

JORGE LUIS MONTEIRO DE MATOS

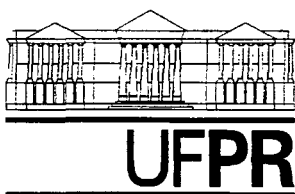
**ESTUDOS SOBRE A PRODUÇÃO DE PAINÉIS ESTRUTURAIS
DE LÂMINAS PARALELAS DE *Pinus taeda* L.**

Tese apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de "Doutor em Ciências Florestais".

Orientador: Prof. Sidon Keinert Júnior

CURITIBA

1997



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
COORDENAÇÃO DO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA FLORESTAL

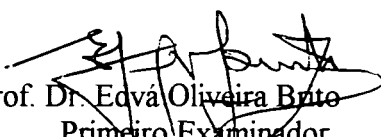
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
COORDENAÇÃO DO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL

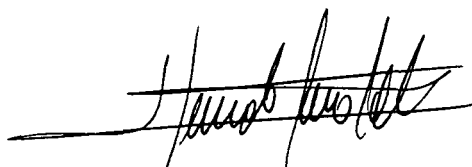
P A R E C E R


Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, reuniram-se para realizar a arguição da Tese de DOUTORADO, apresentada pelo candidato **JORGE LUIS MONTEIRO DE MATOS**, sob o título "ESTUDOS SOBRE A PRODUÇÃO DE PAINÉIS ESTRUTURAIIS DE LÂMINAS PARALELAS (PLP) DE *Pinus taeda* L.", para obtenção do grau de **Doutor** em Ciências Florestais, no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, Área de Concentração **TECNOLOGIA E UTILIZAÇÃO DE PRODUTOS FLORESTAIS**.


Após haver analisado o referido trabalho e argüido o candidato são de parecer pela "APROVAÇÃO" da Tese, com média final: (*8,5*), correspondente ao conceito: (*A*).

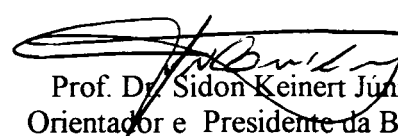
Curitiba, 03 de outubro de 1997


Prof. Dr. Edvá Oliveira Brito
Primeiro Examinador
UFRRJ


Prof. Dr. Hernando Alfonso Lara Palma
Segundo Examinador
UNESP


Pesq. Dr. José Carlos Duarte Pereira
Terceiro Examinador
EMBRAPA


Prof. Dr. Setsuo Iwakiri
Quarto Examinador
UFPR


Prof. Dr. Sidon Keinert Júnior
Orientador e Presidente da Banca
UFPR



À minha esposa DIANA

A meu filho RODRIGO

A Meus Pais AURI e JUSTINA

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Sidon Keinert Júnior, pela orientação, sugestões, estímulo e amizade.

Ao Professor Setsuo Iwakiri, pela co-orientação e sugestões apresentadas.

Aos colegas do Departamento de Engenharia e Tecnologia Rurais do Setor de Ciências Agrárias.

À Empresa Battistella, pelo fornecimento do material de estudo e apoio integral à realização dos experimentos, sem o que a realização deste trabalho não seria possível.

Ao Professor João Carlos Moreschi, pela amizade, estímulo e apoio financeiro, através do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, para aquisição do equipamento para realização deste trabalho.

A Bibliotecária Sra. Lílíana Luisa Pizzolato pelas correções gramaticais e normalização da apresentação do trabalho

Ao Engenheiro Eletricista Fábio Eduardo Scarabelot, pela amizade e responsável pela recuperação da máquina universal de ensaios, através dos vários projetos que conduzimos.

Aos funcionários Ricardo Klitzke, Gilnei Machado, Ademir Cavalli, Vitor Herrera e Antônio Perin.

Agradecimento especial, em memória do Professor João Batista Chaves Correa falecido em 1992, de quem tivemos a orientação inicial deste programa de doutorado.

A todos aqueles que colaboraram de maneira direta ou indireta, e que emprestaram sua amizade durante a realização deste trabalho.

BIOGRAFIA

JORGE LUIS MONTEIRO DE MATOS, filho de Auri Garcia de Matos e Justina Monteiro de Matos, nasceu em Santa Maria, Estado do Rio Grande do Sul, em 23 de janeiro de 1960.

Concluiu o Curso de Ensino de Primeiro Grau em 1974 no Colégio Santa Maria; o Curso de Ensino de Segundo Grau em 1977, no Colégio Estadual Manoel Ribas, em Santa Maria.

Em 1978 iniciou o Curso de Engenharia Florestal na Universidade Federal de Santa Maria, graduando-se em julho de 1982.

Em 1983 ingressou no Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, como Pesquisador Assistente.

Entre os anos de 1985 e 1988 realizou o Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, na Universidade Federal do Paraná, onde obteve o título de Mestre em Ciências Florestais - M.Sc. na Área de Concentração Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais.

Em 1992 ingressou na Universidade Federal do Paraná como Professor das disciplinas de Estruturas de Madeira e Tecnologia da Madeira, onde ocupa atualmente o cargo de Professor Assistente III.

Em 1991 iniciou o Programa de Doutorado no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal da Universidade Federal do Paraná, concluindo o presente trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABELAS	xii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIMBOLOS	xiv
RESUMO	xvi
ABSTRACT	xvii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. OBJETIVOS.....	2
1.1.1. Objetivo Geral	2
1.1.2. Objetivos Específicos.....	2
2. REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1. PROPRIEDADES DAS MADEIRAS DE REFLORESTAMENTOS DE PINUS	3
2.1.1. Considerações Gerais.....	3
2.1.2. Características que Influem Sobre a Resistência da Madeira :	5
2.2. PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA.....	8
2.2.1. Propriedades Elásticas da Madeira	8
2.2.2. Propriedades de Resistência da Madeira	10
2.3. TÉCNICAS DE AVALIAÇÃO NÃO DESTRUTIVA DE PROPRIEDADES DE MADEIRAS	11
2.3.1. Métodos de Avaliação Mecânica das Propriedades da Madeira	13
2.3.2. Avaliação das Propriedades da Madeira Por Métodos de Frequência de Vibração.	14
2.3.3. Métodos de Classificação de Madeiras Por Emissão de Ondas Acústicas	15
2.3.3.1. Considerações Gerais.....	15
2.3.3.2.. Aplicação de Emissão Acústica em Postes e Árvores em Pé.....	16

2.3.3.3.. Aplicação de Emissão Acústica Para Classificação Não Destrutiva de Madeiras	17
2.3.3.4. Análise Teórica de Compostos de Madeira Laminada (Teoria Clássica de Vigas).....	18
2.3.3.5. Técnica de Classificação de Lâminas de Madeira Por Aplicação de Ondas Acústicas.....	20
2.3.3.6. Princípio de Aplicação e Medição de Ondas Acústicas na Madeira.....	20
2.4. HISTÓRICO DA ORIGEM DOS PAINÉIS DE LÂMINAS PARALELAS	23
2.5. PROCESSO DE PRODUÇÃO DE PAINÉS DE LÂMINAS PARALELAS	30
2.5.1.. Laminação e Secagem de Lâminas	31
2.5.2. Espécies Utilizadas na Produção de PLP	32
2.5.3. Emendas de Lâminas	32
2.5.4. Colagem de Lâminas.....	35
2.6. PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE PAINÉIS DE LÂMINAS PARALELAS - PLP	36
2.7. VANTAGENS DOS PAINÉIS DE LÂMINAS PARALELAS.....	38
2.8. APLICAÇÕES, USOS E MERCADOS POTENCIAIS PARA LVL	41
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	46
3.1. ESPÉCIE ESTUDADA.....	46
3.2. AMOSTRAGEM E COLETA DO MATERIAL.....	46
3.3. AQUECIMENTO DAS TORAS.....	46
3.4. LAMINAÇÃO.....	47
3.5. SECAGEM DAS LÂMINAS.....	49
3.6. AVALIAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA DAS LÂMINAS.....	49
3.7. AVALIAÇÃO NÃO DESTRUTIVA DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS LÂMINAS.....	49
3.7.1. Cálculos do Módulo de Elasticidade Dinâmico - MOEd das Lâminas.....	49
3.8. CLASSIFICAÇÃO DAS LÂMINAS POR CLASSES DE RESISTÊNCIA	51
3.9. PRODUÇÃO DE PAINÉIS DE LÂMINAS PARALELAS - PLP.....	51
3.10. ESTIMATIVA DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DOS PAINÉIS ESTRUTURAIS.....	53
3.10.1. Cálculo do MOE Estimado Pela Equação Geral Para Vigas Laminadas.....	53

3.10.2. Cálculo do Módulo de Elasticidade Dinâmico dos Painéis.....	55
3.11. DELINEAMENTO EXPERIMENTAL.....	56
3.11.1. Toras de Base e Toras de Topo.....	56
3.11.2. Espessura das Lâminas.....	56
3.11.3. Classificação Preliminar das Lâminas em Classes de Resistência.....	56
3.11.4. Produção de Compensados.....	56
3.11.5. Repetições.....	57
3.11.6. Análise Estatística.....	57
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	59
4.1. PROPRIEDADES DAS LÂMINAS DE PINUS TAEDA L. A PARTIR DO TESTE DE AVALIAÇÃO NÃO DESTRUTIVA.....	59
4.1.1. Distribuição de Frequência dos Valores do Módulo de Elasticidade Dinâmico (MOEd).....	59
4.1.2. Valores Limites do Módulo de Elasticidade Dinâmico (MOEd).....	60
4.1.3. Análise das Propriedades das Lâminas, entre Tratamentos.....	64
4.1.3.1. Variabilidade da Massa Específica das Lâminas.....	64
4.1.3.2. Variabilidade do Módulo de Elasticidade Dinâmico das Lâminas.....	66
4.2. ANÁLISE DA MASSA ESPECÍFICA E DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS PAINÉIS PRODUZIDOS.....	67
4.2.1. Análise da Massa Específica.....	69
4.2.2. Análise do Módulo de Ruptura.....	69
4.2.3. Análise do Módulo de Elasticidade Aparente.....	70
4.2.4 - Análise da Tensão no Limite Proporcional.....	71
4.3. RELAÇÃO ENTRE O MOE EFETIVO, MOE DINÂMICO E O MOE APARENTE DOS PAINÉIS.....	71
4.3.1. Modelo de Equação Linear Para Estimar o Módulo de Elasticidade Aparente (MOEa) dos Painéis.....	72
4.3.2. Uso da Técnica de Emissão Acústica Para Estimativa do MOE Aparente dos PLP.....	73
4.4. COMPARAÇÃO DE PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE PAINÉIS DE LÂMINAS PARALELAS, COMPENSADO E MADEIRA SÓLIDA.....	75

4.4.1. Análise da Massa Específica	75
4.4.2. Análise do Módulo de Elasticidade Aparente (MOEa)	76
4.4.3. Análise do Módulo de Ruptura.....	77
4.4.4. Análise da Tensão no Limite Proporcional	77
5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	79
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	110
ANEXOS.....	82

LISTA DE FIGURAS

FIGURA

- 1 SISTEMA DE APLICAÇÃO DE ONDAS ACÚSTICAS PARA DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO DE MATERIAIS- MODELO METRIGUARD 239A 21
- 2 ASPECTO DE SEÇÕES DE VIGAS DE LÂMINAS DE PINUS SP. COM ESPESSURA DE 4,2mm, COLADAS PARALELAMENTE, DISPOSTAS POR CLASSES DE MÓDULO DE ELASTICIDADE..... 25
- 3 PROCESSO DE PRODUÇÃO EM ALTA VELOCIDADE DE PAINÉIS DE LÂMINAS PARALELAS, PROPOSTO POR BOHLEN, 1972 27
- 4 ETAPAS DO PROCESSO PRESS-LAM DESENVOLVIDO NO LABORATÓRIO DE PRODUTOS FLORESTAIS DE MADISON-EUA 28
- 5 CONSUMO DE LVL DE ACORDO COM O USO FINAL (PRODUÇÃO = 1.062.000 m³), ESTADOS UNIDOS - 1994..... 45
- 6 MANUSEIO DAS TORAS DE *PINUS TAEDA L.* ANTERIOR A LAMINAÇÃO..... 47
- 7 LÂMINAS DE *PINUS TAEDA L.* OBTIDAS EM TORNO CONVENCIONAL..... 48
- 8 MÉTODO UTILIZADO PARA VERIFICAÇÃO DA RESISTÊNCIA DAS LÂMINAS ATRAVÉS DO DETERMINADOR DE ONDAS DE TENSÃO 50

9	PROCESSO DE APLICAÇÃO DE COLA NAS LÂMINAS, PARA PRODUÇÃO DE PAINÉIS DE LÂMINAS PARALELAS.....	53
10	MÉTODO UTILIZADO PARA VERIFICAÇÃO DA RESISTÊNCIA DOS PAINÉIS ATRAVÉS DO DETERMINADOR DE ONDAS DE TENSÃO	55
11	HISTOGRAMA DE DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA DA MASSA ESPECÍFICA (g/cm^3) DAS LÂMINAS DE <i>PINUS TAEDA L.</i> COM ESPESSURA DE 3,2mm	61
12	HISTOGRAMA DE DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO (MOEd) DAS LÂMINAS DE <i>PINUS TAEDA L.</i> COM ESPESSURA DE 3,2mm	61
13	HISTOGRAMA DE DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA DA MASSA ESPECÍFICA (g/cm^3) DAS LÂMINAS DE <i>PINUS TAEDA L.</i> COM ESPESSURA DE 4,2mm	63
14	HISTOGRAMA DE DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO (MOEd) DAS LÂMINAS DE <i>PINUS TAEDA L.</i> COM ESPESSURA DE 4,2mm	63
15	RELAÇÃO ENTRE O MÓDULO DE ELASTICIDADE APARENTE DOS PAINÉIS E O MÓDULO DE ELASTICIDADE EFETIVO CALCULADO PELA EQUAÇÃO GERAL	73
16	RELAÇÃO ENTRE O MÓDULO DE ELASTICIDADE APARENTE DOS PAINÉIS E O MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO DETERMINADO POR MÉTODO ACÚSTICO	74

LISTA DE TABELAS

TABELA

1	VALORES DE PROPRIEDADES DE RESISTÊNCIA À FLEXÃO ESTÁTICA PARA <i>PINUS TAEDA L.</i> , NOS LENHOS JUVENIL ADULTO, EM ÁRVORES COM 18, 21 E 30 ANOS DE IDADE.....	7
2	VALORES DE PROPRIEDADES DE RESISTÊNCIA À FLEXÃO ESTÁTICA PARA LÂMINAS E MADEIRA SÓLIDA DE <i>PINUS TAEDA L.</i> COM 30 ANOS DE IDADE, OBTIDOS A PARTIR DE TESTES MECÂNICOS DESTRUTIVOS	22
3	ESPÉCIES UTILIZADAS NA PRODUÇÃO DE PAINÉIS DE LÂMINAS PARALELAS.....	33
4	VALORES DE PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS MÉDIAS OBTIDAS PARA PAINÉIS PLP TESTADOS À FLEXÃO ESTÁTICA.....	39
5	VALORES TÍPICOS DE PROPRIEDADES MECÂNICAS ADMISSÍVEIS PARA DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL COM PAINÉIS DE LÂMINAS PARALELAS PLP, FABRICADOS NOS ESTADOS UNIDOS.....	42
6	PRINCIPAIS USOS DE PAINÉIS DE LÂMINAS PARALELAS.....	45
7	VARIÁVEIS CONTROLADAS NO PROCESSO DE PRODUÇÃO DOS PAINÉIS.....	52
8	FORMULAÇÃO DO ADESIVO EM PARTES POR PESO.....	52
9	VALORES PARA CÁLCULO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE EFETIVO PARA PAINÉIS DE LÂMINAS PARALELAS.....	54

10	PARÂMETROS UTILIZADOS PARA REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS MECÂNICOS DOS PAINÉIS DE LÂMINAS PARALELAS, DE ACORDO COM A NORMA ASTM D 198.....	58
11	NÚMERO DE LÂMINAS E VALOR PERCENTUAL DE OCORRÊNCIA, POR CLASSE DE MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO (MOEd), DE LÂMINAS DE 59 ÁRVORES DE <i>PINUS TAEDA L.</i> , EM ESPESSURAS DE 3,2 E 4,2 mm.....	60
12	VALORES MÉDIOS E LIMITES DE MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO (MOEd) PARA SELEÇÃO DE LÂMINAS UTILIZADAS NA MONTAGEM DE PAINÉIS DO TIPO “CLASSIFICADOS”, POR TRATAMENTO.....	62
13	VALORES MÉDIOS DE MASSA ESPECÍFICA E MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO (MOEd) PARA LÂMINAS DE <i>PINUS TAEDA L.</i> OBTIDOS NOS DIFERENTES TRATAMENTOS.....	65
14	VALORES MÉDIOS OBSERVADOS DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS PAINÉIS DE LÂMINAS PARALELAS DE <i>PINUS TAEDA L.</i>	68
15	MODELOS DE EQUAÇÃO DE REGRESSÃO LINEAR SIMPLES PARA PREDIÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE APARENTE DOS PAINÉIS DE LÂMINAS PARALELAS DE <i>PINUS TAEDAL</i>	72
16	COMPARAÇÃO ENTRE AS PROPRIEDADES DE PAINÉIS DE LÂMINAS PARALELAS PLP, COMPENSADOS E MADEIRA DE <i>PINUS TAEDA L.</i>	76

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

a = distância entre o ponto de aplicação da carga ao apoio mais próximo (1/2 do vão de cisalhamento).

A = área da seção transversal

A^i = área da seção transversal da i -ésima Lâmina

b = largura do corpo de prova (cm) ;

CV = coeficiente de variação

d = distância entre os transdutores (cm)

d^i = distância entre o plano baricentral da viga laminada e a i -ésima lâmina

f = frequência natural

F = valor de F calculado em estatística

g = aceleração da gravidade ($9,804\text{m/s}^2$)

h = altura o corpo de prova ou da viga (cm) ;

I = momento de inércia da seção

i = raio de giração

I_o^i = momento de inércia da i -ésima lâmina em relação a sua linha neutra

I^i = momento de inércia da seção da i -ésima lâmina, em relação a linha neutra da viga

L = comprimento da peça de madeira biapoiada , vão ou distância entre os apoios

LVL = Laminated Veneer Lumber (Painéis de Lâminas Paralelas – PLP)

M = variável mecânica

m_n, k_1 = constantes de vibração em módulo 1.

MOE = módulo de elasticidade do material (módulo de Young)

MOEa = módulo de elasticidade aparente dos painéis, obtido em testes mecânicos (kgf/cm^2)

MOEd = módulo de elasticidade dinâmico dos painéis, obtido por ultra-som (kgf/cm^2).

MOEe = módulo de elasticidade efetivo dos painéis, calculado pela equação geral (kgf/cm^2)

MOEt ^{i} = módulo de elasticidade da i -ésima lâmina na direção longitudinal

MOR = módulo de ruptura (kgf/cm^2)

N = número de observações;

P = carga máxima (kgf)
 P_L = carga no limite proporcional (kgf)
PLP = Painéis de Lâminas Paralelas
 R = Coeficiente de Correlação
 R^2 = coeficiente de determinação;
 S = desvio padrão
 S_{xy} = erro padrão da estimativa
 t = Tempo de Propagação (s)
TLP = tensão no limite proporcional
UFPR = Universidade Federal do Paraná
 V = Velocidade de propagação da onda de tensão (m/s)
 $\alpha, \beta, \dots, \eta$ = constantes da regressão
 δ = Massa Específica da Lâmina (kg/m^3)
 α = coeficiente de deformação;
 ε = deformação relativa
 σ = tensão em kgf/cm^2 ;
 x_1, x_2, \dots, x_n = variáveis explicativas

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo a realização de estudos sobre a viabilidade de produção de painéis estruturais de lâminas paralelas (PLP) de madeira de *Pinus taeda* L., através da classificação preliminar das lâminas, em classes de qualidade, utilizando-se o método não destrutivo de aplicação de ondas acústicas. Toras da base e segundas toras, em comprimento de 2,60m, de 59 árvores, provenientes de um plantio de 21 anos, localizado no Município de Campo Alegre - SC foram laminadas em espessuras de 3,2 e 4,2mm. Após a secagem procedeu-se a um sistema de avaliação não destrutiva da qualidade das lâminas, pelo princípio de emissão de ondas acústicas através do material (*stress wave timer*), determinando-se, individualmente, o módulo de elasticidade dinâmico (MOEd). As lâminas foram classificadas de acordo com o valor obtido de módulo de elasticidade dinâmico, sendo então produzidos 48 painéis de lâminas paralelas (PLP) de dimensões 1,22 x 2,44m e espessura média de 28mm. Os resultados demonstraram que lâminas obtidas da primeira tora (tora da base) apresentaram valores médios superiores de massa específica, mas inferiores de módulo de elasticidade, quando comparados àquelas lâminas obtidas da segunda tora. Os valores de propriedades de resistência avaliadas nos painéis, foram o módulo de ruptura (MOR), o módulo de elasticidade (MOE) e a Tensão no Limite Proporcional (TLP). Os resultados demonstraram que os painéis produzidos a partir de lâminas classificadas pelo valor do módulo de elasticidade dinâmico resultaram em valores médios de módulo de elasticidade (MOE), módulo de ruptura (MOR) e tensão no limite proporcional (TLP) superiores em 11%, 23% e 13%, respectivamente, quando comparados com painéis PLP obtidos de lâminas não classificadas. A espessura das lâminas não produziu diferenças significativas entre os valores médios das propriedades avaliadas nos painéis PLP. Seguindo a tendência observada nas lâminas, o MOE médio dos painéis foi menor para aqueles produzidos de toras da base, quando comparados com os valores de painéis produzidos de lâminas da segunda tora. O MOR apresentou maior valor médio em painéis de lâminas obtidas da base das árvores. Concluiu-se que os resultados obtidos demonstram a viabilidade técnica de produção de painéis estruturais de lâminas paralelas, de excelente resistência, a partir de lâminas selecionadas de *Pinus taeda* L.

ABSTRACT

The objective of this research was to study of the production feasibility of structural laminated veneer lumber, from *Pinus taeda* L. veneer, in southern Brazil. The logs of 59 trees were obtained in Campo Alegre - SC, in 21 years old plantation. The logs were conditioned in a steam vat using a typical industry schedule. The logs, 2,60m length came to be peeled in process to 3,2mm e 4,2mm thick veneers. After the drying process, the veneer sheets were graded into two categories (selected and not selected) using an ultrasonic propagation time measurement. The individual dynamic modulus of elasticity was used to grade the veneer sheets. A total of 48 panels were manufactured from 1,30m wide by 2,44m long by 28mm thick, of veneers oriented parallel to the length of the panel. From veneers obtained of the first log (tree base) the density was higher, but the dynamic modulus of elasticity was lower than those of veneers of the second logs. The flexural properties of the panels apparent modulus of elasticity (MOE), modulus of rupture (MOR) and fiber stress at proportional limit (TLP) were 11%, 23% and 13% respectively higher for panels manufactured from "classified veneers" than to panels of "not classified" veneers. The veneer thickness did not influence the flexural properties and, in the same manner as mentioned, the MOE was higher for panels manufactured of second log veneers. The conclusion came to be possible to produce high strength parallel laminated panels from selected *Pinus taeda* stress graded veneers.

1. INTRODUÇÃO

A indústria florestal brasileira contribui com 4% do Produto Interno Bruto do país, o que equivale a movimentação e produção de bens de consumo de elevada soma. Esta participação significativa na economia nacional torna a atividade florestal um segmento importante.

Neste contexto os produtos oriundos da atividade florestal, pela exploração de madeira como matéria-prima, tornam a atividade auto-sustentável, tendo em vista que o recurso madeireiro é renovável, o consumo de energia para elaboração de produtos é menor, quando comparada com outros produtos como ferro, aço tijolos e ainda, ambientalmente corretos, já que são recicláveis e biodegradáveis. Com as tendências mundiais de valorização ambiental e cobranças da sociedade por alternativas menos danosas ao ambiente a atividade industrial madeireira tenderá a consolidar-se e a fortalecer-se. Ainda neste contexto, a exploração adequada dos recursos florestais torna-se obrigatório por dois motivos óbvios: o primeiro relativo a valorização ambiental dos recursos florestais, e o segundo estritamente econômico uma vez que, a viabilização de produção só ocorre com a racionalização no uso integral de matéria-prima e meios de produção .

Uma outra tendência mundial neste final de século é o binômio produtividade e qualidade. As indústrias passaram a vislumbrar o aspecto de qualidade total como uma necessidade de sobrevivência em um mercado cada vez mais competitivo. E aqui o aspecto racionalização também mostra-se óbvio, pois produtos com qualidade, pressupõe processo de produção com qualidade, onde os meios de produção, desde a matéria-prima, processos e mão-de-obra devem primar pela excelência.

Pelos aspectos mencionados, torna-se necessária a busca de alternativas no contexto de “bases de produção”. Uma das alternativas é a geração de novos produtos.

A atividade industrial madeireira é bastante diversificada, mas alguns segmentos apresentam importância mais expressiva, como a produção de madeira serrada e de chapas de composição. A produção de chapas de composição abrange a produção de aglomerados, fibras e compensados. Deste, os compensados apresentam maior participação no item produção, sendo que há estimativas de existência de aproximadamente 300 fábricas no país, com uma capacidade instalada de 2.000.000m³/ano.

A matéria prima básica da indústria de compensados são toras de madeira de grandes diâmetros para produção de laminas. É notório que especialmente no Sul do Brasil, a disponibilidade desta matéria-prima está se tornando rara e onerosa. A indústria tem optado por espécies oriundas de reflorestamentos, como pinus e mais recentemente eucaliptos.

A produção de madeira de pinus e eucaliptos, a partir dos anos 60, esteve voltada para atender a emergente produção de papel e celulose, para a qual, as dimensões e fuste das árvores apresentavam pouca importância. Conseqüentemente o manejo destas florestas foi realizado visando atender este setor de produção. As maiores dificuldades encontradas pela indústria de laminação referem-se a baixa qualidade de madeira de pinus (presença de nós, lenho juvenil) e as dificuldades de processamento do eucaliptos, devido a existência de tensões de crescimento. Algumas destas dificuldades já estão sendo superadas, pela introdução de técnicas de manejo e condução dos plantios visando a produção de lâminas. Cita-se ainda o melhoramento genético, seleção de clones, onde parte destes defeitos são superados.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo Geral:

Avaliar a viabilidade de utilização de lâminas de *Pinus taeda* para produção de painéis estruturais de lâminas paralelas, através da classificação preliminar das lâminas, em classes de qualidade, utilizando método não destrutivo, pela aplicação de ondas acústicas.

1.1.2. Objetivos Específicos

- a) Avaliar a influência da classificação preliminar das lâminas em classes de Módulo de Elasticidade Dinâmico (MOEd) sobre as propriedades finais de resistência dos painéis produzidos;
- b) Avaliar a variabilidade do Módulo de Elasticidade Dinâmico de lâminas de *Pinus taeda* por meio de ensaios não destrutivos.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. PROPRIEDADES DAS MADEIRAS DE REFLORESTAMENTOS DE PINUS

2.1.1. Considerações Gerais

A expansão das fronteiras agrícolas gerou o processo de destruição da cobertura florestal nativa dos Estados da região Sul do Brasil. O processo de ocupação de terras vinculado ao incentivo a entrada de imigrantes europeus nesta região tornou a cobertura florestal um entrave ao avanço da agricultura nestas áreas, num processo semelhante ao que ocorre hoje nas regiões Centro-Oeste e Norte do Brasil, onde a atividade madeireira não constitui-se numa atividade econômica produtiva e sustentável, mas simplesmente numa atividade extrativista.

A exploração madeireira no Sul do Brasil inicialmente esteve mais voltada a utilização da madeira de pinho (*Araucária angustifolia*), em virtude da existência de extensas florestas desta espécie e de sua qualidade e preferência no mercado externo. Além disto as madeiras de lei podiam ser encontradas em outras regiões.

A exploração e exaustão das reservas nativas provocaram a desmobilização ou inviabilização de alguns segmentos da indústria madeireira. Alguns destes segmentos, comprometidos com o suprimento de matéria-prima, passaram a recorrer a outros estados, buscando madeiras já inexistentes no Sul do país, marcadamente no Paraguai, Centro-Oeste e Norte do Brasil.

A lei de incentivos fiscais, criada em 1966, permitiu que as empresas aplicassem parte de seu imposto devido em reflorestamentos. O resultado desta iniciativa foi a imediata ampliação da área de florestas plantadas no país, especialmente com espécies exóticas como eucaliptos e pinus. Os primeiros reflorestamentos incentivados foram feitos com o objetivo de produzir matéria-prima para a indústria de papel e celulose e a produção de energia, sob a forma de carvão vegetal para a metalurgia (REZENDE e NEVES, 1988). A política de incentivos fiscais voltou-se especialmente para as espécies exóticas, com destaque para o pinus. Antes dos anos 60 o setor madeireiro se desenvolvia a partir da disponibilidade natural de matéria-prima. Posteriormente ocorreu uma reversão de tendências. A indústria procurou a reconstituição de reservas florestais, recompondo sua matéria-prima.

Atualmente a disponibilidade de matéria-prima para as indústrias reside basicamente nos plantios oriundos da política de reflorestamento ou em plantios próprios de espécies exóticas.

Devido as condições favoráveis de desenvolvimento encontradas em áreas exóticas e o aumento de práticas culturais em regiões nativas ou exóticas, as árvores de florestas plantadas atingem dimensões comercializáveis em menor idade que em condições naturais de desenvolvimento.

As propriedades da madeira cultivada são diferentes daquelas de florestas naturais. Os problemas relacionados com o processamento e a utilização de florestas manejadas estão relacionadas principalmente com as diferentes propriedades devido ao crescimento acelerado.

Extensivos estudos foram conduzidos visando a caracterização das propriedades físicas e mecânicas da madeira de pinus de reflorestamentos do Sul do Brasil (TOMASELLI, 1979; MUÑIZ, 1993; LUCAS, 1997),

As principais conclusões observadas nos trabalhos de pesquisa indicam que a madeira de pinus tendem a apresentar baixa resistência média, especialmente quando se leva em consideração a distinção entre lenho juvenil e adulto.

