



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS - GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**INFLUÊNCIA DA CLASSIFICAÇÃO DAS LÂMINAS EM VIGAS
DE MADEIRA LAMINADA - COLADA**

*Dissertação apresentada à Universidade
Federal de Santa Catarina - UFSC, opção:
Construção Civil, para a obtenção do título
de Mestre em Engenharia Civil.*

HUMBERTO ALEXANDRE CABRAL ARRUDA

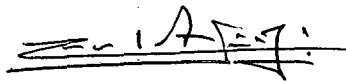
**INFLUÊNCIA DA CLASSIFICAÇÃO DAS LÂMINAS EM VIGAS DE
MADEIRA LAMINADA COLADA**

Humberto Arruda

Esta dissertação foi julgada para a obtenção do título de

Mestre em Engenharia Civil

Especialidade **Construção Civil** e aprovada em sua forma final pelo programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil

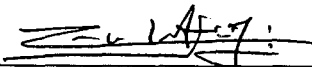


Prof. Dr. Carlos Alberto Szücs - (Orientador)

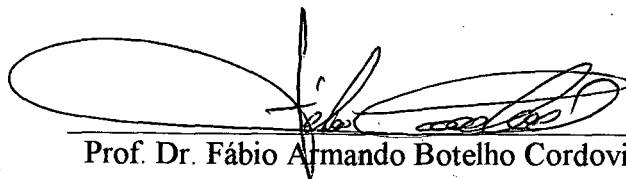


Prof. Dr. Glicério Trichês - (Coord. do Curso)


Banca Examinadora:



Prof. Dr. Carlos Alberto Szücs - (Presidente) - UFSC



Prof. Dr. Fábio Armando Botelho Cordovil - UFSC



Prof. Dr. Francisco Antonio Rocco Lahr - EESC/USP

*A minha esposa Ana
e minhas filhas Thais
e Sigrid, pelo carinho,
compreensão e força
nos momentos difíceis
vividos durante o curso.*

*Aos meus Pais, pelo
apoio e incentivo
sempre constante.*

MEUS SINCEROS AGRADECIMENTOS

- Ao amigo e orientador Prof. Carlos Alberto Szücs, pelo tema proposto, valiosos ensinamentos e diretrizes seguras em todas as fases deste trabalho.
- Ao Prof. Luiz Roberto Prudêncio Jr. pela colaboração prestada nas análises estatísticas desenvolvidas neste trabalho.
- Aos colegas do curso de pós-graduação pela amizade, intercâmbio de idéias e pelo apoio manifestado.
- Em especial, aos colegas Adolar Ricardo Bohn, André Graeff, Fernando Avancinni e Paulo Ioppi, por terem proporcionado um ambiente de amizade e companheirismo durante o período de nossa convivência.
- A todos os professores do curso de pós-graduação em Engenharia Civil - UFSC, pelos ensinamentos recebidos.
- Aos engenheiros Ruy Alexandre Sá Ribeiro e Estevão Vicente Monteiro de Paula pelo incentivo e contribuição em minha formação profissional, eu vos agradeço.
- Ao Laboratorista Paulo César Fortkamp e aos bolsistas Cristiano Ricardo Paiva Inácio e Claudio Vicente Zanon pelo apoio recebido durante a realização dos ensaios.
- Ao Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia - INPA, pela liberação integral de minhas atividades para a realização do curso.
- À Coordenadoria de Aperfeiçoamento e Especialização de Pessoal de Nível Superior - CAPES, que financiou meus estudos em forma de bolsa de estudo no período de 94/95.
- Às Empresas Battistella Ind. e Comércio e Alba Química Ind. e Comércio, pelo fornecimento da madeira e adesivo, respectivamente, para a concepção das vigas.
- A todos que de uma forma ou de outra colaboraram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

	Páginas
. LISTA DE FIGURAS.....	VII
. LISTA DE TABELAS.....	IX
. SIMBOLOGIA.....	X
. RESUMO.....	XIII
. ABSTRACT.....	XIV
<u>CAPÍTULO - I</u> . INTRODUÇÃO.....	1
I.1 - Generalidades.....	2
I.2 - A demanda do material madeira.....	5
I.3 - O uso da madeira de reflorestamento na construção.....	7
<u>CAPÍTULO - II</u> . REVISÃO TEÓRICA E BIBLIOGRÁFICA.....	10
II.1 - Introdução.....	10
II.2 - A madeira laminada colada.....	10
II.2.1 - Breve histórico.....	11
II.2.2 - Definições básicas.....	14
II.2.3 - As vantagens das estruturas de MLC.....	15
II.2.4 - Processo de fabricação.....	16
II.3 - Classificação visual da madeira.....	17
II.3.1 - Defeitos naturais.....	18
II.3.2 - Defeitos de processamento.....	20
II.3.3 - Defeitos de secagem.....	20
II.4 - Classificação e triagem das lâminas pela resistência.....	22
II.5 - Estudo teórico sobre o efeito do mom. fletor e do esf. cortante.....	24
II.6 - Classificação da madeira no Brasil.....	29

