de tais emendas, também foram testadas 14 peças de mesma seção transversal, porém sem emendas. Os resultados mostraram que as emendas dentadas verticais e horizontais apresentaram resistência à tração equivalentes, 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.

JANOWIAK *et al* (1993) avaliaram a resistência à tração e flexão para emendas dentadas verticais e horizontais em algumas espécies de dicotiledôneas: *Red oak*, *Red Maple* e *Yellow poplar*, usando os adesivos melamina formaldeído e resorcinol formaldeído. Os resultados dos ensaios de tração e flexão para peças não estruturais mostraram que nem a orientação da emenda dentada nem o adesivo tiveram uma influência decisiva sobre a resistência.

BUSTOS *et al* (2003) comentam que, durante visitas a cinco indústrias de emenda dentada em Quebec (Canadá), observaram que duas estavam trabalhando

com o perfil macho-fêmea, duas com o invertido e uma com o convencional (figura 5). Não houve nenhum acordo entre as indústrias sobre qual tipo de geometria teve melhor desempenho mecânico. Portanto, em seu trabalho, BUSTOS *et al* (2003) pesquisaram estes três tipos de configurações de emendas utilizando a madeira *black spruce*. Verificaram que as emendas dentadas feitas com as saliências nas extremidades (macho-fêmea e invertida) garantiam um alinhamento entre as superfícies depois do aplainamento. Entretanto, estas saliências representam um impacto negativo sobre a resistência, uma vez que atuam como emendas de topo, ou seja, a descontinuidade gera uma área de concentração de tensão. Por isso, nos três casos, a emenda dentada convencional exibiu a maior resistência média, tanto à flexão quanto à tração.

Figura 5: Tipos de emendas estruturais usadas nas indústrias canadenses: (A) Convencional, (B) Macho-fêmea e (C) Invertida. Fonte: BUSTOS *et al* (2003).

2.4.1. Pressão de colagem

É comum se aplicar pressão na colagem dos dentes. Quando isso é feito, os dentes externos tendem a ser destacados da peça; o resultado é uma linha de cola

compacta e emendas de baixa resistência na face larga ou na face estreita. Como estas emendas fracas estão nas superfícies externas, ou seja, nas áreas sujeitas à elevada concentração de tensão, a redução na resistência da peça é maior. Este problema pode ser reduzido aplicando-se pressão lateral no momento da colagem, ou usinando-se a peça novamente, depois da colagem, para a retirada dos dentes externos mal colados.

Segundo STRICKLER (1980) e MADSEN & LITTLEFORD (1962), uma pressão da ordem de 400 psi (2,76 MPa) na seção transversal é suficiente para a maioria das espécies coníferas.

A norma alemã DIN 68140-71 especifica as seguintes pressões mínimas admissíveis: 11,8 MPa para dentes de 10 mm e 1,96 MPa para dentes de 60 mm. Em nenhum caso a pressão deve ser menor que 1,0 MPa.

MACÊDO (1996) recomenda pressão de colagem de 8,0 MPa para as coníferas e 10,0 MPa para as dicotiledôneas (folhosas).

RUYSCH (1980) citado por MACÊDO (1996) afirma que sob condições práticas é quase impossível produzir emendas dentadas confiáveis em madeiras com um peso específico superior a $0,65 \text{ g/cm}^3$ (medido a 14% de teor de umidade). Exemplifica ainda que, para as espécies Iroko e Merbau, com um peso específico de aproximadamente $0,85 \text{ g/cm}^3$, a pressão de colagem da emenda dentada deve ser da ordem de 13 MPa a 14 MPa para um período de secagem de 8 horas, usando os adesivos a base de resorcinol formaldeído ou uma combinação deste com o acetato de polivinila.

AZAMBUJA (2002) e HENRIQUES DE JESUS (2000) recomendam, para corpos-de-prova de *Pinus caribea hondurensis* solicitados à tração paralela, uma pressão de colagem de 9,0 MPa, para emendas dentadas usando adesivo poliuretano a base de óleo de mamona. Para o *Eucaliptus grandis*, em ensaio de tração paralela, HENRIQUES DE JESUS (2000) indica uma pressão de 10,0 MPa.

2.4.2. O efeito do tipo de adesivo nas propriedades da emenda

AYARKWA *et al* (2000) estudaram o efeito do tipo de cola nas propriedades de tração e flexão de emendas dentadas em madeiras tropicais dicotiledôneas da África (*Obeche*, *Makore*, *Moabi*) usando os adesivos resorcinol formaldeído, melamina formaldeído e isocianatos (poliuretanos). Os resultados indicaram que o tipo de cola 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 cola parece estar relacionado à densidade da madeira, exibindo a maior eficiência na espécie de menor densidade (*Obeche* – 351 kg/m³), eficiência moderada na espécie de média densidade (*Makore* – 677 kg/m³) e a menor eficiência na espécie de alta densidade (*Moabi* – 819 kg/m³). Nenhum efeito significativo foi observado no módulo de elasticidade, tanto na flexão quanto na tração.

Segundo BUSTOS *et al* (2003), os adesivos a 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).

AZAMBUJA (2002) estudou o comportamento do adesivo poliuretano derivado do óleo de mamona em vigas retas de madeira laminada colada de 5,0 x 15,0 x 220,0 cm e 5,0 x 10,5 x 220,0 cm, com as espécies *Pinus caribea* var. *hondurensis* e *Eucalyptus Grandis*, avaliando sua eficiência na laminação de vigas e seu comportamento na ruptura dos elementos estruturais. Concluiu que a nova

variedade de adesivo apresentou características de resistência adequadas e, observou a necessidade de um maior tempo de prensagem comparado com o adesivo convencional à base de resorcinol-formaldeído.

O adesivo à base de mamona foi estudado também por HENRIQUES DE JESUS (2000), que verificou a viabilidade de sua utilização em peças de madeira laminada colada, determinando os parâmetros de colagem mais adequados para melhorar a resistência final da peça de MLC.

PELLICANE *et al* (1994) usaram o *Método dos Elementos Finitos* para verificar o efeito dos vazios na linha de cola sobre a resistência à tração de emendas dentadas em madeira. Um total de 100 emendas foram testadas, as quais continham vários defeitos de fabricação. O adesivo utilizado foi o fenol resorcinol e a espécie de madeira foi o *Douglas-fir*. Concluíram que as emendas com vazios ao longo da linha de cola apresentaram graves conseqüências para a resistência à tração. Em contrapartida, as variáveis relacionadas à umidade, espessura dos dentes, danos dos dentes e contaminantes na linha de cola não mostraram nenhuma diferença estatística na resistência quando comparados ao grupo de controle.

SERRANO & GUSTAFSSOM (1999) apresentaram resultados numéricos, também pelo *Método dos Elementos Finitos*, sobre o comportamento mecânico de emendas dentadas para madeira laminada. Deste estudo, concluíram que a resistência da emenda dentada é fortemente influenciada pelo comportamento da linha de cola depois da tensão de pico, pela rigidez das lâminas e pela diferença na rigidez entre as duas partes que compõe a emenda. Além disso, explicaram que a resistência da emenda dentada é fortemente dependente também da presença e localização de pequenos defeitos (vazios) na linha de cola, principalmente nos dentes mais externos.

2.5. ADESIVOS

A capacidade de adesão constitui uma das mais importantes propriedades tecnológicas da madeira. Com o auxílio de adesivos pode-se obter um grande número de produtos derivados da madeira, como gigantescos elementos estruturais na forma de *madeira laminada colada* (MLC) confeccionados a partir de peças de dimensões limitadas.

Como descrito na revista *Referência (ESPECIAL Adesivos, 2004)*, *adesivo* é um termo genérico que denomina uma categoria de produtos cuja finalidade é unir, ligar ou juntar dois materiais iguais ou diferentes. Dentro deste termo está incluído a denominação *cola* e *resinas*. Em geral, os adesivos são classificados pela maneira de aplicação e secagem (cura), pela composição química e pelo custo.

Do ponto de vista técnico, o termo adesivo é usado para os produtos com propriedades de unir materiais através de substâncias químicas à base de polímeros. *Adesivos* têm origem sintética, extraídos de matérias-primas onde houve reação química. *Colas* são “gommas” extraídas de origem animal (gorduras, sebos) ou vegetal (resinas). Apesar da palavra *adesivo* ser genérica, servindo tanto para *colas* como *resinas*, o mercado madeireiro se acostumou a chamar de adesivo especialmente os produtos utilizados na união de materiais: exemplo disto é o adesivo de PVA (polivinil), conhecido como *cola branca*. Já na confecção de produtos como MDF e compensado, entre outros, são utilizadas as *resinas*.

O uso de adesivos em produtos à base de madeira pode ser dividido em quatro funções: união de peças de madeira, produção de compensado, produção de laminados e produção de painéis de partículas. Por meio dos adesivos, é possível transformar a madeira com dimensões menores, aproveitar resíduos do processamento e minimizar defeitos, ou seja, valorizar propriedades da madeira tais como: resistência, massa, aparência, desempenho e estética da superfície.

Como resultado de uma pesquisa realizada pela revista *Referência (ESPECIAL Adesivos, 2004)*, com relação ao retrato atual da indústria de adesivos no país, observou-se que um dos grandes impasses entre os fabricantes de produtos madeireiros com as indústrias de resinas é o preço, que, em razão das variações das principais matérias-primas (metanol, uréia, fenol e soda), acompanha as cotações do oscilante mercado internacional.

Segundo artigo publicado na revista *LIGNUM (ADHESIVOS para remanufatura: Para um buen resultado, 2003)*, a porcentagem do custo de produção que corresponde ao adesivo varia bastante segundo o produto fabricado, o tipo de cola usada e a eficiência das máquinas. No caso das emendas dentadas, em linhas de alta produtividade, o adesivo pode representar entre 1% a 6% do custo total do produto acabado, dependendo do tipo de adesivo (PVA *versus* resorcinol formaldeído).

2.5.1. Princípios de adesão

Conforme STRICKLER (1980), a qualidade superior na colagem deve ser alcançada em todas as superfícies dos dentes para garantir emendas de madeira de alta qualidade. Especialmente em emendas dentadas estruturais, os princípios de adesão devem ser cuidadosamente observados. Estes princípios são basicamente os mesmos em todos os tipos de colagem, ou seja, da laminação até a fabricação de móveis feitos com emendas dentadas. São eles:

a) Devem-se preparar superfícies razoavelmente lisas, secas e sem danos. O corte dos dentes representa, provavelmente, a pior condição na fabricação das emendas dentadas. Nos locais onde haja fibras torcidas podem ocorrer arrancamentos, a menos que um cortador bem afiado esteja sendo usado. Portanto, é essencial manter as facas de corte sempre afiadas, a não ser que as

emendas estejam sendo feitas por um molde de impressão (método descrito por MACÊDO 1996).

b) Uma quantidade de cola suficiente deve ser passada nas superfícies dos dentes a fim de proporcionar um filme contínuo na interface da emenda depois da união dos dentes. O adesivo deve “molhar” ambas as superfícies a serem coladas. Os extrativos e outros produtos químicos encontrados na madeira, tais como as resinas, podem prejudicar a colagem. A secagem por pré-aquecimento pode trazer a resina para as superfícies dos dentes e impedir a absorção do adesivo. Além disso, as superfícies a serem unidas devem estar secas. Umidade em excesso pode interferir na cura adequada.

c) Após a colagem deve-se aplicar pressão sobre as partes emendadas a fim de desenvolver um contato de superfície necessário. Uma regra geral é: “quanto maior a pressão melhor”, desde que a força longitudinal não fendilhe ou danifique de qualquer forma a madeira.