Estudos realizados por MUÑIZ (1993) com madeira de *Pinus taeda* comprovaram que a parte central do tronco, com diâmetro aproximado de 10cm, apresentou baixa massa específica, baixa resistência a flexão estática e a compressão paralela à grã. A massa específica, constata MUÑIZ (1993) varia consideravelmente no sentido horizontal do tronco, sendo cerca de 20% maior para o lenho adulto.

Os aumentos crescentes de percentuais de lenho juvenil em madeira de reflorestamentos foram extensivamente analisados por BENDTSEN (1978); HARRIS (1981), SENFT (1986). Para BENDTSEN (1978), para se alcançar êxito no uso dos recursos florestais, provenientes de reflorestamentos, os conceitos tradicionais devem ser modificados e adaptados às características da matéria-prima disponível. Estas adaptações devem ser feitas especialmente no que concerne aos crescentes índices percentuais de lenho juvenil existente no lenho das árvores de rápido crescimento, que foram absorvidos pela indústria de papel e celulose, mas que precisa ser analisada com cuidado quando da produção de madeira serrada e produtos com finalidade estrutural.

O conceito genérico atual é de que a madeira de pinus, oriunda de reflorestamentos, do sul do Brasil é de qualidade muito pobre, em termos de resistência.

As exportações para países como EUA, na forma de *clear*, *studs*, e lâminas, já constitui-se em motivo de preocupação naqueles países tendo em vista que em condições nativas, a espécie, por apresentar lento crescimento, apresenta valores de resistência superiores aos de nossas espécies, que passaram a ser utilizadas em grandes volumes e que podem comprometer as características dos produtos (GREEN e SHELLEY, 1993).

As propriedades mecânicas da madeira são médias derivadas de valores obtidos a partir de corpos de prova de pequenas dimensões e livres de defeitos, segundo procedimentos estabelecidos por norma. Os métodos de coleta e análise destas propriedades são dinâmicos, devendo em princípio ser alterados no decorrer dos anos, ou mesmo implementados, porque as características das florestas variam, devendo os valores serem revisados especialmente se a madeira for utilizada em aplicações críticas, como no uso estrutural.

Os fatores que afetam as propriedades mecânicas da madeira, ainda não estão suficientemente estudados para espécies oriundas de reflorestamentos. Estas características dependem das práticas silviculturais e de manejo adotadas, voltadas para os aumentos de rendimento e redução de custos em detrimento das propriedades de resistência. Neste sentido, torna-se necessário o estudo destes fatores e de sua influência sobre madeiras de plantios artificiais, visando sua utilização estrutural.

2.1.2. Características que Influem Sobre a Resistência da Madeira

- a) **Massa específica:** a massa específica da madeira dá uma medida real da quantidade do material lenhoso presente num determinado volume. As propriedades de resistência da madeira dependem da quantidade de material lenhoso presente. A relação entre a massa específica e as diversas propriedades de resistência em madeira verde e seca, demonstram que tais propriedades aumentam, com o aumento da massa específica, sendo que, esta relação é mais acentuada para madeiras secas do que para verdes. A massa específica é um excelente indicativo das propriedades mecânicas somente para madeiras de grã reta e livre de defeitos, ou seja, sem a influência de outros fatores que influem negativamente sobre o tal relacionamento.
- b) **Ângulo de inclinação da grã:** a inclinação da grã é a medida do desvio das fibras com relação ao eixo longitudinal da peça. Se um membro contendo fibras à um determinado

ângulo do eixo longitudinal, é sujeito a esforços de tração ou compressão, o efeito das componentes da força acompanha a direção da grã e a madeira se torna mais fraca nesta direção do que ao longo do eixo longitudinal da peça. A inclinação da grã excessivamente alta é também indesejável, porque a madeira se torna mais frágil e tem uma maior tendência para distorção, com mudança no conteúdo de umidade da madeira. Normalmente considera-se que o efeito da inclinação da grã sobre as propriedades de resistência, é maior em membros estruturais do que em pequenos corpos de prova. A variação nas propriedades de resistência devido o afastamento das fibras com relação ao eixo longitudinal da peça, pode ser calculada através do método de Hankinson.

- c) **Largura dos Anéis de Crescimento** : Na maioria das coníferas a largura dos anéis de crescimento é facilmente identificável. Os anéis são constituídos de lenho inicial, formado no período de maior atividade vegetativa da planta, especialmente no verão e, o lenho tardio, formado no período de baixa atividade vegetativa ou no inverno. O lenho tardio apresenta paredes de células mais espessas, lumen menor, o que lhe confere um maior valor de massa específica, comparado com o lenho inicial, constituído de células de paredes mais finas e lumen grande. Dependendo da velocidade de crescimento das árvores, as transições entre os dois tipos de lenho torna-se mais acentuada, conferindo propriedades de resistência diferenciadas à madeira formada. As intervenções na floresta, como a prática da desrama e dos desbastes que diminuem a concorrência entre árvores, também pode provocar alterações na velocidade de crescimento, alterando a transição na largura dos anéis de crescimento e conseqüentemente, nas propriedades de resistência da madeira formada.
- d) **Lenho Adulto e Juvenil**: Importante em árvores de rápido crescimento, a ocorrência de lenho juvenil e adulto é uma característica muito comum, especialmente em coníferas. A importância deve-se ao fato que o lenho juvenil, formado nos primeiros anos de crescimento da árvore, apresenta características distintas em relação ao lenho adulto, na mesma árvore. O lenho juvenil, de acordo com BENDTSEN (1978), quando comparado com o lenho adulto apresenta menor massa específica, maior ângulo das microfibrilas, traqueóides mais curtos, menor contração transversal, menor percentual de lenho tardio, paredes celulares mais finas, maior conteúdo de lignina e menor

resistência. As proporções variam com a posição no tronco da árvore e com a idade das árvores.

A distinção entre os valores das propriedades mecânicas da madeira, levando em consideração estes dois tipos de lenho, pode ser melhor observada na Tabela 1, de acordo com estudos realizados por alguns pesquisadores, com *Pinus taeda*. Constata-se a importância que assume esta característica sobre a avaliação das propriedades da madeira de árvores oriundas de reflorestamentos.

TABELA 1 - VALORES DE PROPRIEDADES DE RESISTÊNCIA À FLEXÃO ESTÁTICA PARA PINUS TAEDA L., NOS LENHOS JUVENIL E ADULTO, EM ÁRVORES COM 18, 21 E 30 ANOS DE IDADE

LENHO	Massa Específica (g/cm ³)	Módulo de Ruptura (kgf/cm ²)	Módulo de Elasticidade (kgf/cm ²)	Tensão Limite (kgf/cm ²)
Pinus taeda - 18 anos *				
• Lenho Juvenil	0,436	497	61 200	232
• Lenho Adulto	0,545	1 065	153 300	590
• Média	0,490	781	107 250	411
Pinus taeda - 21 anos **				
• Lenho Juvenil	-	496	76 521	-
• Lenho Adulto	-	563	100 160	-
• Média	0,413	525	86 764	-
Pinus taeda - 30anos ***				
• Lenho Juvenil	0,460	638	88 333	335
• Lenho Adulto	0,587	941	160 438	483
• Média	0,523	789	124 385	409
Pinus taeda Nativo **** Estados Unidos	0,510	900	125 849	-

* FONTE : TOMASELLI, 1979 - Irati - PR

** FONTE : LUCAS, 1997 - Três Barras - SC

*** FONTE : MUÑIZ, 1993 - Irati - PR

**** FONTE : FOREST PRODUCTS LABORATORY, 1987 - EUA

2.2. PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA

2.2.1. Propriedades Elásticas da Madeira

Um corpo sólido sujeito a uma determinada carga, sofre uma certa deformação. Quando essa carga é removida, esse corpo tem a tendência de retornar à forma e posição original. Essa tendência é de elasticidade. Isto ocorre somente quando o esforço não excede o limite elástico. A propriedade elástica é característica dos corpos sólidos abaixo de um certo limite de esforços. Acima deste limite ocorrerão deformações plásticas, até a ruptura. Um corpo sólido é chamado elástico quando a deformação produzida devido à aplicação de uma carga abaixo do limite proporcional, é completamente retomada após o relaxamento desta carga. Além do limite proporcional, as deformações plásticas sofridas pelo material são irreversíveis (KOLLMANN e CÔTÉ JR., 1968).

Na prática, o limite proporcional de um material é determinado no diagrama carga-deformação. O ponto sobre o diagrama onde a linha começa perceptivelmente a curvar-se é o limite proporcional.

A relação entre as cargas aplicadas e as deformações correspondentes até o limite proporcional, é expressa pela lei de Hooke, através da seguinte equação:

$$\varepsilon = \alpha \cdot \sigma^n \quad \text{Equação 1}$$

onde :

ε = deformação relativa

σ = tensão em kgf/cm²;

α = coeficiente de deformação;

n = constante específica para cada material, no caso da madeira é considerado o valor igual a 1.

Pela teoria elástica de Bernouilli em elementos em forma de viga sujeitos à flexão, a seção transversal, normal ao eixo central longitudinal, permanecerá plana após a aplicação da carga, ou seja, as tensões de tração e compressão, localizadas em extremos opostos desta seção, possuem valores idênticos para qualquer momento fletor dado; e ainda, para qualquer

momento fletor dado, as fibras localizadas a um certo nível da seção não sofrem esforços, e por definição, este ponto é denominado de linha neutra da seção.

Normalmente utiliza-se o valor recíproco $1/\alpha = MOE$, onde MOE é chamado de módulo de elasticidade ou módulo de Young, e expressa o esforço hipotético, pelo qual, um corpo de 1 cm² de área transversal pode ser estendido ao dobro do seu comprimento original. Na realidade, o valor real do MOE é impossível de ser atingido, pois antes disso ocorre a ruptura do material. Em ensaios de flexão estática, a determinação do módulo de elasticidade pode ser feita na parte reta da linha descrita pelas avaliações carga-deformação, no primeiro ponto de inflexão no limite de proporcionalidade ou limite elástico (KOLLMANN e CÔTÉ JR, 1968).

A rigidez da madeira é uma medida de sua aptidão de resistir à deformação imposta pela carga. Desta forma, em termos práticos, um material que é difícil de curvar ou deformar, pode ser chamado de rígido. Por outro lado, um material que é fácil a se curvar sem quebrar, é dito flexível.

A rigidez é expressa numericamente através do módulo de elasticidade, e em testes de flexão estática de vigas de seção retangular, com dois apoios e um ponto de aplicação da carga, este valor pode ser obtido através da fórmula (ASTM, 1994a):

$$MOEa = (P_L \cdot L^3) / (4 \cdot d \cdot b \cdot h^3) \quad \text{Equação 2}$$

onde:

MOEa = Módulo de Elasticidade Aparente (kgf/cm²) ;

P_L = carga no limite proporcional (kgf);

L = comprimento do vão (cm) ;

d = deformação correspondente à carga no limite proporcional (cm) ;

b = largura do corpo de prova (cm) ;

h = altura o corpo de prova (cm) ;

Para o cálculo do Módulo de Elasticidade Aparente (MOEa) em vigas retangulares submetidas à flexão estática com dois pontos de aplicação de carga, dispostos simetricamente, a equação utilizada é: (ASTM,1994a)

$$MOEa = \frac{(P_L \cdot a)}{(4 \cdot d \cdot b \cdot h^3)} \cdot (3L^2 - 4a^2) \quad \text{Equação 3}$$

onde:

a = distância entre o ponto de aplicação da carga ao apoio mais próximo (cm)
(1/2 do vão de cisalhamento).

2.2.2. Propriedades de Resistência da Madeira

A resistência máxima de um material é definida como o esforço máximo que ocorre na ruptura. Alguns materiais possuem reservas consideráveis de resistência entre o limite elástico e a resistência máxima. No entanto, essa faixa de resistência chamada “inelástica” não é considerada na aplicação da teoria de resistência para vigas estruturais de madeira, por ser essa faixa muito variável com relação a outros materiais de construção como estruturas de aço. Testes em corpos de prova da mesma espécie e dimensões, e nas mesmas condições, podem resultar numa considerável variação em valores de resistência. Esta variabilidade nos resultados dos testes é levada em consideração quando o esforço admissível para diferentes espécies e classes de madeiras para fins estruturais são estabelecidos (PARKER, 1979).

A resistência de uma viga de madeira submetida flexão é expressa em termos de esforços por unidade de área, através do Módulo de Ruptura (MOR), que expressa o esforço máximo sobre as fibras nos extremos superior e inferior da seção transversal da viga. Os valores de Módulo de Ruptura são utilizados para obtenção de tensões admissíveis para diversas formas de utilização da madeira.

A resistência da madeira, expressa numericamente através do Módulo de Ruptura, pode ser obtido em testes de flexão estática, com viga apoiada em ambas as extremidades com aplicação da carga no centro do vão, através da fórmula: (ASTM, 1994a).

$$MOR = (P \cdot L) / (b \cdot h^2) \quad \text{Equação 4}$$

onde :

MOR = Módulo de Ruptura (kgf/cm²)

P = carga máxima (kgf)

L = distância entre os apoios (cm)

b = largura da viga (cm)

h = altura da viga (cm)

No caso de dois pontos de aplicação de carga sobre a viga, a fórmula a ser utilizada é:
(ASTM, 1994a)

$$MOR = (3 \cdot P \cdot a) / (b \cdot h^2) \quad \text{Equação 5}$$

onde :

a = distância entre os pontos de aplicação da carga ao apoio mais próximo

(cm)(1/2 do vão de cisalhamento)

2.3. TÉCNICAS DE AVALIAÇÃO NÃO DESTRUTIVA DE PROPRIEDADES DE MADEIRAS

Várias pesquisas têm sido desenvolvidas relacionadas a técnica de avaliação não destrutiva de propriedades de madeiras. Estas pesquisas têm resultado em avanços significativos no uso da madeira em aplicações estruturais e também em “avaliações no local” de partes de elementos estruturais de madeira.

A grande variabilidade natural da madeira, causada por fatores genéticos e ambientais, causa frustrações aos fabricantes de produtos de madeira devido a dificuldade de manutenção de um processo de produção consistente e de produtos com qualidade uniforme. Os usuários de produtos de madeira sentem-se igualmente frustrados com a grande variabilidade de desempenho dos produtos finais de madeira. Neste sentido, os métodos de avaliação não destrutiva tem contribuído significativamente para modificar alguns destes conceitos (PETERSON, 1994).

A hipótese fundamental para a avaliação não destrutiva de produtos de madeira foi inicialmente proposta por JAYNE¹ citado por PELLERIN (1965). Ele verificou que as propriedades da madeira de armazenamento e dissipação de energia, que podem ser medidas não destrutivamente utilizando-se uma série de técnicas estáticas e dinâmicas, são controladas pelos mesmos mecanismos que determinam as propriedades mecânicas deste material. Estas propriedades, especialmente o módulo de elasticidade (MOE) e o módulo de ruptura (MOR) são relacionados, nesta teoria, com a energia armazenada (MOE) e com a dissipação de energia, no caso do MOR.

A medição dos fatores de dissipação sob condições de baixa tensão, tornam possível a estimativa das propriedades de resistência, que são normalmente determinadas pela completa ruptura do material, no caso dos testes destrutivos (PELLERIN, 1965).

Em 1964, GALLIGAN em uma extensa revisão de literatura sobre testes não destrutivos em madeira, relata que dentre os principais métodos em uso comercial, naquela época, para determinação de propriedades mecânicas da madeira, estava a máquina de classificação não destrutiva, baseada em métodos mecânicos. Segundo GALLIGAN (1964), o método de ondas acústicas, baseado na relação existente entre a velocidade do som, o módulo de elasticidade e a massa específica, passava a tornar-se de interesse devido aos excelentes resultados obtidos em estudos de alguns pesquisadores. Em consequência destes estudos, o uso de relações matemáticas entre estas propriedades e o comportamento elástico e de resistência poderiam ser obtidos através do uso de técnicas de análises de regressão. Esta teoria evoluiu para as aplicações industriais mais significativas, atualmente em uso; a máquina de avaliação da classe de resistência de madeira estrutural e a classificação ultra-sônica de lâminas de madeira. O desenvolvimento destas duas técnicas contribuíram significativamente para a aceitação da madeira em aplicações estruturais. Atualmente, nos Estados Unidos, cada peça de madeira que compõe as tesouras e as lâminas para produção de produtos estruturais, é testada por técnicas de avaliação não destrutiva. SANDOZ (1994) apresenta uma extensa revisão de métodos não destrutivos utilizados para classificação de madeiras.

¹ JAYNE, B. A. Vibrational properties of wood . *For. Prod. J.*, Madison, v. 09, n.11, p. 413-416, 1959.

2.3.1. Métodos de Avaliação Mecânica das Propriedades da Madeira

Os primeiros métodos aplicados para classificação de madeiras foram essencialmente os métodos mecânicos, incorporados na máquina de classificação por classes de resistência. Esta máquina esta baseada no princípio da avaliação do módulo de elasticidade (MOE) de uma seção transversal padronizada. Por extrapolação, o módulo de ruptura (MOR) é avaliado e torna-se outro parâmetro de classificação. Nos processos industriais a máquina mede ainda o teor de umidade e as dimensões das peças de madeira.

Alguns princípios de funcionamento de máquinas existentes no mercado são descritos e comparados por BOSTROM (1994). Em um dos princípios citados, a máquina aplica uma força constante sobre a peça de madeira, que corresponde a tensão de flexão de 142kgf/cm^2 . A madeira é apoiada sobre um vão de 914mm, entre rolos de suporte. A deformação pode ser medida a cada 15,2cm ao longo do comprimento da peça, exceto nos 60cm do início e final da peça.

Um outro princípio utilizado é a aplicação de carga até que a madeira sofra uma deformação pré-definida. A carga necessária à deformação é medida a cada 10cm ao longo da peça, exceto nos 50cm iniciais e finais, colocados sobre rolos suporte com vão de 90cm.

Se a peça a ser testada possui um encurvamento inicial, este valor deve ser subtraído do valor da deformação ou a peça deve ser medida dos dois lados.

Para aumentar a eficiência destas medidas muitas variáveis explicativas associadas podem ser obtidas, permitindo o uso de modelos de equações mais complexos, do tipo:

$$M = \alpha X_1 + \beta X_2 + \dots + \eta X_n + \varepsilon \quad \text{Equação 6}$$

onde:

M = variável mecânica

$\alpha, \beta, \dots, \eta$ = constantes da regressão

ε = erro do modelo

x_1, x_2, \dots, x_n = variáveis explicativas

Para SANDOZ (1994) a variável x_1 pode representar a medida da deformação da amostra, a curvatura ou deformação sob uma carga constante, como ocorre na avaliação

clássica da taxa de resistência, a variável x_2 pode representar um índice de nó, lido através de medidores óticos, a variável x_3 pode ser uma medida da massa específica do material, medido por pesagem ou por determinação do perfil densitométrico por raios X.

Embora o conceito de análise multivariada seja interessante, do ponto de vista científico, do ponto de vista industrial este conceito tem limitações. Como o fato de que a máquina trabalha com seções transversais restritas, não podendo ser utilizada para controle de qualidade de material bruto da floresta ou avaliações no local de estruturas de madeira. Ainda há o fato de que esta tecnologia é complexa e cara, não sendo acessível a pequenas indústrias de madeira.

2.3.2. Avaliação das Propriedades da Madeira Por Métodos de Frequência de Vibração

Outra técnica de avaliação não destrutiva de propriedades da madeira é o método por vibração, baseado na medida da frequência de vibração natural de uma peça de madeira biapoiada por dois rolos.

A relação entre o MOE dinâmico e a frequência natural pode ser expressa pela seguinte equação, apresentada por HEARMON (1966) e GÖRLACHER (1984):

$$MOEd = \frac{4\pi^2 \times L^4 \times f^2 \times \delta}{m_n^4 \times i^2} \times \left(1 + \frac{i^2}{L^2} \times k_1\right) \quad \text{Equação 7}$$

onde :

MOEd = Módulo de Elasticidade Dinâmico

δ = massa específica

L = comprimento da peça de madeira biapoiada

i = raio de giração

f = frequência natural

m_n, k_1 = constantes de vibração em módulo 1.

Este método apresenta os mesmos fatores limitantes de uso do processo anterior.

2.3.3. Métodos de Classificação de Madeiras Por Emissão de Ondas Acústicas

2.3.3.1. Considerações Gerais

Os métodos de classificação de madeiras pelo processo de ultra-som baseiam-se no princípio de propagação de ondas de tensão. Para a madeira a onda de tensão é uma onda ultra-sônica, de baixa frequência, que se propaga ao longo do eixo natural do material.

- Velocidade Acústica

A propagação das ondas acústicas no material madeira depende principalmente das propriedades mecânicas da parede celular da madeira, especialmente a camada S_2 , que é o maior constituinte da madeira, (DUNLOP, 1981).

O cálculo da velocidade de propagação da onda longitudinal depende do módulo de elasticidade da madeira, na direção da propagação, bem como da massa específica do material, podendo ser expressa pela seguinte equação :

$$V = \sqrt{\frac{MOE}{\delta}} \quad \text{Equação 8}$$

onde:

V = Velocidade de propagação da onda de tensão (m/s)

MOE = Módulo de elasticidade do material (módulo de Young)

δ = massa específica do material

A massa específica da parede celular é razoavelmente constante mas há amplas variações do módulo de elasticidade entre a mesma espécie ou árvores da mesma espécie e isto pode ser atribuído a variações na estrutura da parede celular podendo-se esperar um largo intervalo de valores para a velocidade de propagação .

Também é importante considerar o ângulo das fibrilas da camada S_2 , que pode variar de 10° a 40° em relação a direção da grã. De acordo com DUNLOP (1981) alguns pesquisadores mediram o MOE para variações de ângulo microfibrilar de 40° a 10° encontrando valores de 1 a 4×10^{10} Pa, respectivamente.

Outro fator que afeta o módulo elástico da parede celular é o teor de umidade. Significativos decréscimos do MOE com o aumento do teor de umidade são esperados tendo, em consequência, significativos efeitos nos valores da velocidade acústica medida nas peças de madeira (DUNLOP,1981).

- Decréscimo Acústico

Outro importante parâmetro é o decréscimo acústico. A atenuação ou amortecimento acústico de ondas sonoras na madeira depende da presença de mecanismos de absorção de energia. O amortecimento depende da frequência da onda acústica e da temperatura da madeira.

A altas frequências e baixas temperaturas, mecanismos moleculares de pequena escala (movimentos laterais de cadeias de moléculas ou moléculas de água absorvida) são os principais responsáveis pelo decréscimo de ondas acústicas. A altas temperaturas e baixas frequências o decréscimo das ondas acústicas podem ser causados pelo movimento de cadeias de polímeros de lignina e celulose (DUNLOP,1981).

O decréscimo acústico ou da velocidade acústica, também depende da direção de propagação da onda acústica. Na direção longitudinal (ao longo da grã) o caminho de propagação principal são as fibrilas da camada S_2 . Elas são altamente cristalinas, elásticas e atuam como um meio de decréscimo. Quando as ondas viajam através da direção transversal, cruzam a lignina, mais amorfa e inelástica, e são sujeitas a grandes decréscimos.

2.3.3.2. Aplicação de Emissão Acústica em Postes e Árvores em Pé

O uso da técnica de emissão acústica em árvores em pé e em postes de madeira foi sido utilizada por diversos pesquisadores tais como; DUNLOP (1981), SANDOZ (1989), BETHGE e MATTHECK (1994), LEMASTER, BIERNACKI e BEALL (1994), resultando

em excelentes relações para detecção de deterioração dos materiais, da presença de defeitos e do ataque de insetos e fungos.

As aplicações não destrutivas desta técnica em árvores em pé, ou em toras, permitem a seleção em campo do melhor material para os fins a que se destinam, além do conhecimento das condições físicas internas de outros materiais.

A deterioração e defeitos podem ser determinados porque a velocidade de propagação da onda de tensão, e conseqüentemente o MOE, reduz drasticamente ao encontrar um defeito. Isto significa que praticamente todos os defeitos ou deterioração onde a lignina é destruída podem ser detectados (BETHGE e MATTHECK, 1994).

2.3.3.3. Aplicação de Emissão Acústica Para Classificação Não Destrutiva de Madeiras

A técnica de aplicação de emissão acústica está adaptada para a classificação de madeiras para construção no Eurocode 5. Também na Suíça, uma nova classe de resistência, em complemento a classificação visual, está em uso. SANDOZ (1989), realizou estudos de classificação de madeiras para construção, através da técnica de ultra-som, obtendo excelentes resultados na caracterização mecânica de vigas de madeira, em 3 classes de resistência baseadas em níveis de velocidade de propagação das ondas acústicas.

A técnica do ultra-som pode ser ainda utilizada para classificação das tábuas que compõem uma viga laminada colada. A medição da velocidade de propagação acústica das ondas sonoras, em cada tábua, pode permitir o cálculo do módulo de elasticidade dinâmico das tábuas, e através do uso da equação 9 apresentada por BODIG e JAYNE (1982), estima-se o valor módulo de elasticidade final esperado para a viga.

A madeira usada para fabricação de vigas laminadas freqüentemente apresenta uma grande variabilidade nas características elásticas. Na prática, adota-se o uso de tábuas de alta resistência próximo as superfícies superior e inferior da viga e, o material de mais baixa resistência, próximo ao miolo da viga.

2.3.3.4. Análise Teórica de Compostos de Madeira Laminada (Teoria Clássica de Vigas)

As equações gerais desenvolvidas para produtos laminados tem uma ampla aplicação. Estas equações são usualmente utilizadas para analisar o comportamento de vigas de madeiras laminadas, mas também são usadas para descrever as propriedades elásticas da parede das células e das fibras de madeira. A literatura sobre este assunto chama atenção ao grande número de hipóteses usadas na predição das propriedades mecânicas de vigas laminadas (CARRASCO,1989).

A hipótese de uma linha de cola rígida e de espessura infinitesimal é usada universalmente (BODIG e JAYNE, 1982; LARA PALMA,1994). Além disso, assume-se que as lâminas individuais são homogêneas e ortotrópicas, e seus eixos ortotrópicos e geométricos coincidem. Adicionalmente, o longo eixo da viga corresponde ao eixo longitudinal da madeira. Assume-se a homogeneidade para a análise elástica das lâminas, a presença de defeitos e anormalidades de crescimento também são levadas em conta para a avaliação da tensão limite da viga.

A maioria das vigas laminadas são simétricas, portanto, a seção transversal pode ou é assumida como sendo homogênea e um Módulo de Elasticidade Efetivo (MOEe) é calculado segundo a equação clássica da flexão modificada, apresentada a seguir:

$$MOEe = \frac{2}{I} \times \sum_{i=1}^n MOEt^i \times I^i \quad \text{Equação 9}$$

onde:

MOEe = Módulo de Elasticidade Efetivo

MOEtⁱ = Módulo de Elasticidade da i-ésima Lâmina na Direção Longitudinal

Iⁱ = Momento de Inércia da Seção da i-ésima Lâmina, em Relação a Linha Neutra da Viga

I = Momento de Inércia de Toda Seção da Viga

n = Metade do Número Total de Lâminas

A equação geral para cálculo do momento de inércia de cada lâmina, em relação a linha neutra, é obtida por:

$$I^i = I_o^i + A^i \times (d^i)^2 \quad \text{Equação 10}$$

onde:

I^i = Momento de Inércia da i-ésima Lâmina em Relação a Linha Neutra da Viga

I_o^i = Momento de Inércia da i-ésima Lâmina em Relação a sua Linha Neutra
(baricentral)

A^i = Área da Seção Transversal da i-ésima Lâmina

d^i = Distância Entre o Plano Baricentral da Viga Laminada e a i-ésima Lâmina

Substituindo-se a equação 10 na equação 9 teríamos :

$$MOE_e = \frac{2}{I} \times \sum_{i=1}^n MOE_t^i \times \left[I_o^i + A^i \times (d^i)^2 \right] \quad \text{Equação 11}$$

As lâminas externas, de acordo com BODIG e JAYNE (1982), contribuem mais sobre o valor do módulo de elasticidade efetivo da viga que aquelas lâminas colocadas próximas a linha neutra. Neste caso, o posicionamento das lâminas de maior resistência, ou de maior módulo de elasticidade próximas a superfície tornam-se mais eficientes.

Resultados obtidos em testes com 60 vigas laminadas de *spruce*, constituídas de 10 tábuas de 30mm de espessura, em que se correlacionaram os valores médios da velocidade de propagação de ondas acústicas nas tábuas e o MOE das vigas laminadas, permitiram o desenvolvimento da primeira máquina de classificação industrial de tábuas, para vigas laminadas, em uso na Suíça (SANDOZ, 1994).

2.3.3.5. Técnica de Classificação de Lâminas de Madeira Por Aplicação de Ondas Acústicas

Muitos pesquisadores utilizaram a técnica de aplicação de ondas acústicas em lâminas de madeira para produção e estudos com painéis de lâminas paralelas (PLP). (KOCH e WOODSON, 1968; JUNG, 1982; KRETSCHMANN *et al.*, 1993; CHA e PEARSON, 1994; RASMUSSEN, 1994). Os resultados destes estudos demonstraram a existência de elevadas correlações entre a determinação do módulo de elasticidade mecânico e o módulo de elasticidade estimado através de ondas acústicas. Demonstram ainda que, a montagem dos painéis através do uso das lâminas, agrupadas por classes de qualidade, em função da velocidade de propagação do som, mostra-se muito eficiente, conferindo elevadas propriedades mecânicas finais aos painéis.

2.3.3.6. Princípio de Aplicação e Medição de Ondas Acústicas na Madeira

A aplicação e medição de ondas acústicas consiste no posicionamento de dois transdutores acelerômetros sobre o material a ser medido. Uma onda acústica é induzida ao material, ao tocar-se este com um martelo, um pêndulo ou outros meios. Quando a onda acústica alcança o acelerômetro de partida, uma contagem de tempo, em microssegundos, é iniciada no instrumento. Quando esta onda atinge o acelerômetro de parada, a contagem de tempo cessa e o aparelho registra e mostra o tempo decorrido de trânsito da onda de tensão, entre os acelerômetros, através do material (Figura 1). As propriedades do material a ser medido afetam a forma da onda de tensão, e deste modo, o tempo de detecção da passagem da onda (METRIGUARD, 1997). Os tempos registrados em microssegundos são então, utilizados no cálculo do módulo de elasticidade dinâmico.