<u>CAPÍTULO - III</u> . CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA DA MADEIRA.....	31
III.1 - Introdução.....	31
III.2 - A madeira.....	32
III.3 - Propriedades Físicas.....	35
III.3.1 - Teor de Umidade.....	35
III.3.1.1 - Descrição geral.....	35
III.3.1.2 - Resultados.....	36
III.3.2 - Massa específica aparente.....	36
III.3.2.1 - Descrição geral.....	36
III.3.2.2 - Resultados.....	37
III.4 - Propriedades Mecânicas.....	38
III.4.1 - Flexão simples.....	38
III.4.1.1 - Descrição geral.....	38
III.4.1.2 - Resultados.....	40
III.4.2 - Compressão paralela às fibras.....	40
III.4.2.1 - Descrição geral.....	40
III.4.2.2 - Resultados.....	41
III.4.3 - Tração paralela às fibras.....	42
III.4.3.1 - Descrição geral.....	42
III.4.3.2 - Resultados.....	43
III.4.4 - Tração normal às fibras.....	44
III.4.4.1 - Descrição geral.....	44
III.4.4.2 - Resultados.....	46
III.4.5 - Cisalhamento paralelo às fibras.....	47
III.4.5.1 - Descrição geral.....	47
III.4.5.2 - Resultados.....	49
III.5 - Caracterização das lâminas por flexão simples... 51	51
III.5.1 - Procedimento do ensaio.....	51
III.5.4 - Resultados.....	54

<u>CAPÍTULO - IV . COMPOSIÇÃO DA AMOSTRAGEM E TIPOS DE CLASSIFICAÇÃO.....</u>	56
IV.1 - Introdução.....	56
IV.2 - Estimativa do número de corpos de prova.....	56
IV.3 - Características dos elementos estruturais.....	58
IV.4 - Análise do posicionamento das lâminas.....	59
IV.5 - Tipos de classificação.....	61
IV.5.1 - Vigas compostas de forma aleatória.....	62
IV.5.2 - Vigas classificadas pela rigidez	63
IV.5.3 - Vigas classificadas pela rigidez elevada	65
IV.5.4 - Vigas classificadas pelo tamanho dos nós.....	67
IV.5.5 - Vigas classificadas pela espessura dos anéis de crescimento.....	73
<u>CAPÍTULO - V . CONCEPÇÃO E EXPERIMENTAÇÃO DOS ELEMENTOS ESTRUTURAIS.....</u>	77
V.1 - Introdução.....	77
V.2 - Materiais e métodos.....	77
V.2.1 - O adesivo.....	77
V.2.2 - O dispositivo de pressão.....	78
V.2.3 - Metodologia de fabricação das vigas.....	79
V.2.4 - Verificação da influência do mom. fletor no mód. de elasticidade das vigas.....	82
V.3 - Ensaio experimental das vigas.....	83
V.3.1 - Método de ensaio.....	83
V.3.2 - Determinação do mód. de elast. das vigas.....	85
V.3.3 - Determinação da resistência à flexão.....	86
V.3.4 - Resultados experimentais.....	86
<u>CAPÍTULO - VI . ANÁLISE ESTATÍSTICA.....</u>	99
VI.1 - Introdução.....	99
VI.2 - Análise da estatística básica dos dados de ensaio.....	99