Algumas das principais características da madeira que afetam a adesão e colagem estão apresentadas de forma detalhada a seguir, segundo KOLLMAN *et al* (1975), citados por CAMPOS & LAHR (2004):

Variabilidade – as maiores variações acontecem entre espécies, sendo que algumas delas apresentam maior facilidade de colagem que outras. A natureza biológica da madeira causa adicionalmente amplas variações entre árvores de uma mesma espécie, e mesmo no material de uma mesma árvore. Esta variabilidade atinge uma série de propriedades (peso específico, textura, permeabilidade, etc), que por sua vez são definidas no processo de adesão e no desempenho da colagem.

Densidade – colagens feitas em madeiras de densidade mais alta degradam-se mais rapidamente do que as efetuadas em madeiras de mais baixa densidade. Madeiras mais densas normalmente possuem maior resistência

mecânica. A densidade da espécie está diretamente relacionada com a sua porosidade e permeabilidade, influenciando assim o grau de rugosidade e as funções de mobilidade, fatores determinantes na formação da ligação adesivo-substrato.

Porosidade e permeabilidade – o tamanho, a disposição e a frequência de cavidades celulares e poros na estrutura da madeira afetam diretamente a penetração do adesivo. As interações da porosidade e permeabilidade com a migração do solvente também interferem na viscosidade da resina, afetando suas funções de mobilidade, o que acarreta mudanças na qualidade da colagem, ocorrendo mais ou menos vazios.

Capacidade tampão e pH – a maior parte das espécies de madeira apresenta pH ácido. As variações de pH e a capacidade tampão (capacidade de manter estável o seu pH) afetam diretamente a cura e a solidificação do adesivo, uma vez que estes processos ocorrem somente em faixas relativamente estreitas de pH.

Conteúdo de umidade – na colagem com os tradicionais adesivos sintéticos à base de uréia, melamina, fenol e resorcinol, é imprescindível que a madeira seja previamente seca até teores de umidade normalmente entre 5% e 20%. Teores de umidade mais altos podem ocasionar a formação de bolhas.

2.5.2. Qualidade do adesivo

A avaliação da qualidade do adesivo deve ser realizada em três momentos: fabricação, aplicação e produto colado. O fabricante controla propriedades como viscosidade, regula a fluidez do produto quando aplicado e os relaciona com a densidade da madeira e consumo do material. Além disso, estabelece o teor de

sólidos, que influencia na quantidade de material que forma a película sólida na junta colada e também a absorção do adesivo nos poros da madeira.

A densidade determina a relação de massa por volume, útil para armazenamento do adesivo e transporte. O pH é outra característica que deve ser cuidadosamente observada. Isto porque o adesivo pode ser ácido ou básico, fator que determina reações químicas entre adesivo e madeira, estabelecendo a velocidade de secagem do adesivo e a aderência.

2.6. O EFEITO DA LAMINAÇÃO NAS VIGAS DE MLC

Uma característica importante da madeira laminada colada é que a colagem das lâminas pode resultar em vigas de resistência maior que a encontrada para as lâminas individuais que a compõe. Este aumento na resistência é importante porque as medidas de controle de qualidade usadas para determinar a qualidade necessária para a lâmina são dependentes do seu valor.

FALK & COLLING (1995) estudaram este efeito e concluíram que o aumento na resistência das lâminas de madeira quando coladas numa viga de MLC pode ser explicado por três fatores físicos: efeito do procedimento de ensaio, reforço de defeitos e um efeito de dispersão. Estes efeitos são mais pronunciados na resistência característica do que na resistência média. Isto pode ser explicado pelo maior coeficiente de variação da resistência à tração da lâmina comparado com os dados de resistência à flexão da viga. Além disso, o efeito da laminação diminui com o aumento da qualidade e resistência das lâminas, porque os defeitos são menores e o material é mais homogêneo.

2.6.1. Efeito do procedimento do ensaio de tração

Existe uma diferença no desempenho à tração de lâminas individuais, como medido pelos métodos de ensaio da norma, e seu desempenho real na viga. Os métodos para ensaio de tração europeu e norte-americano sugerem uma configuração de ensaio que não determina nenhuma restrição lateral para a peça tracionada. Embora esta configuração de ensaio seja aplicável para peças individuais submetidas à tração, tais como os membros de uma treliça, ela não representa a laminação numa viga de MLC (FALK & COLLING 1995).

De acordo com tais métodos de ensaio, defeitos descentralizados (tais como os nós de extremidade) ou áreas de densidade assimétrica podem induzir a tensões de flexão lateral que, quando combinadas com as tensões de tração aplicadas, reduzem a resistência à tração medida (figura 6).

Figura 6: Tensões de flexão induzidas em um ensaio de tração. *Fonte: FALK & COLLING (1995).*

Numa viga de madeira laminada colada, as tensões de flexão lateral são desprezíveis, uma vez que esses defeitos estão sujeitos a restrições laterais impostas pela colagem das lâminas (FOSCHI & BARRETT, 1980, citados por FALK & COLLING, 1995). Sendo assim, as lâminas solicitadas à tração numa viga de

MLC têm uma resistência à tração aparente maior que aquela indicada no ensaio de tração com a peça individual.

2.6.2. Reforço de defeitos

Quando colados em uma viga, os defeitos (como os nós) e outras áreas de baixa rigidez são reforçados (pelo menos de um lado) por lâminas adjacentes. Este reforço fornece meios alternativos para as tensões fluírem ao redor do defeito, em áreas adjacentes de elevada rigidez.

2.6.3. Distribuição das lâminas de baixa resistência

Nas vigas, como as peças de baixa resistência são distribuídas na região da linha neutra, existe uma probabilidade pequena de que estas peças venham a iniciar a ruptura. Portanto, a resistência à flexão da viga de MLC é afetada somente pela qualidade das lâminas externas.

2.7. CONCLUSÕES SOBRE A REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A principal vantagem em se utilizar madeira de dimensão estrutural nos ensaios experimentais é a possibilidade de se estudar a ação conjunta de defeitos nas propriedades mecânicas da madeira. Preliminarmente, é necessária a realização de classificação visual e mecânica, pois alguns defeitos podem impedir a utilização estrutural da peça.

Quanto aos perfis de emenda vertical e horizontal, apesar da maioria dos autores afirmarem que as diferenças na resistência devido à orientação dos perfis

de emenda dentada (vertical e horizontal) são insignificantes, existe referência (JOKERST (1981)) à maior resistência para o caso da emenda vertical.

Com relação à comparação entre peças controle e peças emendadas CHEUNG *et al* (2002) atestaram eficiência aproximada de 80% das peças emendadas quando comparadas com a resistência da madeira sem emenda para o adesivo Cascophen.

Um dos fatores que influencia o desempenho da colagem é a densidade da madeira, AYARKWA *et al* (2000).

A resistência da emenda é influenciada pelo comportamento da linha de cola depois da tensão máxima, pela rigidez das lâminas e pela diferença na rigidez entre as duas partes que compõe a emenda (SERRANO & GUSTAFSSON (1999)).

Relatos (PELLICANE *et al* (1994)) indicam que a resistência à tração da emenda dentada é mais afetada por pequenos defeitos (vazios) ao longo da linha de cola do que por variáveis relacionadas à umidade, espessura dos dentes, danos dos dentes e contaminantes na linha de cola.

Com relação à execução das emendas, é necessária a aplicação de pressão lateral no momento da colagem, para impedir o desalinhamento entre as peças.

Neste trabalho procurou-se seguir essas recomendações da literatura, quando da execução das emendas dentadas.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. MATERIAIS

3.1.1. Madeira

Para o desenvolvimento da pesquisa foi utilizada madeira da espécie *Pinus Hondurensis*, proveniente do Horto Florestal de Itirapina/SP, com idade aproximada de 30 anos. Algumas das características desta espécie, contidas na NBR 7190 (para peças isentas de defeitos), estão organizadas na tabela 2. As dimensões nominais iniciais das peças eram de 4,5 x 7,0 x 400 cm.

Tabela 2: Valores médios de densidade aparente, resistência à compressão paralela, resistência à tração paralela e módulo de elasticidade para o *Pinus Hondurensis*. Fonte: NBR 7190.

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	9868

3.1.2. Adesivos

Por indicação de técnicos da indústria de adesivos ou por já reconhecido desempenho, foram selecionados cinco tipos diferentes de adesivos: Cascorez 2550 (resistente à umidade), Poliuretano à base de óleo de mamona, Wonderbond

EPI WS 766-56, Melamina Uréia Formaldeído (MUF) e o Cascophen RS-216-M. O Poliuretano foi fornecido pela KEHL POLÍMEROS E BORRACHAS, e os demais adesivos pela ALBA QUÍMICA.

O Cascorez 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.

O 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. O adesivo à base de mamona possui diversas aplicações, sendo a madeira laminada colada uma delas.

O 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 a 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, painéis.

O Cascophen RS-216-M é um adesivo sintético à base de resorcinol formol, em solução álcool/água, recomendado para colagens à prova d'água, fria ou fervente, diversos solventes orgânicos, fungos e calor. Formulado para colagens de madeira (inclusive algumas tratadas com preventivos contra fogo), chapas duras e outros materiais semelhantes, proporcionando uma liga durável. Usado para

trabalhos navais, hidráulicos, onde a colagem deverá ficar exposta à ação das intempéries e água.

3.2. MÉTODOS

As toras, trazidas de Itirapina, foram levadas para uma serraria de São Carlos para o corte das peças na seção nominal de 4,5 x 7,0 x 400 cm. As peças permaneceram entabicadas, em ambiente externo (cobertas com lonas para proteção contra chuvas), durante 3 meses para secagem até aproximadamente 12 % de umidade (extraíram-se, ao longo desse período, alguns corpos-de-prova para determinação do teor de umidade do lote). Em seqüência vieram as fases de classificação visual, classificação mecânica, seleção dos pares para colagem das emendas, confecção das emendas, plano experimental, ensaios e análise dos dados.

3.2.1. Classificação visual da madeira

O lote de madeira foi classificado, primeiramente, com uma pré-seleção, descartando-se as peças com empenamento excessivo, podridão ou com defeitos que poderiam invalidar os resultados dos testes.

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 aspectos principais que foram utilizados na classificação.

Tendo em vista o melhor aproveitamento do material, a classificação das peças de 4 m foi feita em trechos com pelo menos 1 m (figura 7), para que depois de colada, a peça final ficasse com comprimento superior a 1,8 m (limitação da máquina de ensaio à tração paralela em peça estrutural). Procurou-se aproveitar também comprimentos iguais ou múltiplos de 2 m para separação das peças de controle. Foram limitados os diâmetros dos maiores nós (tabela 3) 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. Considerou-se, também, o número de anéis de crescimento em uma linha radial representativa com comprimento máximo de 7,5 cm (figura 8). Foi medida a espessura de cada anel e avaliada a porcentagem de madeira de inverno na seção transversal.

Figura 7: Exemplo de peça com 4 m classificada como SS e N1 em diferentes trechos (de 1 m e 2 m).

Figura 8: Linha radial representativa para contagem do número de anéis e avaliação da porcentagem de madeira de inverno.

Com todas essas características observadas classificaram-se as peças em SS (Select Structural), N1, N2 e N3 (segundo o SPIB), além de se anotar a

quantidade de anéis por polegada e porcentagem de madeira de inverno. Para uma peça ser classificada como SS, deve satisfazer requisitos mais exigentes quanto ao diâmetro de nós, porcentagem que ocupam na seção transversal e outros defeitos, com relação às demais classes (N1, N2 e N3).