Para o cálculo do módulo de elasticidade para cada lâmina, das quais se mede o tempo de propagação das ondas de tensão, utiliza-se a seguinte equação (METRIGUARD, 1997):

$$MOEd = \delta \times V^2 \times \left(\frac{1}{g} \right) \quad \text{Equação 12}$$

onde:

MOEd = Módulo de Elasticidade Dinâmico (kgf/cm²)

δ = Massa Específica da Lâmina (kg/m³)

g = Aceleração da Gravidade (9,804m/s²)

V = Velocidade da Onda Longitudinal (cm/s)

A velocidade é obtida pela Equação 13:

$$V = d/t$$

Equação 13

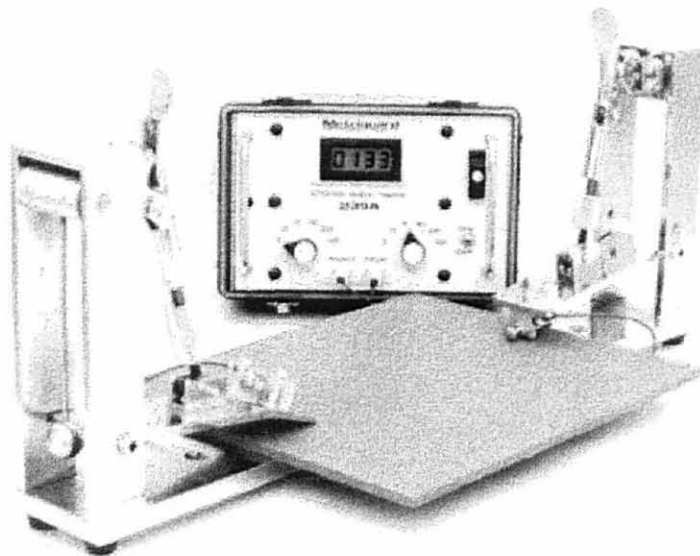
onde,

V = Velocidade (cm/s)

d = Distância Entre os Transdutores (cm)

t = Tempo de Propagação (s)

FIGURA 1- SISTEMA DE APLICAÇÃO DE ONDAS ACÚSTICAS PARA DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO DE MATERIAIS- MODELO METRIGUARD 239A



O método descrito acima constitui-se numa prática não destrutiva de determinação da qualidade de lâminas, que são então separadas em classes de qualidade para a montagem final dos painéis.

A avaliação do módulo de elasticidade de lâminas através de processos mecânicos convencionais, citados anteriormente, é bastante complexo. LARA PALMA (1994), determinou os valores de módulo de elasticidade a flexão de lâminas de Pinus 2mm, utilizados para produção de compensados através do procedimento destrutivo convencional (Tabela 2). A partir dos resultados obtidos estabeleceu importantes relações entre os valores do módulo de elasticidade das lâminas e o comportamento elástico dos compensados fabricados.

TABELA 2 -VALORES DE PROPRIEDADES DE RESISTÊNCIA À FLEXÃO ESTÁTICA PARA LÂMINAS E MADEIRA SÓLIDA DE PINUS TAEDA L. COM 30 ANOS DE IDADE, OBTIDOS A PARTIR DE TESTES MECÂNICOS DESTRUTIVOS

	Massa Específica (g/cm ³)	Módulo de Ruptura (kgf/cm ²)	Módulo de Elasticidade (kgf/cm ²)	Tensão Limite (kgf/cm ²)
Lâminas (2mm espessura)	0,535	838	71.166	
Madeira Sólida	0,523	769	121.129	394

FONTE: LARA PALMA, 1994 (Adaptado).

Em um estudo realizado para avaliar a influência do uso de lâminas oriundas de madeira de lenho juvenil de espécies de Pinus do Sul dos Estados Unidos, para produção de painéis de lâminas paralelas, KRETSCHMANN *et al.* (1993) utilizaram dois princípios de classificação não destrutiva para lâminas. Um deles, baseado no tempo de propagação ultra-sônica,

utilizando-se um valor para seleção de lâminas, acima de 550 microssegundos. O segundo, baseado numa combinação de propagação ultra-sônica e medição da massa específica no sistema de classificação. Segundo os pesquisadores, ambos demonstraram elevada eficiência, sendo que este procedimento já é de uso corrente entre algumas empresas produtoras de PLP nos Estados Unidos.

2.4. HISTÓRICO DA ORIGEM DOS PAINÉIS DE LÂMINAS PARALELAS

O processo de obtenção de painéis laminados a partir de lâminas de madeiras coladas paralelamente, na mesma direção, atualmente conhecidas como painéis de lâminas paralelas (PLP), ou na sua origem por *laminated veneer lumber* (LVL), é resultado de uma longa e gradual evolução de conceitos e técnicas.

A literatura aponta que a origem deste processo estaria no trabalho de LUXFORD², citado por SCHAFFER *et al.* (1972) e também por LAUFENBERG (1983). LUXFORD construiu elementos estruturais de aviões, com elevada resistência, a partir de painéis de lâminas paralelas, fabricados de madeira de 3,6mm de espessura coladas paralelamente, à frio.

Pesquisas posteriores sugerem o pré-aquecimento das lâminas para acelerar a cura dos adesivos termoendurecedores utilizados, reduzindo o tempo de cura (MARRA³ citado por SCHAFFER *et al.*, 1972). O pré-aquecimento das superfícies demonstrou que o tempo de fabricação dos painéis poderia ser significativamente reduzido, em relação aos tempo de cura em temperatura ambiente.

Lâminas faqueadas passaram a ser utilizadas em 1962, quando LUTZ *et al.*⁴, citados por SCHAFFER *et al.* (1972) produzem lâminas de 6mm de espessura de *white oak* (carvalho branco), secas em secador de lâminas convencional. O conceito de classificação de lâminas faqueadas utilizadas na produção de vigas, foi apresentado por KOCH (1964a), que realizou estudos utilizando material obtido de espécies de *Pinus* do Sul do Estados Unidos, especialmente *Pinus taeda* e *Pinus palustris* com espessuras de 8,5 mm. Foram montadas

² LUXFORD, R. F. Strength of glue-laminated Sitka spruce made up of rotary-cut veneers. USDA Forest Service, FPL Rep. 1512. Forest Prod. Lab., Madison, 1944.

³ MARRA, G. G. Development of a method for rapid laminating of lumber without the use of high-frequency heat. *For. Prod. J.*, Madison, v. 06, n.3, p. 97-104, 1956.

⁴ LUTZ, J. F.; HASKELL, H.H. e McALISTER. Slicewood - A promising new wood product. *For. Prod. J.*, Madison, v. 12, n.5, p. 218-227, 1962.

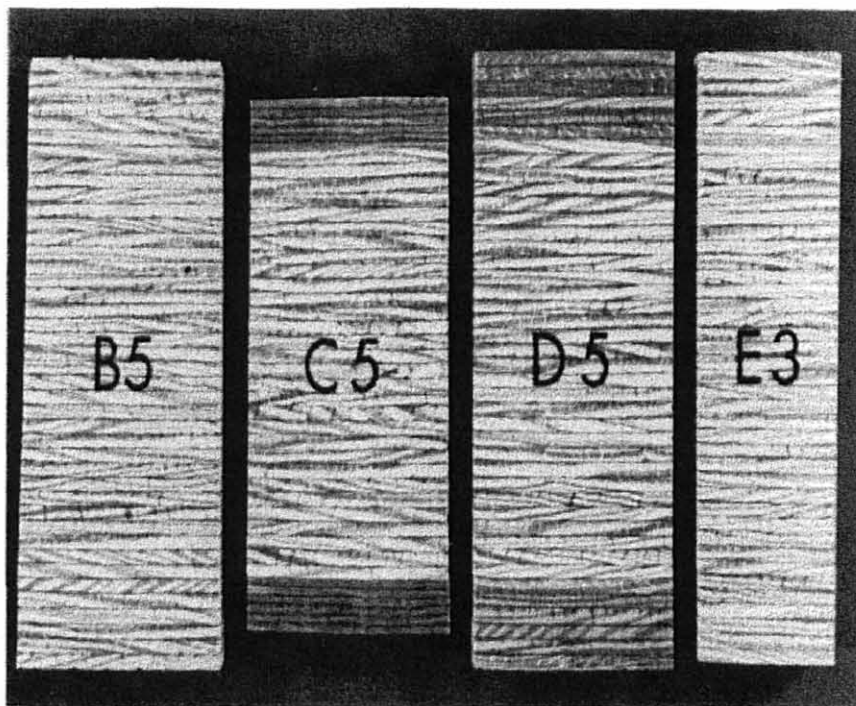
vigas de 18cm de espessura, 12,7cm de largura, com 21 lâminas selecionadas pelo valor individual do módulo de elasticidade (MOE). Este valor foi calculado pela medida da deformação sofrida pelas lâminas, através de um aparato desenvolvido pelo pesquisador. As lâminas faqueadas mais resistentes foram dispostas nas camadas externas da viga, nas zonas de maior tensão de tração e compressão, e as menos resistentes próximas ao centro das vigas.

KOCH (1964a) concluiu que para vigas montadas por este sistema, os valores de resistência foram equivalentes aqueles obtidos em vigas tradicionalmente montadas com tábuas selecionadas de alta classe de resistência.

Mais tarde, KOCH (1967) continuaria suas investigações levando em consideração a resistência individual das lâminas para montagem de vigas. O objetivo principal de seu estudo era buscar alternativas para uso integral de madeira de árvores de pequeno a grandes diâmetros e desenvolver um sistema econômico de montagem de vigas de elevada resistência. Utilizando *Pinus taeda* e *Pinus echinata*, obteve lâminas torneadas de 4,2mm de espessura. A partir deste material produziu vigas estruturais de 18 cm de espessura e 7,6 cm de largura (Figura 2). Selecionou as lâminas pelo MOE medido individualmente e ainda, aplicou tratamentos a algumas lâminas como a densificação por pressão e temperatura aumentando seu MOE na ordem de 80%. Posicionou estas lâminas nas 6 camadas externas. Comprovou mais uma vez que este método mostrou-se viável para produção de vigas de elevada resistência.

O processo de secagem de lâminas para produção de painéis estruturais, foi tema de estudos realizados por KIMBALL (1968) que apresentou no 21º Encontro Anual da Forest Products Research Society, realizado no Canadá, em 1967, resultados da eficiência de alguns métodos. KIMBALL (1968) utilizou lâminas faqueadas de *Pinus taeda*, com espessura de 4,8mm e 9,5mm. Testou quatro métodos de secagem; em secadores a altas temperaturas, em secadores a baixas temperaturas, em prensas e em secador de lâminas por rolo. Os melhores resultados foram obtidos pelo processo de secagem por prensagem a quente das lâminas, que mostrou-se mais eficiente, rápido, e com ocorrência de menor número de defeitos nas lâminas que os processos convencionais. O autor recomendou o desenvolvimento de outros estudos para encontrar-se o ponto ótimo econômico.

FIGURA 2 - ASPECTO DE SEÇÕES DE VIGAS DE LÂMINAS DE PINUS SP. COM ESPESSURA DE 4,2mm, COLADAS PARALELAMENTE, DISPOSTAS POR CLASSES DE MÓDULO DE ELASTICIDADE



FONTE: KOCH, 1967

Em pesquisas para produção de vigas de elevada resistência, KOCH e WOODSON (1968) produziram 20 vigas com dimensões de 4,6 cm x 5 cm x 750 cm a partir de lâminas de *Pinus taeda*, com 4,2 mm de espessura. Classificaram as lâminas através do processo anteriormente empregado por KOCH (1964a, 1964b e 1967) e ainda, pelo método de emissão de ondas acústicas, medindo a velocidade de propagação de ondas de tensão no sentido longitudinal das lâminas. Como o comprimento dimensionado para as vigas (7,5m) excedesse o comprimento padrão das lâminas, (2,5m) foi necessário utilizar um sistema de emendas de topo entre lâminas para obter-se o comprimento desejado. Os autores verificaram que as 3 emendas de topo usadas entre lâminas não reduziram seriamente o MOE das vigas. Constataram ainda, elevada correlação entre os valores do MOE dinâmico e MOE estático, medidos e calculados para seleção das lâminas usadas nas vigas.

O uso da técnica de classificação de lâminas por ultra-som para montagem de vigas citada pelos autores, surge como uma inovação para esta finalidade, embora o uso desta

técnica tenha sido estudada em anos anteriores por GALLIGAN e COURTEAU⁵ e MARRA *et al.*⁶, citados por KOCH e WOODSON (1968).

No ano de 1972 o *Forest Products Journal* publica trabalho submetido por BOHLEN (1972) em maio de 1971. Neste trabalho o autor, pesquisador do Serviço Florestal Canadense, apresenta os resultados de avaliações técnicas e econômicas de produção de um tipo de painel denominado *Laminated Veneer Lumber*- (Painéis de Lâminas Paralelas - PLP). O processo descrito por BOHLEN (1972) consistia na produção de lâminas de *Douglas-fir*, em torno convencional, na espessura de 6mm, que foram secas a um teor de umidade de 5%. Para demonstrar a possibilidade de produzir painéis largos e em comprimentos que poderiam ser serrados em dimensões de madeira estrutural, BOHLEN (1972) fabricou painéis de 3,8cm de espessura, 61cm de largura e comprimento de 4,80m. Utilizou resina fenol-formaldeído, normalmente usada para compensados, aplicada na gramatura de 310 g/m² por linha dupla. Consolidou os painéis em prensa aquecida, a uma pressão de 10,5 kgf/cm² mantendo a temperatura no centro das chapas em 149°C por 3 min, o que demandou 20 min. de prensagem, considerados excessivos pelo autor.

BOHLEN (1972) afirmou que a laminação de troncos de *Douglas-fir*, com diâmetros entre 41cm a 53cm, em lâminas de 6mm resultariam na produção de painéis LVL com elevado rendimento. Para que o produto desenvolvido pudesse competir com madeira serrada, um processo especial de fabricação deveria ser desenvolvido (Figura 3). A análise econômica realizada demonstrou, naquela ocasião, que a produção de LVL custaria 22% mais que a mesma produção de madeira serrada. Entretanto, estes custos poderiam se tornar iguais com o aumento do custo da madeira serrada.

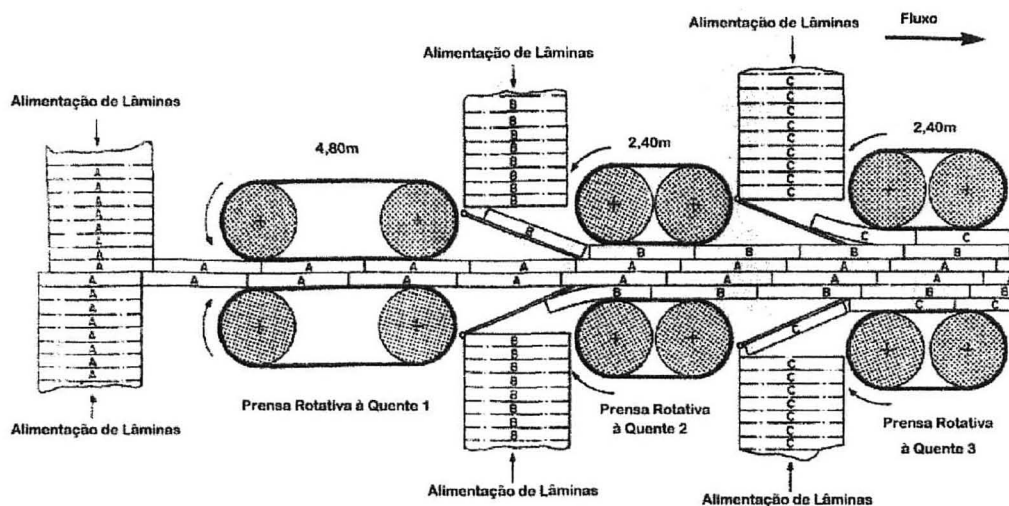
No mesmo ano em que BOHLEN (1972) apresentou o resultado de suas investigações, pesquisadores do laboratório de Produtos Florestais de Madison, EUA apresentavam os resultados de avaliações técnicas e econômicas de produção de painéis laminados através de um processo denominado *Press-Lam* (SCHAFFER *et al.* 1972a, 1972b, 1972c).

O processo *Press-Lam* consistia na obtenção de lâminas em torno convencional, a partir de troncos de 30 a 50cm de diâmetro de espécies de *Pinus* do Sul dos Estados Unidos.

⁵ GALLIGAN, W.L. e COURTEAU, R.W. Measurement of elasticity of lumber with longitudinal stress waves and a piezoelectric effect of wood. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NONDESTRUCTIVE TESTING OF WOOD (2.:1965: Pullman). **Proceedings of the Second International Symposium on Nondestructive Testing of Wood**, Pullman, Washington, Washington State University, 1965. p. 223-244.

⁶ MARRA, G.G.; PELLERIN, R.F. e GALLIGAN, W.L. Nondestructive determination of wood strength and elasticity by vibration. **Holz als Roh - und Werkstoff**. v. 24, n.10, p. 460-466. 1966.

FIGURA 3 - PROCESSO DE PRODUÇÃO EM ALTA VELOCIDADE DE PAINÉIS DE LÂMINAS PARALELAS, PROPOSTO POR BOHLEN, 1972

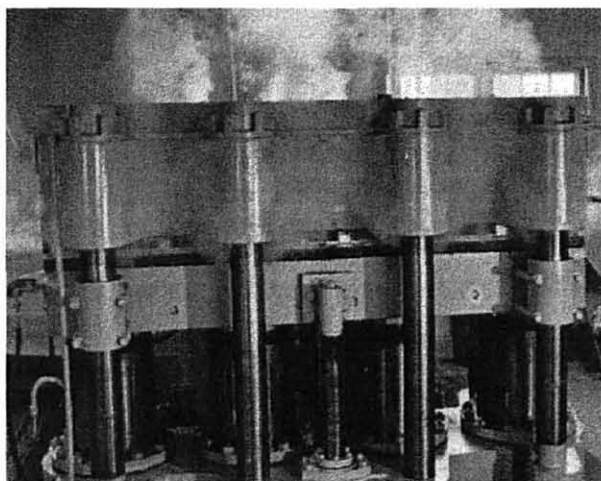


A espessura das lâminas foi definida em 6mm, 9mm e 13mm, sendo secas em prensa a 191°C, em aproximadamente 13 min, a um teor de umidade de 6%. Logo a seguir as lâminas foram coladas com resina fenol-resorcinol (310g/m²), com cura à temperatura ambiente, neste caso, com aceleração da cura pelo aproveitamento do calor residual da secagem das lâminas na prensa (Figura 4). Foram montados elementos estruturais com 3,8cm de espessura, com três, quatro e seis camadas de lâminas.

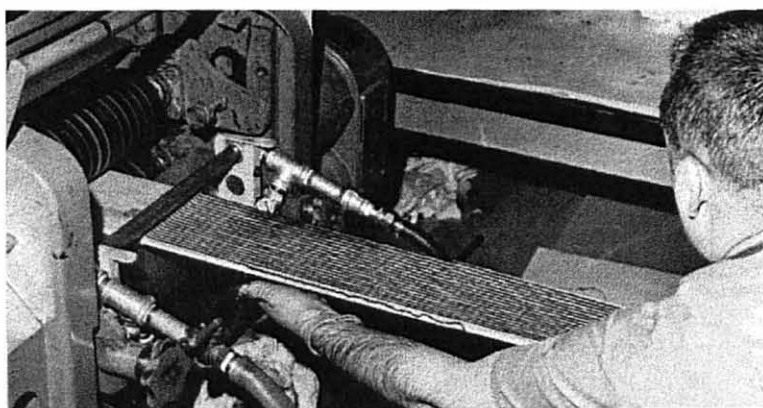
As principais razões apontadas para o desenvolvimento deste processo foram: possibilidade de aumento do rendimento de troncos convencionalmente serrados, porque na laminação não haveria perdas com costaneiras e serragem, e a laminação permitiria ainda a extração de material de maior largura. O processo de secagem de lâminas por prensagem demonstrou ser mais rápido que em processos convencionais (KIMBALL, 1968).

A montagem de elementos estruturais com várias lâminas coladas dispersaria os defeitos de nós e outros redutores de resistência, tornando o produto mais uniforme que madeira serrada obtida do mesmo tronco.

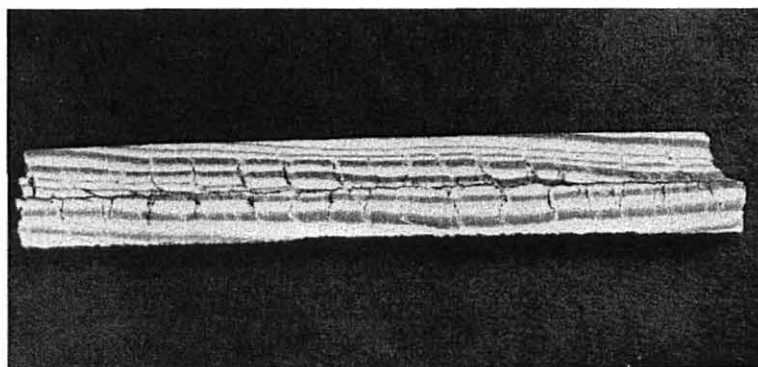
FIGURA 4 – ETAPAS DO PROCESSO *PRESS-LAM* DESENVOLVIDO NO LABORATÓRIO DE PRODUTOS FLORESTAIS DE MADISON-EUA



a) Secagem de Lâminas por Prensagem



b) Aplicação de cola por extrusão às lâminas aquecidas



c) Vista de Topo de Painel *Press-Lam* com Lâminas de 12,7mm de Pinus do Sul

FONTE: SCHAFFER, *et al.*, 1972b

O processo geral de fabricação consistia de :

- a) Corte de lâminas de madeira a partir de toras verdes, em um torno convencional;
- b) recorte das lâminas em dimensões convenientes para a secagem em prensas;
- c) secagem das lâminas por prensagem até teores de umidade aceitáveis;
- d) aplicação de adesivo às lâminas aquecidas, por um sistema de extrusão em rolos de borracha;
- d) montagem das lâminas nas dimensões requeridas;
- e) pressionamento da pilha por um curto período de tempo, enquanto o calor armazenado nas lâminas, durante a secagem, curasse o adesivo.

A investigação realizada no Laboratório de Produtos Florestais (FPL) incluiu avaliação de rendimentos e variáveis de processamento explorando o uso de Pinus do Sul dos Estados Unidos, principalmente o *Pinus taeda* como matéria-prima. Os resultados mostraram rendimentos médios de 50% em comparação com os valores obtidos serrando-se pinus do sul. Comparando as propriedades mecânicas do painel produzido, com madeira sólida livre de defeitos, os autores encontraram valores 18% menores de resistência a flexão e redução de 5% no MOE do material *Press-Lam*. O problema mais sério verificado, que poderia afetar a qualidade do produto, foi a ocorrência de rachaduras paralelas à grã das lâminas obtidas no torno. Segundo os pesquisadores, estas rachaduras reduziram a resistência de pequenas amostras mas não pareciam ser um problema tão sério que pudesse afetar as propriedades de resistência a flexão de vigas estruturais. Concluíram ainda que o processo *Press-Lam* consistia no uso de equipamentos e procedimentos similares aqueles usados na produção de compensados, podendo ser um produto alternativo atrativo para a indústria.

Em continuidade as avaliações técnicas e econômicas da possibilidade de produção de elementos estruturais laminados, através do processo *Press-Lam*, SCHAFFER *et al.*(1972c) relatam que, após 6 meses de pesquisa conseguiram demonstrar a viabilidade do processo e que o conceito *Press-Lam* evoluiu. Avaliações das propriedades do produto não foram realizadas em grande profundidade, segundo os autores, porque o objetivo principal era verificar a viabilidade do processo. A partir daí, as pesquisas passam a concentrar-se na redução dos custos de produção e de dados técnicos, necessários para a aceitação dos produtos *Press-Lam*.

Ainda na década de 70, os painéis de lâminas paralelas começam a ser produzidos comercialmente pela Empresa Trus Joist Corporation, com o nome comercial de *Micro-Lam*

(BOHLEN,1974; KUNESH,1978; VLOSKY *et al.*, 1994). Esta Empresa, atualmente denominada Trus Joist MacMillan, é o maior fornecedor do mercado americano. Produziu este tipo de painel por mais de 10 anos, antes que houvesse competição com outra companhia. Esta primeira linha de produção tinha pequena capacidade (47.200m³/ano) segundo KUNESH (1978), mas com nichos de demanda que foram criados e que rapidamente consumiram a produção (VLOSKY *et al.*, 1994).

A partir da década de 1970, surgiram muitas publicações com resultados de pesquisa analisando aspectos construtivos e estruturais com PLP: MOODY (1972); BRAUN e MOODY (1972); MOODY e PETERS (1972); LEI e WILSON (1979); YOUNGQUIST *et al.* (1979); JUNG e DAY (1981); LAUFENBERG (1982); JUNG e MURPHY (1983); HESTERMAN e GORMAN (1992); KRETSCHMAN *et al.* (1993); CHA e PEARSON (1994).

Aspectos relativos a mercados potenciais e econômicos para o novo produto foram estudados por HARPOLE e AUBRY (1977); YOUNGQUIST e BRYANT (1979); LOEHNERTZ (1983); HOOVER *et al.*(1987b); VLOSKY *et al.*(1994).

Estudos de aplicações de PLP para produção de móveis foram realizados por HOOVER *et al.* (1988); ECKELMAN (1993); KIMMEL *et al.* (1994).

2.5. PROCESSO DE PRODUÇÃO DE PAINÉS DE LÂMINAS PARALELAS

Existem dois tipos básicos de produção de PLP, distinguidos pelo método de fabricação, são eles: o PLP produzido em prensas contínuas em comprimento maiores que 2,44m e aqueles produzidos em prensas tradicionais de compensados de comprimento nominal de 2,44m (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 1987).

Painéis de lâminas paralelas de comprimento contínuo têm emendas entre lâminas a cada 2,44m de intervalo. Os painéis de comprimento definido, produzidos em prensas para compensados, podem ser unidos por emendas de topo ou dentadas, em grandes comprimentos.

Nos processos existentes para produzir painéis de lâminas paralelas, que utilizam procedimentos semelhantes aqueles utilizados na produção de compensados, as lâminas são

obtidas em tornos, secas, aspergidas com adesivo, montadas na espessura desejada e consolidadas em prensas convencionais de compensados de forma contínua ou em etapas. (LAUFENBERG,1983). Processos contínuos de produção requerem substancial investimento de capital, limitando a produção de PLP. Se existem facilidades para produção de compensados, então podem ser feitas adaptações para produção de PLP com espessura de 16mm a 38mm. A seguir os painéis são serrados e emendados nos topos, em componentes de tamanho estrutural, podendo competir em preço e desempenho com madeiras de elevada classe estrutural (YOUNGQUIST, 1985).

As lâminas são testadas previamente a montagem dos painéis por processos não destrutivos assegurando elevada resistência ao produto estrutural. Os painéis PLP são usados primariamente para aplicações estruturais, mas também são utilizados na produção de móveis.

Os princípios básicos de produção de PLP propostos por BOHLEN (1972) e SCHAFFER *et al.*(1972a, 1972b, 1972c) sofreram algumas modificações no decorrer dos anos, como resultado de investigações científicas.

2.5.1. Laminação e Secagem de Lâminas

Nos estudos iniciais sobre a produção de painéis de lâminas paralelas, que contribuíram para o desenvolvimento do processo, foram utilizadas lâminas de madeira faqueadas, em espessuras de 5,0mm (MURPHEY, DRASHER e WOODRUFF,1967; KOCH 1964a). Posteriormente, KOCH (1967); KOCH e WOODSON (1968); BOHLEN (1972); SCHAFFER *et al.*(1972a), (1972b); BOHLEN (1974), passaram a utilizar lâminas obtidas em tornos rotatórios, o que hoje constitui-se no processo básico de obtenção de lâminas. As espessuras destas lâminas são obtidas em faixas entre 2,5mm a 12,7mm (KUNESH, 1978; PEASE, 1994).

O processo de secagem de lâminas foi estudado inicialmente por KIMBALL (1968) que testou métodos de secagem de lâminas faqueadas de *Pinus taeda*. Os resultados obtidos por KIMBALL serviram como subsídio para os pesquisadores do Laboratório de Produtos Florestais de Madison - EUA, que 1972 aplicaram a técnica da secagem de lâminas por prensagem (SCHAFFER *et al.*, 1972a); no processo denominado *Press-Lam*. Neste sistema as lâminas foram submetidas a pressões de $3,5\text{kgf/cm}^2$, à temperatura de 191°C , em menos de 15 min. JOKERST (1972) descreve esta metodologia com detalhes em seu trabalho. O autor

afirma que a principal diferença deste método e outros processos convencionais de secagem, é que torna-se desnecessária a adição de calor para cura da resina, uma vez que se aproveita o próprio calor residual da secagem das lâminas por prensagem, o que reduz substancialmente os custos de produção.

No processo apresentado por BOHLEN (1972) as lâminas foram secas em secadores convencionais, comumente utilizados pela indústria de compensados.

2.5.2. Espécies Utilizadas na Produção de PLP

Normalmente são utilizadas espécies de coníferas, com predominância para os *Pinus* do Sul dos Estados Unidos e o *Douglas-fir* (0,46 - 0,50g/cm³).

Um levantamento das principais espécies mencionadas na literatura, para produção de painéis de lâminas paralelas (PLP) são apresentados na Tabela 3.

A denominação *Pinus* do Sul (*southern pine*), usada no mercado americano, consiste de um conjunto de uma ou mais espécies de *Pinus* com características similares em aparência e em classes de qualidade padronizadas por norma, nas quais se incluem: o *Pinus taeda* (*loblolly pine* - 0,51g/cm³), o *Pinus elliottii* (*slach pine* - 0,59g/cm³) o *Pinus palustris* (*longleaf pine* - 0,59g/cm³) e o *Pinus echinata* (*shortleaf pine* - 0,51g/cm³) FOREST PRODUCTS LABORATORY (1987).

O valor da massa específica a 12% de umidade nos fornece um parâmetro da qualidade da madeira utilizada naquele país, acrescentando-se o fato de serem espécies também denominadas de fibra-longa. Espécies de folhosas, ou de fibra-curta, são também mencionadas na literatura, conforme pode ser observado na Tabela 3, especialmente para produção de móveis.