VI.2.1 - Módulo de elasticidade real (E_{real}).....	100
VI.2.2 - Resistência à flexão	102
VI.3 - Comparação múltipla de médias entre as 5 classificações..	103
VI.4 - Método de "DUNCAN" entre as 5 classificações.....	106
VI.4.1 - Análise das médias do " E_{real} " das vigas.....	106
VI.4.2 - Análise entre as médias da resistência à flexão....	109
VI.5 - Análise entre os módulos de elasticidade Real e Teórico..	110
VI.5.1 - Introdução.....	110
VI.5.2 - Comparação entre o " E_{real} " e o " $E_{teórico}$ ".....	111
VI.5.3 - Correlação entre o " E_{real} " e o " $E_{teórico}$ "	115
<u>CAPÍTULO - VII . PROPOSTA PARA CLASSIFICAÇÃO DAS</u> DAS LÂMINAS.....	118
VII.1 - Introdução.....	118
VII.2 - Determinação das categorias para a proposta de classificação das lâminas.....	118
VII.3 - Comparação estatística entre as classif. "A" e "B"	123
<u>CAPÍTULO - VIII . CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</u>	125
Aplicação prática das vigas de MLC do estudo.....	128
Recomendações para futuras pesquisas.....	129
ANEXO-01.....	130
ANEXO-02.....	141
ANEXO-03.....	146
Referências bibliográficas.....	156

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO - II

II.01 - Partes de uma peça de MLC.....	14
II.02 - Esquema do processo de fabricação dos elementos de MLC.....	16
II.03 - Principais defeitos da madeira.....	18
II.04 - Critérios de medição dos nós - COPANT.....	19
II.05 - Sistema de flexão a três pontos.....	23
II.06 - Esquema de carregamento real e auxiliar.....	26
II.07 - Influência da relação L/d, assim como, do carregamento sobre o módulo de elasticidade.....	28

CAPÍTULO - III

III.08 - Esquema de retirada dos CPs.....	33
III.09 - Esq. de retirada dos CPS de flexão simples e tração paralela às fibras..	33
III.10 - Esquema de retirada dos CPs de tração normal às fibras.....	34
III.11 - Esquema de retirada dos CPs de cisalhamento.....	34
III.12 - Sistema de numeração dos corpos de prova.....	35
III.13 - Desenho esquemático do CP de umidade (mm).....	35
III.14 - Esquema do ensaio de flexão a 4 pontos.....	39
III.15 - Dimensões e esquema do ensaio de compressão paralelas às fibras.....	41
III.16 - Dimensões e esquema do ensaio de tração paralela às fibras.....	43
III.17 - Corpo de prova e esquema do ensaio de tração normal às fibras.....	44
III.18 - Dispositivo para o ensaio de tração normal às fibras.....	45
III.19 - Corpo de prova de cisalhamento.....	47
III.20 - Dispositivo do ensaio de cisalhamento.....	48
III.21 - Esquema adotado do ensaio de flexão a 3 pontos.....	52
III.22 - Foto do dispositivo de ensaio das lâminas.....	53
III.23 - Sistema de identificação das lâminas.....	53
III.24 - Histograma e curva de frequência acumulada.....	54

CAPÍTULO - IV

IV.01 - Dimensões geométricas das vigas (mm).....	58
IV.02 - Composição de cada viga - VA.....	62
IV.03 - Composição de cada viga - VR.....	64
IV.04 - Composição de cada viga - VRE.....	66
IV.05 - Composição de cada viga - VN.....	71
IV.06 - Critério de medição dos anéis de crescimento-COPANT.....	74
IV.07 - Composição de cada viga - VAC.....	75

CAPÍTULO - V

V.01 - Dispositivo desenvolvido para aplicação de pressão nas vigas.....	78
V.02 - Etapa de pesagem dos componentes do adesivo.....	81
V.03 - Aplicação do adesivo nas lâminas.....	81
V.04 - Aplicação da pressão de colagem e o sistema de pesagem.....	82
V.05 - Esquema do ensaio de flexão simples das vigas.....	84
V.06 - Equipamentos de aplicação de carga e fonte de aquisição de dados.....	85
V.07 - Gráfico inicial tensão x flecha para a determinação do incremento.....	87
V.08 - Gráfico corrigido tensão x flecha da viga VR-02.....	88
V.09 - Detalhe da ruptura na zona tracionada.....	93
V.10 - Gráficos corrigidos resistência x flecha das vigas VA.....	94
V.11 - Gráficos corrigidos resistência x flecha das vigas VR.....	95
V.12 - Gráficos corrigidos resistência x flecha das vigas VRE.....	96
V.13 - Gráficos corrigidos resistência x flecha das vigas VN.....	97
V.14 - Gráficos corrigidos resistência x flecha das vigas VAC.....	98

CAPÍTULO - VI

VI.01 - Esquema das comparações das médias do E_{real}	107
VI.02 - Relação entre " E_{real} " e " $E_{teorico}$ ".....	116

CAPÍTULO - VII

VII.01 - Posicionamento das lâminas em função da categoria e contribuição inercial em relação a inércia total.....	120
--	-----