Neste trabalho, a maioria das peças utilizadas foi 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, fazendo as emendas em regiões distantes dos defeitos e, no caso das peças controle, escolheram-se peças cuja região central não contivesse defeitos. Assim, o comprimento das lâminas efetivamente tracionado (fora da região das garras) não possuiu defeitos aparentes.

Tabela 3 – Limites relativos à proporção da área da seção transversal ocupada pelo nó. Fonte: CARREIRA (2003)

Características	Classe			
	Select Structural	Nº 1	Nº 2	Nº 3
Inclinação de fibras	1:12	1:10	1:8	1:4
Nós	Borda da face larga	1/4	1/3	1/2
	Centro da face larga	1/2	3/5	3/4
	Face estreita	1/5	1/3	1/2

3.2.2. Classificação mecânica da madeira

As peças foram classificadas mecanicamente pelo método de vibração transversal (figura 9). Por meio deste método não destrutivo é possível obter o módulo de elasticidade de cada peça apenas pela relação entre a rigidez à flexão e a frequência natural de vibração do material.

Figura 9: Ensaio de classificação mecânica “Vibração transversal”.

3.2.3. Seleção dos pares de peças para colagem das emendas

Após classificação visual e mecânica, cada peça, cortada com comprimento de 1 m, pertencia a uma determinada classe visual e faixa de módulo de elasticidade (figura 10). Para tornar o material final o mais uniforme possível, os pares foram formados de modo a juntar peças as mais semelhantes possíveis quanto ao módulo de elasticidade e à classificação visual.

Figura 10: União de peças semelhantes para compor as vigas de 2 m.

Os pares foram distribuídos em 25 grupos com características semelhantes quanto ao módulo de elasticidade, e numerados sequencialmente em ordem crescente. Em cada grupo, os seis pares foram distribuídos aleatoriamente para constituir um corpo-de-prova de emenda colada com um determinado adesivo ou padrão de emenda.

As 25 peças de controle, com 2 m de comprimento, foram selecionadas de forma a terem módulo de elasticidade semelhante à média dos módulos de elasticidade das peças de cada grupo.

3.2.4. Confeção das emendas dentadas

Para o preparo das emendas dentadas verticais utilizou-se um cortador tipo asa (figura 11), com lâminas de 28 mm (resultando nos parâmetros geométricos mostrados na figura 12). Os próximos passos foram o preparo das peças, que tiveram todo o excesso de serragem e pó retirados com o auxílio de um pincel, e colagem. Como mostrado na figura 13, a cola foi aplicada com um pincel.

Figura 11: Cortador tipo asa.

Parâmetro	Perfil
L - comprimento (mm)	28,30
t - largura do dente (mm)	6,98
b - largura da ponta do dente (mm)	0,81
α - inclinação do dente	1:10,60

Figura 12: Parâmetros geométricos do perfil.

Figura 13: Aplicação de cola na peças.

Para colagem das peças em tamanho estrutural foi utilizado um equipamento, desenvolvido no laboratório do madeiras (figuras 14 e 15), formado por dois trilhos que prendem um macaco hidráulico. A peça a ser colada é encaixada entre 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 desempenham a restrição lateral (figura 16). Utilizou-se pressão de colagem de 9 MPa para todos os adesivos.

Figura 14: Aplicação de pressão longitudinal na emenda dentada.

Figura 15: Detalhe do aplicador de carga, manômetro e posicionamento da peça a ser emendada.

Figura 16: Esquema de restrição lateral nas duas peças.

3.2.5. Plano experimental

Para a avaliação das emendas dentadas foram confeccionados 150 corpos-de-prova com emendas dentadas e 25 corpos-de-prova sem emendas, para efeito comparativo, com dimensões médias iguais a 3,20 x 6,20 x 200 cm e com teor de umidade em torno de 12%. A distribuição dos corpos-de-prova foi feita da seguinte maneira:

- 25 peças com emendas dentadas (perfil vertical de 28 mm) usando madeira da espécie *Pinus Hondurensis* para cada um dos adesivos comerciais: Cascorez 2550 (resistente à umidade), Poliuretano à base de óleo de mamona, Wonderbond EPI WS 766-56 e o adesivo Melamina Uréia Formaldeído (MUF);
- 25 peças com emendas dentadas usando madeira da espécie *Pinus Hondurensis* e o adesivo Cascophen RS-216-M para cada padrão de emenda (vertical e horizontal, ambos de 28 mm);
- 25 peças para controle, sem emendas.

Como já citado no item 3.2.3, foi feita uma distribuição aleatória das peças em 25 grupos com características semelhantes quanto ao módulo de elasticidade.

3.2.6. Métodos de Ensaaios utilizados

Respeitados os tempos de cura de todos os adesivos, as peças foram ensaiadas para determinação da força de ruptura no ensaio de resistência à tração paralela. Para caracterização do lote, foram extraídos corpos-de-prova normativos das peças ensaiadas à tração e realizados ensaios de compressão paralela, densidade aparente e determinação do teor de umidade.

Ensaaios de tração paralela em peças com e sem emendas dentadas

Os testes de tração paralela foram conduzidos segundo os procedimentos da ASTM D198-84. Para o ensaio de tração em peças com dimensões estruturais de até 3,30 m de comprimento, foi utilizado o equipamento da marca *Metriguard*, modelo 422, capacidade para 1000 kN (figuras 17, 18 e 19).

Figura 17: Máquina de ensaio de tração horizontal.

Figura 18: Vista superior da máquina de ensaio de tração horizontal, com as dimensões das garras (75 cm) e a dimensão tracionada livre (30 cm).

Figura 19: Detalhe da ruptura de uma peça em ensaio de tração paralela.

Esse ensaio fornece apenas o valor da força de ruptura que, dividida pela área da seção transversal do corpo-de-prova, permite obter a sua resistência.

Ensaio de caracterização

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, 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, ou seja, 25 para cada lote, totalizando 175). Para o ensaio de compressão paralela, 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 20).

Figura 20: Máquina de ensaio DARTEC M1000/RC.

3.2.7. Análise dos dados

A análise dos dados foi dividida em quatro partes: 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 RS 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. As três primeiras comparações estão ilustradas na figura 21.

Figura 21: Ilustração das análises feitas.

Para aplicar as análises paramétricas nos resultados de comparação entre adesivos e entre perfis, confirmou-se, primeiramente, a normalidade dos dados e, em seguida, tratou-se como sendo "Blocos Aleatorizados".

Para julgar a normalidade dos dados, algumas condições devem ser preenchidas, tais como: a distribuição do resíduo deve ser normal, a média deve ser centrada em zero e a variância deve ser constante. Os testes mais usados para verificar a adequabilidade do modelo são: Gráfico da Distribuição dos Resíduos (Histograma de frequências), Gráfico de Probabilidade e Gráfico dos Resíduos *versus* Valor Estimado.

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 controlar a fonte estranha (módulo de elasticidade) e remover a variabilidade entre as peças, foi utilizado um delineamento de experimento denominado *Blocos Aleatorizados*, ou seja, cada faixa de módulo de elasticidade constituiu um bloco do experimento. Os

dados de resistência foram então analisados com o procedimento da *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).

Com relação à análise dos modos de ruptura, a ASTM D4688-99 apresenta critérios para avaliar adesivos usados em emendas dentadas de madeira laminada colada. Segundo essa norma, deve-se analisar as resistências à tração de emendas sob os seguintes tratamentos: *seco sem tratamento, úmido após um tratamento de impregnação por pressão a vácuo, úmido após um tratamento alternado entre fervura e secagem*. No caso desta pesquisa, apenas o primeiro tipo foi utilizado (seco sem tratamento).

Ainda segundo os textos da norma, não só os valores de resistência importam como também os modos de ruptura, que devem ser observados e comparados aos seis modos descritos na tabela 4.

Tabela 4: 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.

4. RESULTADOS OBTIDOS E ANÁLISES

4.1 CLASSIFICAÇÃO VISUAL E MECÂNICA

As tabelas de 5 a 11 exibem os resultados obtidos com a classificação visual e mecânica para as peças utilizadas na confecção dos corpos-de-prova controle (sem emenda) e com emenda dentada.

A classificação visual e os valores de módulo de elasticidade foram utilizados para distribuir igualmente as peças entre os adesivos e para se avaliar posteriormente a relação com seus valores de resistência.

Nota-se que nas tabelas de 5 a 11 os valores do módulo de elasticidade estão organizados em ordem crescente. Além disso, a figura 22 representa as seções A e B citadas na tabela 5, para as quais foram contadas as quantidades de anéis de crescimento.

Figura 22: Ilustração das seções A e B das peças controle.

Com relação às demais tabelas (peças com emendas), são apresentadas as quantidades de anéis em cada peça, apenas na seção onde foi feita a emenda.

Tabela 5: Dados da classificação visual e mecânica para as peças controle.

Número Lâmina	Seção	Qtd. madeira de inverno/pol.	Madeira de inverno (%)	Classe	MOE Vibração (GPa)
1	A	4	14	SS	8,4
	B	5	23	SS	8,4
2	A	3	10	N1	10,0
	B	4	15	N1	10,0
3	A	5	33	N2	10,0
	B	4	27	N2	10,0
4	A	4	28	SS	10,0
	B	7	56	SS	10,0
5	A	3	23	N1	10,1
	B	5	52	N1	10,1
6	A	4	27	SS	10,5
	B	1	10	SS	10,5
7	A	5	26	N1	10,6
	B	5	14	N1	10,6
8	A	5	13	SS	10,8
	B	6	16	SS	10,8
9	A	5	16	SS	11,2
	B	5	17	SS	11,2
10	A	5	26	N2	11,2
	B	5	17	N2	11,2
11	A	6	34	SS	11,8
	B	7	40	SS	11,8
12	A	3	16	SS	12,1
	B	4	17	SS	12,1
13	A	4	20	SS	12,3
	B	6	40	SS	12,3
14	A	3	13	SS	12,6
	B	3	14	SS	12,6
15	A	3	17	SS	12,9
	B	3	21	SS	12,9
16	A	6	24	N1	13,2
	B	6	20	N1	13,2
17	A	5	14	N1	13,5
	B	5	19	N1	13,5
18	A	4	19	SS	13,6
	B	5	29	SS	13,6
19	A	5	18	N1	13,9
	B	4	19	N1	13,9
20	A	5	38	SS	14,2
	B	6	55	SS	14,2
21	A	5	22	N1	14,5
	B	7	28	N1	14,5
22	A	4	14	N2	14,8
	B	4	26	N2	14,8
23	A	4	17	N1	15,0
	B	6	19	N1	15,0
24	A	9	40	N2	15,1
	B	5	30	N2	15,1
25	A	5	46	N1	15,4
	B	6	51	N1	15,4

Tabela 6: Resultados da classificação visual e mecânica para as peças usadas com o adesivo Cascorez.