2.5.3. Emendas de Lâminas

Para a produção de painéis de grande comprimento, emendas de lâminas devem ser feitas, uma vez que, o comprimento de laminação não excede 2,50m. Alguns tipos de emendas ou união entre lâminas são apresentados a seguir:

TABELA 3 - ESPÉCIES UTILIZADAS NA PRODUÇÃO DE PAINÉIS DE LÂMINAS
PARALELAS

NOME CIENTÍFICO	NOME COMUM		TIPO DE LÂMINA	ESPESSURA DAS LÂMINAS	REFERÊNCIA
Quercus alba	white oak (carvalho branco)	folhosa	faqueado	6,4mm	LUTZ, 1944 citado por SCHAFFER <i>et al.</i> , 1972a
Abies grandis	Grand - fir	conifera	laminado	2,5mm	RASMUSSEN, 1994
Acacia mangium	Acacia	folhosa	laminado	2,5mm	SASAKI <i>et al.</i> , 1993
Acer rubrum	Red maple	folhosa	laminado	4,2mm	KIMMEL <i>et al.</i> , 1994
Albizia falcata	-		laminado	2,5mm	SASAKI <i>et al.</i> , 1993
Cryptomeria japonica	Sugi	folhosa	laminado	2,5mm	SASAKI e KAWAI, 1994
Eucalyptus deglupta	Eucalipto	folhosa	laminado	2,5mm	SASAKI <i>et al.</i> , 1993
Gmelina arborea	Gmelina	folhosa	laminado	2,5mm	SASAKI <i>et al.</i> , 1993
Liquidambar styraciflua	sweetgum	folhosa	laminado	3,2mm; 4,0mm; 4,7mm e 6,3mm	HOOVER <i>et al.</i> , 1987
Liriodendron tulipifera	yellow - poplar	folhosa	laminado	3,2mm; 4,0mm; 4,2mm, 5,0mm, 7mm e 6,3mm	HOOVER <i>et al.</i> , 1987 KIMMEL <i>et al.</i> , 1994 MURPHEY <i>et al.</i> , 1967 CHUI <i>et al.</i> , 1994
Picea sitchensis	sitka spruce			3,6mm	LUXFORD, citado por LAUFENBERG, 1982
Pinus contorta	Pinus	conifera			HESTERMAN e GORMAN, 1992
Pinus elliottii	Pinus	conifera	laminado	3,2mm	KRETSCHMANN <i>et al.</i> , 1993
Pinus palustris	Pinus	conifera	faqueado		KOCH, 1964a
Pinus taeda	Pinus	conifera	faqueado		KOCH, 1964a
Pinus taeda	Pinus	conifera	faqueado	4,8 e 9,5mm	KIMBALL, 1968
Pinus taeda	Pinus	conifera	laminado	4,2mm	KOCH e WOODSON, 1968
Pinus taeda	Pinus	conifera	laminado	3,2mm	KRETSCHMANN <i>et al.</i> , 1993
Populus spp	Poplar			3,2mm	CHUI <i>et al.</i> , 1994
Pseudotsuga menziessii	Douglas - fir	conifera		6,3mm 8,0mm	BOHLEN, 1972 KRETSCHMANN <i>et al.</i> , 1993 JOKERST, 1972

- a) Emendas de topo - este tipo de emenda é simples de realizar, mas pode ocorrer separação entre as lâminas, submetendo cada lâmina a um defeito artificial através da largura, a cada 2,50m. A aceitabilidade deste método depende do número de emendas e qualidade das lâminas. Estudos realizados demonstram que até 3 emendas de topo, em cada lâmina, não reduzem seriamente o MOE (KOCH e WOODSON, 1968). A tensão de ruptura pode aumentar com a redução da espessura das lâminas unidas nos topos (LEICESTER e BUNKER, 1969; JUNG e MURPHY, 1983);
- b) Emendas sobrepostas - Neste processo as lâminas são unidas sobrepondo-se uma a outra, numa pequena extensão, ao final de seu comprimento. As pressões utilizadas no processo de prensagem podem resultar em retornos em espessura quando o material atinge a umidade de equilíbrio. Este processo aumenta também a massa específica do painel, nos pontos de emenda;
- c) Emendas biseladas - As emendas biseladas de lâminas individuais são também utilizadas na produção de painéis de grande comprimento. Neste caso, cortes com inclinações de 1:12 são feitas no topo das lâminas, que são então coladas com adesivos fenol-resorcinol. Neste tipo de emenda são obtidas elevadas resistências;
- d) Emendas entre painéis - Os painéis já consolidados podem ser unidos por emendas de topo, usando técnicas convencionais de produção de compensados, podendo-se assim obter produtos de comprimento estrutural. Pesquisas foram realizadas utilizando emendas biseladas com inclinações de 1:9, e emendas dentadas horizontais e verticais. A resistência obtida, em comparação com painéis sem qualquer tipo de emenda, indicaram a manutenção de médias próximas a 95% de resistência, para emendas de face, 83% para emendas de dentes verticais, e 71% para emendas de dentes horizontais.(LAUFENBERG, 1983, YOUNGQUIST, LAUFENBERG e BRYANT, 1984).

2.5.4. Colagem de Lâminas

No processo original denominado *Press-Lam* calor residual da secagem era utilizado para acelerar a cura do adesivo. Com esta metodologia, a escolha do adesivo ficava limitada a resinas fenol-resorcinol e algumas resinas fenólicas modificadas. De acordo com JOKERST (1984), apesar da substancial redução dos custos de energia, o processo de montagem dos painéis representava 35% do custo total para produção de PLP, principalmente devido ao alto custo do adesivo.

Buscando alternativas de redução de custos de produção dos painéis, LOEHNERTZ (1983) e JOKERST (1984) realizaram trabalhos de investigação científica no qual utilizaram o princípio do pré-aquecimento das lâminas, antes de aplicação do adesivo fenólico comumente usado para compensados visando reduzir o tempo de cura e, conseqüentemente o tempo de prensagem dos painéis.

LOEHNERTZ (1983) constatou que a substituição da resina fenol-resorcinol por resina fenólica e o pré-aquecimento das lâminas, reduziram substancialmente os custos de produção dos painéis. JOKERST (1984) concluiu que existem pelo menos duas maneiras de reduzir o tempo de prensagem dos painéis; aumentar a temperatura inicial das lâminas (pré-aquecimento) ou aumentar a temperatura dos pratos da prensa. Aumentos de temperatura inicial de lâminas de 22°C para 121°C reduziram o tempo de prensagem em até 50%. Aumentos de temperatura dos pratos de prensa de 149°C para 177°C reduziram o tempo de prensagem em até 33%. Estas verificações foram feitas na produção de painéis com 4cm de espessura e 4 linhas de cola entre lâminas de *Douglas-fir* com 8mm de espessura.

A tecnologia básica utilizada na colagem de compensados pode ser utilizada na produção de painéis de lâminas paralelas, com pequenas alterações. Para colagem das lâminas, conforme já observado, é comum a utilização de resinas fenólicas, mas atualmente tecnologias de emprego de isocianato e uretano estão disponíveis e sendo utilizadas (MALONEY, 1996). No processo Raute, descrito por PEASE (1994) o processo se inicia com a laminação, secagem de lâminas e emendas de face entre lâminas. Adesivo a base de resina fenólica é aplicado por extrusão ou aspersão. As lâminas são montadas na espessura requerida e imediatamente pré-prensadas. Isto assegura boa dispersão da cola entre as lâminas e a montagem para o manuseio subsequente. A pressão e temperatura necessários para produzir uma linha de cola durável são obtidos em prensagens à quente em prensas de abertura simples

ou duplas, dependendo da capacidade da linha de produção. A temperatura da prensa está entre 140 a 180°C.

Outras variáveis importantes do processo de produção de painéis são a gramatura de cola aplicada às lâminas, em 300g/m² - linha dupla para *Douglas-fir* (BOHLEN, 1975; JUNG, 1982; YOUNGQUIST, LAUFENBERG e BRYANT, 1984; HESTERMAN e GORMAN, 1992;) e para *Pinus* 430g/m² - linha dupla (KRETSCHMANN *et al.*, 1993).

A pressão varia de 10 a 12,5kgf/cm² e a temperatura dos pratos da prensa entre 140°C a 170°C (JUNG, 1982; YOUNGQUIST, LAUFENBERG e BRYANT, 1984; JOKERST, 1984). Os tempos de prensagem dependem da espessura dos painéis produzidos.

O uso de radio frequência na prensagem e cura da resina tem também sido investigada, sendo considerada particularmente vantajosa em painéis de maior espessura, minimizando os problemas de controle de espessura devido a densificação que ocorre na prensagem convencional (KLEMAREWSKI e ANNETT, 1995).

2.6. PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE PAINÉIS DE LÂMINAS PARALELAS - PLP

Com a produção dos primeiros painéis do tipo PLP, iniciou-se uma série de investigações científicas visando o ajuste das variáveis do processo e sua influência sobre as características físicas e mecânicas dos painéis.

Quando desenvolveram o processo denominado *Press-Lam*, SCHAFFER *et al.*(1972a) não fizeram avaliações das propriedades do produto em grande profundidade, porque, segundo eles, o objetivo principal era verificar a viabilidade do processo. Mesmo assim, pequenas vigas foram produzidas a partir do processo *Press-Lam*, nas dimensões de 5x5x7,6cm, de *Pinus do Sul* com 1,3mm de espessura com 4 camadas de lâminas. Estas pequenas vigas foram comparadas com amostras de madeira, livres de defeitos, extraídas das mesmas toras das quais se produziram os painéis.

Os autores verificaram que :

Os painéis *Press-Lam* apresentaram 82% da resistência a flexão verificada na madeira sólida. Verificaram ainda que os painéis *Press-Lam* apresentaram 95% da rigidez a flexão observada em madeira sólida.

As amostras de *Press-Lam* testadas ao cisalhamento, apresentaram 59% de resistência observada na madeira sólida, testada ao cisalhamento no plano radial e 67% no plano longitudinal.

Segundo os autores SCHAFFER *et al.* (1972a), muitas variações na forma construtiva dos painéis *Press-Lam* são possíveis; número de lâminas, espessura tipo de junções entre lâminas, espaço entre junções de lâminas, além de definição do tipo de produto, o que resultará em alterações das propriedades.

No início do mesmo ano, BOHLEN (1972), quando apresentava o conceito e a sistemática de produção de painéis de lâminas paralelas, preocupou-se mais com os estudos de viabilidade de produção e avaliação dos ganhos em rendimentos pela laminação de *Douglas-fir* e aspectos econômicos, relacionados a custos do que propriamente com avaliações de propriedades físicas e mecânicas dos painéis produzidos. Ele faria isto mais tarde, em 1974, quando em continuidade ao seu trabalho de produção contínua de painéis de lâminas paralelas (PLP) BOHLEN (1974), comparou as propriedades de amostras serradas em dimensões de madeira estrutural, com 5x10cm, obtidas de lâminas de *Douglas-fir* com 6mm de espessura, com madeira serrada na mesma dimensão.

A resistência dos painéis, avaliada estatisticamente, indicou que os PLP, comparados com a madeira serrada de mesma dimensão, apresentou valores de resistência pelo menos igual a madeira de classe estrutural relacionada.

Em novas pesquisas conduzidas em 1975, BOHLEN (1975) analisa a resistência ao cisalhamento de PLP de *Douglas-fir*, afirmando que o uso de PLP não seria recomendado em certas aplicações estruturais com alta tensão de cisalhamento, já que o produto testado por ele não atingiu os limites mínimos exigidos por norma. Os valores médios foram 31% menores que os estabelecidos pela norma Canadense (CSA-086-1979).

Nos anos seguintes, as pesquisas com o novo produto avançam, SCHAFFER *et al.*, (1977) apresentam novos conceitos e resultados de pesquisas procurando tornar o processo mais flexível. Uma das inovações apresentadas no processo foi o uso de emendas do tipo *finger-joint* entre lâminas, que resultou em estudos da influência desta inovação técnica sobre as propriedades de resistência dos painéis. LAUFENBERG (1983) apresenta uma extensa revisão de literatura sobre as pesquisas conduzidas até este período, relacionadas ao processo e ao desempenho dos PLP, incluindo detalhados estudos sobre o efeito das emendas entre lâminas.

Estudos relacionados aos efeitos da classificação de lâminas, em classes de qualidade, antes da montagem dos painéis e seus efeitos nas propriedades dos painéis ocorreram inicialmente com KOCH (1967) e KOCH e WOODSON (1968), porém, os objetivos daqueles autores era a produção de vigas e não painéis estruturais do tipo PLP. Salienta-se entretanto que a primeira referência da literatura ao uso de sistema de classificação de lâminas de madeira, pela emissão de ondas acústicas, é apresentada por KOCH e WOODSON (1968) e posteriormente por McALISTER⁷ citado por JUNG (1982).

Um completo estudo das propriedades de PLP a partir de lâminas testadas e classificadas por ondas acústicas, foi realizada por JUNG, (1982). Segundo o autor, os resultados indicaram que a resistência lateral e no plano podem ser estimadas com razoável precisão, pelo uso desta técnica.

Estudos detalhados de propriedades de painéis de *Douglas-fir* e *Pinus* do Sul foram realizados por KRETSCHMANN *et al.* (1993) também empregando a técnica de classificação das lâminas por ultra-som. Valores das propriedades obtidas para os painéis são apresentados na Tabela 4.

2.7. VANTAGENS DOS PAINÉIS DE LÂMINAS PARALELAS

O processo de produção de PLP transforma material de baixa qualidade em produto de alta qualidade que pode ter seus valores de resistência pré-estabelecidos. Os painéis de lâminas paralelas são substitutos de madeira serrada em uma variedade de aplicações estruturais onde os atributos da madeira sólida são de elevado custo.

De acordo com PEASE (1994), comparados com a madeira sólida os painéis PLP oferecem as seguintes vantagens:

- a) Maior resistência - A estrutura laminada dos painéis torna-os mais resistentes e estáveis. O processo de classificação das lâminas confere propriedades de resistência que podem ser calculadas com precisão. Para classificar as lâminas, a massa específica ou emissão de ondas acústicas podem ser medidos. Os defeitos como presença de nós,

⁷ McALISTER, R.H. Modulus of elasticity distribution of loblolly pine veneer as related to location within the stem and specific gravity. *For. Prod. J.*, Madison, v. 26, n.10, p. 37-40, 1976.

TABELA 4 - VALORES DE PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS MÉDIAS OBTIDAS PARA PAINÉIS PLP TESTADOS À FLEXÃO ESTÁTICA

PESQUISADOR	ESPÉCIE	ESPESSURA DAS LÂMINAS (mm)	QUALIDADE DAS LÂMINAS*	MASSA ESPECÍFICA (g/cm ³)	MÓDULO DE RUPTURA (kgf/cm ²)	COEFICIENTE DE VARIAÇÃO (%)	MÓDULO DE ELASTICIDADE (kgf/cm ²)	COEFICIENTE DE VARIAÇÃO (%)	NÚMERO DE TESTES	DIMENSÕES DO CORPO DE PROVA (cm x cm)	TEOR DE UMIDADE (%)
JUNG, 1982	Douglas-fir	6,3	Alcatórias	0,51	607	30	169 440	7	14	3,8 x 8,9	7,6
			Baixa	0,50	595	29	156 785	6	14		7,9
			Média	0,52	553	19	172 252	3	14		7,5
			Alta	0,55	637	14	196 860	4	14		7,5
KRETSCHMANN <i>et al.</i> , 1993	Douglas-fir	2,5	Alta	0,52	628	12	139 208	13	60	3,8 x 3,8	12,1
			25% lenho juvenil	0,52	652	13	132 880	10	64		11,9
			50% lenho juvenil	0,48	576	14	132 177	8	64		12,3
			50% lenho adulto	0,51	612	11	125 849	8	64		11,8
			75% lenho juvenil	0,46	530	11	113 194	8	64		12,5
			100% lenho juvenil	0,45	344	21	91 399	14	60		11,9
			100% lenho adulto	0,50	402	24	112 491	16	64		11,9
KRETSCHMANN <i>et al.</i> , 1993	Pinus do Sul	3,2	Alta	0,63	678	15	132 880	14	51	3,8 x 3,8	12,0
			57% lenho juvenil	0,60	552	26	104 757	22	31		11,9
			57% lenho adulto	0,62	634	17	125 849	12	48		11,7
			100% lenho juvenil	0,59	488	25	89 290	18	36		11,7
			100% lenho adulto	0,59	603	20	119 522	17	50		11,9

* Qualidade das Lâminas - refere-se a classificação das lâminas através do método de emissão de ondas acústicas, em classes de resistência, anterior a montagem dos painéis.

distribuídos através da laminação, causam insignificante efeito na resistência do produto;

- b) Flexibilidade dimensional - Os painéis PLP podem ser produzidos em qualquer largura e comprimento especificado, sem limitações da linha de produção. Em alguns processos pode-se produzir chapas com 1,2m de largura e até 25m de comprimento. As espessuras normalmente estão na faixa de 19 a 75mm;
- c) Utilização de grande variedade de espécies e tamanhos de toras - Madeiras de coníferas são as mais utilizadas. Nos Estados Unidos muitas coníferas e folhosas são utilizadas, sendo mais comum o uso do *Douglas fir* e dos Pinus do Sul.

O PLP foi identificado como sendo superior a aço reciclado e plástico, concreto, e tijolos, em termos de requisitos de energia para sua produção. De acordo com um estudo financiado pela Fundação Nacional de Ciências e conduzido pelo Comitê de Recursos Naturais Renováveis para Materiais Industriais, dos Estados Unidos junções metálicas de assoalhos e elementos de armação de estruturas consomem 50 e 13 vezes mais energia, respectivamente, comparados com a madeira (BOYD *et al.*, 1976). Estruturas de alumínio requerem 20 vezes mais energia comparado com elementos de armação de estruturas de madeira, e tijolos aproximadamente 25 vezes mais energia comparados com materiais baseados em madeira (BOYD *et al.*, 1976).

Procedimentos como avaliação ambiental do ciclo de vida, também chamado análise do ciclo de vida, estão sendo usados para comparar o impacto ambiental de madeira sólida e outros materiais de construção, como produtos de madeira para engenharia, incluindo custo de exaustão do recurso, custo de consumo de energia na manufatura, e eficiência do uso final da energia (KOCH, 1992). Claramente as vantagens ambientais da madeira, um material renovável biodegradável, são evidentes. A habilidade de utilização dos recursos florestais melhorará pela tecnologia de produtos reconstituídos de madeira, fornecendo argumentos que suportem projeções otimistas de mercado (VLOSKY *et al.*, 1994).

A principal vantagem para pequenas construções é a uniformidade da madeira laminada. Como os produtos são compostos de camadas de lâminas, os defeitos da madeira são dispersos. Defeitos naturais como nós, buracos, grã cruzada, rachaduras e fendas, comuns em madeira serrada, são distribuídos aleatoriamente entre muitas camadas de lâminas. Como resultado, há menor variação em resistência, com correspondente possibilidade de projeto de maior tensão e estabilidade dimensional que madeira serrada. Cada peça de PLP quer seja uma viga I ou principal, pode ser calculada para atender requisitos específicos e restritos de projeto.

Embora não exista ainda uma norma específica para avaliações de propriedades de painéis PLP, nos Estados Unidos, alguns valores de tensões admissíveis para cálculo estrutural com estes elementos já estão estabelecidos e em uso, conforme pode ser observado na Tabela 5.

Dependendo do uso final pretendido, vantagens adicionais de PLP sobre madeira sólida podem ser identificados. Por exemplo, devido ao produto ser disponível em comprimentos de 18m-24m, as vigas podem frequentemente alcançar um lado a outro da fundação sem necessidade de um suporte central.

2.8. APLICAÇÕES, USOS E MERCADOS POTENCIAIS PARA LVL

Algumas das primeiras aplicações de PLP foram inspiradas pelo alto custo e escassez de madeira serrada estrutural de elevada resistência para uso em cordas paralelas de tesouras e tabladros de andaimes. Os fabricantes de tesouras encontraram no conceito PLP novas oportunidades de mercado (VLOSKY *et al.*, 1994).

Defeitos redutores de resistência são praticamente inexistentes tornando possível a viabilidade de construção de tesouras leves e seções em I. As seções em I tem a alma composta de painéis estruturais como compensados ou chapas de partículas, coladas em encaixes ou ranhuras nas flanges PLP. Mercados correntes para estas vigas de seção em I são em uso como vigas e caibros em construções com armações leves.

Pranchas de andaimes são um produto PLP importante. A uniformidade das propriedades e uma longa vida em serviço, devido principalmente a resistência a rachaduras, são as principais razões para o sucesso de PLP neste mercado. Esta resistência a rachaduras é

TABELA 5- VALORES TÍPICOS DE PROPRIEDADES MECÂNICAS ADMISSÍVEIS PARA DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL COM PAINÉIS DE LÂMINAS PARALELAS - PLP, FABRICADOS NOS ESTADOS UNIDOS

PROPRIEDADES	VALORES TÍPICOS DE TENSÕES ADMISSÍVEIS (kgf/cm ²)	
	WOOD HANDBOOK*	MICRO-LAM®**
Flexão Estática	155 - 295	204
Tração Paralela	112 - 197	126
Compressão Paralela	169 - 225	213
Compressão Perpendicular à Grã:	28 - 42	62
• Perpendicular a linha de cola	28 - 56	37
• Paralela a linha de cola		
Cisalhamento Horizontal:	14 - 21	20
• Perpendicular a linha de cola	7 - 14	13
• Paralelo a linha de cola		
Módulo de Elasticidade	126 553 - 196 860	140 614

* FONTE: Adaptado de FOREST PRODUCTS LABORATORY, 1987.

**FONTE: Adaptado de VLOSKY *et al.*, 1994. (Valores do produto comercial MICRO-LAM® fabricado de Pinus do Sul dos EUA.

atribuída ao alívio de tensões proporcionado pelas rachaduras das lâminas no torno. Outra indústria que tem adotado o PLP é a da construção civil. O produto é usado em componentes da manufatura de casas devido ao menor peso e economia de material nos componentes fabricados. É considerado como sendo de custo efetivo nas operações secundárias de manufatura devido a reduzida ocorrência daqueles defeitos típicos em madeira serrada como torção, curvatura, empenamento, rachaduras e nós redutores da resistência.

Os painéis PLP representam uma nova tecnologia na utilização da madeira, deste modo os processos e usos para este material estão evoluindo. Usos como carrocerias de caminhões com espécies resistentes a abrasão em superfícies muito usadas, formas de vigas, armação de secadores, trilhos de portas mostram a versatilidade do processo e a consistência das propriedades mecânicas e dimensionais deste material.

A versatilidade dos painéis PLP pode ser observada em algumas utilizações estruturais específicas, mencionadas na literatura. Temos como exemplo: a fabricação, teste e instalação de uma ponte na Floresta Nacional George Washington, nos Estados Unidos, com vários componentes de PLP produzidos com lâminas de *Douglas-fir* (YOUNGQUIST *et al.*, 1979).

Pode-se mencionar também, a produção de colunas cilíndricas obtidas a partir de 16 lâminas de 2,5mm de espessura, formando painéis PLP cilíndricos com espessura de 3,5cm e com 30cm de diâmetro e 5m de comprimento, em uso no Japão (SASAKI e KAWAI, 1994).

Os painéis PLP tem sido também utilizados para produção de móveis. Esta possibilidade passou a ser melhor considerada a partir da constatação de que as madeiras de folhosas, tradicionalmente empregadas no mercado americano para produção de móveis, estariam apresentando aumento de preços, neste caso, as indústrias estariam buscando materiais alternativos para substituição da madeira com esta finalidade.

Estudos de uso potencial de PLP pela indústria de móveis foram conduzidos por HOOVER *et al.*, (1987a, 1987b) e ECKELMAN (1993). Segundo estes pesquisadores algumas utilizações potenciais para PLP de madeiras de folhosas estariam na construção de mesas, estruturas de sofás, cadeiras, armários de cozinha, camas dentre outros.

Os PLP apresentam muitas das propriedades desejáveis encontradas em madeira sólida e em chapas aglomeradas e compensados. Sendo um novo material, o PLP pode apresentar aplicações com características requeridas pela indústria de móveis, onde os materiais

convencionas sejam muitos caros ou onde os produtos substitutos da madeira não estejam apresentando características mecânicas ou estéticas adequadas.

Para ECKELMAN (1993), a opção pelo uso de PLP na produção de móveis deve atender a requisitos como: aspectos estéticos quando usado em partes expostas, resistência a flexão, cisalhamento e nas emendas quando usado em partes estruturais e estabilidade dimensional quando usado como painéis em superfícies.

O potencial de substituição da madeira sólida por elementos de PLP crescem a medida que a relação entre os custos da matéria-prima, atualmente utilizada para produção de móveis, e os custos de produção de painéis PLP atinjam índices compatíveis e atrativos que justifiquem a sua utilização.

Os mercados potenciais para uso de produtos PLP foram inicialmente apontados por YOUNGQUIST e BRYANT (1979), os quais citam várias utilizações possíveis para o produto. Também VLOSKY *et al.*, (1994) apresentam extensa relação de usos finais e mercados potenciais para PLP (Tabela 6).

No mercado americano, foram produzidos somente no ano de 1994, 1.062.000m³ de PLP, segundo dados apresentados por GUSS (1995) que inclui ainda projeções otimistas para os próximos anos. Levantamentos semelhantes foram realizados por PEASE (1994) e PETERSON *et al.* (1993) apontando também projeções otimistas de demanda para este tipo de produto.

De acordo com GUSS (1995), 45% da produção americana de LVL em 1994 foi consumida para produção de vigas estruturais do tipo I, e 37% desta produção em vigas e componentes residenciais (Figura 5). As projeções de futuro sobre o uso de painéis de lâminas paralelas estão baseadas fundamentalmente na realidade da indústria da construção civil americana e nos importantes aspectos econômicos.

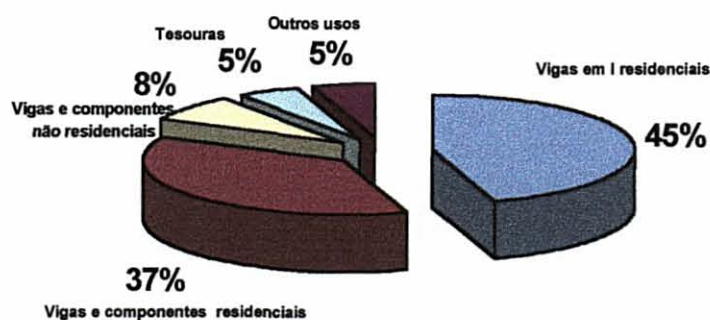
O uso de produtos estruturais reconstituídos de madeira, como o caso de painéis estruturais PLP, em estudo neste trabalho, dependem essencialmente de uma somatória de fatores culturais e econômicos. Os aspectos culturais relacionam-se principalmente com a tradição de uso da madeira e produtos de madeira na construção civil. Os aspectos econômicos estão relacionados a existência de mercado consumidor potencial para este tipo de produto e custos de produção que o tornem competitivo com outros produtos existentes no mercado.

TABELA 6 - PRINCIPAIS USOS DE PAINÉIS DE LÂMINAS PARALELAS

INDUSTRIAL	CONSTRUÇÃO DE CASAS	OUTROS
<ul style="list-style-type: none"> • Tesouras de vão amplo • casas pré-fabricadas • formas de concreto • assentos de estádios • carrocerias e revestimentos para caminhões e vagões • revestimento de containers de carga • estruturas de palanques, andaimes 	<ul style="list-style-type: none"> • Todos os sistemas de forros • vigas e peças principais • vigas estruturais • sistemas de coberturas 	<ul style="list-style-type: none"> • componentes móveis • colunas decorativas estruturais • corrimão de escadas • cruzetas e partes de torre de postes

FONTE: VLOSKY *et al.*, 1994 (Adaptado).

FIGURA 5 - CONSUMO DE LVL DE ACORDO COM O USO FINAL (PRODUÇÃO = 1.062.000 m³), ESTADOS UNIDOS - 1994



FONTE: GUSS, 1995 (Adaptado).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. ESPÉCIE ESTUDADA.

A madeira utilizada neste estudo foi de *Pinus taeda* L. proveniente de plantio de 21 anos, localizado no Município de Campo Alegre no Estado de Santa Catarina. A escolha desta espécie deve-se ao fato de tratar-se de madeira de ampla utilização na produção de compensados, bem como, pela importância da espécie como matéria-prima disponível para suprimento da indústria madeireira do Sul do Brasil.

O material botânico coletado das árvores foi encaminhado para identificação ao herbário do Laboratório de Dendrologia, do Departamento de Silvicultura e Manejo, da Universidade Federal do Paraná, sendo identificado e registrado sob número 7315 como *Pinus taeda* L.

3.2. AMOSTRAGEM E COLETA DO MATERIAL

Foram selecionadas 59 árvores com diâmetro médio de 32,3 cm (DAP), de tronco cilíndrico, livre de bifurcações e defeitos, de um plantio com altura média de 19,4m. De cada árvore foram seccionadas 2 toras de 2,65m de comprimento, sendo os topos marcados com tinta vermelha para toras da base e tinta amarela para a segunda tora da árvore. A amostragem compreendeu portanto, os primeiros 5,30m de comprimento do tronco, convencionalmente utilizados para laminação (Figura 6).

3.3. AQUECIMENTO DAS TORAS

Anteriormente ao processo de laminação, as toras foram submersas em tanques de aquecimento a base de água quente à temperatura média de 80°C, durante 2 horas, conforme procedimento usual da indústria.

Após o período de aquecimento as toras foram conduzidas ao torno, para laminação. Os diâmetros de cada tora foram tomados instantes antes do início da laminação.