LISTA DE TABELAS

	Páginas
Tab.01 - Concavidade de tábuas de MLC.....	22
Tab.02 - Relação de madeiras para os ensaios de caracterização.....	32
Tab.03 - Cálculo do módulo de elasticidade médio das lâminas e do módulo de elasticidade teórico da viga VA-01.....	63
Tab.04 - Cálculo do módulo de elasticidade médio das lâminas e do módulo de elasticidade teórico da viga VR-01.....	65
Tab.05 - Cálculo do módulo de elasticidade médio das lâminas e do módulo de elasticidade teórico da viga VRE-01.....	66
Tab.06 - Qualidade e intervalos de qualificação das lâminas.....	70
Tab.07 - Cálculo do módulo de elasticidade médio das lâminas e do módulo de elasticidade teórico da viga VN-01.....	72
Tab.08 - Cálculo do módulo de elasticidade médio das lâminas e do módulo de elasticidade teórico da viga VAC-01.....	76
Tab.09 - Resultado do ensaio de flexão a 4 pontos da viga VR-02.....	90
Tab.10 - Resultado das vigas compostas de forma aleatória - VA.....	91
Tab.11 - Resultado das vigas classificadas pela rigidez - VR.....	91
Tab.12 - Resultado das vigas classificadas com rigidez elevada - VRE.....	92
Tab.13 - Resultado das vigas classificadas pelo tamanho dos nós - VN.....	92
Tab.14 - Resultado das vigas classificadas pelos anéis de crescimento - VAC.....	92
Tab.15 - Análise estatística básica do módulo de elasticidade real.....	101
Tab.16 - Análise estatística básica da tensão de ruptura.....	101
Tab.17 e 18 - Comparação múltipla de médias para E_{real}	104
Tab.19 e 20 - Comparação múltipla de médias para a resistência à flexão.....	105
Tab.21 - Resultado do método de "DUNCAN" para o E_{real}	108
Tab.22 - Resultado do método de "DUNCAN" para a resistência à flexão.....	109
Tab.23 - Resultado da comparação de médias entre E_{real} e $E_{teórico}$	113
Tab.24 - Correlação entre " E_{real} " e " $E_{teórico}$ ".....	116
Tab.25 - " $E_{teórico}$ " para as vigas de classificação "A" e "B".....	121

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVEATURAS

A	- coeficiente angular da reta
a	- distância da carga atuante ao apoio da viga
B	- coeficiente linear da reta
b	- largura da viga
CP	- corpo de prova
C.V.	- coeficiente de variação
ei	- frequência esperada
d	- altura da viga
DM	- resultado do teste de Kolmogorov-Smirnov
$D_{\alpha}(n)$	- valor tabelado p/ verificação da normalidade de uma dist. pelo teste de Kolmogorov-Smirnov
E_L	- módulo de elasticidade das lâminas
E_m	- módulo de elasticidade médio das lâminas na seção
E_{real}	- módulo de elasticidade longitudinal
$E_{teórico}$	- módulo de elasticidade teórico
F	- distribuição "F"
F_{α}	- valor comparativo tabelado da distribuição "F"
g1	- coeficiente de assimetria
g2	- coeficiente de achatamento ou curtose
H_0, H_1	- hipóteses a serem testadas
i	- intervalo
k	- número de grupos ou blocos (classificações)

K	- número de intervalos usados no histograma
K-S	- teste de Kolmogorov-Smirnov
L	- vão livre entre apoios
MLC	- madeira laminada-colada
MQR	- média quadrática dentro dos grupos
MQB	- média quadrática entre grupos
N	- distribuição normal
n	- tamanho da amostra
mh	- média harmônica
P	- carga atuante
P_r	- carga atuante de ruptura
QQ	- valor calculado do teste do qui-quadrado
r	- coeficiente de correlação
r^2	- coeficiente de determinação
S	- desvio padrão da amostra
S_p	- média ponderada do desvios padrão
SQB	- soma dos quadrados dos desvios entre os grupos
SQR	- soma dos quadrados residual dentro dos grupos
SQT	- soma dos produtos dos resíduos com respeito à média total
$t_{\alpha}(n)$	- valor tabelado da distribuição de Student
VSCA	- viga simulada pela classificação "A" ou "B"
VA	- vigas compostas de forma aleatória
VR	- vigas classificadas pela rigidez
VRE	- vigas classificadas pela rigidez elevada