Número Lâmina	Tipo de adesivo	Peças de 1 m	Qtd. madeira de inverno/pol.	Madeira de inverno (%)	Classe	MOE Vibração (GPa)
1	Cascorez	1	4	24	SS	9,3
		2	4	18	SS	9,4
2	Cascorez	1	4	12	SS	10,0
		2	5	18	SS	10,0
3	Cascorez	1	5	45	SS	10,0
		2	5	41	SS	11,1
4	Cascorez	1	5	45	N2	10,6
		2	4	41	SS	10,9
5	Cascorez	1	5	18	SS	10,8
		2	5	12	SS	10,8
6	Cascorez	1	3	10	N2	11,4
		2	5	14	N2	11,6
7	Cascorez	1	4	25	SS	11,9
		2	4	25	SS	12,0
8	Cascorez	1	5	18	SS	12,0
		2	4	17	SS	12,1
9	Cascorez	1	4	15	N2	12,5
		2	4	12	SS	12,6
10	Cascorez	1	5	35	SS	12,8
		2	5	38	SS	13,2
11	Cascorez	1	5	19	SS	13,0
		2	3	20	SS	13,2
12	Cascorez	1	3	15	SS	13,2
		2	4	13	SS	13,2
13	Cascorez	1	8	25	SS	13,7
		2	7	28	SS	13,9
14	Cascorez	1	5	19	N1	14,0
		2	4	20	N1	14,3
15	Cascorez	1	5	37	SS	14,3
		2	6	43	SS	14,4
16	Cascorez	1	5	30	SS	14,5
		2	6	31	N2	14,6
17	Cascorez	1	4	17	N2	14,7
		2	6	17	N2	14,8
18	Cascorez	1	6	24	N1	15,3
		2	4	18	N1	15,5
19	Cascorez	1	5	36	SS	15,4
		2	5	34	SS	15,5
20	Cascorez	1	6	20	SS	15,7
		2	6	25	N1	15,7
21	Cascorez	1	7	33	SS	16,2
		2	6	47	SS	16,2
22	Cascorez	1	4	21	SS	16,6
		2	5	21	SS	17,6
23	Cascorez	1	5	34	N3	17,4
		2	6	32	N2	15,6
24	Cascorez	1	10	45	SS	18,7
		2	5	46	SS	18,8
25	Cascorez	1	5	38	SS	18,8
		2	6	42	SS	19,2

Tabela 7: Resultados da classificação visual e mecânica para as peças usadas com o adesivo Cascophen (emenda horizontal).

Número Lâmina	Tipo de adesivo	Peças de 1 m	Qtd. madeira de inverno/pol.	Madeira de inverno (%)	Classe	MOE Vibração (GPa)
26	Cascophen	1	4	37	SS	9,3
	(H)	2	3	26	SS	9,4
27	Cascophen	1	3	9	SS	9,6
	(H)	2	4	18	SS	9,6
28	Cascophen	1	5	29	SS	10,0
	(H)	2	4	36	SS	10,0
29	Cascophen	1	4	35	SS	10,5
	(H)	2	4	28	SS	10,8
30	Cascophen	1	4	24	SS	10,7
	(H)	2	5	22	SS	10,8
31	Cascophen	1	4	33	SS	11,4
	(H)	2	7	33	SS	11,4
32	Cascophen	1	4	15	SS	11,8
	(H)	2	5	18	SS	12,0
33	Cascophen	1	5	9	SS	11,9
	(H)	2	3	6	N3	12,8
34	Cascophen	1	3	21	SS	12,5
	(H)	2	6	21	SS	14,1
35	Cascophen	1	4	15	N1	12,6
	(H)	2	5	18	N3	12,7
36	Cascophen	1	6	42	SS	12,8
	(H)	2	4	36	SS	13,5
37	Cascophen	1	4	14	N1	13,2
	(H)	2	3	14	N2	13,7
38	Cascophen	1	5	49	SS	13,7
	(H)	2	7	53	SS	15,4
39	Cascophen	1	3	48	N2	13,8
	(H)	2	5	39	SS	14,0
40	Cascophen	1	6	41	SS	14,2
	(H)	2	3	40	SS	14,3
41	Cascophen	1	5	28	SS	14,6
	(H)	2	3	18	SS	14,6
42	Cascophen	1	4	16	SS	14,8
	(H)	2	5	16	SS	15,1
43	Cascophen	1	5	20	N3	15,1
	(H)	2	4	19	SS	15,1
44	Cascophen	1	3	17	SS	15,6
	(H)	2	6	22	SS	15,6
45	Cascophen	1	7	32	SS	15,8
	(H)	2	6	38	SS	16,1
46	Cascophen	1	4	30	N2	16,0
	(H)	2	6	22	N1	16,1
47	Cascophen	1	6	42	N1	16,2
	(H)	2	5	48	SS	16,4
48	Cascophen	1	7	23	N1	17,5
	(H)	2	6	22	N2	17,6
49	Cascophen	1	4	32	SS	18,2
	(H)	2	7	37	SS	18,2
50	Cascophen	1	5	31	SS	15,9
	(H)	2	6	32	N3	16,0

Tabela 8: Resultados da classificação visual e mecânica para as peças usadas com o adesivo Cascophen (emenda vertical).

Número Lâmina	Tipo de adesivo	Peças de 1 m	Qtd. madeira de inverno/pol.	Madeira de inverno (%)	Classe	MOE Vibração (GPa)
51	Cascophen	1	2	8	SS	6,4
	(V)	2	1	9	N1	7,1
52	Cascophen	1	3	12	SS	10,0
	(V)	2	3	17	SS	10,0
53	Cascophen	1	6	27	N2	10,0
	(V)	2	4	27	N2	10,0
54	Cascophen	1	2	18	SS	10,2
	(V)	2	7	20	SS	10,5
55	Cascophen	1	6	25	SS	10,9
	(V)	2	4	21	N3	11,2
56	Cascophen	1	4	31	SS	11,1
	(V)	2	4	27	SS	11,3
57	Cascophen	1	5	19	N2	11,6
	(V)	2	5	29	N2	12,1
58	Cascophen	1	3	12	SS	12,1
	(V)	2	3	13	SS	12,4
59	Cascophen	1	3	19	SS	12,4
	(V)	2	4	18	SS	12,5
60	Cascophen	1	4	16	N3	12,6
	(V)	2	2	10	N3	12,9
61	Cascophen	1	3	34	SS	13,0
	(V)	2	6	33	SS	13,4
62	Cascophen	1	4	28	SS	13,0
	(V)	2	4	27	SS	13,4
63	Cascophen	1	4	15	SS	13,7
	(V)	2	5	27	SS	14,7
64	Cascophen	1	6	25	SS	14,0
	(V)	2	6	25	SS	14,3
65	Cascophen	1	3	13	SS	14,3
	(V)	2	7	12	SS	15,0
66	Cascophen	1	4	14	N1	14,4
	(V)	2	5	20	SS	14,9
67	Cascophen	1	6	36	N1	14,7
	(V)	2	6	34	SS	15,0
68	Cascophen	1	7	12	N1	15,0
	(V)	2	5	13	N1	15,0
69	Cascophen	1	5	18	N2	15,6
	(V)	2	5	28	N2	15,6
70	Cascophen	1	6	40	N2	15,6
	(V)	2	5	47	N2	18,8
71	Cascophen	1	5	12	N1	16,2
	(V)	2	4	28	SS	16,6
72	Cascophen	1	8	21	SS	16,4
	(V)	2	5	25	SS	16,4
73	Cascophen	1	6	29	SS	17,6
	(V)	2	6	27	SS	17,8
74	Cascophen	1	7	50	SS	18,0
	(V)	2	5	40	SS	18,1
75	Cascophen	1	4	44	SS	19,5
	(V)	2	8	39	SS	20,0

Tabela 9: Resultados da classificação visual e mecânica para as peças usadas com o adesivo poliuretano à base de óleo de mamona.

Número Lâmina	Tipo de adesivo	Peças de 1 m	Qtd. madeira de inverno/pol.	Madeira de inverno (%)	Classe	MOE Vibração (GPa)
76	Mamona	1	6	30	SS	8,5
	(PU)	2	6	31	N1	8,5
77	Mamona	1	5	19	SS	10,0
	(PU)	2	5	20	SS	10,0
78	Mamona	1	7	27	SS	10,0
	(PU)	2	5	29	SS	10,0
79	Mamona	1	4	25	SS	10,5
	(PU)	2	5	27	SS	10,8
80	Mamona	1	4	18	SS	11,0
	(PU)	2	7	21	SS	11,0
81	Mamona	1	6	39	SS	11,1
	(PU)	2	6	25	SS	11,2
82	Mamona	1	6	24	N3	11,5
	(PU)	2	3	20	N3	12,1
83	Mamona	1	8	30	SS	11,9
	(PU)	2	6	32	SS	12,0
84	Mamona	1	6	31	N1	12,4
	(PU)	2	5	30	SS	12,6
85	Mamona	1	5	24	SS	12,7
	(PU)	2	4	32	SS	12,8
86	Mamona	1	4	17	SS	12,9
	(PU)	2	5	21	SS	13,0
87	Mamona	1	5	24	SS	13,3
	(PU)	2	6	23	SS	13,4
88	Mamona	1	4	24	N1	13,5
	(PU)	2	5	21	N1	13,6
89	Mamona	1	5	28	SS	13,9
	(PU)	2	8	32	SS	14,0
90	Mamona	1	5	23	SS	14,1
	(PU)	2	4	23	SS	14,5
91	Mamona	1	5	24	N1	14,3
	(PU)	2	5	19	SS	14,6
92	Mamona	1	5	39	SS	14,7
	(PU)	2	5	47	SS	14,9
93	Mamona	1	5	34	SS	15,0
	(PU)	2	7	39	SS	15,0
94	Mamona	1	4	28	SS	15,4
	(PU)	2	5	34	SS	15,4
95	Mamona	1	4	24	SS	15,7
	(PU)	2	4	25	N2	15,7
96	Mamona	1	6	20	SS	16,2
	(PU)	2	6	22	N1	16,2
97	Mamona	1	6	27	N2	16,2
	(PU)	2	5	28	N1	16,3
98	Mamona	1	5	27	SS	17,3
	(PU)	2	5	27	SS	17,3
99	Mamona	1	4	37	SS	17,9
	(PU)	2	8	40	SS	18,1
100	Mamona	1	8	46	SS	21,3
	(PU)	2	8	47	SS	22,1

Tabela 10: Resultados da classificação visual e mecânica para as peças usadas com o adesivo Wonderbond.

Número Lâmina	Tipo de adesivo	Peças de 1 m	Qtd. madeira de inverno/pol.	Madeira de inverno (%)	Classe	MOE Vibração (GPa)
101	Wonderbond	1	3	9	N2	7,6
	(WB)	2	5	22	SS	8,4
102	Wonderbond	1	4	16	N2	10,0
	(WB)	2	3	13	N3	10,3
103	Wonderbond	1	4	27	SS	10,0
	(WB)	2	5	29	N1	10,0
104	Wonderbond	1	3	23	N1	10,5
	(WB)	2	6	23	N1	10,5
105	Wonderbond	1	4	14	SS	10,8
	(WB)	2	6	13	SS	11,0
106	Wonderbond	1	3	15	SS	11,1
	(WB)	2	3	13	SS	11,8
107	Wonderbond	1	3	23	SS	11,6
	(WB)	2	3	23	N3	11,7
108	Wonderbond	1	3	22	SS	12,0
	(WB)	2	4	23	SS	12,2
109	Wonderbond	1	3	13	SS	12,6
	(WB)	2	4	17	SS	12,7
110	Wonderbond	1	5	39	SS	12,7
	(WB)	2	5	41	SS	12,7
111	Wonderbond	1	3	24	N1	12,8
	(WB)	2	4	27	SS	12,9
112	Wonderbond	1	5	29	SS	13,0
	(WB)	2	4	23	SS	13,5
113	Wonderbond	1	5	20	SS	13,5
	(WB)	2	3	21	SS	13,5
114	Wonderbond	1	6	25	N1	13,9
	(WB)	2	6	25	N1	14,1
115	Wonderbond	1	4	16	SS	14,1
	(WB)	2	3	19	N2	14,1
116	Wonderbond	1	7	41	SS	14,5
	(WB)	2	5	41	SS	14,6
117	Wonderbond	1	5	34	SS	14,7
	(WB)	2	4	35	SS	16,2
118	Wonderbond	1	6	26	SS	15,0
	(WB)	2	7	27	SS	15,1
119	Wonderbond	1	4	33	SS	15,5
	(WB)	2	6	29	N1	15,6
120	Wonderbond	1	5	26	SS	15,7
	(WB)	2	5	28	SS	15,8
121	Wonderbond	1	4	11	SS	15,9
	(WB)	2	3	14	N2	16,3
122	Wonderbond	1	6	44	SS	16,7
	(WB)	2	6	44	SS	16,9
123	Wonderbond	1	6	52	SS	16,9
	(WB)	2	5	36	SS	17,5
124	Wonderbond	1	5	28	SS	18,6
	(WB)	2	5	29	SS	18,6
125	Wonderbond	1	5	20	SS	19,2
	(WB)	2	3	17	SS	20,7

Tabela 11: Resultados da classificação visual e mecânica para as peças usadas com o adesivo MUF.