FIGURA 6 - MANUSEIO DAS TORAS DE PINUS TAEDA L. ANTERIOR A LAMINAÇÃO

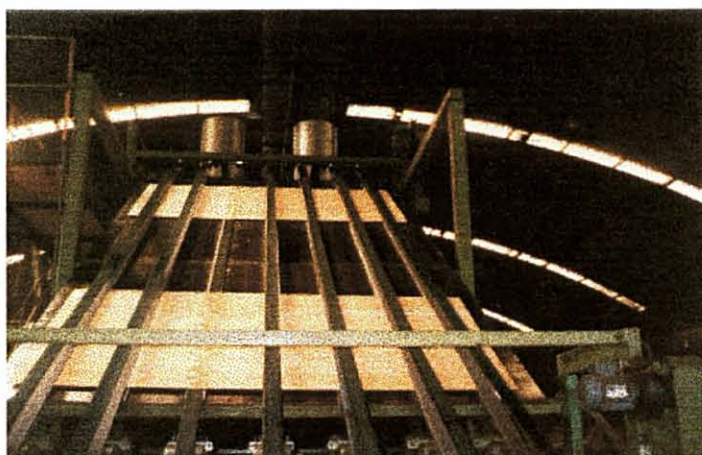


3.4. LAMINAÇÃO

O equipamento utilizado na laminação foi um torno automático marca CREMONA com comprimento de laminação de 2,65m. As toras foram laminadas em duas espessuras distintas: 3,2mm e 4,2mm. Logo a seguir a saída do torno, as lâminas foram automaticamente seccionadas em guilhotina, em dimensões de 2,57m x 1,30 x espessuras de 3,2 ou 4,2mm.

Tratando-se de sistema automatizado, as lâminas foram agrupadas em pilhas de dimensões exatas e pilhas para aproveitamento, de dimensões variáveis (Figura 7).

FIGURA 7– LÂMINAS DE PINUS TAEDA L. OBTIDAS EM TORNO CONVENCIONAL



3.5. SECAGEM DAS LÂMINAS

As lâminas foram secas em secador industrial contínuo de fluxo cruzado, a uma temperatura média de 160°C, com velocidade de passagem regulada de acordo com as espessuras, obtendo-se ao final do processo um teor de umidade de aproximadamente 8%.

3.6. AVALIAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA DAS LÂMINAS

A metodologia para avaliação da massa específica das lâminas, consistiu na pesagem individual de cada uma das lâminas, determinação das espessuras e dimensões de largura e comprimento.

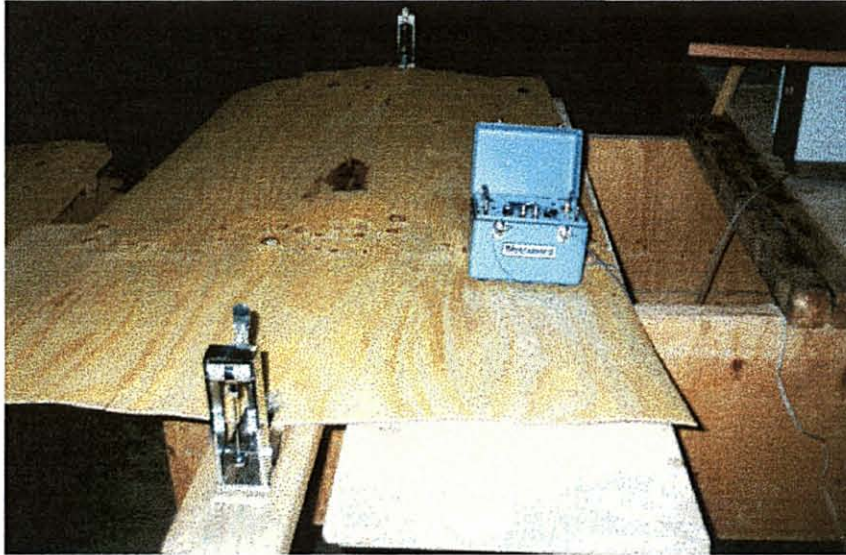
3.7. AVALIAÇÃO NÃO DESTRUTIVA DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS LÂMINAS

Pelo uso de um equipamento de medição do tempo de emissão acústica através das lâminas (*stress wave timer*), marca METRIGUARD, constituído de um sistema de garras, acelerômetros e registrador de tempo, foram tomados os tempos de propagação acústica, em microssegundos no sentido axial de cada lâmina (Figura 8).

3.7.1. Cálculos do Módulo de Elasticidade Dinâmico - MOEd das Lâminas

O cálculo do módulo de elasticidade para lâminas foi realizado através dos valores medidos individualmente para cada lâmina, a partir da equação apresentada pelo fabricante do equipamento.

FIGURA 8- MÉTODO UTILIZADO PARA VERIFICAÇÃO DA RESISTÊNCIA DAS LÂMINAS ATRAVÉS DO DETERMINADOR DE ONDAS DE TENSÃO



Considerando-se o exemplo de uma lâmina com peso de 6,360kg, espessura de 4,37mm, largura de 1,30m, comprimento de 2,575m cujo tempo médio de propagação da onda de tensão medido foi de 517 μ s (microsegundos), em uma distância de 2,475m entre os transdutores, tem-se :

$$V = \frac{247,5\text{cm}}{517 \times 10^{-7}\text{s}} = 478.723,4\text{ cm/s}$$

$$\delta = \frac{6.360\text{g}}{(0,437\text{cm}) \times (130\text{cm}) \times (257,5\text{cm})} = 0,435\text{ g/cm}^3$$

$$MOEd = \frac{(478723,4\text{ cm/s})^2 \times 0,435\text{ g/cm}^3}{980,4\text{ cm/s}^2} = 101.684,62\text{ kgf/cm}^2$$

O valor do módulo de elasticidade dinâmico calculado para a lâmina no exemplo seria registrado como sendo de $101.684,62 \text{kgf/cm}^2$.

3.8. CLASSIFICAÇÃO DAS LÂMINAS POR CLASSES DE RESISTÊNCIA

A partir da obtenção dos valores individuais de módulo de elasticidade dinâmico para as lâminas, estas foram classificadas em duas classes distintas; lâminas com valores de MOE dinâmico superior, a partir de 66.000kgf/cm^2 , e lâminas não classificadas, distribuídas aleatoriamente.

Com as lâminas classificadas nestas duas categorias, foram montados os painéis, previamente a operação de aplicação de cola às lâminas.

A determinação do valor mínimo para classificação das lâminas em classes de resistência foi feita após análise da distribuição de frequência dos valores de MOEd e respectivos valores médios.

3.9. PRODUÇÃO DE PAINÉIS DE LÂMINAS PARALELAS - PLP

Os painéis de lâminas paralelas foram montados a partir de lâminas de 3,2mm de espessura (9 camadas) e lâminas de 4,2mm de espessura (7 camadas). As dimensões estabelecidas inicialmente foram de espessura final de 29mm, comprimento de 2,50m e largura de 1,30m. (Figura 9).

As variáveis do processo de produção foram determinadas a partir da revisão de literatura e dos procedimentos usuais empregados pela indústria na produção convencional de compensados.

As variáveis controladas no processo são apresentadas na Tabela 7.

TABELA 7 - VARIÁVEIS CONTROLADAS NO PROCESSO DE PRODUÇÃO DOS PAINÉIS

VARIÁVEL	VALOR ESTABELECIDO
Temperatura de Prensagem	140°C
Tempo de Prensagem	25 min
Pressão utilizada	10kgf/cm ²
Quantidade de Adesivo (linha dupla)	480g/m ²
Umidade média das lâminas	8,5%

O adesivo utilizado constituiu-se da seguinte formulação:

TABELA 8 - FORMULAÇÃO DO ADESIVO EM PARTES POR PESO

MATERIAL	PARTES
Resina Fenol-formol	100
Casca de Noz em Pó	2
Água	10
Farinha de Trigo	10

Após a produção os painéis foram esquadrejados nas dimensões nominais de 1,22 x 2,44m. Posteriormente foram climatizados em câmara à temperatura de 20°C e UR 65% de climatização até atingirem o equilíbrio higroscópico com o ambiente.

FIGURA 9 - PROCESSO DE APLICAÇÃO DE COLA NAS LÂMINAS,
PARA PRODUÇÃO DE PAINÉIS DE LÂMINAS PARALELAS



3.10. ESTIMATIVA DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DOS PAINÉIS ESTRUTURAIIS

3.10.1. Cálculo do MOE Efetivo Pela Equação Geral Para Vigas Laminadas

Tendo-se determinado os valores individuais do MOEd das lâminas, utilizou-se a equação apresentada por BODIG e JAYNE (1982), (equação 9) para estimar o valor do MOE efetivo dos painéis estruturais de lâminas paralelas.

Foram calculados os valores do MOE de 29 dos 48 painéis produzidos, cuja metodologia empregada consistiu de:

- a) Foram anotados, no momento da montagem dos painéis, anterior a aplicação de cola, os valores de módulo de elasticidade dinâmico de cada lâmina do conjunto que comporia um painel. Grupos de 7 lâminas para painéis com lâminas de 4,2mm de espessura e grupos de 9 lâminas para painéis de lâminas com 3,2mm de espessura;

b) Com os registros individuais de lâminas por painel assumindo-se que a seção transversal dos painéis seria homogênea, um valor de MOE efetivo foi calculado:

Exemplo:

Painel A21, constituído de 7 lâminas procedentes de toras da base do tronco das árvores, espessura de 4,2mm, lâminas previamente selecionadas em classes de resistência com MOEd limite acima de 73.255kgf/cm².

Dados adicionais:

Espessura do painel (e) = 2,78cm

Largura do painel (l) = 120,0cm

Momento de Inércia do painel (I) = 215,0427cm⁴

Espessura da lâmina (el) = 4,0mm

Largura da lâmina (lⁱ) = 120,0cm

Momento de Inércia individual da lâmina (Iⁱ) = 0,626947cm⁴

Área da seção da lâmina (Aⁱ) = 47,67cm²

TABELA 9 - VALORES PARA CÁLCULO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE EFETIVO PARA PAINÉIS DE LÂMINAS PARALELAS

LÂMINA	MASSA ESPECÍFICA kgf/m ³	MÓDULO DE ELASTICIDADE MOEL ⁱ kgf/cm ²	DISTANCIA BARICENTRO d ⁱ cm	INÉRCIA I ⁱ cm ⁴	PRODUTO MOEL ⁱ x I ⁱ kgf.cm ²
1	494	127.553,50	1,192	68,33719	8.716.647,5
2	494	77.026,00	0,795	30,72039	2.366.268,5
3	463	73.983,80	0,397	8,15031	602.990,7
4	457	89.830,60	0,099	1,09716	98.558,2
Σ TOTAL =					11.784.465,0

$$MOEe = \frac{2}{215,0427} \times 11.784.465,0$$

$$MOEe = 109.601,2 \text{ kgf} / \text{cm}^2$$

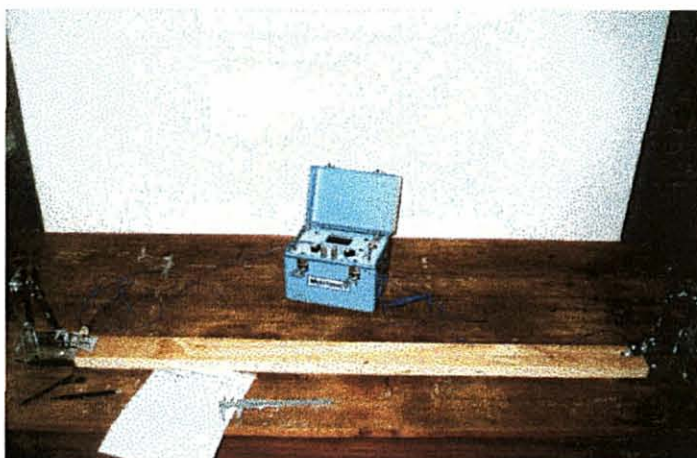
A partir da obtenção deste e demais valores, foram estabelecidas relações com os valores calculados pelo método mecânico destrutivo, apresentado nos resultados e discussão.

3.10.2. Cálculo do Módulo de Elasticidade Dinâmico dos Painéis.

Através da técnica de uso do ultra-som, cada uma das amostras serradas dos painéis (corpos de prova) foi submetido a ondas de tensão, medindo-se o tempo de propagação destas ondas e aplicando-se estes valores na equação para cálculo do MOE dinâmico (Figura 10). Tal como no caso das lâminas os corpos de prova foram também medidos, pesados e submetidos a ondas de tensão utilizando-se os procedimentos descritos no item 3.7.

Os valores de MOE dinâmico calculados foram usados nos estudos das relações entre valores de MOE medidos por técnicas não destrutivas e os valores observados em testes mecânicos convencionais.

FIGURA 10 - MÉTODO UTILIZADO PARA VERIFICAÇÃO DA RESISTÊNCIA DOS PAINÉIS ATRAVÉS DO DETERMINADOR DE ONDAS DE TENSÃO



3.11. DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

Como parte dos objetivos deste trabalho, as seguintes variáveis foram controladas para avaliação ou teste de hipótese:

3.11.1. Toras de Base e Toras de Topo

Considerando-se a conicidade do tronco e o desenvolvimento concêntrico e sucessivo dos anéis de crescimento, considera-se que a segunda tora, distante 2,50m de distância da base, pode apresentar influência na resistência das lâminas.

3.11.2. Espessura das Lâminas

Duas espessuras de lâminas foram empregadas para produção dos painéis estruturais; 3,2mm e 4,2mm. O objetivo foi avaliar o efeito da espessura das lâminas na construção dos painéis.

3.11.3. Classificação Preliminar das Lâminas em Classes de Resistência

Anteriormente a montagem dos painéis procedeu-se a avaliação não destrutiva do módulo de elasticidade dinâmico individual das lâminas. A partir dos resultados obtidos (estudo da distribuição de frequência) estabeleceu-se o limite mínimo acima do qual foram selecionadas as lâminas para produção dos painéis.

Uma segunda classe de lâminas, constituída de lâminas não classificadas, foi utilizada na produção de outro conjunto de painéis.

3.11.4. Produção de Compensados

A partir do conjunto de lâminas classificadas foram produzidos pelos métodos convencionais, 5 painéis compensados de 9 camadas, a fim de se estabelecer comparações de resistência com os painéis estruturais de lâminas paralelas.

3.11.5. Repetições

Foram produzidos 48 painéis de dimensões 1,30x2,44m, 6 por tratamento, dos quais se extraíram corpos de prova de 1,22m de comprimento e 7,6 cm de largura para ensaios de flexão, num total de 5 amostras por painel. Também foram produzidos 5 painéis compensados de 9 camadas, para efeitos comparativos. Alguns painéis, (4 no total) foram perdidos devido a ocorrência de bolha de vapor em seu interior, quando da prensagem. Como houve comprometimento da qualidade dos painéis, estes foram descartados da análise. Alguns corpos de prova foram perdidos por ocasião da realização dos ensaios, por não atenderem aos requisitos da norma, qual seja, da ocorrência de ruptura em intervalo de tempo não inferior a 6min e não superior a 20min.

Os corpos de prova foram condicionados em câmara de climatização à temperatura de 20°C e umidade relativa de 65% até atingirem a umidade de equilíbrio com o ambiente, verificada através de estabilização de seu peso.

No momento de realização dos ensaios os corpos de prova foram pesados e suas dimensões medidas e registradas. O primeiro ensaio realizado foi a verificação não destrutiva de suas propriedades de resistência, pelo uso do equipamento de emissão de ondas acústicas “*stress wave timer*”.

Os procedimentos de avaliação de propriedades foram realizados de acordo com a Norma Americana ASTM D198. Na Tabela 10 são apresentados alguns parâmetros utilizados para realização dos ensaios.

3.11.6. Análise Estatística

O procedimento de avaliação estatística constituiu-se num experimento fatorial do tipo 2x2x2x5, com 48 painéis. Algumas comparações foram estabelecidas entre PLP e 5 chapas compensadas produzidas. A técnica utilizada foi a Análise Fatorial de Covariância (WINER, 1962).

TABELA 10 - PARÂMETROS UTILIZADOS PARA REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS MECÂNICOS DOS PAINÉIS DE LÂMINAS PARALELAS, DE ACORDO COM A NORMA ASTM D - 198

PARÂMETROS	VALORES ESTABELECIDOS
Espessura do corpo de prova	2,7 cm
Largura do corpo de prova	7,6 cm
Comprimento do corpo de prova	1,22 m
Tipo de Carregamento	3 pontos
Vão Total	1,02 m
Vão de Cisalhamento	34 cm
Tempo de ruptura	6 a 20 min

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. PROPRIEDADES DAS LÂMINAS DE PINUS TAEDA L. A PARTIR DO TESTE DE AVALIAÇÃO NÃO DESTRUTIVA

Inicialmente foram analisadas as propriedades das lâminas utilizadas na produção dos painéis de lâminas paralelas.

4.1.1. Distribuição de Frequência dos Valores do Módulo de Elasticidade Dinâmico (MOEd)

Os resultados do MOEd e sua distribuição de frequências das lâminas medidas individualmente são apresentados na Tabela 11.

Podemos observar que o maior número de lâminas concentra-se na faixa de MOEd entre 60.000kgf/cm^2 a 100.000kgf/cm^2 , representando 58% das lâminas medidas.

Estes valores comparados com o valor mínimo de MOEd comumente adotado pelas indústrias americanas para produção de PLP, que é de 140.614kgf/cm^2 (KRETSCHMANN et al., 1993) permitem observar a influência do rápido crescimento das florestas plantadas sobre as propriedades da madeira, relacionada com o seu crescimento em condição nativa.

Constata-se também a grande amplitude de distribuição dos valores do MOEd para as lâminas de *Pinus taeda*. As classes de menor resistência (abaixo do intervalo de 60.000 a 100.000kgf/cm^2) representam 23% dos valores observados e as classes superiores consistem de 19% das lâminas. Esta amplitude de variação pode ser atribuída a variabilidade das propriedades dos lenho adulto e juvenil de *Pinus taeda*, já comprovada por alguns pesquisadores como TOMASELLI, 1979 e MUÑIZ, 1993. Considerando-se a idade das árvores testadas (21 anos) esta variabilidade torna-se mais evidenciada pela distinção entre os dois tipos de lenho.

A distribuição de frequência pode ser observada nas Figuras 11, 12, 13 e 14.

TABELA 11 - NÚMERO DE LÂMINAS E VALOR PERCENTUAL DE OCORRÊNCIA, POR CLASSE DE MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO (MOEd), DE LÂMINAS DE 59 ÁRVORES DE PINUS TAEDA L., EM ESPESSURAS DE 3,2 E 4,2 mm

CLASSE DE MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO (MOEd)* (kgf/cm ²)	NÚMERO DE LÂMINAS (n)	VALOR PERCENTUAL (%)	PORCENTAGEM ACUMULADA (%)
0 < X ≤ 20 000	3	1	-
20 000 < X ≤ 40 000	16	3	1
40 000 < X ≤ 60 000	89	19	4
60 000 < X ≤ 80 000	143	31	23
80 000 < X ≤ 100 000	126	27	54
100 000 < X ≤ 120 000	58	13	81
120 000 < X ≤ 140 000	19	4	94
140 000 < X ≤ 160 000	8	2	98
TOTAL	462	100	100

*Lâminas com dimensões 1,3m x 2,54m e espessuras de 3,2 e 4,2 mm, teor de umidade 8,5%.

4.1.2. Valores Limites do Módulo de Elasticidade Dinâmico (MOEd)

A partir da determinação da distribuição de frequência dos valores de MOEd das lâminas e do cálculo dos valores médios observados por tratamento, foram estabelecidos valores limites ou valores mínimos de MOEd, para cada tratamento, a fim de segregar-se as lâminas em duas classes de qualidade, denominados tratamentos com lâminas “classificadas” e tratamentos com lâminas “aleatórias” conforme previsto no delineamento experimental.

FIGURA 11 - HISTOGRAMA DE DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA DA MASSA ESPECÍFICA (g/cm^3) DAS LÂMINAS DE *PINUS TAEDA* L. COM ESPESSURA DE 3,2mm

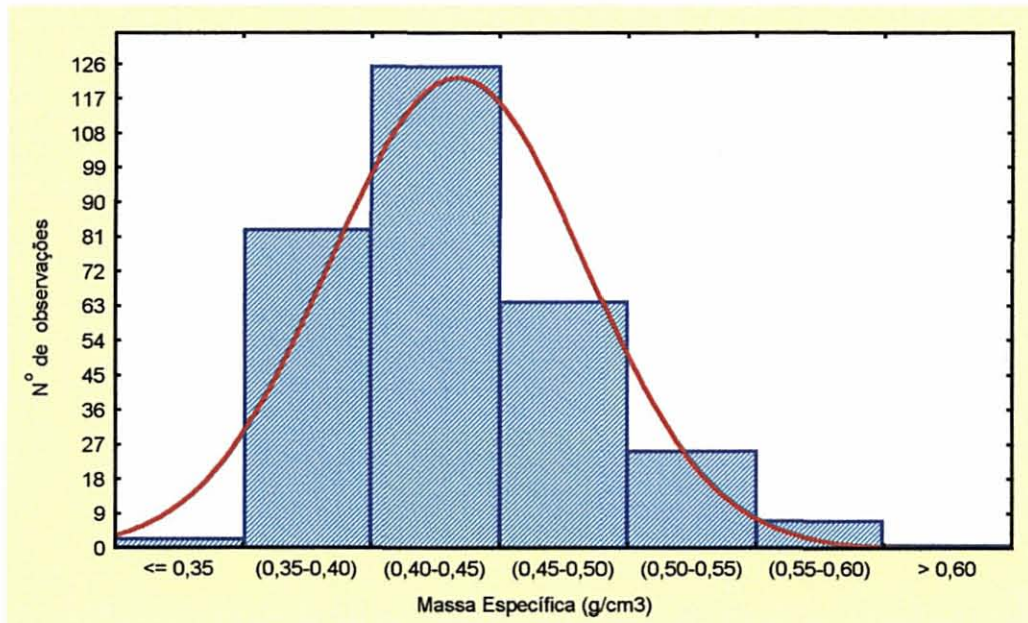
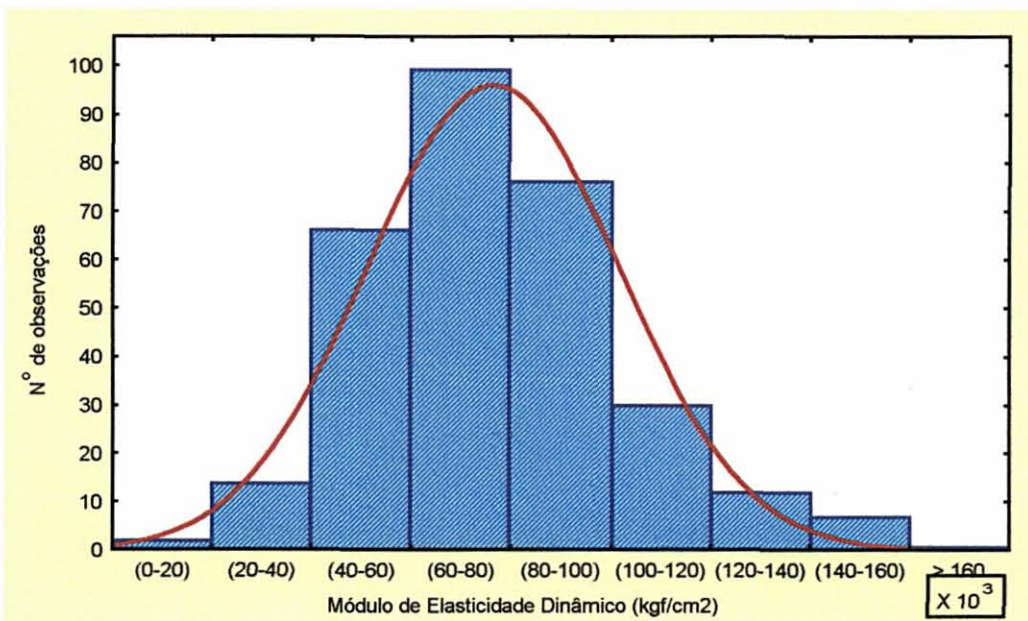


FIGURA 12 - HISTOGRAMA DE DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO (MOEd) DAS LÂMINAS DE *PINUS TAEDA* L. COM ESPESSURA DE 3,2mm



Para os tratamentos com lâminas do tipo “classificadas” estabeleceu-se 10% da média do MOEd observado como valor mínimo necessário para que as lâminas pudessem ser incluídas nestes tratamentos. Para os tratamentos com lâminas do tipo “aleatórias”, embora determinados os valores do MOEd pelo processo não destrutivo, não houve preocupação com a disposição das lâminas e de seus valores medidos.

Na Tabela 11 são apresentados 7 intervalos de classificação de lâminas, e na Tabela 12 os valores limite calculados.

TABELA 12 - VALORES MÉDIOS E LIMITES DE MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO (MOEd) PARA SELEÇÃO DE LÂMINAS UTILIZADAS NA MONTAGEM DE PAINÉIS DO TIPO “CLASSIFICADOS”, POR TRATAMENTO

TRATAMENTOS	MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO MÉDIO	MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO LIMITE
	(kgf/cm ²)	(kgf/cm ²)
• tora da base • espessura lâmina = 4,2mm	81.395 (26,6)	73.255 (17,1)
• tora da base • espessura lâmina = 3,2mm	73.548 (36,0)	66.193 (23,4)
• segunda tora • espessura lâmina = 4,2mm	85.781 (26,4)	77.203 (16,0)
• segunda tora • espessura lâmina = 3,2mm	79.445 (30,0)	71.500 (19,3)

Números entre parênteses referem-se ao coeficiente de variação (%)

Com base nestes valores procedeu-se a montagem definitiva dos painéis.

FIGURA 13 - HISTOGRAMA DE DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA DA MASSA ESPECÍFICA (g/cm^3) DAS LÂMINAS DE *PINUS TAEDA* L. COM ESPESSURA DE 4,2mm

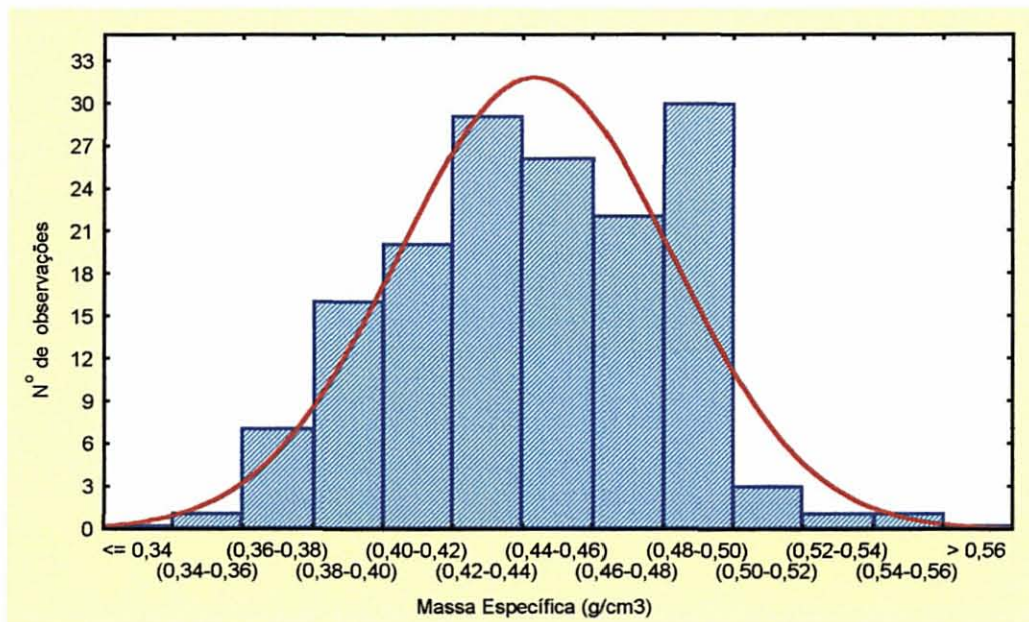
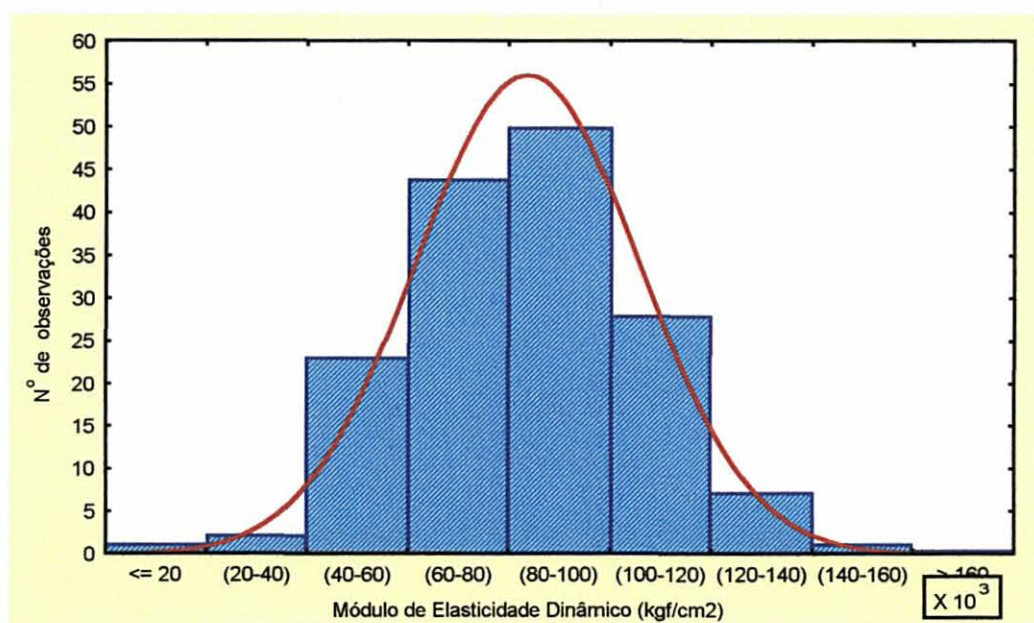


FIGURA 14 - HISTOGRAMA DE DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO (MOEd) DAS LÂMINAS DE *PINUS TAEDA* L. COM ESPESSURA DE 4,2mm



4.1.3. Análise das Propriedades das Lâminas, entre Tratamentos

Com os resultados obtidos nos testes de classificação não destrutivos para lâminas, procedeu-se a uma avaliação estatística dos valores observados das variáveis MOEd e massa específica, nos diferentes tratamentos aplicados (Tabela 13 e Anexos 2 a 5).

4.1.3.1. Variabilidade da Massa Específica das Lâminas

As análises comprovaram que os valores médios da massa específica apresentaram diferenças significativas quando comparados os valores de espessuras de lâminas de 3,2mm e 4,2mm (fator espessura) sendo, em média, maiores para espessuras de 4,2mm ($0,444\text{g/cm}^3$), contra as de 3,2mm ($0,432\text{g/cm}^3$) (Anexo 4).