VN	- vigas classificadas pelo tamanho dos nós
VAC	- vigas classificadas pelos anéis de crescimentos
\bar{X}	- média de uma amostra
X_i	- i-ésimo valor de uma amostra
α	- nível de confiabilidade
ε_{ij}	- erro relativo
μ	- média de uma população
σ	- desvio padrão da população
σ_b	- desvio padrão da inclinação de uma reta
χ_α	- valor comparativo tabelado do teste do qui-quadrado.
δ	- flecha atuante
σ_{cp}^{rup}	- resistência média à compressão paralela às fibras
σ_f^{rup}	- resistência média à flexão
σ_{tp}^{rup}	- resistência média à tração paralela às fibras
σ_{tn}^{rup}	- resistência média à tração normal às fibras
τ_{ci}^{rup}	- resistência média ao cisalhamento paralelo às fibras

RESUMO

A produção de elementos estruturais através da técnica da madeira laminada-colada (MLC), permite a ação do homem sobre algumas características que interferem na qualidade final do produto. Primeiro, para a produção de vigas é possível fazer uma triagem inicial nas tábuas que compõem cada lâmina, de forma a eliminar os grandes defeitos, como por exemplo os grandes nós.

Utilizando madeira de reflorestamento da espécie PINUS variedade Taeda e Elliottii, foi feito primeiramente um estudo de caracterização do material, com vista a determinar suas principais propriedades físico-mecânicas, e embasar a continuidade da pesquisa. Posteriormente, optou-se em fazer uma classificação em 360 tábuas, determinando-se o módulo de elasticidade das lâminas, a serem utilizadas na produção de 30 vigas de madeira laminada-colada, de tamanho real e eixo reto. Essas vigas, compostas através de cinco processos distintos de classificações, foram ensaiadas até o momento da ruptura por meio do ensaio mecânico de flexão a quatro pontos, obtendo-se os parâmetros comparativos do estudo, tais como: Módulo de Elasticidade Longitudinal (E_{real}) e Resistência à flexão (σ_f^{rup}).

O resultado final do ensaio mecânico de flexão, indicou o ganho que se consegue no comportamento final das vigas. Para tanto, comparações estatísticas foram efetuadas entre as classificações, indicando a *classificação ideal* a ser utilizada em escala industrial na produção de elementos estruturais de madeira laminada-colada, de forma a obter componentes que atendam os requisitos de segurança e economia.

Efetou-se estudos de correlação entre o Módulo de Elasticidade Longitudinal (E_{real}) e Módulo de Elasticidade Teórico ($E_{teórico}$) das vigas, visando adotar a utilização do segundo, no dimensionamento estrutural.

É feito também uma "**proposta de classificação**" pela rigidez, da madeira existente no planalto de Lages, PINUS, objetivando fornecer uma opção de compor elementos estruturais com determinado padrão de resistência, baseado no módulo de elasticidade teórico.

ABSTRACT

The production of structural components using the glued laminated wood technique allows men's action over some properties that interfere on the quality of the final product. First, for the production of beams, it is possible to do a initial choice of the boards that will compose each layer, so that big defects, such as big nodes, are eliminated.

Using reforestation wood of the PINUS species specifically Taeda and Elliottii varieties, it was done in principle a characterizing study of the material, willing to determine their main physical and mechanical properties, what gave support to the rest of the research. Afterwards, it was made a choice to classify 360 boards, determining their elasticity module, to be used in the production of 30 beams of glued laminated wood, with real size and straight axis. These beams, composed following five different procedures, were tested until the rupture instant in conformity with the four points flexion test, thus obtaining the comparative parameters of the study, such as Longitudinal Elasticity Module and Rupture Tension.

The final of the flexion test indicates de improvement of the beams' final behaviour: To confirm this, statistician comparisons were done among the classifications, to indicate de *ideal classification* that should be used in industrial scale in the production of structural components of glued laminated wood. This way, it is possible to achieve components that attend both safety and economy requires.

Correlation studies between the Longitudinal Elasticity Module (E_{real}) and the Theoric Elasticity Module (E_{theoric}) of the beams were done in order to allow the adoption of the last in structural dimensionig.

A "**classification proporsal**" of the wood in the plateau of Lages, PINUS TAEDA, considering its hardness is also made. This aims to provide the option of composing structural, components with a determined standard of resistece, based on the theoric elasticity module.