Número Lâmina	Tipo de adesivo	Peças de 1 m	Qtd. madeira de inverno/pol.	Madeira de inverno (%)	Classe	MOE Vibração (GPa)
126	MUF	1	6	45	SS	9,3
		2	5	28	SS	9,4
127	MUF	1	5	22	SS	10,0
		2	6	24	SS	10,0
128	MUF	1	5	25	SS	10,0
		2	5	26	SS	10,0
129	MUF	1	5	31	SS	10,3
		2	5	30	SS	11,0
130	MUF	1	4	16	N2	10,8
		2	7	16	SS	10,9
131	MUF	1	3	18	SS	11,1
		2	3	15	SS	11,2
132	MUF	1	5	17	SS	11,8
		2	3	18	SS	11,8
133	MUF	1	5	26	SS	11,9
		2	6	29	SS	11,9
134	MUF	1	4	23	SS	12,6
		2	6	25	SS	12,8
135	MUF	1	4	31	SS	12,7
		2	5	33	N1	12,7
136	MUF	1	4	13	SS	12,8
		2	5	19	SS	12,8
137	MUF	1	6	24	SS	13,3
		2	6	26	SS	13,4
138	MUF	1	6	40	N2	13,7
		2	5	25	N2	14,0
139	MUF	1	3	26	SS	14,1
		2	5	27	SS	14,1
140	MUF	1	6	34	SS	14,2
		2	3	37	SS	14,3
141	MUF	1	4	37	SS	14,5
		2	6	36	SS	14,6
142	MUF	1	5	23	SS	14,7
		2	5	25	SS	16,2
143	MUF	1	6	54	N2	14,9
		2	6	58	N1	14,9
144	MUF	1	4	19	SS	15,5
		2	7	23	SS	15,5
145	MUF	1	7	39	SS	15,8
		2	7	43	SS	15,8
146	MUF	1	7	18	SS	15,9
		2	4	18	SS	16,0
147	MUF	1	6	50	N1	16,4
		2	8	59	SS	16,7
148	MUF	1	6	35	SS	16,9
		2	6	29	SS	16,9
149	MUF	1	6	35	N1	18,6
		2	4	35	N1	18,6
150	MUF	1	6	36	SS	20,2
		2	5	44	SS	21,3

4.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA

As tabelas de 12 a 18 apresentam os valores de resistência à compressão paralela, teor de umidade e densidade aparente para cada lote de madeira. A tabela 19 apresenta o resumo dos resultados dos ensaios de caracterização. Como citado no item 3.2.6 os corpos-de-prova foram extraídos das peças após o ensaio de tração paralela em tamanho estrutural.

Tabela 12: Resultados dos ensaios de caracterização para as peças controle.

Cps	Dimensões (mm)			U (%)	ρ_{ap} (g/cm ³)	f_{c0} (MPa)
1	31,1	30,8	91,0	13,4	0,340	55,0
2	30,1	30,6	91,0	12,3	0,435	48,1
3	30,7	30,2	90,7	12,3	0,408	28,6
4	30,0	30,5	91,1	11,5	0,309	33,0
5	31,1	30,7	91,0	12,2	0,466	49,5
6	30,3	30,4	91,1	13,6	0,381	48,0
7	31,0	31,1	90,6	14,3	0,328	35,3
8	30,5	30,4	90,9	11,6	0,308	35,1
9	30,7	31,8	91,0	13,5	0,305	51,1
10	31,2	30,6	91,0	12,1	0,507	49,5
11	31,1	30,4	91,1	11,6	0,383	30,4
12	31,7	30,6	91,0	12,2	0,469	45,5
13	30,5	31,2	90,8	13,4	0,489	48,4
14	30,8	30,7	91,0	14,2	0,394	27,9
15	31,6	30,6	91,0	12,7	0,441	51,4
16	30,4	30,6	91,3	13,9	0,443	50,0
17	30,1	30,9	91,2	12,4	0,565	56,0
18	30,1	31,1	91,4	14,1	0,374	50,7
19	30,5	30,1	91,2	14,6	0,485	56,6
20	30,8	30,6	91,0	12,9	0,376	36,2
21	31,0	29,4	90,9	13,1	0,560	36,0
22	30,5	30,2	91,5	14,8	0,290	48,8
23	30,4	30,3	91,0	13,9	0,465	45,0
24	30,1	30,5	91,1	13,2	0,520	46,8
25	30,4	30,2	91,1	13,7	0,600	56,5
Média	30,7	30,6	91,0	13,1	0,426	44,8
Desvio padrão	0,5	0,4	0,2	1,0	0,088	9,1
CV %	1,5	1,4	0,2	7,4	20,592	20,3

Tabela 13: Resultados dos ensaios de caracterização para as peças do lote do adesivo Cascorez.

Cps	Dimensões (mm)			U (%)	ρ_{ap} (g/cm ³)	f_{c0} (MPa)
1	30,5	30,5	90,6	12,9	0,353	33,8
2	30,4	30,4	90,6	13,3	0,435	35,2
3	30,4	30,3	90,8	12,4	0,411	39,4
4	30,3	27,9	90,7	13,1	0,337	47,5
5	30,4	30,3	90,6	13,8	0,484	37,2
6	30,4	30,5	90,8	12,2	0,381	39,2
7	30,5	30,4	90,6	11,2	0,340	32,9
8	30,4	30,3	90,5	14,0	0,312	33,1
9	30,3	30,5	90,4	12,5	0,323	33,0
10	30,3	30,3	90,6	13,1	0,528	42,7
11	30,4	27,9	90,6	14,2	0,429	31,0
12	30,4	30,4	90,7	13,7	0,492	33,9
13	30,4	30,5	90,7	13,4	0,501	52,7
14	30,4	30,4	90,6	13,8	0,404	41,4
15	30,5	30,3	90,7	13,7	0,463	46,5
16	30,5	30,6	90,9	11,8	0,445	50,1
17	30,3	30,6	90,7	14,3	0,569	44,4
18	30,2	30,4	90,7	13,4	0,384	43,8
19	30,2	30,5	91,0	13,0	0,484	53,6
20	30,4	30,3	90,7	14,2	0,384	50,8
21	30,5	30,6	90,6	14,2	0,550	56,3
22	30,3	27,7	90,6	11,9	0,321	37,8
23	30,1	30,6	90,6	13,0	0,468	47,6
24	30,2	30,5	90,7	12,9	0,521	57,0
25	30,4	30,3	90,7	13,8	0,602	64,3
Média	30,4	30,1	90,7	13,2	0,437	43,4
Desvio padrão	0,1	0,9	0,1	0,8	0,083	9,0
CV %	0,4	2,9	0,1	6,3	18,991	20,8

Tabela 14: Resultados dos ensaios de caracterização para as peças do lote do adesivo Cascophen-H.

Cps	Dimensões (mm)			U (%)	$\rho_{ad} (g/cm^3)$	$f_{c0} (MPa)$
26	30,1	30,4	90,7	11,2	0,357	37,6
27	30,2	30,5	90,8	13,4	0,464	33,3
28	30,3	30,1	90,6	13,1	0,459	46,9
29	30,3	30,3	90,8	10,0	0,356	40,1
30	30,3	30,2	90,8	10,7	0,407	45,7
31	30,3	30,2	90,8	11,3	0,439	53,9
32	30,3	30,4	90,7	13,6	0,540	39,1
33	30,0	30,3	90,7	14,0	0,473	39,7
34	30,2	30,0	90,7	11,3	0,383	39,9
35	30,1	30,2	90,8	10,6	0,378	39,5
36	29,9	30,4	90,8	11,4	0,434	48,0
37	30,0	30,2	90,8	11,8	0,369	37,7
38	30,1	30,0	90,8	11,6	0,443	50,2
39	30,0	30,3	90,8	10,6	0,365	36,4
40	30,1	29,9	90,7	10,5	0,282	29,5
41	30,2	30,3	90,7	12,5	0,433	47,9
42	29,7	30,2	90,9	10,2	0,331	33,4
43	30,0	30,8	90,7	11,4	0,373	42,3
44	30,2	30,2	90,7	11,5	0,422	36,3
45	30,2	30,3	90,7	11,1	0,457	52,5
46	29,9	30,3	90,8	11,2	0,434	49,8
47	30,1	30,3	90,8	11,5	0,535	57,3
48	30,2	30,2	90,8	10,6	0,428	49,5
49	30,0	30,6	90,7	11,2	0,439	45,7
50	30,3	30,3	90,7	9,5	0,331	31,7
Média	30,1	30,3	90,7	11,4	0,413	42,6
Desvio padrão	0,2	0,2	0,1	1,1	0,061	7,4
CV %	0,5	0,6	0,1	9,8	14,814	17,5

Tabela 15: Resultados dos ensaios de caracterização para as peças do lote do adesivo Cascophen-V.

Cps	Dimensões (mm)			U (%)	ρ_{ap} (g/cm ³)	f_{co} (MPa)
51	31,6	30,7	90,5	12,9	0,317	44,7
52	31,1	32,2	90,5	11,5	0,310	29,0
53	31,0	32,3	90,9	12,6	0,312	32,0
54	29,5	31,1	90,7	12,5	0,291	37,7
55	29,4	31,0	90,9	11,9	0,318	32,1
56	32,4	31,1	90,9	12,1	0,373	32,1
57	30,7	32,5	90,5	13,6	0,332	39,0
58	31,0	32,5	90,6	11,7	0,239	34,0
59	31,1	28,9	90,9	12,6	0,371	31,2
60	30,9	32,5	90,6	13,2	0,328	32,2
61	31,4	31,8	91,0	14,1	0,399	35,2
62	30,9	32,3	90,6	13,2	0,396	43,6
63	30,7	32,5	90,7	12,6	0,404	45,9
64	31,1	32,4	90,7	12,9	0,334	45,0
65	30,7	32,6	90,8	13,6	0,367	35,8
66	30,7	32,6	90,7	12,0	0,306	31,2
67	30,1	30,2	91,0	12,0	0,394	39,3
68	30,9	29,2	90,7	13,0	0,455	47,8
69	31,6	31,5	90,5	13,6	0,424	43,7
70	32,3	31,0	90,6	13,2	0,407	47,9
71	31,7	31,7	90,9	12,4	0,357	45,8
72	30,9	32,1	90,6	13,6	0,436	40,0
73	30,8	32,5	90,4	12,9	0,442	48,4
74	31,8	31,5	90,4	12,3	0,391	46,1
75	30,9	32,3	90,7	13,6	0,432	47,6
Média	31,0	31,6	90,7	12,8	0,365	39,5
Desvio padrão	0,7	1,0	0,2	0,7	0,055	6,6
CV %	2,2	3,3	0,2	5,4	15,088	16,6

Tabela 16: Resultados dos ensaios de caracterização para as peças do lote do adesivo poliuretano à base de óleo de mamona.