Os valores da massa específica também diferiram, quando comparados os valores médios de lâminas obtidas de toras da base das árvores ($0,455\text{g/cm}^3$) com lâminas obtidas da segunda tora ($0,421\text{g/cm}^3$) (Anexo 5).

A diferença observada entre a massa específica de lâminas obtidas de toras extraídas da base das árvores, com maior valor médio, e quando comparada com lâminas das segundas toras, apresenta uma tendência natural já constatada por alguns autores (MUNÍZ, 1993; KOLLMANN e CÔTÉ, JR., 1968). A tendência de variação da massa específica no tronco de árvores de *Pinus sp.* é decrescente com a altura das árvores. Isto pode ser atribuído a dois aspectos: as diferentes proporções entre lenho juvenil e lenho adulto e ao fato biológico de que a árvore tende, por questões estruturais, a reforçar as células do lenho em sua base, dando sustentação ao peso de sua estrutura.

Com relação a variabilidade observada entre espessuras de lâminas, com valores médios em lâminas mais espessas (4,2mm - $0,44\text{g/cm}^3$) em relação a lâminas mais finas (3,2mm - $0,43\text{g/cm}^3$), embora os valores numéricos estejam muito próximos. O teste de comparação de médias confirma a diferença estatística entre elas. Esta diferença pode ser atribuída ao fato de que, ao laminar-se toras em lâminas de maior espessura porções de lenho tardio e inicial, que apresentam-se em transição entre anéis de crescimento, seriam incorporadas em maior proporção nas lâminas, conferindo pesos maiores, para mesmo volume. Em lâminas mais finas, as porções de lenho inicial e tardio, seriam mais bem distribuídas.

A constatação da existência de diferenças significativas entre os valores médios da massa específica das lâminas, entre tratamentos, confirma a necessidade de uso da análise de covariância para avaliação da propriedade MOEd das lâminas.

Os valores médios obtidos para as lâminas de *Pinus taeda* podem ainda ser equiparados aos valores obtidos por LARA PALMA (1994) apresentados na Tabela 2. Embora a idade das árvores testadas pelo pesquisador tenha sido de 30 anos, a espessura das lâminas sendo de 2mm, e o método de avaliação diferenciado, os resultados mostram-se semelhantes.

TABELA 13-VALORES MÉDIOS DE MASSA ESPECÍFICA E MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO (MOEd) PARA LÂMINAS DE *PINUS TAEDA* L. OBTIDOS NOS DIFERENTES TRATAMENTOS

TRATAMENTOS	MASSA ESPECÍFICA (g/cm ³)			MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO (kgf/cm ²)		
	média	S*	CV**	média	S*	CV**
• tora da base • espessura lâmina = 4,2mm	0,46	0,04	8,7	81395	21626,8	26,6
• tora da base • espessura lâmina = 3,2mm	0,45	0,05	11,1	73548	26512,3	36,0
• segunda tora • espessura lâmina = 4,2mm	0,43	0,03	7,0	85781	22663,9	26,4
• segunda tora • espessura lâmina = 3,2mm	0,41	0,04	9,7	79445	23873,1	30,0

*S = desvio padrão

**CV = coeficiente de variação

4.1.3.2. Variabilidade do Módulo de Elasticidade Dinâmico das Lâminas.

A análise dos valores médios de módulo de elasticidade dinâmico das lâminas (MOEd), medidos através do método de emissão de ondas acústicas, apresentados na Tabela 13 e Anexos 6 a 9, demonstraram que existiu diferença significativa entre as médias apenas entre os valores médios de lâminas obtidas da base (69.954kgf/cm^2) comparados com lâminas da segunda tora, (89.081kgf/cm^2) (Anexo 9).

Entre as espessuras de lâminas os valores médios de MOEd ajustados foram considerados estatisticamente não diferenciados.

Convém salientar que os testes de média foram procedidos com ajustes dos valores observados de MOEd, através da análise de covariância, para um valor médio de massa específica de $0,438\text{g/cm}^3$. Este ajuste tornou-se necessário devido a verificação de diferenças de massa específica entre os tratamentos. Como esta variável influi diretamente sobre a equação de cálculo do MOEd (equação 14) e também sobre os valores do módulo de elasticidade das lâminas, esta técnica foi empregada.

Os valores médios ajustados para o MOEd médio entre lâminas de base, que apresentaram menor valor (69.954kgf/cm^2) e as segundas toras (89.081kgf/cm^2), contrariam as observações de MUNÍZ (1993) para madeira sólida de *Pinus taeda*, onde a pesquisadora constatou que os valores das propriedades foram decrescentes com a altura das árvores.

Torna-se importante considerar também que, mesmo desprezando-se a influência da massa específica das lâminas sobre o MOEd, a comparação estatística das médias confirma maior valor médio para lâminas das segundas toras.

Uma possível explicação para esta tendência poderia ser atribuída ao fato de que, a variação do módulo de elasticidade na direção medula casca, para madeiras de *Pinus taeda*, é muito elevada. LARA PALMA (1994) comprovou a existência de diferenças entre valores médios de módulo de elasticidade, calculado em lâminas de *Pinus taeda*, no sentido medula casca.

A análise preliminar, efetuada com as lâminas que foram utilizadas na composição dos painéis de lâminas paralelas, permite, em resumo, algumas considerações:

- a) As diferenças nos valores de MOEd entre espessura de lâminas não se confirmaram. Independentemente de espessura utilizada o comportamento do MOEd permaneceu constante.
- b) A massa específica diferiu entre lâminas de 3,2mm e 4,2mm sendo maior em lâminas mais espessas.
- c) As lâminas obtidas de segundas toras apresentaram, em média, maiores valores de MOEd que lâminas da base das toras, o que a princípio, contraria as expectativas iniciais.
- d) Os valores médios da massa específica foram maiores para lâminas obtidas na base comparadas com lâminas de topo.

A classificação das lâminas por classes de qualidade, dentro dos tratamentos aplicados, a continuidade das tendências observadas para as lâminas e sua influência sobre as propriedades dos painéis produzidos, será avaliada a seguir.

4.2. ANÁLISE DA MASSA ESPECÍFICA E DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS PAINÉIS PRODUZIDOS

A análise das propriedades de resistência dos painéis produzidos foi realizada através dos valores obtidos pelo cálculo da tensão no limite proporcional, módulo ruptura e módulo de elasticidade a flexão, de acordo com os procedimentos descritos na norma da AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM D198 (1994a).

Os tratamentos aplicados para análise incluem a adição do sistema de classificação de lâminas, por classes de qualidade.

Na Tabela 14 são apresentados os valores médios obtidos para as propriedades avaliadas, e nos Anexos 10 a 29, os resultados das análises.

TABELA 14 - VALORES MÉDIOS OBSERVADOS DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS PAINÉIS DE LÂMINAS PARALELAS DE *PINUS TAEDA L.*

POSIÇÃO NO TRONCO	BASE				TOPO			
	3,2mm		4,2mm		3,2mm		4,2mm	
ESPESSURA DAS LÂMINAS								
CLASSIFICAÇÃO LÂMINAS	classificadas	aleatórias	classificadas	aleatórias	classificadas	aleatórias	classificadas	aleatórias
Massa Específica g/cm ³	0,592 (4,2)	0,528 (3,5)	0,583 (5,6)	0,518 (4,6)	0,563 (3,9)	0,496 (3,4)	0,545 (4,0)	0,507 (3,7)
Módulo de Ruptura kgf/cm ²	519 (23,0)	374 (24,5)	522 (22,1)	401 (20,1)	444 (17,5)	295 (29,0)	358 (23,9)	284 (27,0)
Módulo de Elasticidade kgf/cm ²	96.734 (20,0)	56.883 (16,0)	88.915 (20,7)	64.164 (21,5)	96.717 (11,2)	57.170 (27,2)	95.251 (13,5)	66.501 (23,2)
Tensão no Limite Proporcional kgf/cm ²	356 (26,1)	221 (21,3)	375 (21,7)	278 (20,5)	345 (16,1)	223 (33,6)	281 (27,8)	233 (30,5)
Teor de Umidade (%)	10,4 (17,7)	11,7 (3,7)	10,0 (6,2)	10,8 (4,5)	10,5 (6,1)	11,7 (6,6)	11,1 (11,9)	11,1 (6,7)
Número de Amostras (n)	23	18	31	29	27	18	30	21

Valores entre parênteses referem-se ao coeficiente de variação (%)

4.2.1. Análise da Massa Específica

O primeiro parâmetro avaliado nas propriedades dos painéis foi a massa específica. Através da análise estatística, verificou-se que a massa específica dos painéis diferiu com a posição do tronco das árvores de onde as lâminas foram obtidas. Para painéis de lâminas obtidas da base das árvores a massa específica foi maior ($0,555\text{g/cm}^3$). Este resultado está dentro do esperado, tendo em vista que, na análise da variação da massa específica entre lâminas, isto já havia sido evidenciado. O maior valor médio das lâminas da base prevaleceu sobre a composição final dos painéis, em relação aqueles fabricados com lâminas de segunda tora (Anexos 10 a 14).

Um outro resultado das análises, referente a massa específica, foi a obtenção de maior valor médio desta propriedade para painéis fabricados a partir de lâminas classificadas, em classes de resistência, baseada no valor do módulo de elasticidade dinâmico calculado. Painéis fabricados de lâminas classificadas, apresentaram maior valor médio de massa específica ($0,571\text{g/cm}^3$) comparados com o valor médio de painéis de lâminas não classificadas ($0,512\text{g/cm}^3$) (Anexo 14). Constata-se que a classificação de lâminas baseadas no valor do MOEd está altamente relacionada aos valores de massa específica das lâminas, o que pode ser explicado pela inserção desta variável na equação para obtenção do MOEd (equação 14).

A partir da análise da massa específica dos painéis, a análise das outras variáveis foi realizada ajustando-se seus valores de acordo com um valor médio de massa específica, através da análise de covariância.

4.2.2. Análise do Módulo de Ruptura

A análise e comparação dos valores médios da propriedade módulo de ruptura (MOR) foi realizada, conforme já mencionado, através de análise de covariância. Neste tipo de análise ajustaram-se os valores da propriedade MOR, a um valor médio geral de massa específica, ($0,541\text{g/cm}^3$). Isto é, foram considerados os valores médios de MOR ajustados como se todos os painéis apresentassem a mesma massa específica, considerando-se esta variável como de grande influência sobre os valores do módulo de ruptura (MOR). Os valores

médios apresentados a seguir, são valores ajustados estatisticamente, conforme pode ser observado nos Anexos 15 a 19.

O módulo de ruptura apresentou maior valor médio, para painéis de lâminas paralelas obtidos de lâminas classificadas em classe de módulo de elasticidade dinâmico selecionado (425kgf/cm^2). Este valor médio foi superior em 11%, ao valor do MOR obtido em painéis cujas lâminas não foram classificadas, ou, de montagem aleatória (384kgf/cm^2) (Anexo 19).

Este indicativo de incremento na resistência dos painéis, pela classificação preliminar das lâminas, já foi demonstrado em pesquisas realizadas utilizando a mesma técnica de classificação adotada neste trabalho (JUNG, 1982 ; KRETSCHMAN *et al.*, 1993).

As análises estatísticas demonstraram que, o valor médio do MOR, para os painéis obtidos de lâminas oriundas das toras da base das árvores, (440kgf/cm^2) foram 19% superiores àqueles painéis produzidos com lâminas de segunda tora, ou acima de 2,60m da altura das árvores (369kgf/cm^2) (Anexo 17). Esta constatação pode estar relacionada com a maior porcentagem de lenho juvenil nas porções superiores do tronco, considerado mais jovem. Como a massa específica foi ajustada a um valor médio comum, esta poderia ser a causa desta constatação.

A única interação significativa foi observada entre os fatores posição no tronco com espessura de lâminas. Para painéis obtidos de lâminas da base, com 4,2mm de espessura, o valor médio de MOR (454kgf/cm^2) foi superior as demais interações.

4.2.3. Análise do Módulo de Elasticidade Aparente

Os valores médios do módulo de elasticidade aparente (MOEa) dos painéis de lâminas paralelas, medidos por método mecânico, e ajustados pela análise de covariância, apresentaram tendência semelhante aqueles já observados para as lâminas testadas de modo dinâmico (Anexos 20 a 24). A primeira constatação é de que o valor médio do MOEa não diferiu estatisticamente para os painéis com 9 camadas obtidos de lâminas de 3,2mm de espessura (76.947kgf/cm^2), daqueles obtidos de lâminas de 7 camadas com lâminas de 4,2mm de espessura (80.616kgf/cm^2) (Anexo 23). Outra constatação importante refere-se ao fato de que, diferenças significativas foram verificadas entre valores médios de painéis fabricados de lâminas da base, (73.660kgf/cm^2) com painéis produzidos de lâminas da segunda tora (83.904kgf/cm^2). O maior valor médio foi verificado na segunda condição, isto

é, painéis fabricados com lâminas da segunda tora (Anexo 22). Este resultado contraria as tendências normais observadas com madeira sólida, para esta propriedade (MUÑIZ, 1993).

Importante constatação é verificada na existência de diferença significativa entre médias de painéis obtidos de lâminas previamente classificadas, com médias de painéis produzidas de lâminas tomadas aleatoriamente. O valor do módulo de elasticidade de painéis de lâminas classificadas (86.858kgf/cm^2) é superior em 23% ao valor obtido em painéis produzidos com lâminas dispostas aleatoriamente (70.705kgf/cm^2) (Anexo 24). Esta constatação confirma a necessidade do estabelecimento de uma metodologia para classificação prévia de lâminas, anterior a montagem de painéis estruturais de lâminas paralelas (PLP).

Dentre as interações analisadas, painéis produzidos com lâminas classificadas, nas espessuras de 3,2mm e 4,2mm, apresentaram maior valor médio de MOEa.

4.2.4. Análise da Tensão no Limite Proporcional

Os valores médios de tensão limite ajustados para um valor de massa específica de $0,541\text{g/cm}^3$, apresentaram diferenças estatísticas significativas apenas entre painéis produzidos de lâminas classificadas (310kgf/cm^2) em relação a painéis de lâminas não classificadas (275kgf/cm^2) (Anexo 29).

Dentre as interações, painéis PLP de lâminas procedentes da base das árvores, com espessuras de 4,2mm apresentaram maiores valores médios de TLP.

Também a combinação de lâminas classificadas com espessuras de 3,2mm ou 4,2mm resultaram em maiores valores médios.

4.3. RELAÇÃO ENTRE O MOE EFETIVO, MOE DINÂMICO E O MOE APARENTE DOS PAINÉIS

A partir da classificação individual de lâminas, em classes de módulo elasticidade dinâmico (MOEd), através do teste não destrutivo de emissão de ondas acústicas, foram realizados cálculos teóricos e testes dinâmicos para avaliação do valor do módulo de elasticidade esperado para os painéis.

4.3.1 . Modelo de Equação Linear Para Estimar o Módulo de Elasticidade Aparente (MOE_A) dos Painéis

A equação geral, (equação 9) normalmente utilizada para analisar o comportamento de vigas de madeira laminada, foi empregada para estimar as propriedades elásticas de 29 painéis de lâminas paralelas produzidas neste trabalho.

Após a obtenção dos valores de módulo de elasticidade aparente (MOE_A) para cada painel testado através de testes mecânicos, foram estabelecidas relações através da técnica da análise de regressão com os valores do módulo de elasticidade efetivo (MOE_e). No Anexo 1 são apresentados os valores obtidos para os painéis de lâminas paralelas produzidos.

Os modelos de equação linear propostos para estimativa do MOE_A dos painéis, previamente a sua produção, a partir do conhecimento dos valores do MOE_e e do MOE_d das lâminas é apresentado na Tabela 15. Observa-se que os valores do coeficiente de determinação R² para o modelo linear proposto (modelo 1), explicam em torno de 55%, da variabilidade dos dados. Na Figura 15, observa-se a dispersão dos valores obtidos.

TABELA 15 - MODELOS DE EQUAÇÃO DE REGRESSÃO LINEAR SIMPLES PARA PREDIÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE APARENTE DOS PAINÉIS DE LÂMINAS PARALELAS DE *PINUS TAEDA L.*

MODELO DE REGRESSÃO	N	R ²	Sxy	F
1. MOE _A = 23.990,00 + 0,68935 * MOE _e	29	0,5504	16.073,4	33,05*
2. MOE _A = -19.108,62 + 0,99758 * MOE _d	44	0,8177	8.984,8	188,41*

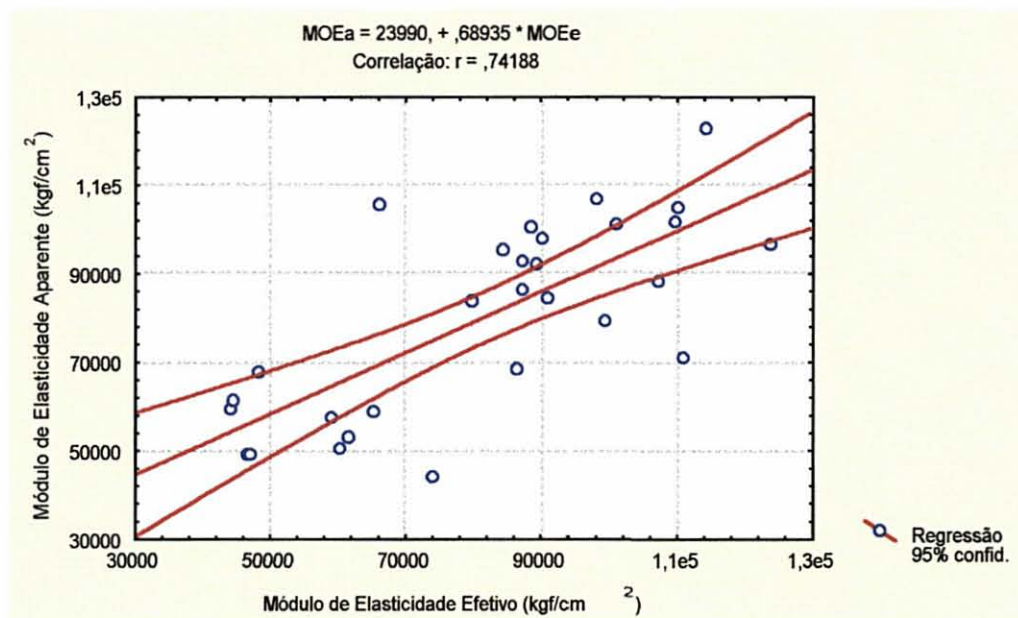
MOE_A = Módulo de elasticidade aparente dos painéis, obtido em testes mecânicos (kgf/cm²)

MOE_e = Módulo de elasticidade efetivo dos painéis, calculado pela equação geral (kgf/cm²)

MOE_d = Módulo de elasticidade dinâmico dos painéis, obtido por ultra-som (kgf/cm²).

N = número de observações; R² = coeficiente de determinação; Sxy = erro padrão da estimativa; F = valor de F calculado; * = significativo ao nível de 95%.

FIGURA 15 - RELAÇÃO ENTRE O MÓDULO DE ELASTICIDADE APARENTE DOS PAINÉIS E O MÓDULO DE ELASTICIDADE EFETIVO CALCULADO PELA EQUAÇÃO GERAL

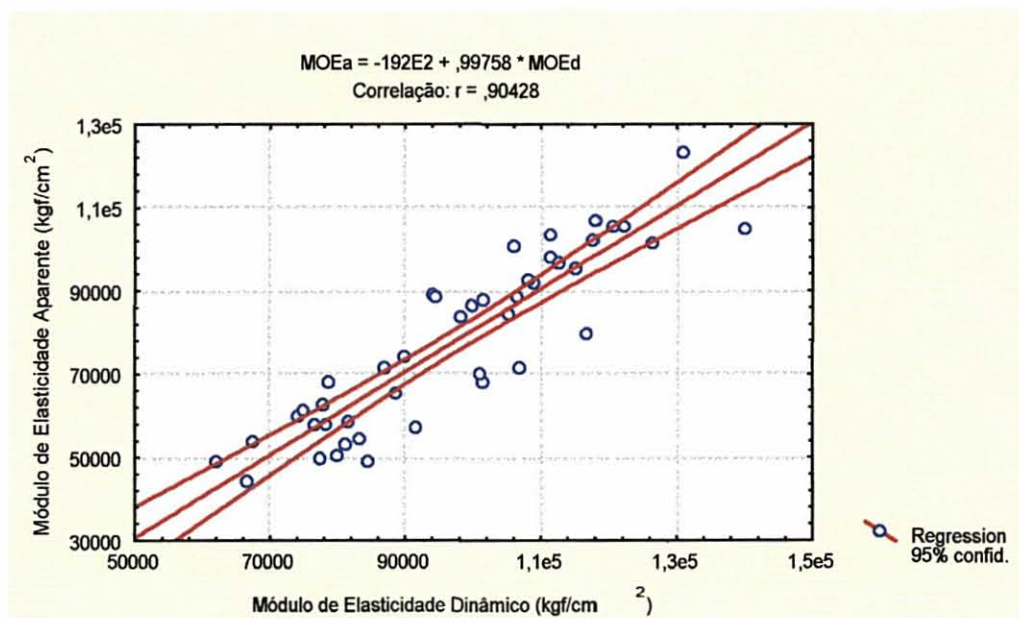


4.3.2. Uso da Técnica de Emissão Acústica Para Estimativa do MOE Aparente dos PLP

Da mesma forma que os estudos realizados com as lâminas de *Pinus taeda L.*, para seleção por classes de MOE dinâmico, medido por emissão acústica, os corpos de prova dos painéis estruturais de lâminas paralelas, foram testados utilizando-se a mesma técnica para a determinação do MOEd dos painéis e correlacionados com os valores de MOE aparente determinados por meios mecânicos.

Pela Tabela 15 e Figura 16 observamos um bom ajuste do modelo. Estes valores são superiores ao do modelo apresentado na técnica anterior, o que permite concluir sobre a possibilidade de uma melhor estimativa do MOE aparente pela técnica do ultra-som.

FIGURA 16 - RELAÇÃO ENTRE O MÓDULO DE ELASTICIDADE APARENTE DOS PAINÉIS E O MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO DETERMINADO POR MÉTODO ACÚSTICO



Torna-se importante salientar que antes de sugerir a possibilidade de uso destes modelos estimadores, para determinação das propriedades elásticas reais dos painéis produzidos, convém observar que a técnica do ultra-som apresenta resultados finais mais satisfatórios no processo de seleção de lâminas. Isto pode ser comprovado pelas análises estatísticas dos tratamentos que demonstraram a eficiência do método.

Os valores médios do módulo de elasticidade dinâmico foram 28% superiores em média aos valores do MOE obtidos e calculados pelo processo mecânico. O coeficiente de determinação obtido neste modelo (81,7%) equipara-se àqueles valores obtidos por JUNG (1982) utilizando a mesma técnica (82,3% e 78,6%).

A variável módulo de ruptura (MOR) não apresentou boa correlação com os valores medidos pela técnica do ultra-som. O estabelecimento de modelos de equação mais complexos poderiam viabilizar sua estimativa. Entretanto, conforme já mencionado, torna-se importante concentrar-se em técnicas apuradas de seleção das lâminas que compõem os painéis - PLP. A partir deste ponto, os valores de resistência final dos painéis corresponderão

a qualidade das lâminas. Constatou-se a influência da classificação preliminar das lâminas sobre esta propriedade nas análises estatísticas realizadas com os tratamentos.

4.4. COMPARAÇÃO DE PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE PAINÉIS DE LÂMINAS PARALELAS, COMPENSADO E MADEIRA SÓLIDA

Embora os compensados e painéis de lâminas paralelas apresentem tecnologia de produção semelhante, pode-se afirmar que são produtos com características, propriedades e usos distintos. A diferença entre eles não se limita ao posicionamento paralelo das lâminas, quando da montagem, mas também porque o principal uso dos painéis de lâminas paralelas ocorre em substituição a madeira serrada estrutural.

Entretanto, uma comparação entre os valores de propriedades dos dois produtos, bem como com a madeira serrada de *Pinus taeda L.*, foi realizada. O objetivo desta comparação foi demonstrar ou verificar as vantagens apresentadas por diversos pesquisadores em seus estudos sobre este produto.

Para realização destas comparações, foram fabricados compensados constituídos de 9 camadas de lâminas de 3,2mm de espessura, procedentes do tronco da base das árvores e montadas com lâminas dispostas aleatoriamente. A comparação das propriedades foi realizada com a classe de painéis estruturais de lâminas paralelas e procedimentos iguais aos aplicados aos compensados, exceto pelo posicionamento paralelo das lâminas.

Os valores das propriedades medidas são apresentados na Tabela 16. E os detalhes da análise estatística nos Anexos 30 a 41.

4.4.1. Análise da Massa Específica

A análise estatística demonstrou que a massa específica média dos compensados ($0,549\text{g/cm}^3$) foi maior que a dos painéis PLP ($0,528\text{g/cm}^3$). Devido a esta diferença as comparações entre propriedades foram realizadas com o ajuste dos valores médios considerando que os dois materiais apresentam massa específica média de $0,538\text{g/cm}^3$ (Anexo 31).

TABELA 16 - COMPARAÇÃO ENTRE AS PROPRIEDADES DE PAINÉIS DE LÂMINAS PARALELAS - PLP, COMPENSADOS E MADEIRA DE PINUS TAEDA L.

PROPRIEDADE	PAINÉIS DE LÂMINAS PARALELAS - PLP*	COMPENSADO 9 CAMADAS*	MADEIRA SÓLIDA**
Massa Específica (g/cm ³)	0,528 (3,5)	0,549 (2,9)	0,439 (9,0)
Módulo de Ruptura (kg/cm ²)	374 (24,5)	310 (23,5)	379 (28,0)
Módulo de Elasticidade (kg/cm ²)	56 883 (16,0)	60 456 (30,7)	73 200 (39,8)
Tensão no Limite Proporcional (kg/cm ²)	221 (21,3)	229 (24,0)	288 (29,2)
Teor de Umidade (%)	11,7 (3,7)	9,2 (11,7)	13,1 (13,8)
Número de Amostras (n)	18	26	18

* Toras da Base das Árvores, lâminas com 3,2mm, não classificadas. Valores entre parênteses referem-se ao coeficiente de variação.

** Madeira Sólida - Valores obtidos em estudos experimentais com a espécie, em laboratório.

4.4.2. Análise do Módulo de Elasticidade Aparente (MOEa)

Os valores médios observados de módulo de elasticidade aparente (MOEa), para os painéis PLP, não diferiram estatisticamente daqueles valores médios obtidos nas chapas compensadas. Esta tendência confirmou-se tanto para as médias ajustadas quanto para os valores reais medidos (Anexos 40 e 41).

Comparados com os valores obtidos em outros tratamentos, especialmente naquele em que se classificaram as lâminas, estes valores apresentaram-se baixos.

4.4.3. Análise do Módulo de Ruptura

Os valores médios ajustados da variável módulo de ruptura apresentaram diferenças estatísticas significativas. Foram superiores em painéis estruturais de lâminas paralelas, (387kgf/cm^2) comparadas com os compensados (301kgf/cm^2). Considerados os valores ajustados esta diferença foi 28% superior em PLP (Anexos 37 e 38).

4.4.4. Análise da Tensão no Limite Proporcional

Os valores médios observados em painéis estruturais de lâminas paralelas - PLP e chapas compensadas não diferiram estatisticamente, apesar dos valores numéricos observados (Anexos 34 e 35).

De modo geral, exceto pelos valores do módulo de ruptura, os dois produtos não apresentaram diferenças em valores de resistência. Porém, deve-se ressaltar que não é usual a produção, pela indústria, de chapas compensadas com espessuras de 2,78cm. Somente em condições muito específicas solicitadas pelo consumidor. Outro detalhe relevante, operacionalmente, a técnica de sobreposição de lâminas perpendicularmente umas as outras limita o comprimento dos painéis produzidos, o que na técnica de produção de painéis de lâminas paralelas não é problema, tendo em vista a existência de processos contínuos que permitem a obtenção de painéis estruturais nos comprimentos que se desejar.

Se obtidos em plantas convencionais de produção de compensados, os painéis estruturais de lâminas paralelas podem ser unidos por emendas de topo, emendas em cunha, emendas em dentes e outras para atingir-se os comprimentos desejados.

São apresentados na Tabela 16 valores médios de propriedades de resistência de madeira serrada de *Pinus taeda*, 18 anos de idade, com espessura de 2,5cm, obtidos em estudos preliminares com a espécie realizadas em laboratório. Como a procedência do material não pode ser verificada e mesmo, não constitui-se do mesmo material com os quais os compensados e PLP foram obtidos, exceto pela espécie, não foi possível estabelecer análises estatísticas para comparação das médias. Porém, pode-se observar a elevada dispersão dos resultados, obtidos com madeira serrada, através dos valores do coeficiente de variação. A vantagem dos produtos laminados reconstituídos, torna-se evidente. A dispersão dos defeitos naturais da madeira como nós, fissuras, rachaduras e transições de lenho são mais

distribuídas quando da montagem dos painéis, conferindo-lhes maior uniformidade em propriedades. Em alguns casos, quando as lâminas são selecionadas em classes de resistência superior, os valores das propriedades de resistência dos painéis podem superar as da madeira sólida equivalente. Este procedimento de seleção de lâminas pode ser aplicado tanto para obtenção de PLP como compensados.

A vantagem da classificação de lâminas pode ser verificada também nos valores médios das propriedades dos painéis, apresentados na Tabela 14. No caso dos painéis obtidos com lâminas classificadas, os valores de propriedades superam os valores obtidos para os compensados.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os resultados obtidos neste estudo permitem as seguintes conclusões:

- a) A classificação de lâminas em classes de qualidade, pela determinação não destrutiva do módulo de elasticidade dinâmico, baseado no princípio de aplicação de ondas sonoras, mostrou-se altamente eficaz, contribuindo para o aumento significativo das propriedades de resistência mecânica dos painéis de lâminas paralelas testados.
- b) O módulo de elasticidade dinâmico de lâminas extraídas da tora da base das árvores foi, em média, inferior aqueles relativos a segunda tora.
- c) A laminação de toras de *Pinus taeda* L. em espessuras distintas (3,2mm ou 4,2mm) e a consequente montagem de painéis de lâminas paralelas de 9 e 7 camadas, respectivamente, não resultou em diferenças entre as propriedades de resistência mecânica dos painéis, em termos de MOEa, MOR e TLP.
- d) O módulo de elasticidade dinâmico médio, medido em lâminas de *Pinus taeda* L., com 21 anos de idade, avaliadas pela técnica de aplicação de ondas acústicas, apresentou maior frequência observada na faixa de 60.000 a 100.000 kgf/cm², representando 58% das lâminas medidas.
- e) As lâminas obtidas de toras da base das árvores apresentaram, em média, maior massa específica e resultaram em painéis de maior valor médio de módulo de ruptura (MOR).
- f) As propriedades módulo de elasticidade aparente (MOEa), módulo de ruptura (MOR) e tensão no limite proporcional (TLP) dos painéis de lâminas paralelas - PLP foram superiores, em média, 23%, 11% e 13% respectivamente, para painéis produzidos de lâminas classificadas em classes de qualidade superior, quando comparados com PLP obtidos de lâminas não classificadas.

- g) O módulo de elasticidade aparente médio dos painéis foi inferior para aqueles produzidos de lâminas obtidas de toras da base das árvores, seguindo a mesma tendência observada para as lâminas.
- h) Previsões das propriedades finais de resistência à flexão estática, para os painéis de lâminas paralelas, podem ser realizadas preliminarmente a sua fabricação utilizando equações teóricas de predição e o procedimento de classificação das lâminas, baseados no método de determinação do módulo de elasticidade dinâmico.

Com base nos estudos e conclusões deste trabalho, recomenda-se:

- a) Implementar nas indústrias a utilização de alguma técnica de classificação preliminar de lâminas, não destrutiva, que contribua para maior controle do produto final de madeira laminada.
- b) Levar em consideração, na operação de laminação, o aspecto de que lâminas de primeira tora (toras da base) apresentam qualidade de lâminas superiores quando se deseja produzir painéis de elevada resistência.
- c) Avaliar, na produção de painéis laminados de madeira de *Pinus taeda* L., o uso de lâminas de maior espessura que resultam em menor número de linhas de cola e, conseqüentemente, em redução de volumes de adesivo a ser utilizado.
- d) Desenvolver estudos com outras espécies de *Pinus* existentes no país e mesmo de outras espécies, em continuidade aos estudos sobre produção de painéis estruturais de lâminas paralelas iniciados neste estudo.
- e) Desenvolver estudos de viabilidade econômica para produção comercial de painéis de lâminas paralelas, visando criar alternativas à indústria madeireira, à indústria da construção civil e aos consumidores potenciais.

- f) Estudar outras propriedades que não foram contempladas neste trabalho, tais como; estabilidade dimensional, inchamento em espessura, propriedades de resistência mecânica destes produtos no sentido perpendicular a grã, etc.

ANEXOS

ANEXO 1	VALORES MÉDIOS DE MÓDULO DE ELASTICIDADE APARENTE, MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO E MÓDULO DE ELASTICIDADE EFETIVO DOS PAINÉIS ESTRUTURAIS DE LÂMINAS PARALELAS	86
ANEXO 2	ANÁLISE DE VARIÂNCIA DA VARIÁVEL MASSA ESPECÍFICA DAS LÂMINAS	87
ANEXO 3	VALORES MÉDIOS DA MASSA ESPECÍFICA DAS LÂMINAS	87
ANEXO 4	TESTE DE MÉDIAS DA VARIÁVEL MASSA ESPECÍFICA DAS LÂMINAS, PARA O FATOR ESPESSURA DAS LÂMINAS.....	88
ANEXO 5	TESTE DE MÉDIAS DA VARIÁVEL MASSA ESPECÍFICA DAS LÂMINAS, PARA O FATOR POSIÇÃO DAS LÂMINAS.....	88
ANEXO 6	ANÁLISE DE COVARIÂNCIA DA VARIÁVEL MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO (MOEd) DAS LÂMINAS.....	89
ANEXO 7	VALORES MÉDIOS DE MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO (MOEd) DAS LÂMINAS	89
ANEXO 8	TESTE DE MÉDIAS DA VARIÁVEL MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO (MOEd), PARA O FATOR ESPESSURA DAS LÂMINAS..	90
ANEXO 9	TESTE DE MÉDIAS DA VARIÁVEL MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO (MOEd), PARA O FATOR POSIÇÃO DAS LÂMINAS	90
ANEXO 10	ANÁLISE DE VARIÂNCIA DA VARIÁVEL MASSA ESPECÍFICA DOS PAINÉIS DE LÂMINAS PARALELAS	91
ANEXO 11	VALORES MÉDIOS DA MASSA ESPECÍFICA DOS PAINÉIS DE LÂMINAS PARALELAS	92
ANEXO 12	TESTE DE MÉDIAS DA VARIÁVEL MASSA ESPECÍFICA DOS PAINÉIS DE LÂMINAS PARALELAS, PARA O FATOR POSIÇÃO DAS LÂMINAS	93
ANEXO 13	TESTE DE MÉDIAS DA VARIÁVEL MASSA ESPECÍFICA DOS PAINÉIS DE LÂMINAS PARALELAS, PARA O FATOR ESPESSURA DAS LÂMINAS.....	93

ANEXO 14	TESTE DE MÉDIAS DA VARIÁVEL MASSA ESPECÍFICA DOS PAINÉIS DE LÂMINAS PARALELAS, PARA O FATOR CLASSIFICAÇÃO DAS LÂMINAS.....	94
ANEXO 15	ANÁLISE DE COVARIÂNCIA DA VARIÁVEL MÓDULO DE RUPTURA (MOR) DOS PAINÉIS DE LÂMINAS PARALELAS.....	95
ANEXO 16	VALORES MÉDIOS AJUSTADOS DE MÓDULO DE RUPTURA (MOR) DOS PAINÉIS DE LÂMINAS PARALELAS.....	96
ANEXO 17	TESTE DE MÉDIAS AJUSTADAS DA VARIÁVEL MÓDULO DE RUPTURA (MOR) DOS PAINÉIS DE LÂMINAS PARALELAS, PARA O FATOR POSIÇÃO DAS LÂMINAS.....	97
ANEXO 18	TESTE DE MÉDIAS AJUSTADAS DA VARIÁVEL MÓDULO DE RUPTURA (MOR) DOS PAINÉIS DE LÂMINAS PARALELAS, PARA O FATOR ESPESSURA DAS LÂMINAS.....	97
ANEXO 19	TESTE DE MÉDIAS AJUSTADAS DA VARIÁVEL MÓDULO DE RUPTURA (MOR) DOS PAINÉIS DE LÂMINAS PARALELAS, PARA O FATOR CLASSIFICAÇÃO DAS LÂMINAS.....	98
ANEXO 20	ANÁLISE DE COVARIÂNCIA DA VARIÁVEL MÓDULO DE ELASTICIDADE APARENTE (MOEa) DOS PAINÉIS DE LÂMINAS PARALELAS.....	98
ANEXO 21	VALORES MÉDIOS AJUSTADOS DE MÓDULO DE ELASTICIDADE APARENTE (MOEa) DOS PAINÉIS DE LÂMINAS PARALELAS.....	99
ANEXO 22	TESTE DE MÉDIAS DA VARIÁVEL MÓDULO DE ELASTICIDADE APARENTE (MOEa) DOS PAINÉIS DE LÂMINAS PARALELAS, PARA O FATOR POSIÇÃO DAS LÂMINAS.....	100
ANEXO 23	TESTE DE MÉDIAS DA VARIÁVEL MÓDULO DE ELASTICIDADE APARENTE (MOEa) DOS PAINÉIS DE LÂMINAS PARALELAS, PARA O FATOR ESPESSURA DAS LÂMINAS.....	100
ANEXO 24	TESTE DE MÉDIAS DA VARIÁVEL MÓDULO DE ELASTICIDADE APARENTE (MOEa) DOS PAINÉIS DE LÂMINAS PARALELAS, PARA O FATOR CLASSIFICAÇÃO DAS LÂMINAS.....	101

ANEXO 25	ANÁLISE DE COVARIÂNCIA DA VARIÁVEL TENSÃO NO LIMITE PROPORCIONAL (TLP) DOS PAINÉIS DE LÂMINAS PARALELAS.....	102
ANEXO 26	VALORES MÉDIOS AJUSTADOS DE TENSÃO NO LIMITE PROPORCIONAL (TLP) DOS PAINÉIS DE LÂMINAS PARALELAS .	103
ANEXO 27	TESTE DE MÉDIAS AJUSTADAS DA VARIÁVEL TENSÃO NO LIMITE PROPORCIONAL (TLP) DOS PAINÉIS DE LÂMINAS PARALELAS, PARA O FATOR POSIÇÃO DAS LÂMINAS.....	104
ANEXO 28	TESTE DE MÉDIAS AJUSTADAS DA VARIÁVEL TENSÃO NO LIMITE PROPORCIONAL (TLP) DOS PAINÉIS DE LÂMINAS PARALELAS, PARA O FATOR ESPESSURA DAS LÂMINAS.....	104
ANEXO 29	TESTE DE MÉDIAS AJUSTADAS DA VARIÁVEL TENSÃO NO LIMITE PROPORCIONAL (TLP) DOS PAINÉIS DE LÂMINAS PARALELAS, PARA O FATOR CLASSIFICAÇÃO DAS LÂMINAS ..	105
ANEXO 30	ANÁLISE DE VARIÂNCIA DA VARIÁVEL MASSA ESPECÍFICA DOS PAINÉIS DE LÂMINAS PARALELAS (PLP) E COMPENSADOS (PLY).....	106
ANEXO 31	VALORES MÉDIOS DA MASSA ESPECÍFICA	106
ANEXO 32	TESTE DE MÉDIAS DA VARIÁVEL MASSA ESPECÍFICA.....	106
ANEXO 33	ANÁLISE DE COVARIÂNCIA DA VARIÁVEL TENSÃO NO LIMITE PROPORCIONAL DOS PAINÉIS DE LÂMINAS PARALELAS E COMPENSADOS.....	107
ANEXO 34	VALORES MÉDIOS DA TENSÃO NO LIMITE PROPORCIONAL	107
ANEXO 35	TESTE DE MÉDIAS DA VARIÁVEL TENSÃO NO LIMITE PROPORCIONAL.....	107
ANEXO 36	ANÁLISE DE COVARIÂNCIA DA VARIÁVEL MÓDULO DE RUPTURA (MOR) DOS PAINÉIS DE LÂMINAS PARALELAS E COMPENSADOS.....	108
ANEXO 37	VALORES MÉDIOS DO MÓDULO DE RUPTURA.....	108
ANEXO 38	TESTE DE MÉDIAS DA VARIÁVEL MÓDULO DE RUPTURA.....	108

ANEXO 39	ANÁLISE DE COVARIÂNCIA DA VARIÁVEL MÓDULO DE ELASTICIDADE APARENTE (MOEa) DOS PAINÉIS DE LÂMINAS PARALELAS E COMPENSADOS	109
ANEXO 40	VALORES MÉDIOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE APARENTE (MOEa)	109
ANEXO 41	TESTE DE MÉDIAS DA VARIÁVEL MÓDULO DE ELASTICIDADE	109

ANEXO 1 - VALORES MÉDIOS DE MÓDULO DE ELASTICIDADE APARENTE, MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO E MÓDULO DE ELASTICIDADE EFETIVO DOS PAINÉIS ESTRUTURAIS DE LÂMINAS PARALELAS

TRATA- MENTO	OBS.	PAINEL	MASSA ESPECÍFICA (g/cm ³)	MOR OBSERVADO (kgf/cm ²)	MOE APARENTE (kgf/cm ²)	MOEd DINÂMICO (kgf/cm ²)	MOE EFETIVO (kgf/cm ²)
	1	A21	0,583	602,08	101.975,54	117.755,41	109.601,2
	2	A22	0,627	508,76	105.026,20	140.039,83	109.998,6
1	3	A23	0,592	622,73	101.285,52	126.327,13	101.161,6
	4	A24	0,535	437,87	83.760,27	98.150,67	79.948,5
	5	A25	0,598	529,99	68.360,85	101.442,16	86.467,8
	6	A26	0,564	412,45	70.469,77	101.036,16	
	7	A41	0,533	496,34	89.526,01	94.169,16	
	8	A42	0,502	427,48	62.704,82	77.730,65	
2	9	A43	0,503	365,92	57.840,91	78.415,73	
	10	A44	0,528	438,62	54.291,91	83.085,20	
	11	A45	0,554	402,08	71.800,60	86.764,41	
	12	A46	0,490	295,41	53.892,86	67.462,53	
	13	B21	0,586	420,60	71.182,96	106.664,28	110.804,7
	14	B22	0,629	612,46	123.204,69	130.914,32	114.328,0
3	15	B23	0,597	577,95	98.095,46	111.467,36	90.016,8
	16	B24	0,566	414,96	95.216,30	115.136,34	84.345,1
	17	B25	0,602	510,86	105.359,73	120.715,13	
	18	B26	0,568	525,23	88.614,36	94.575,20	
	19	B42	0,505	342,40	48.970,67	62.043,71	46.446,4
	20	B43	0,513	251,68	43.966,21	66.773,05	73.860,7
4	21	B44	0,522	435,43	59.650,63	73.954,77	44.220,6
	22	B45	0,543	342,17	57.774,05	76.419,47	59.178,2
	23	B46	0,532	402,70	61.109,34	75.041,53	44.667,4
	24	C21	0,584	465,81	105.447,21	122.291,17	66.201,7
	25	C22	0,582	422,99	96.932,59	112.510,54	123.735,5
5	26	C23	0,538	474,52	88.227,03	106.475,69	107.176,7
	27	C24	0,567	418,25	103.621,16	111.524,66	
	28	C25	0,543	525,97	100.652,49	106.182,87	88.582,8
	29	C26	0,553	376,20	84.567,52	105.261,47	90.909,5
	30	C41	0,485	342,51	67.930,05	78.497,37	48.158,4
	31	C42	0,485	305,71	58.891,93	81.537,59	65.344,8
6	32	C43	0,504	237,00	50.631,57	79.967,02	60.398,9
	33	C44	0,509	309,11	49.383,66	84.338,59	46.819,0
	34	C45	0,502	178,45	52.834,23	80.997,77	61.520,9
	35	D11	0,544	240,91	79.536,38	116.670,59	99.141,4
	36	D12	0,526	346,14	86.676,65	99.890,55	87.439,2
7	37	D13	0,555	317,36	92.073,38	108.830,88	89.269,1
	38	D14	0,545	346,16	92.699,80	108.098,59	87.268,9
	39	D16	0,552	380,25	107.006,65	118.148,70	98.206,2
	40	D41	0,497	239,81	65.707,52	88.581,02	
	41	D42	0,519	358,31	56.914,58	91.459,66	
8	42	D43	0,511	279,92	73.983,56	89.943,50	
	43	D44	0,472	186,47	49.742,21	77.345,70	
	44	D46	0,520	321,61	87.604,87	101.647,10	

ANEXO 2 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA DA VARIÁVEL MASSA ESPECÍFICA DAS LÂMINAS

Causa da Variação	Soma de Quadrados	G.L.	Quadrado Médio	F	P
EFEITOS PRINCIPAIS					
A:Fator Espessura	,0126333	1	,0126333	6,827	,0093*
B:Fator Posição	,1168771	1	,1168771	63,164	,0000*
INTERAÇÕES					
AB	,0031760	1	,0031760	1,716	,1908
RESÍDUO	,8474694	458	,0018504		
TOTAL (CORRIGIDO)	1,0058260	461			

ANEXO 3 - VALORES MÉDIOS DA MASSA ESPECÍFICA DAS LÂMINAS

Variação	N	Média	Erro Padrão
MÉDIA GERAL	462	,4380495	,0021168
Fator Espessura			
3,2mm	306	,4325185	,0024616
4,2mm	156	,4435804	,0034443
Fator Posição			
BASE	237	,4548727	,0029831
TOPO	225	,4212262	,0030040
AB - INTERAÇÕES			
3,2mm BASE	160	,4521149	,0034007
3,2mm TOPO	146	,4129220	,0035600
4,2mm BASE	77	,4576305	,0049021
4,2mm TOPO	79	,4295304	,0048397

ANEXO 4 - TESTE DE MÉDIAS DA VARIÁVEL MASSA ESPECÍFICA DAS LÂMINAS,
PARA O FATOR ESPESSURA DAS LÂMINAS

```

-----
Método: 95 Porcento Tukey HSD
Variação      N      LS Média
-----
3,2mm         306     ,4325185
4,2mm         156     ,4435804
-----
contraste      diferença +/-  limites
3,2mm - 4,2mm  -,01106     ,00832 *
-----

```

* indica uma diferença estatística significativa.

ANEXO 5 - TESTE DE MÉDIAS DA VARIÁVEL MASSA ESPECÍFICA DAS LÂMINAS,
PARA O FATOR POSIÇÃO DAS LÂMINAS

```

-----
Método: 95 Porcento Tukey HSD
Variação      N      LS Média
-----
TOPO          225     ,4212262
BASE          237     ,4548727
-----
contraste      diferença +/-  limites
BASE - TOPO    0,03365     0,00832 *
-----

```

* indica uma diferença estatística significativa.

ANEXO 6 - ANÁLISE DE COVARIÂNCIA DA VARIÁVEL MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO (MOEd) DAS LÂMINAS

Causa da Variação	Soma de Quadrados	G.L.	Quadrado Médio	F	P
COVARIÁVEL					
Massa Específica	1,4642E0011	1	1,4642E0011	541,427	,0000*
EFEITOS PRINCIPAIS					
A:Fator Espessura	6,3263E0008	1	6,3263E0008	2,339	,1268
B:Fator Posição	3,3193E0010	1	3,3193E0010	122,736	,0000*
INTERAÇÕES					
AB	9,6372E0008	1	9,6372E0008	3,564	,0597
RESÍDUO	1,2359E0011	457	2,7044E0008		
TOTAL (CORRIGIDO)	2,7886E0011	461			

ANEXO 7- VALORES MÉDIOS DE MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO (MOEd) DAS LÂMINAS

Variação	N	Média	Erro Padrão
MÉDIA GERAL	462	79517,622	809,5582
Fator Espessura			
3,2mm	306	78270,713	944,1677
4,2mm	156	80764,530	1322,3435
Fator Posição			
BASE	237	69954,041	1185,3225
TOPO	225	89081,202	1181,5934
AB: INTERAÇÃO			
3,2mm BASE	160	67176,630	1328,6145
3,2mm TOPO	146	89364,796	1426,2045
4,2mm BASE	77	72731,453	1910,7142
4,2mm TOPO	79	88797,608	1854,7431

ANEXO 8- TESTE DE MÉDIAS DA VARIÁVEL MÓDULO DE ELASTICIDADE
DINÂMICO (MOEd), PARA O FATOR ESPESSURA DAS LÂMINAS

Método: 95 Porcento Tukey HSD

Variação	N	LS Média
3,2mm	306	78270,713
4,2mm	156	80764,530

contraste	diferença	+/-	limites
3,2mm - 4,2mm	-2493,82		3204,14

ANEXO 9 - TESTE DE MÉDIAS DA VARIÁVEL MÓDULO DE ELASTICIDADE
DINÂMICO (MOEd), PARA O FATOR POSIÇÃO DAS LÂMINAS

Método: 95 Porcento Tukey HSD

Variação	N	LS Média
BASE	237	69954,041
TOPO	225	89081,202

contraste	diferença	+/-	limites
BASE - TOPO	-19127,2		3392,76 *

* indica uma diferença estatística significativa.

ANEXO 10 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA DA VARIÁVEL MASSA ESPECÍFICA DOS
PAINÉIS DE LÂMINAS PARALELAS

Causa da Variação	Soma de Quadrados	G.L.	Quadrado Médio	F	p
EFEITOS PRINCIPAIS					
A: Posição	,0360258	1	,0360258	64,780	,0000*
B: Espessura	,0018975	1	,0018975	3,412	,0663
C: Classificação	,1637255	1	,1637255	294,402	,0000*
INTERAÇÕES					
AB	,0004655	1	,0004655	,837	,3712
AC	,0016672	1	,0016672	2,998	,0850
BC	,0023109	1	,0023109	4,155	,0429*
ABC	,0024450	1	,0024450	4,396	,0373*
RESIDUAL	,1051085	189	5,56130E-004		
TOTAL (CORRIGIDO)	,3114747	196			

ANEXO 11 - VALORES MÉDIOS DA MASSA ESPECÍFICA DOS PAINÉIS DE
LÂMINAS PARALELAS

Nível	N	Média	Erro Padrão
MÉDIA GERAL	197	,5414587	,0017171
A: Posição			
BASE	101	,5552791	,0024004
TOPO	96	,5276383	,0024560
B: Espessura			
3,2mm	111	,5382869	,0022657
4,2mm	86	,5446305	,0025808
C: Classificação			
CLASSIFICADA	111	,5709214	,0022535
ALEATÓRIA	86	,5119960	,0025915
AB			
3,2mm BASE	60	,5505364	,0030462
3,2mm TOPO	41	,5600219	,0037106
4,2mm BASE	51	,5260375	,0033548
4,2mm TOPO	45	,5292390	,0035879
AC			
BASE CLASSIF.	54	,5877149	,0032450
BASE ALEATÓRIA	47	,5228433	,0035381
TOPO CLASSIF.	57	,5541279	,0031279
TOPO ALEATÓRIA	39	,5011487	,0037874
BC			
3,2mm CLASSIF.	61	,5642494	,0030198
3,2mm ALEATÓRIA	50	,5123245	,0033786
4,2mm CLASSIF.	50	,5775934	,0033458
4,2mm ALEATÓRIA	36	,5116675	,0039304

ANEXO 12 - TESTE DE MÉDIAS DA VARIÁVEL MASSA ESPECÍFICA DOS PAINÉIS DE LÂMINAS PARALELAS, PARA O FATOR POSIÇÃO DAS LÂMINAS

```

-----
Método: 95 Porcento Tukey HSD
Nível          N          LS Média
-----
  TOPO          96          ,5276383
  BASE          101          ,5552791
-----
contraste diferença +/- limites
BASE - TOPO    0,02764      0,00677 *
-----
* indica uma diferença estatística significativa.

```

ANEXO 13 - TESTE DE MÉDIAS DA VARIÁVEL MASSA ESPECÍFICA DOS PAINÉIS DE LÂMINAS PARALELAS, PARA O FATOR ESPESSURA DAS LÂMINAS

```

-----
Método: 95 Porcento Tukey HSD
Nível          N          LS Média
-----
  3,2mm         111          ,5382869
  4,2mm          86          ,5446305
-----
contraste diferença +/- limites
3,2mm - 4,2mm -0,00634      0,00677
-----

```

ANEXO 14 - TESTE DE MÉDIAS DA VARIÁVEL MASSA ESPECÍFICA DOS
PAINÉIS DE LÂMINAS PARALELAS, PARA O FATOR
CLASSIFICAÇÃO DAS LÂMINAS

Método: 95 Porcento Tukey HSD

Nível	N	LS Média
-------	---	----------

ALEATÓRIA	86	,5119960
-----------	----	----------

CLASSIF.	111	,5709214
----------	-----	----------

contraste diferença +/- limites

1 - 2	0,05893	0,00677 *
-------	---------	-----------

* indica uma diferença estatística significativa.

ANEXO 15 - ANÁLISE DE COVARIÂNCIA DA VARIÁVEL MÓDULO DE RUPTURA
(MOR) DOS PAINÉIS DE LÂMINAS PARALELAS

Causa da Variação	Soma de Quadrados	G.L.	Quadrado Médio	F	P
COVARIÁVEL					
Massa Específica	196558,32	1	196558,32	25,405	,0000*
EFEITOS PRINCIPAIS					
A: Posição	177099,76	1	177099,76	22,890	,0000*
B: Espessura	3221,58	1	3221,58	,416	,5264
C: Classificação	31431,05	1	31431,05	4,062	,0453*
INTERAÇÕES					
AB	59857,342	1	59857,342	7,736	,0060*
AC	300,085	1	300,085	,039	,8462
BC	10852,034	1	10852,034	1,403	,2378
ABC	425,759	1	425,759	,055	,8173
RESÍDUO	1454572,2	188	7737,086		
TOTAL (CORRIGIDO)	3018083,8	196			

ANEXO 16 - VALORES MÉDIOS AJUSTADOS DE MÓDULO DE RUPTURA (MOR)
DOS PAINÉIS DE LÂMINAS PARALELAS

NÍVEL	N	Média	Erro Padrão
MÉDIA GERAL	197	404,46442	6,471474
A: Posição			
BASE	101	439,97198	9,387855
TOPO	96	368,95685	10,285427
B: Espessura			
3,2mm	111	400,29444	8,637955
4,2mm	86	408,63440	9,626462
C: Classificação			
CLASSIF.	111	425,10952	10,981448
ALEATÓRIA	86	383,81931	13,153139
AB			
1 1	60	453,65589	11,465358
1 2	41	426,28808	14,437705
2 1	51	346,93298	13,516797
2 2	45	390,98072	14,039053
AC			
1 1	54	461,88841	16,780674
1 2	47	418,05556	14,487500
2 1	57	388,33064	11,933903
2 2	39	349,58306	18,447447
BC			
1 1	61	413,27136	12,429939
1 2	50	387,31752	15,388261
2 1	50	436,94768	15,314690
2 2	36	380,32111	17,207283

ANEXO 17 - TESTE DE MÉDIAS AJUSTADAS DA VARIÁVEL MÓDULO DE RUPTURA (MOR) DOS PAINÉIS DE LÂMINAS PARALELAS, PARA O FATOR POSIÇÃO DAS LÂMINAS

Método: 95 Porcento Tukey HSD			
Nível	N	LS Média	

TOPO	96	368,95685	
BASE	101	439,97198	

contraste	diferença	+/-	limites
1 - 2	71,0151		29,2806 *

* indica uma diferença estatística significativa.

ANEXO 18 - TESTE DE MÉDIAS AJUSTADAS DA VARIÁVEL MÓDULO DE RUPTURA (MOR) DOS PAINÉIS DE LÂMINAS PARALELAS, PARA O FATOR ESPESSURA DAS LÂMINAS

Método: 95 Porcento Tukey HSD			
NÍVEL	N	LS Média	

3,2mm	111	400,29444	
4,2mm	86	408,63440	

contraste	diferença	+/-	limites
1 - 2	-8,33996		25,4957

ANEXO 19 - TESTE DE MÉDIAS AJUSTADAS DA VARIÁVEL MÓDULO DE RUPTURA (MOR) DOS PAINÉIS DE LÂMINAS PARALELAS, PARA O FATOR CLASSIFICAÇÃO DAS LÂMINAS

Método: 95 Porcento Tukey HSD			
NÍVEL	N	LS Média	

ALEATÓRIA	86	383,81931	
CLASSIF.	111	425,10952	

contraste	diferença	+/-	limites
1 - 2	41,2902	40,4115 *	

* indica uma diferença estatística significativa.

ANEXO 20 - ANÁLISE DE COVARIÂNCIA DA VARIÁVEL MÓDULO DE ELASTICIDADE APARENTE (MOEa) DOS PAINÉIS DE LÂMINAS PARALELAS

Causa da Variação	Soma da Quadrados	G.L.	Quadrado Médio	F	P

COVARIÁVEL					
Massa Específica	8,8223E0009	1	8,8223E0009	50,067	,0000*
EFEITOS PRINCIPAIS					
A: Posição	3,6851E0009	1	3,6851E0009	20,914	,0000*
B: Espessura	6,2368E0008	1	6,2368E0008	3,539	,0615
C: Classificação	4,8103E0009	1	4,8103E0009	27,299	,0000*
INTERAÇÕES					
AB	6,6515E0007	1	6,6515E0007	,377	,5463
AC	3,2513E0008	1	3,2513E0008	1,845	,1760
BC	9,1198E0008	1	9,1198E0008	5,176	,0240*
ABC	4,6071E0008	1	4,6071E0008	2,615	,1076
RESÍDUO	3,3127E0010	188	1,7621E0008		

TOTAL (CORRIGIDO)	9,5477E0010	196			

ANEXO 21 - VALORES MÉDIOS AJUSTADOS DE MÓDULO DE ELASTICIDADE APARENTE (MOEa) DOS PAINÉIS DE LÂMINAS PARALELAS

NÍVEL	N	Média	Erro Padrão
MÉDIA GERAL	197	78781,695	976,6260
A: Posição			
BASE	101	73659,696	1416,7442
TOPO	96	83903,693	1552,1989
B: Espessura			
3,2mm	111	80616,464	1303,5750
4,2mm	86	76946,925	1452,7529
C: Classificação			
CLASSIF.	111	86858,210	1657,2372
ALEATÓRIA	86	70705,179	1984,9725
AB			
1 1	60	74899,303	1730,2653
1 2	41	72420,088	2178,8294
2 1	51	86333,624	2039,8530
2 2	45	81473,763	2118,6678
AC			
1 1	54	80412,904	2532,4127
1 2	47	66906,487	2186,3441
2 1	57	93303,516	1800,9746
2 2	39	74503,870	2783,9494
BC			
1 1	61	86470,025	1875,8326
1 2	50	74762,902	2322,2802
2 1	50	87246,396	2311,1773
2 2	36	66647,455	2596,7932

ANEXO 22- TESTE DE MÉDIAS DA VARIÁVEL MÓDULO DE ELASTICIDADE APARENTE (MOEa) DOS PAINÉIS DE LÂMINAS PARALELAS, PARA O FATOR POSIÇÃO DAS LÂMINAS

 Método: 95 Porcento Tukey HSD

N LS Média

 BASE 101 73659,696

TOPO 96 83903,693

 contraste diferença +/- limites
 1 - 2 -10244,0 4418,80 *

 * indica uma diferença estatística significativa.