Cps	Dimensões (mm)			U (%)	ρ_{ad} (g/cm ³)	f_{c0} (MPa)
76	31,2	30,8	90,5	13,1	0,422	43,8
77	31,1	30,4	90,7	14,0	0,561	54,3
78	30,9	30,6	90,6	13,4	0,483	52,4
79	31,2	30,8	90,6	13,7	0,410	42,6
80	30,6	30,7	90,6	13,6	0,411	40,3
81	30,9	30,4	90,5	13,2	0,393	42,3
82	30,7	30,7	90,5	14,1	0,416	40,0
83	30,5	31,1	90,7	13,6	0,447	52,8
84	30,8	31,0	90,5	13,8	0,475	51,5
85	30,6	31,0	90,5	13,2	0,393	43,6
86	30,7	31,0	90,8	13,7	0,421	43,0
87	31,0	31,0	90,7	13,0	0,379	44,0
88	30,7	31,0	90,6	13,8	0,391	42,2
89	31,0	30,7	90,6	14,0	0,443	51,1
90	29,6	29,7	90,5	12,8	0,388	46,6
91	30,7	30,7	90,5	13,9	0,468	51,8
92	30,7	31,0	90,6	13,6	0,502	57,0
93	30,4	31,1	90,7	13,8	0,403	46,6
94	30,8	31,0	90,4	13,2	0,494	56,0
95	30,9	28,6	90,7	12,9	0,391	44,5
96	30,6	31,0	90,6	13,9	0,476	50,6
97	30,8	31,0	90,5	14,1	0,487	57,2
98	30,9	31,0	90,7	13,2	0,490	48,7
99	30,6	30,9	90,6	13,7	0,513	47,6
100	30,8	31,0	90,7	14,4	0,588	68,3
Média	30,7	30,7	90,6	13,6	0,450	48,7
Desvio padrão	0,3	0,5	0,1	0,4	0,056	6,7
CV %	1,0	1,8	0,1	3,1	12,519	13,7

Tabela 17: Resultados dos ensaios de caracterização para as peças do lote do adesivo Wonderbond.

Cps	Dimensões (mm)			U (%)	ρ_{ad} (g/cm ³)	f_{c0} (MPa)
101	30,9	30,2	90,8	10,7	0,402	26,7
102	30,9	30,5	90,6	11,6	0,516	35,2
103	30,4	30,8	90,7	10,9	0,509	36,2
104	30,6	30,6	90,6	10,5	0,583	41,9
105	30,4	30,9	90,7	11,1	0,491	32,2
106	30,9	30,1	90,8	10,9	0,475	32,9
107	30,4	30,8	90,7	10,5	0,484	36,7
108	30,1	30,8	90,8	10,3	0,508	38,8
109	30,4	30,8	90,7	11,7	0,513	35,7
110	30,3	31,0	90,9	11,2	0,561	35,2
111	30,5	30,6	89,1	10,6	0,569	41,7
112	30,8	30,4	90,6	10,5	0,574	40,0
113	30,2	27,7	90,7	11,1	0,462	34,7
114	30,1	30,9	90,7	11,2	0,590	45,9
115	30,0	27,8	90,8	10,6	0,491	36,3
116	30,2	31,0	90,7	10,2	0,599	44,4
117	30,9	30,4	90,7	11,2	0,532	41,3
118	30,2	30,8	90,5	11,0	0,540	43,1
119	30,3	30,7	90,6	11,3	0,554	42,8
120	29,2	29,0	90,7	11,3	0,560	41,3
121	27,8	30,2	90,8	10,3	0,410	31,7
122	30,4	30,8	90,5	11,6	0,654	48,4
123	30,8	30,3	90,5	11,8	0,632	47,3
124	30,3	31,0	90,5	11,1	0,636	51,0
125	31,0	30,3	90,5	11,5	0,670	46,9
Média	30,3	30,3	90,6	11,0	0,541	39,5
Desvio padrão	0,6	0,9	0,3	0,5	0,069	6,0
CV %	2,1	2,9	0,4	4,2	12,854	15,1

ela 18: Resultados dos ensaios de caracterização para as peças do lote do
adesivo MUF.

Cps	Dimensões (mm)			U (%)	ρ_{ap} (g/cm ³)	f_{c0} (MPa)
126	29,7	30,0	90,1	12,5	0,392	39,7
127	29,9	29,9	90,1	13,2	0,435	37,6
128	29,9	30,2	90,0	13,4	0,435	39,6
129	30,0	29,8	90,1	13,2	0,448	39,3
130	30,1	30,0	90,0	12,2	0,429	43,5
131	29,9	30,0	90,1	13,0	0,398	39,2
132	29,8	29,9	90,0	13,6	0,385	37,6
133	30,0	30,1	90,1	13,0	0,384	36,7
134	29,0	29,2	90,0	12,9	0,469	45,5
135	30,1	30,0	90,1	13,0	0,447	43,7
136	30,2	30,0	90,0	13,2	0,409	41,9
137	30,1	30,0	89,9	12,8	0,520	46,6
138	29,7	29,9	90,1	12,6	0,412	42,7
139	29,3	29,1	90,2	12,7	0,447	44,0
140	30,0	30,0	90,0	12,9	0,432	39,4
141	29,7	30,0	90,0	12,5	0,471	53,3
142	29,7	30,0	90,0	12,6	0,389	35,5
143	30,1	29,9	90,1	13,1	0,542	55,9
144	29,9	29,8	90,1	14,0	0,496	49,3
145	29,8	29,9	90,2	12,9	0,521	55,2
146	29,9	30,0	90,0	13,3	0,400	32,9
147	30,0	30,0	90,0	13,7	0,502	48,5
148	30,0	29,6	90,0	14,1	0,535	54,5
149	29,9	29,5	90,3	12,4	0,477	47,2
150	29,9	29,8	90,2	13,1	0,666	62,3
Média	29,9	29,9	90,1	13,0	0,458	44,5
Desvio padrão	0,3	0,3	0,1	0,5	0,065	7,4
CV %	0,9	0,9	0,1	3,6	14,288	16,6

Tabela 19: Valores médios para os lotes (resistência à compressão, umidade e
densidade).

LOTES	f_{c0} (MPa)	U%	$\rho_{ap, verde}$ (g/cm ³)
Mamona	48,7	13,6	0,450
Controle	44,8	13,1	0,426
MUF	44,5	13,0	0,458
Cascorez	43,4	13,2	0,437
Cascophen-H	42,6	11,4	0,413
Cascophen-V	39,5	12,8	0,365
WB	39,5	11,0	0,541

4.3 TRAÇÃO PARALELA EM PEÇAS DE TAMANHO ESTRUTURAL

A tabela 20 apresenta os valores obtidos para a resistência à tração paralela (MPa), bem como o valor médio, o desvio padrão e o coeficiente de variação (%), para cada grupo, com e sem emenda.

Tabela 20: Resultados dos ensaios de resistência à tração paralela (MPa).

BLOCO	TRATAMENTOS						
(MOE)	A	B	C	D	E	F	G
	Cascorez	Cascophen (Horizontal)	Cascophen (Vertical)	PU	Wonderbond	MUF	Controle
1	36,92	45,73	37,37	67,73	36,14	26,49	57,96
2	65,83	32,53	51,64	57,15	47,30	25,55	55,19
3	59,62	53,43	47,78	45,14	78,31	23,12	76,66
4	51,59	37,34	43,99	39,18	74,32	24,67	39,27
5	54,49	48,23	44,03	57,23	56,03	29,09	83,19
6	50,37	60,32	50,68	47,71	53,09	30,35	98,49
7	53,13	40,51	52,53	40,88	72,97	33,55	90,04
8	43,08	45,46	39,84	51,11	58,73	20,06	58,12
9	43,65	45,00	42,68	48,72	63,78	28,87	71,26
10	65,12	58,43	56,11	36,83	63,33	31,88	98,18
11	40,64	74,15	48,50	58,21	65,12	19,07	79,07
12	39,31	64,86	58,47	44,50	60,94	19,53	60,19
13	47,11	72,99	58,93	39,48	55,16	27,91	85,92
14	52,58	34,15	47,66	44,70	72,71	19,17	88,01
15	47,68	35,04	62,04	43,63	54,13	24,19	84,43
16	60,12	56,07	58,41	44,48	65,90	29,40	67,40
17	61,34	32,57	57,59	52,34	64,27	31,75	57,18
18	65,43	54,90	63,84	28,54	65,67	27,90	33,78
19	63,02	60,52	63,69	32,96	65,51	28,11	123,19
20	85,73	79,01	64,87	44,60	60,20	34,70	53,78
21	50,89	61,20	68,94	44,34	52,13	22,58	123,30
22	49,76	70,47	61,14	37,12	65,43	19,09	79,42
23	47,77	76,41	72,28	44,70	86,75	29,23	95,65
24	76,92	63,71	67,46	55,37	66,79	33,48	117,34
25	72,41	37,85	69,52	34,98	67,66	25,22	110,57
Média	55,38	53,63	55,60	45,67	62,90	26,60	79,50
Desvio padrão	12,09	14,70	9,90	8,96	10,40	4,84	24,52
CV %	21,84	27,40	17,81	19,62	16,53	18,21	30,84

4.4 ANÁLISE ENTRE OS TRATAMENTOS COM PERFIL VERTICAL

A primeira análise feita foi a comparação entre os valores de resistência à tração obtidos nos ensaios com todas as emendas de perfil vertical, ou seja,

utilizaram-se os dados das colunas A, C, D, E e F da tabela 20. Verificou-se a normalidade dos dados e, em seguida fez-se a Análise de Variância.

Figura 23: Histograma de freqüências (perfil vertical).

Figura 24: Gráfico de probabilidade normal dos resíduos (perfil vertical).

Figura 25: Resíduos *versus* valor estimado (perfil vertical).

Os gráficos das figuras 23, 24 e 25 referentes a Histograma de Frequência, Gráfico de Probabilidade Normal dos Resíduos e gráfico de Resíduos *versus* Valores estimados, respectivamente, mostram um forte 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 21 apresenta o quadro da ANOVA.

Tabela 21: Tabela ANOVA (perfil vertical).

Fonte	GL	SQ	QM	Razão
Tratamentos	4	19751,13	4937,78	56,21
Blocos	24	2515,10	104,80	1,19
Erro	96	8432,70	87,84	
Total	124	30698,94		

A razão observado com GL = (4, 96) é igual a 56,21. Como o valor de F tabelado, para um nível de significância de 95%, é igual a 2,48 verifica-se que a razão observada cai na região de rejeição ($56,21 > 2,48$), podendo-se concluir que os dados fornecem evidência suficiente para rejeitar a hipótese nula e que existem diferenças entre as médias nas resistências à tração para os cinco adesivos testados. Para identificar essas diferenças, utilizou-se o método da “Diferença

Menos Significativa” (LSD). Com relação às diferenças entre os blocos, como 1,19 < 1,65 (tabelado), podemos concluir que não existem diferenças significativas, com confiabilidade de 95%, entre os vários blocos.

- LSD entre tratamentos:

$$LSD = t_{\frac{\theta}{2},v} * \sqrt{\frac{2 * QME}{n}} \tag{1}$$

Na expressão 1, *n* corresponde ao número de observações dentro de um mesmo tratamento e *v* é o número de graus de liberdade da parcela do erro. O valor tabelado de *t*_{0,025, 96} é 1,99. Portanto:

$$LSD = 1,99 * \sqrt{\frac{2 * 87,84}{25}} = 5,28$$

Fazendo-se, a partir da tabela 20, 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 22: Diferença entre as resistências médias dos adesivos.

	WB	Cascophen-V	Cascorez	PU	MUF
WB	0,00				
Cascophen-V	7,30	0,00			
Cascorez	7,52	0,22	0,00		
PU	17,20	9,93	9,71	0,00	
MUF	36,30	7,30	28,78	19,07	0,00

A análise desses resultados (tabela 22) revela que só não existe diferença significativa entre os adesivos Cascophen e Cascorez (0,22 < 5,28). O diagrama da figura 26 indica os grupos, organizados no sentido de menor para o de maior resistência. A figura 27 mostra um gráfico dos valores médios de resistência para cada adesivo.

Figura 26: Grupos formados pela diferença significativa, organizados no sentido de menor para maior valor médio de resistência.

Figura 27: Valores médios de resistência para os diferentes tratamentos.

4.5 COMPARAÇÃO ENTRE OS TRATAMENTOS E O CONTROLE

Constatou-se, anteriormente, pela comparação entre as emendas dentadas verticais com todos os adesivos, que as diferenças de resistência entre alguns grupos de adesivos foram significativas. Mas, e quanto à comparação com as

peças sem emendas (controle)? Para tal análise foi utilizado o *Método de Dunnett*, descrito abaixo.

Método de Dunnett

Pelo *Método de Dunnett*, a média de um tratamento controle pode ser comparada com as médias dos tratamentos específicos.

$$(\bar{y}_i - \bar{y}_j) \pm t_{k,v,\frac{\theta}{2}} * s * \sqrt{\frac{1}{n_A} + \frac{1}{n_i}}$$

(2)

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

Após substituições, obteve-se, como valor da segunda parte da expressão 2, um intervalo de $\pm (7,23)$, que foi comparado com as diferenças entre os valores médios de resistência mostrados na tabela 23.

Tabela 23: Resistências à tração médias e diferenças com relação ao controle.

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

Como nenhuma das diferenças (tabela 23) está contida no intervalo $(-7,23 < \bar{y}_i - \bar{y}_j < 7,23)$, conclui-se que existe diferença significativa entre o controle e todos os tratamentos.

Para quantificar as diferenças entre controle e adesivo, foram calculadas as eficiências, indicadas na tabela 24, variando de 79% para o Wonderbond a 33% para o MUF.

Tabela 24: Eficiência entre as resistências médias dos adesivos e o controle.

ADESIVOS	EFICIÊNCIA (%)
Wonderbond	79
Cascophen-Vertical	70
Cascorez	70
Cascophen-Horizontal	67
Poliuretano	57
Melamina Uréia Formaldeído	33

A mesma análise foi feita desconsiderando os blocos referentes aos valores extremos de resistência do grupo controle (blocos 4, 18, 19, 21, 24 e 25 – tabela 20). Essa análise não apresentou diferenças significativas em relação à análise feita anteriormente, de forma que a mesma não está apresentada.

Figura 28: Comportamento da resistência à tração com o aumento das faixas de módulo de elasticidade (Bloco).

No gráfico da figura 28, todos os adesivos, com exceção do MUF e 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. O MUF

mostrou comportamento constante em aproximadamente 27 MPa para todas as faixas do bloco, mostrando não ser adequado para o tipo de madeira utilizado, ou seja, de baixa densidade, uma vez que este adesivo possui baixa viscosidade, sendo muito absorvido pela madeira. Quanto ao PU, os valores de resistência à tração decresceram com o aumento do módulo de elasticidade, mostrando um indicativo de influência na eficiência do adesivo com o aumento da densidade da madeira.

4.6 ANÁLISE ENTRE OS PERFIS VERTICAL E HORIZONTAL

A segunda análise feita foi a comparação entre os valores de resistência à tração obtidos nos ensaios com as emendas de perfil vertical e horizontal feitas com adesivo Cascophen, ou seja, as colunas B e C da tabela 20. Foi verificada e constatada a normalidade dos dados, como mostrado nos gráficos das figuras 29, 30 e 31.

Figura 29: Histograma de freqüências (perfis vertical e horizontal).

Figura 30: Gráfico de probabilidade normal dos resíduos (perfis vertical e horizontal).

Figura 31: Resíduos *versus* valor estimado (perfis vertical e horizontal).

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

Tabela 25: Tabela ANOVA (perfil vertical e horizontal).

Fonte	GL	SQ	QM	Razão
Tratamentos	1	48,24	48,24	0,50
Blocos	24	5225,95	217,75	2,26
Erro	24	2311,28	96,30	
Total	49	7585,47		

O número de graus de liberdade é dado por $GL = (k-1, n-k-m+1) = (1, 24)$ e o valor crítico tabelado entre tratamentos, é $F_{0,05} = 4,26$. Já que $0,50 < 4,26$, não existe diferença significativa entre os dois tipos de tratamento. O valor crítico entre blocos é dado por $F_{0,05} = 1,98$. Como $2,26 > 1,98$ há evidências de que existem diferenças significativas entre os valores dos blocos. Para identificar estas diferenças o método da “Diferença Menos Significativa” (LSD) foi utilizado.

- LSD entre blocos:

$$LSD = t_{\frac{\theta}{2}, v} * \sqrt{\frac{2 * QME}{k}} \quad (3)$$

Na expressão 3, k corresponde ao número de observações dentro de um mesmo bloco. O valor tabelado de $t_{0,025, 24} = 2,064$. Assim:

$$LSD = 2,064 * \sqrt{\frac{2 * 96,30}{2}} = 20,25$$

Fazendo a diferença entre os valores médios de cada bloco, obtiveram-se diferenças maiores que LSD, indicadas na figura 32, em forma de matriz.

Figura 32: Pontos com diferença significativa entre todos os blocos.

Como pode ser observado na figura 32, 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 (tabelas 6 e 7).

Quando se analisa o conjunto com todos os 5 tratamentos, a variabilidade é grande e a diferença em decorrência do bloco passa a ser não significativa. Ao se analisar apenas 2 adesivos (estatisticamente semelhantes), a influência do bloco passa a ser detectada.

A figura 33 representa as diferenças entre as médias de resistências para cada bloco.

Figura 33: Valores médios de resistência para cada bloco.

4.7 CLASSIFICAÇÃO PELO MODO DE RUPTURA

Foram analisadas as formas de ruptura das peças, e classificadas de acordo com a tabela 4. As rupturas de modo 1 indicam falhas de colagem e as de modo 6 falhas na madeira. Os modos 2, 3, 4 e 5 caracterizam ruptura na emenda, sendo que o modo 4 representa melhor eficiência da emenda dentada. A figura 34 mostra exemplos de rupturas ocorridas em cada modo.

MODOS DE RUPTURA (ASTM D4688)					
1	2	3	4	5	6

Figura 34: Exemplos de rupturas ocorridas em cada modo.

A frequência de cada forma de ruptura está apresentada na tabela 26. Observa-se que 41% das peças apresentaram ruptura no modo 4. A frequência de ocorrência de cada modo de ruptura, para cada adesivo, está mostrada na figura 35, podendo-se observar os picos de ocorrência.

Na tabela 27, a quantidade de peças em cada modo de ruptura está distribuído entre os tratamentos.

Tabela 26: Quantidade de ocorrências para cada modo de ruptura.

MODO	QUANTIDADE	
	Nº PEÇAS	%
1	16	11%
2	24	16%
3	34	23%
4	62	41%
5	7	5%
6	7	5%
TOTAL GERAL	150	100%

Figura 35: Gráfico de ocorrências para cada modo de ruptura e adesivo.

Tabela 27: Quantidade de peças rompidas em cada modo de ruptura e tratamento.

MODO	ADESIVO	QUANTIDADE	
		Nº PEÇAS	%
1	CASCOREZ	1	1%
	MUF	9	6%
	PU	4	3%
	CASCOPHEN-H	2	1%
	CASCOPHEN-V	0	0%
	WONDERBOND	0	0%
1 Total		16	11%
2	CASCOREZ	5	3%
	MUF	5	3%
	PU	9	6%
	CASCOPHEN-H	1	1%
	CASCOPHEN-V	3	2%
	WONDERBOND	1	1%
2 Total		24	16%
3	CASCOREZ	3	2%
	MUF	4	3%
	PU	10	7%
	CASCOPHEN-H	6	4%
	CASCOPHEN-V	7	5%
	WONDERBOND	4	3%
3 Total		34	23%
4	CASCOREZ	12	8%
	MUF	7	5%
	PU	2	1%
	CASCOPHEN-H	13	9%
	CASCOPHEN-V	14	9%
	WONDERBOND	14	9%
4 Total		62	41%
5	CASCOREZ	2	1%
	MUF	0	0%
	PU	0	0%
	CASCOPHEN-H	1	1%
	CASCOPHEN-V	1	1%
	WONDERBOND	3	2%
5 Total		7	5%
6	CASCOREZ	2	1%
	MUF	0	0%
	PU	0	0%
	CASCOPHEN-H	2	1%
	CASCOPHEN-V	0	0%
	WONDERBOND	3	2%
6 Total		7	5%
Total geral		150	100%

A relação entre a eficiência da emenda e seu modo de ruptura pode ser observada comparando a figura 35 com os valores da tabela 24. As maiores eficiências coincidem com maiores ocorrências no modo de ruptura 4. Já a maior ocorrência no modo de ruptura 1 pertence às emendas feitas com o adesivo de pior eficiência (MUF).

4.7.1 Relação com madeira de inverno e módulo de elasticidade

Os gráficos das figuras 36 e 37 mostram que as rupturas no modo 4 ocorreram nas peças com as menores porcentagens de madeira de inverno e de menor módulo de elasticidade. Pode-se observar também que a ineficiência de colagem (modo 1) ocorreu em peças com porcentagens superiores de madeira de inverno. Na figura 38, pode ser observada a relação entre porcentagem de madeira de inverno e módulo de elasticidade, evidenciando aumento no módulo de elasticidade com o aumento da porcentagem de madeira de inverno.

Figura 36: Faixas de porcentagem de madeira de inverno para cada modo de ruptura.

Figura 37: Faixas de módulo de elasticidade para cada modo de ruptura.

Figura 38: Porcentagem de madeira de inverno *versus* módulo de elasticidade.

5. CONCLUSÕES

Várias conclusões foram apresentadas no decorrer do texto deste trabalho destacando-se a seguir as principais:

Com relação ao desenvolvimento do trabalho com peças estruturais de pinus, destaca-se a importância da classificação visual por eliminar os defeitos visíveis que podiam ter influência sobre o desempenho das peças. Por sua vez, a classificação mecânica feita por meio do módulo de elasticidade possibilitou uma distribuição mais uniforme das peças (análise por blocos) entre os vários tipos de adesivos e perfis testados. Esse efeito dos blocos mostrou-se significativo, principalmente na comparação entre os perfis, devido à menor variabilidade observada nesse caso, em relação à comparação entre adesivos. Além disso, a classificação mecânica mostrou ter relação com a porcentagem de madeira de inverno (obtida por meio da classificação visual).

Os procedimentos de execução das emendas, indicados pela literatura consultada, como pressão de colagem e pressão lateral, mostraram-se adequados, uma vez que não houve presença de esmagamento dos dentes e nem desalinhamento longitudinal das peças no momento da prensagem.