ANEXO 23- TESTE DE MÉDIAS DA VARIÁVEL MÓDULO DE ELASTICIDADE APARENTE (MOEa) DOS PAINÉIS DE LÂMINAS PARALELAS, PARA O FATOR ESPESSURA DAS LÂMINAS

 Método: 95 Porcento Tukey HSD

NÍVEL N LS Média

 3,2mm 86 76946,925

4,2mm 111 80616,464

 contraste diferença +/- limites
 1 - 2 3669,54 3847,62

ANEXO 24- TESTE DE MÉDIAS DA VARIÁVEL MÓDULO DE ELASTICIDADE APARENTE (MOEa) DOS PAINÉIS DE LÂMINAS PARALELAS, PARA O FATOR CLASSIFICAÇÃO DAS LÂMINAS

```

-----
Método: 95 Porcento Tukey HSD
NÍVEL          N          LS Média
-----
ALEATÓRIA  86          70705,179
CLASSIF.   111          86858,210
-----
contraste  diferença +/-  limites
1 - 2          16153,0      6098,60 *
-----
* indica uma diferença estatística significativa.

```

ANEXO 25- ANÁLISE DE COVARIÂNCIA DA VARIÁVEL TENSÃO NO LIMITE
PROPORCIONAL (TLP) DOS PAINÉIS DE LÂMINAS PARALELAS

Causa da Variação	Soma da Quadrados	G.L.	Quadrado Médio	F	P
COVARIÁVEL					
Massa Específica	129990,54	1	129990,54	29,085	,0000*
EFEITOS PRINCIPAIS					
A: Posição	1405,901	1	1405,901	,315	,5815
B: Espessura	7215,556	1	7215,556	1,614	,2054
C: Classificação	22314,307	1	22314,307	4,993	,0266*
INTERAÇÕES					
AB	60910,902	1	60910,902	13,629	,0003*
AC	3637,529	1	3637,529	,814	,3778
BC	19257,958	1	19257,958	4,309	,0393*
ABC	42,816	1	42,816	,010	,9232
RESÍDUO	840232,40	188	4469,3213		
TOTAL (CORRIGIDO)	1606684,1	196			

ANEXO 26 - VALORES MÉDIOS AJUSTADOS DE TENSÃO NO LIMITE
PROPORCIONAL (TLP) DOS PAINÉIS DE LÂMINAS PARALELAS

NÍVEL	N	Média	Erro Padrão
MÉDIA GERAL	197	292,65248	4,918529
A: Posição			
BASE	101	295,81614	7,135073
TOPO	96	289,48883	7,817257
B: Espessura			
4,2mm	111	298,89320	6,565125
3,2mm	86	286,41177	7,316422
C: Classificação			
CLASSIF.	111	310,04768	8,346256
ALEATÓRIA	86	275,25728	9,996811
AB			
1 1	60	320,06718	8,714043
1 2	41	271,56510	10,973123
2 1	51	277,71922	10,273203
2 2	45	301,25844	10,670134
AC			
1 1	54	317,63758	12,753855
1 2	47	273,99470	11,010969
2 1	57	302,45778	9,070152
2 2	39	276,51987	14,020656
BC			
1 1	61	306,07331	9,447156
1 2	50	291,71309	11,695576
2 1	50	314,02205	11,639659
2 2	36	258,80148	13,078091

ANEXO 27 - TESTE DE MÉDIAS AJUSTADAS DA VARIÁVEL TENSÃO NO LIMITE PROPORCIONAL (TLP) DOS PAINÉIS DE LÂMINAS PARALELAS, PARA O FATOR POSIÇÃO DAS LÂMINAS

 Método: 95 Porcento Tukey HSD

NÍVEL	N	LS Média
TOPO	96	289,48883
BASE	101	295,81614

 contraste diferença +/- limites

1 - 2	6,32731		22,2542
-------	---------	--	---------

ANEXO 28 - TESTE DE MÉDIAS AJUSTADAS DA VARIÁVEL TENSÃO NO LIMITE PROPORCIONAL (TLP) DOS PAINÉIS DE LÂMINAS PARALELAS, PARA O FATOR ESPESSURA DAS LÂMINAS

 Método: 95 Porcento Tukey HSD

NÍVEL	N	LS Média
3,2mm	86	286,41177
4,2mm	111	298,89320

 contraste diferença +/- limites

1 - 2	12,4814		19,3776
-------	---------	--	---------

ANEXO 29 - TESTE DE MÉDIAS AJUSTADAS DA VARIÁVEL TENSÃO
NO LIMITE PROPORCIONAL (TLP) DOS PAINÉIS DE LÂMINAS
PARALELAS, PARA O FATOR CLASSIFICAÇÃO DAS LÂMINAS

Método: 95 Porcento Tukey HSD

NÍVEL	N	LS Média
-------	---	----------

ALEATÓRIA	86	275,25728
-----------	----	-----------

CLASSIF.	111	310,04768
----------	-----	-----------

contraste diferença +/- limites

1 - 2	34,7904	30,7141 *
-------	---------	-----------

* indica uma diferença estatística significativa.

ANEXO 30 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA DA VARIÁVEL MASSA ESPECÍFICA DOS
PAINÉIS DE LÂMINAS PARALELAS (PLP) E COMPENSADOS (PLY)

Causa da Variação	Soma de Quadrados	G.L.	Quadrado Médio	F	P
EFEITOS PRINCIPAIS					
A: PLYPLP. TRATAM	,0050331	1	,0050331	17,566	,0001*
RESÍDUO	,0120338	42	2,86519E-004		
TOTAL (CORRIGIDO)	,0170669	43			

ANEXO 31 - VALORES MÉDIOS DA MASSA ESPECÍFICA

Nível	N	Média	Erro Padrão
MÉDIA GERAL	44	,5385628	,0025951
A: PLYPLP. TRATAM			
PLY	26	,5494393	,0033196
PLP	18	,5276862	,0039897

ANEXO 32 - TESTE DE MÉDIAS DA VARIÁVEL MASSA ESPECÍFICA

Método: 95 Porcento Tukey HSD			
Nível	N	LS Média	
PLP	18	,5276862	
PLY	26	,5494393	
contraste		diferença +/-	limites
PLY - PLP		0,02175	0,01048 *

* indica uma diferença estatística significativa.

ANEXO 33 - ANÁLISE DE COVARIÂNCIA DA VARIÁVEL TENSÃO NO LIMITE
 PROPORCIONAL DOS PAINÉIS DE LÂMINAS PARALELAS E
 COMPENSADOS

Causa da Variação	Soma de Quadrados	G.L.	Quadrado Médio	F	P
COVARIÁVEL					
PLYPLP.DENSIDAD	7933,2155	1	7933,2155	3,077	,0869
EFEITOS PRINCIPAIS					
A: PLYPLP. TRATAM	629,86754	1	629,86754	,244	,6290
RESÍDUO	105708,07	41	2578,2456		
TOTAL (CORRIGIDO)	114409,36	43			

ANEXO 34 - VALORES MÉDIOS DA TENSÃO NO LIMITE PROPORCIONAL

Nível	N	Média	Erro Padrão
MÉDIA GERAL	44	226,75010	7,838218
A: PLYPLP. TRATAM			
PLY	26	222,16791	10,776373
PLP	18	231,33230	13,365478

ANEXO 35 - TESTE DE MÉDIAS DA VARIÁVEL TENSÃO NO LIMITE
 PROPORCIONAL

Método: 95 Porcento Tukey HSD			
Nível	N	LS Média	
PLY	26	222,16791	
PLP	18	231,33230	
contraste	diferença	+/-	limites
PLY - PLP	-9,16440		37,4530

ANEXO 36 - ANÁLISE DE COVARIÂNCIA DA VARIÁVEL MÓDULO DE RUPTURA
(MOR) DOS PAINÉIS DE LÂMINAS PARALELAS E COMPENSADOS

Causa da Variação	Soma de Quadrados	G.L.	Quadrado Médio	F	P
COVARIÁVEL					
PLYPLP.DENSIDAD	11649,383	1	11649,383	1,801	,1870
EFEITOS PRINCIPAIS					
A: PLYPLP. TRATAM	55521,371	1	55521,371	8,583	,0055*
RESÍDUO	265227,72	41	6468,9687		
TOTAL (CORRIGIDO)	321317,89	43			

ANEXO 37 - VALORES MÉDIOS DO MÓDULO DE RUPTURA

Nível	N	Média	Erro Padrão
MÉDIA GERAL	44	344,34434	12,415743
A: PLYPLP. TRATAM			
PLY	26	301,32346	17,069783
PLP	18	387,36523	21,170927

ANEXO 38 - TESTE DE MÉDIAS DA VARIÁVEL MÓDULO DE RUPTURA

Método: 95 Porcento Tukey HSD			
Nível	N	LS Média	
PLY	26	301,32346	
PLP	18	387,36523	
contraste	diferença	+/-	limites
PLY - PLP	-86,0418		59,3256 *

* indica uma diferença estatística significativa.

ANEXO 39 - ANÁLISE DE COVARIÂNCIA DA VARIÁVEL MÓDULO DE ELASTICIDADE APARENTE (MOEa) DOS PAINÉIS DE LÂMINAS PARALELAS E COMPENSADOS

Causa da Variação	Soma de Quadrados	G.L.	Quadrado Médio	F	P
COVARIÁVEL					
PLYPLP.DENSIDAD	2,3412E0009	1	2,3412E0009	12,486	,0010*
EFEITOS PRINCIPAIS					
A: PLYPLP. TRATAM	2,7194E0008	1	2,7194E0008	1,450	,2354
RESÍDUO	7,6880E0009	41	1,8751E0008		
TOTAL (CORRIGIDO)	1,0165E0010	43			

ANEXO 40 - VALORES MÉDIOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE APARENTE (MOEa)

Nível	N	Média	Erro Padrão
MÉDIA GERAL	44	59542,054	2113,8308
A: PLYPLP. TRATAM			
PLY	26	56531,225	2906,2001
PLP	18	62552,884	3604,4365

ANEXO 41 - TESTE DE MÉDIAS DA VARIÁVEL MÓDULO DE ELASTICIDADE

Método: 95 Porcento Tukey HSD			
Nível	N	LS Média	
PLY	26	56531,225	
PLP	18	62552,884	
contraste	diferença	+/-	limites
PLY - PLP	-6021,66		10100,4

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM . **Annual Book of ASTM Standards**. Philadelphia. Section 4 Construction. Volume 04.09 – Wood. ASTM Designation D 198. Standard Methods of Static Tests of Lumber in Structural Sizes.1994a.
- 2 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM . **Annual Book of ASTM Standards**. Philadelphia. Section 4 Construction. Volume 04.09 – Wood. ASTM Designation D 2395. Test Methods for Specific Gravity of Wood and Wood-Base Materials.1994b.
- 3 BENDTSEN, B.A. Properties of wood from improved and intensively managed trees. In: **ECONOMICS & FINANCIAL MANAGEMENT AND TIMBER PRODUCTION TECHNICAL COMMITTEES OF THE FOREST PRODUCTS RESEARCH SOCIETY. Proceedings of the Economics & Financial Management and Timber Production Technical Committees of The Forest Products Research Society**. Atlanta, Georgia. No. p.78-21. 1978.
- 4 BETHGE K. & MATTHECK C. Visual tree assessment and related testing methods. In: **INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NONDESTRUCTIVE TESTING OF WOOD**. (9.:1994: Madison). **Proceedings of the Ninth International Symposium on Nondestructive Testing of Wood**. Forest Products Society. Madison, Wisconsin,1994. p. 176-182.
- 5 BODIG, J.; FYIE, J. Performance requirements for exterior laminated veneer lumber. **For. Prod. J.**, Madison, v.36, n.2, p. 49-54, 1986.
- 6 BODIG, J.; JAYNE, B.A **Mechanics of wood and wood composites**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1982. 711 p.
- 7 BOHLEN, J.C. LVL laminated-veneer lumber: Development and economics. **For. Prod. J.**, Madison, v.22, n.1, p.18-26, 1972.
- 8 BOHLEN, J.C. Tensile strength of Douglas-fir laminated veneer lumber. **For. Prod. J.**, Madison, v.24, n.1, p.54-58, 1974.
- 9 BOHLEN, J.C. Shear strength of Douglas-fir laminated veneer lumber. **For. Prod. J.**, Madison, v.25, n.2, p.16-23, 1975.
- 10 BOSTRÖM, L. A comparison between four different timber strength grading machines. In: **INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NONDESTRUCTIVE TESTING OF WOOD**.(9.:1994: Madison). **Proceedings of the Ninth International Symposium on Nondestructive Testing of Wood**. Forest Products Society. Madison, Wisconsin, 1994. paginas 157-167.

- 11 BOYD, C.W. et al. Wood for structural and architectural purposes. **Wood and Fiber**. V. 8, n. 1, p. 3-72, 1976.
- 12 BOZHANG, S.; ZHIYONG, C. Nondestructive evaluation of full-sized particleboard panels using the vibration technique. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NONDESTRUCTIVE TESTING OF WOOD. (9.:1994: Madison). **Proceedings of the Ninth International Symposium on Nondestructive Testing of Wood**. Forest Products Society. Madison, Wisconsin, 1994. p. 117-122.
- 13 BRAUN, M.O e MOODY, R.C. Bending strength of small glulam beams with a laminated veneer tension lamination. **For. Prod. J.**, Madison, v.27, n.11, p.46-51, 1977.
- 14 CARRASCO, E. V. **Resistência, elasticidade e distribuição de tensões nas vigas retas de madeira laminada colada (MLC)**. São Carlos, 1989. 322f. Tese. (Doutorado. EESC) - Universidade de São Paulo.
- 15 CHA, J.K.; PEARSON, R.G. Stress analysis and prediction in 3-layer laminated veneer lumber: response to crack and grain angle. **Wood and Fiber Science**. v.26, n. 1, p.97-106, 1994.
- 16 CHUI, Y.H.; SCHNEIDER, M.H.; ZHANG, H.J. Effects of resin impregnation and process parameters on some properties of Poplar LVL. **For. Prod. J.**, Madison, v.44, n.7/8, p.74-78, 1994.
- 17 DUNLOP, J.I. Testing of poles by using acoustic pulse method. **Wood Science and Technology**. v. 15, n. 4, p. 301-310, 1981.
- 18 ECKELMAN, C.A Potential uses of laminated veneer lumber in furniture. **For. Prod. J.**, Madison, v.43, n.4, p.19-24, 1993.
- 19 FOREST PRODUCTS LABORATORY - **Wood handbook - wood as an engineering material**. Washington: US Department of Agriculture, 1987. 466p.
- 20 GALLIGAN, W. L. A status report nondestructive testing in wood. **For. Prod. J.**, Madison, v.14, n.5, p.221-227, 1964.
- 21 GREEN, D. W.; SHELLEY, B.E. **Guidelines for assigning allowable properties to mechanically graded foreign species**. Madison: Forest Products Laboratory and West Coast Lumber Inspection Bureau, 1993. 9p.
- 22 GÖRLACHER, R. Ein neues Meßverfahren zur Bestimmung des Elastizitätsmodulus von Holz. **Holz als Roh-und Werkstoff**. v. 42, n.6, p. 219-222, 1984.
- 23 GUSS, L.M. Engineered wood products: The future is bright. **For. Prod. J.**, Madison, v.45, n.7/8, p.17-24, 1995.

- 24 HARPOLE, G.B.; AUBRY, L.W. Economic feasibility of process for high-yield laminated structural products. **U.S.D.A. Forest Service. Research Paper, FPL 285**, Madison Wisconsin, 1977. 22p.
- 25 HARRIS, J.M. Effect of rapid growth on wood processing. In: IUFRO WORLD CONGRESS (17.:1981: Japan). **Proceedings of the 17 Iufro world congress**, 1981. p117-125
- 26 HEARMON, R.F.S. Theory of the vibration testing of wood. **For. Prod. J.**, Madison, v.16,n.8, p. 29-40, 1966.
- 27 HESTERMAN, N.D.; GORMAN, T. M. Mechanical properties of laminated veneer lumber made from interior Douglas-fir and Lodgepole Pine. **For. Prod. J.**, Madison, v.42, n.11/12, p.69-173, 1992.
- 28 HILBRAND, H.C.; MILLER, D.G. Machine grading - theory and practice. Part 1. **For. Prod. J.**, Madison, v.16, n.11, p.28-34, 1966a.
- 29 HILBRAND, H.C.; MILLER, D.G. Machine grading - theory and practice. Part 2. **For. Prod. J.**, Madison, v.16, n.12, p.36-40. 1966b.
- 30 HOOVER, W.L. et al. Material design factors for hardwood laminated-veneer-lumber. **For. Prod. J.**, Madison, v.37, n.9, p.15-23, 1987a.
- 31 HOOVER, W.L. et al. Markets for hardwood laminated-veneer-lumber. **For. Prod. J.**, Madison, v.37, n.10, p.57-62, 1987b.
- 32 HOOVER, W.L. et al. Design and specification of hardwood laminated-veneer-lumber for furniture applications. **For. Prod. J.**, Madison, v.38, n.1, p.31-34, 1988.
- 33 HOYLE, R.J. Background to machine stress grading. **For. Prod. J.**, Madison, v.18, n.4, p.87-97, 1968.
- 34 IWAKIRI, S. **Classificação de madeiras tropicais através do método mecânico não destrutivo**. Curitiba. 1982. 91 f. Dissertação, (Mestrado em Ciências Florestais)-Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.
- 35 JOKERST, R.W. Feasibility of producing a high-yield laminated structural product : residual heat of drying accelerates adhesives cure. **U.S. Forest Products Laboratory. Research Paper, FPL-179**, Madison, 1972.
- 36 JOKERST, R.W. Preheating veneer reduces press time in phenolic-bonded PLV. **For. Prod. J.**, Madison, v.34, n.2, p.47-50, 1984.
- 37 JUNG, J. Properties of parallel laminated veneer from stress-wave-tested veneers. **For. Prod. J.**, Madison, v.32, n.7, p.30-35, 1982.

- 38 JUNG, J.; DAY, J. Strength of fasteners in parallel-laminated veneer. **U.S. Forest Products Laboratory. Research Paper, FPL-389**, Madison, 1981.
- 39 JUNG, J.; MURPHY, J.F. An investigation of the fracture of butt joints in parallel-laminated veneer. **Wood and Fiber Science**, v.15, n. 2, p.116-134, 1983.
- 40 KIMBALL, K.E. Accelerated methods of drying thick-sliced and thin-sawed Loblolly pine. **For. Prod. J.**, Madison, v.18, n.1, p.31-38, 1968.
- 41 KIMMEL, J.D. et al. Characteristics of creosote-treated LVL materials. **For. Prod. J.**, Madison, v.44, n.5, p.49-53, 1994.
- 42 KLEMAREWSKI, A; ANNET, D.M. Benefits of radio frequency gluing of laminated veneer lumber. In: **INTERNATIONAL PARTICLEBOARD/COMPOSITE MATERIALS SYMPOSIUM. (29.:1995: Pullman, WA) Proceedings of the twenty-ninth international particleboard/composite materials symposium**, Washington: Washington State University.1995. p. 143-150.
- 43 KOCH, P. Strength of beams with laminae located according to stiffness. **For. Prod. J.**, Madison, v.14, n.10, p.456-460, 1964a.
- 44 KOCH, P. Beams from boltwood: A feasibility study. **For. Prod. J.**, Madison, v.14, n.11, p.497- 500, 1964b.
- 45 KOCH, P. Location of laminae by elastic modulus may permit manufacture of very strong beams from rotary-cut southern pine veneer. **U.S. Forest Service. Research Paper**, Louisiana, **SO-30**, 1967. 12p.
- 46 KOCH, P. Wood versus nonwood materials in U.S. residential construction: some energy-related global implications. **For. Prod. J.**, Madison, v.42, n. 5, p. 31-42, May. 1992.
- 47 KOCH, P. Structural lumber laminated from ¼ inch rotary- peeled southern pine veneer. **For. Prod. J.**, Madison, v.23, n.7, p.17-25, 1973.
- 48 KOCH, P.; WOODSON, G.E. Laminating butt-jointed, log-run southern pine veneers into long beams of uniform high strength. **For. Prod. J.**, Madison, v.18, n.10, p.45-51, 1968.
- 49 KOLLMANN, F.F.P.; CÔTÉ JR., W.A. **Principles of wood science and technology: solid wood**. Berlin: Springer-Verlag, 1968. 562p.
- 50 KRETSCHMANN, D. E. et al. Effect of various proportions of juvenile wood on laminated veneer lumber. **USDA. Forest Service. Research Paper, FPL-521**, Madison, p. 1-31, 1993.

- 51 KUNESH, R. H. Micro=Lam structural laminated veneer lumber. **For. Prod. J.**, Madison, v.28, n.7, p.41-44, 1978.
- 52 LARA PALMA, H. A **Determinação de parâmetros elásticos e de resistência e a influência da madeira nas propriedades de compensados de *Pinus elliottii* Engelm. e *Pinus taeda* L.** Curitiba, 1994, 167 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais)- Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.
- 53 LAUFENBERG, T. Exposure effect upon performance of laminated veneer lumber and glulam materials. **For. Prod. J.**, Madison, v.32, n.5, p.42-48, 1982.
- 54 LAUFENBERG, T.L. Parallel-laminated veneer: processing and performance research review. **For. Prod. J.**, Madison, v.33, n.9, p.21-28, 1983.
- 55 LEI, Y.; WILSON, J. B. Fracture toughness of parallel-laminated veneer. **For. Prod. J.**, Madison, v.29, n.8, p.28-32, 1979.
- 56 LEICESTER, R.H.; BUNKER, P.C. Fracture at butt joints in laminated pine. **For. Prod. J.**, Madison, v.19, n.2, p.59-60, 1969.
- 57 LEMASTER, R. L.; BIERNACKI, J.M.; BEALL, F.C. The feasibility of using acousto-ultrasonics to detect decay in utility poles. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NONDESTRUCTIVE TESTING OF WOOD (9.:1994: Madison). **Proceedings of the Ninth International Symposium on Nondestructive Testing of Wood**, Madison, Wisconsin: Washington State University, 1994. p. 84-91.
- 58 LOEHNERTZ, S.P. Cost comparison of two processes for laminating thick veneer. **For. Prod. J.**, Madison, v.33, n.11/12, p.57-60, 1983.
- 59 LUCAS, F. C. **Estudo da influência do teor de umidade e da massa específica aparente sobre a resistência, e a avaliação de algumas características visuais como indicadoras da qualidade das madeiras de *Pinus elliottii* var. *elliottii* Engelm e *Pinus taeda* L.** Curitiba, 1997.128f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Setor de Ciências Agrárias - Universidade Federal do Paraná.
- 60 MALONEY, T. M. The family of wood composite materials. **For. Prod. J.**, Madison, v.46, n.2, p.19-26, 1996.
- 61 METRIGUARD INC. Metriguard Model 239A Stress Wave Timer. Manual care and instructions, theory and data reduction. Pullman, 1997.
- 62 MOODY, R.C. Tensile strength of lumber laminated from 1/8-inch thick veneers. U.S. **Forest Products Laboratory. Research Paper FPL-181**, 1972.

- 63 MOODY, R.C.; PETERS, C.C. Feasibility of producing a high-yield laminated structural product; strength properties of rotary knife-cut laminated southern pine. **U.S. Forest Products Laboratory. Research Paper FPL-178**, 1972.
- 64 MUÑIZ, G. I. **Caracterização e desenvolvimento de modelos para estimar as propriedades e o comportamento na secagem da madeira de *Pinus elliottii* Engelm. e *Pinus taeda* L.** Curitiba, 1993, 236 f. Tese, (Doutorado em Ciências Florestais) Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.
- 65 MURPHEY, W.K.; DRASHER, C.L.; WOODRUFF, D.V. Mechanized properties of small laminated beams utilizing slicewood. **For. Prod. J.**, Madison, v.17, n.3, p.37-40, 1967.
- 66 PARKER, H. **Simplified design of structural wood**. New York: Willey, 1979. 269p.
- 67 PEASE, D. A. Panels: products, applications and production trends: A Special Report From: Wood Technology. Miller Freeman, 1994. 254p.
- 68 PELLERIN, R.F. A vibrational approach to nondestructive testing of structural lumber. **For. Prod. J.**, Madison, v.15, n.3, p.93-101, 1965.
- 69 PETERSON, K.R. The role of nondestructive evaluation in assuring the wise use of our timber resource. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NONDESTRUCTIVE TESTING OF WOOD.(9.:1994: Madison). **Proceedings of the Ninth International Symposium on Nondestructive Testing of Wood**. Madison, Wisconsin, Washington State University, 1994. p. 7-9.
- 70 PETERSON, K.R. et al. **Expanded markets for engineered wood products: the forest products laboratory's view**. Forest Products Society. Proceedings of Wood Products for Engineered Structures. p.164-166. 1993.
- 71 RASMUSSEN, D. L. **The Strength of Laminated Veneer Lumber (LVL) Made From Second Growth Grand Fir**. Idaho, 1994.49p. Thesis. Master of Science. University of Idaho.
- 72 REZENDE, J.L.; NEVES, A.R. Evolução e Contribuição do Setor Florestal Brasileiro Para a Economia Brasileira. In: SIMPÓSIO BILATERAL BRASIL FINLÂNDIA SOBRE ATUALIDADES FLORESTAIS.(1988: Curitiba). **Anais do Simpósio Bilateral Brasil Finlândia Sobre Atualidades Florestais**. 1988. p.214-266.
- 73 ROSS, R.J.; PELLERIN, R.F. NDE of wood-based composites with longitudinal stress waves. **For. Prod. J.**, Madison, v.38, n.5, p.39-45, 1988.
- 74 SANDOZ, J.L. Grading of construction timber by ultrasound. **Wood Science and Technology**, New York, v.23, n.1, p. 95-108, 1989.

- 75 SANDOZ, J.L. Valorization of forest products as building materials using nondestructive testing. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NONDESTRUCTIVE TESTING OF WOOD. (9.:1994: Madison). **Proceedings of the Ninth International Symposium on Nondestructive Testing of Wood.** Madison, Wisconsin, Washington State University, 1994. p. 103-109.
- 76 SASAKI, H. et al. Laminated veneer lumber and composite beams produced from tropical hardwood thinnings. In: Recent Research on Wood and Wood-Based Materials- (Current Japanese Materials Research) v. 11, Elsevier Science Publishers Ltd. Londres. 1993. P. 55-66.
- 77 SASAKI, H.; KAWAI, S. Recent research and development work on wood composites in Japan. **Wood Science and Technology**, New York, v. 28, p. 241-248, 1994.
- 78 SCHAFFER, E.L. et al. FPL Press-Lam process: Fast, efficient conversion of logs into structural products. **For. Prod. J.**, Madison, v.22, n.11, p.11-18, 1972.
- 79 SCHAFFER, E.L. et al. Feasibility of producing a high-yield laminated structural product: General summary. **U.S. Forest Products Laboratory. Research Paper, FPL-175**, 1972a. 20p.
- 80 SCHAFFER, E.L. et al. Feasibility of producing a high-yield laminated structural product: Strength properties of rotary knife-cut laminated southern pine. **U.S. Forest Products Laboratory. Research Paper, FPL-178**, 1972b. 13p.
- 81 SCHAFFER, E.L. et al. Press-Lam: progress in technical development of laminated veneer structural products. **U.S. Forest Products Laboratory. Research Paper FPL-279**, 1977.
- 82 SENFT, J. F. Practical Significance of Juvenile Wood for the User. In: Proceedings of the 18^o IUFRO World Congress. Iugoslávia. p. 261-271. 1986.
- 83 SHOWALTER, K.L.; WOESTE, F. E.; BENDTSEN, B. A. Effect of length on tensile strength in structural lumber. **U.S. Forest Products Laboratory. Research Paper, FPL -482**, 1987.
- 84 SHYAMASUNDER,K; ASWATHANARAYANA,B.S; NAIDU, M.V. Nondestructive evaluation of modulus of elasticity and modulus of rigidity of plywood by sonic methods. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NONDESTRUCTIVE TESTING OF WOOD.(9.:1994: Madison). **Proceedings of the Ninth International Symposium on Nondestructive Testing of Wood.** Madison, Wisconsin. Washington State University, 1994. p. 113-116.
- 85 TOMASELLI, I. **Qualidade da Madeira de Pinus elliottii, Pinus taeda e Araucaria angustifolia e sua Correlação com as Propriedades do Papel.** Relatório Convênio FINEP/UFPR, no. 18/79. Curitiba, 1979. 161p.

- 86 VLOSKY, R.P. et al. Laminated veneer lumber: A United States market overview. **Wood and Fiber Science**. Madison, v.26, n.4, p. 456-466, 1994.
- 87 WALTERS, W.R.; DAVIS, E.F. Manufacturing engineered wood products: Is it for everyone? In: INTERNATIONAL PARTICLEBOARD/COMPOSITE MATERIALS SYMPOSIUM. (29.:1995: Pullman, WA) **Proceedings of the twenty-ninth international particleboard/composite materials symposium**, Washington: Washington State University.1995. p. 129-139.
- 88 WILCOX, W.W. Detection of early stages of wood decay with ultrasonic pulse velocity. **For. Prod. J.**, Madison, v.38, n.5, p.68-73, 1988.
- 89 WINER, B. J. **Statistical principles in experimental design**. New York: McGraw-Hill, 1962. 907 p.
- 90 WINISTORFER, S.G.; STEUDEL, H.J. ISO 9000: Issues for the structural composite lumber industry. **For. Prod. J.** Madison, v.47, n.1, p.43-47, 1997.
- 91 YOUNGQUIST, J. A Laminated Veneer Lumber - A High-quality Structural Lumber Substitute: In: FOREST PRODUCTS RESEARCH INTERNATIONAL ACHIEVEMENTS AND THE FUTURE. (6.: 1985, Pretoria). **Symposium of Forest Products Research International Achievements and the Future**. Vol 6. Pretoria. 1985.13p.
- 92 YOUNGQUIST, J. A.; BRYANT, B.S. Production and marketing feasibility of parallel-laminated veneer products. **For. Prod. J.**, Madison, v.29, n.8, p.45-48, 1979.
- 93 YOUNGQUIST, J. A; LAUFENBERG, T.L.; BRYANT, B.S. End jointing of laminated veneer lumber for structural use. **For. Prod. J.**, Madison, v.34, n.11/12, p.25-32, 1984.
- 94 YOUNGQUIST, J.A. et al. Design, fabrication, testing and installation of a Press-Lam bridge. **U.S. Forest Products Laboratory. Research Paper FPL-332**. 1979.
- 95 ZHANG, H.J.; CHUI, Y.H.; SCHNEIDER, M.H. Compression control and its significance in the manufacture and effects on properties of poplar LVL. **Wood Science and Technology**, New York, p. 285-290.