Com relação à qualidade da colagem, a maior incidência de rupturas no modo 1, que representa falha na colagem, ocorreu para o MUF (Melamina Uréia Formaldeído). 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.

A análise dos resultados mostrou que não existe diferença significativa (considerando confiabilidade de 95%) entre os perfis horizontal e vertical, ambos colados com Cascophen, com leve vantagem do perfil vertical (valor médio: 55,6 MPa) sobre o horizontal (valor médio: 53,63 MPa).

A comparação entre todos os adesivos com perfil vertical revelou que apenas o Cascophen e o Cascorez não possuem diferenças estatísticas, com confiabilidade de 95%. O adesivo que mais se destacou foi o Wonderbond, com desempenho superior inclusive ao Cascophen, adesivo de uso tradicional na fabricação de madeira laminada colada.

O APÊNDICE A apresenta uma comparação simplificada dos custos dos adesivos, mostrando, em relação ao Cascophen, um custo muito menor dos adesivos Wonderbond e Cascorez (cerca de 5 e 10 vezes menor, respectivamente). Esses adesivos apresentaram eficiências igual ou superior ao do Cascophen, quanto à resistência à tração, na situação avaliada neste trabalho. Isso sinaliza uma situação promissora para o uso desses adesivos na fabricação de MLC. É importante destacar que, além dos testes efetuados no presente trabalho, a confirmação da eficiência desses adesivos deve ser comprovada em testes de durabilidade. Essa avaliação está sendo feita paralelamente pelo grupo de pesquisa no qual este trabalho está inserido. Entretanto, segundo informações dos boletins técnicos dos fabricantes, esses adesivos são resistentes à umidade.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADHESIVOS para remanufactura: Para um buen resultado. (2003). Revista Lignum, Chile, jul.

AMERICAN INSTITUTE of TIMBER CONSTRUCTION. (2001). **AITC 117 - Manufacturing - Standard Specifications for Structural Glued Laminated Timber of Softwood Manufacturing Requirements.** Englewood, CO, AITC.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM (1927). **D 245-27 – Standard practice for establishing structural grades and related allowable properties for visually graded lumber.**

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM (1993). **D 245-93 – Standard practice for establishing structural grades and related allowable properties for visually graded lumber.**

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM (1999). **D 4688-99 – Standard test method for evaluating structural adhesives for finger jointing lumber.**

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1997). Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira: **Projeto de Estruturas de Madeira.** NBR 7190 – 107 p.

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).** São Carlos. 116p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

BARRETT, J. D.; LAM, F.; LAU, W. (1995). **Size effects in visually graded softwood structural lumber.** Journal of Materials of Civil Engineering. 7:1 19-30.

BROWN, L. S.; DeVISSER, D. A.; TUVEY, R. S; ROZEK, A. K. (1997). **Mechanically graded lumber: The grading agency perspective.** Wood Design Focus. 3-7.

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 JR., C ; MINÁ, A. J. S. (2003). ***Vibração transversal: Um método eficiente para classificação de peças estruturais de madeira***. In: Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.7, n.2, p.335-338.

CAMPOS, C. I.; LAHR, F. A. R. (2004). ***Estudo Comparativo dos Resultados de Ensaio de Tração Perpendicular para MDF Produzido em Laboratório com Fibras de Pinus e de Eucalipto Utilizando Uréia-Formaldeído***. Revista Matéria, vol 9, nº 1, 32-42.

CARPINETTI, L. C. R. (2003). ***Planejamento e análise de experimentos***. Departamento de Engenharia de Produção – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo.

CARREIRA, M. R. (2003). ***Critérios de classificação visual de peças estruturais de Pinus Sp.*** São Carlos. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo.

CARREIRA, M. R.; DIAS, A. A.; CALIL JR.,C. (2004a). ***Critérios para classificação visual de peças estruturais de Pinus Sp.*** IX Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira (IX EBRAMEM), Cuiabá – MT, jul.

CARREIRA, M. R.; DIAS, A. A.; CHEUNG, A. B.; CALIL JR.,C. (2004b). ***Classificação estrutural de Pinus Sp por vibração transversal***. IX Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira (IX EBRAMEM), Cuiabá – MT, jul.

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).

DIN 68140 (1971) ***Keilzinkenverbindung von Holz***. Berlin, Alemanha.

ESPECIAL Adesivos. (2004). Revista Referência, Ano VI – nº 40. Brasil

ESPINOSA, M. M. (2002). ***Estatística e planejamento estatístico de experimentos em madeiras e derivados***. Apostila, Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeira (LaMEM). Escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

FALK, R. H.; COLLING, F. (1995). ***Laminating effects in glued-laminated timber beams***. Journal of Structural Engineering. December.

FISSETTE, P. R.; RICE, W. W. (1988). ***An analysis of structural finger-joints made from two northeastern species***. Forest Prod. J. 38(9): 40-44.

FOSCHI, R. O.; BARRETT, J. D. (1980). ***Glued-laminated beam strength: a model***. J. Structural Div., ASCE, 106(8), 1735-1754.

FREITAS, R. R. (2004). **Classificação de peças estruturais de *Pinus spp.* pela MSR (Machine Stress Rate)**. São Carlos, SP. Dissertação de Mestrado - Escola de Engenharia de São Carlos.

GALLIGAN, W. L.; GREEN, D. W. (1980). **Development of standardized concepts for assignment and assessment of the mechanical properties of lumber**. Forest Products Journal, 30:9 39-45.

GLOS, P. (1995). **Strength grading**. Timber Engineering STEP 1: Design – Details and structural systems. Netherlands: Centrum Hout.

HENRIQUES DE JESUS, J. M. (2000). **Estudo do adesivo poliuretano à base de mamona em madeira laminada colada (MLC)**. São Carlos. 109p. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

HERNANDEZ, R. (1998). **Analysis of strain in finger-jointed lumber**. In: 5th World Conference on Timber Engineering. Montreux, Switzerland.

JANOWIAK, J. J.; LABOSKY JR., P.; BLANKENHORN, P. R.; MANBECK, H. B. (1993). **Finger-joint strength evaluations of three northeastern hardwoods**. Forest Prod. J. 43 (9): 23-28.

JOHANSSON, C. J.; BOSTROM, I.; BRAUNER, I.; HOFFMEYER, P.; HOLMQVIST, C.; SOLLU, K. H. (1998). **Laminations for glued laminated timber – Establishment of strength classes for visual strength grades and machine settings for glulam laminations of Nordic origin**. SP Swedish National Testing and Research Institute. 71 p.

JOKERST, R. W. (1981). **Finger-jointed wood products**. USDA. Forest Service. Forest Product Laboratory. FPL 382. 26p.

KOLLMANN, F. F. P.; KUENZI, E. W.; STAMM, A. J. (1975). **Principles of wood science and technology**. V.2. New York, Springer-Verlag.

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.

MACÊDO, A. N. (1996). **Estudo de emendas dentadas em madeira laminada colada: calibração de método de ensaio**. São Carlos. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 113p.

MACÊDO, A. N. (2000). **Fadiga em emendas dentadas em madeira laminada colada**. Tese de doutorado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 195p.

MACHADO, J. M. S. R. (2000). **Avaliação da variação das propriedades mecânicas de Pinho Bravo (*Pinus pinaster Ait.*) por meio de ultra-sons**. Doutorado em Engenharia Florestal - Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.

MADSEN, B.; LITTLEFORD, T. W. (1962). ***Finger joints for structural usage***. Forest Prod. J. 12 (2): 68-73.

MADSEN, B. (1992). ***Structural Behaviour of Timber***. Timber Engineering Ltd. Vancouver, Canadá.

MELO, A. V.; MANTILLA CARRASCO, E. V. (2004). ***Análise de adesivos em madeira laminada colada***. IX Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira (IX EBRAMEM), Cuiabá – MT, jul.

MESEGUER, A. G. (1991). ***Controle e garantia da qualidade na construção***. Trad. Antonio Carmona Filho et. al. São Paulo, SINDUSCON/SP-Projeto/PW. cap. 3-1, p.40-62.

PELLERIN, R. (1970). ***Testing reliability of finger joints used in laminated beams***. Proceedings of Northern California Section of Forest Products Research Society, Nov. 19-20

PELLICANE, P. J.; GUTKOWSKI, R. M.; JAUSLIN, C. (1994). ***Effect of glueline voids on the strength of finger-jointed wood***. Forest Prod. J. 44 (6): 61-64.

RAMPAZZO, S. E.; SPONCHIADO, M. (2000). ***A utilização da madeira de reflorestamento***. Revista de Pesquisa e Pós-Graduação, Erechim, RS, Brasil. 01: 131-148.

ROSS, R. J.; WANG, X.; MATTSON, J. A. ; ERICKSON, J. R. ; FORSMAN, J. W. ; GESKE, E. A. ; WEHR, M. A. (2000). ***Comparison of Several Nondestructive Evaluation Techniques for Assessing Stiffness and MOE of Small-Diameter Logs***. In: 12th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood, Hungary.

ROTH, A. (1970). ***A new type of finger joint***. Paperi ja Puu. J. 52 (1): 25-28.

RUYSCH, G. N. (1980). ***Production finger-jointed sawnwood***. In: Seminar on the production marketing and use of finger-jointed sawnwood, Hamar, Norway, Sep. 5p.

SERRANO, E., GUSTAFSSON, P. J. (1999). ***Influence of bondline brittleness and defects on the strength of timber finger-joints***. International Journal of Adhesion & Adhesives 19. Division of Structural Mechanics, Lund University, Lund, Sweden.

SOUTHERN PINE INSPECTION BUREAU. (1994). ***Graders Manual for Boards and 2" Dimension***. Pensacola, Florida, SPIB.

STRICKLER, M. D. (1980). ***Finger-jointed dimension lumber – past, present, and future***. Forest Prod. J. 30(9): 51-56.

SUNLEY, J. G.; HUDSON, W. M. (1964). ***A report of research on the machine-grading of lumber in Britain***. Forest Products Journal. 155-158.

TOMASELLI, I.; SILVA, L. X. (1996). ***Grevillea, Cinamomo e outras Madeiras***. In: Seminário sobre Processamento e Utilização de Madeira de Reflorestamento. Curitiba. Anais, SBS, p. 05-16.

VERREAULT, C. (1999). ***Performance evaluation of green gluing for finger jointing***. Internal Rept. CFS-VA # 2295. Forintek Canada Corp., Ste-Foy, QC, Canada. 59 pp.

APÊNDICE A – Preços médios de mercado dos adesivos

A tabela A mostra os preços unitários de cada adesivo utilizado na pesquisa, cotados nos fabricantes dos mesmos, em fevereiro de 2006. Também são informados os valores em dólar (1 US\$ = 2,15 R\$), pois, como a matéria-prima da maioria dos adesivos é importada, esses valores apresentam menor variação, segundo informação dos fabricantes.

Tabela A: Preços de mercado dos adesivos utilizados.

ADESIVO	R\$/kg*	US\$/kg*
Cascophen RS-216-M	48,81	22,70
Poliuretano à base de mamona (PU)	36,02	16,75
Wonderbond EPI WS 766-56	9,46	4,40
Cascorez 2550	4,88	2,27
Melamina Uréia Formaldeído (MUF)	1,62	0,75

* Preços médios de mercado à vista, em fev/2006.

Considerando, por simplificação, um consumo médio semelhante para todos os adesivos, e custos semelhantes para aplicação, a comparação dos custos dos adesivos, na fabricação de madeira laminada colada, pode ser feita diretamente com relação ao preço unitário por kg.