CAPÍTULO . I

INTRODUÇÃO

I. INTRODUÇÃO

A utilização da madeira como elemento estrutural tem sido, via de regra, realizada de maneira ultrapassada em nosso país. Isto, se comparado com as novas técnicas de aplicação desse material nos sistemas estruturais empregados largamente em vários países do hemisfério norte.

Portanto, tendo em vista o que vem sendo feito nesses países, pode-se dizer que a preocupação maior que deve ser levada em consideração no momento ecológico pelo qual estamos passando, é a possível consequência danosa que pode ocorrer devido a exploração do material madeira a ser empregado nas estruturas quando pensado apenas em termos de exploração de florestas de árvores nativas. Logo, é possível se pensar em uma utilização que esteja vinculada à produção e exploração racional da madeira. Daí a necessidade de se utilizar cada vez mais, a madeira de reflorestamentos, como fazem os países do hemisfério norte.

No que diz respeito a Santa Catarina, trata-se de um estado onde existem inúmeras áreas de reflorestamentos, predominando em grande escala os plantios de PINUS.

Em se pensando em uma forma racional de exploração dessa madeira, o processo de fabricação de elementos estruturais através da técnica da madeira laminada-colada, enquadra-se perfeitamente nessa direção. A expressão madeira laminada-colada, nada mais é do que o material composto de peças de madeira obtidas a partir de tábuas, solidarizadas entre si, podendo ser chamada também de madeira reconstituída.

A Empresa Battistella, de Lages / SC, proprietária de reflorestamentos de aproximadamente 100 milhões de árvores da espécie *Pinus* variedade *Taeda* e *Elliottii*, vinha produzindo elementos estruturais em forma de vigas e pilares, de forma aleatória e artesanal, para empregar em sua linha de produção de casas de alto padrão.

Essa Empresa, buscando melhor conhecer o material utilizado em seus produtos, com vista a melhorar as características mecânicas dos elementos estruturais, buscou assessoria da UFSC, através do Laboratório de Experimentação em Estruturas do Departamento de Engenharia Civil, fornecendo o material necessário para esta pesquisa.

Isso nos levou a refletir sobre as melhorias a serem efetuadas nesses elementos. E nesse sentido, sabe-se que um dos princípios básicos na concepção de elementos estruturais de madeira laminda-colada, está na seleção e posicionamento das lâminas de acordo com o esforço solicitante, ao qual a lâmina (tábua) é submetida ao longo da seção transversal da peça. Este é

portanto o enfoque a ser dado por esta pesquisa, contemplando os seguintes objetivos.

Os principais objetivos do presente estudo são:

- 1 - Obter primeiramente o conhecimento preciso das principais propriedades físico-mecânicas do material disponível na região serrana do Município de Lages/SC, uma vez que inexistem estudos caracterizando esse material.
- 2 - Classificar as lâminas pelo módulo de elasticidade, para em seguida efetuar composições de vigas baseadas em 5 (cinco) tipos de classificações. Com a análise do resultado final, obtido no ensaio de flexão, o qual indicará o ganho no comportamento mecânico dessas vigas assim constituídas, espera-se poder indicar a classificação ideal que poderá ser utilizada a nível de produção industrial.
- 3 - Efetuar estudo entre o E_{real} e o $E_{teórico}$, visando o emprego do segundo no dimensionamento estrutural.
- 4 - Determinar, se possível, uma proposta de classificação pela resistência para o PINUS da região do planalto de Lages, baseado no módulo de elasticidade das lâminas, no estudo entre o E_{real} e o $E_{teórico}$ e em função da classificação ideal conseguida.

I.1 - Generalidades da madeira

O desenvolvimento do homem ao longo do tempo, desde os estágios mais primitivos da humanidade até hoje, tem sido associado a uma dependência do material madeira. A madeira é provavelmente o mais antigo material de construção utilizado pelo homem.

Por ser um material de fácil trabalhabilidade e disponibilidade quase que universal, a madeira tornou-se essencial à sobrevivência do homem.

Com o decorrer dos avanços tecnológicos, mais diversos e aperfeiçoados são as formas de emprego da madeira. Mesmo com o surgimento de inúmeros materiais sintéticos, tem sido difícil manter um alto padrão de conforto sem a presença da madeira. Surgiram outros tipos de materiais, tais como metais, plásticos, cimento, etc., no entanto, apresentam indisponibilidade de matéria-prima, alta necessidade de insumos energéticos para a sua produção, além de problemas de contaminação ambiental causado no processo de produção.

A madeira possui virtudes peculiares que podem torná-la um material estrutural de primeira escolha em um número muito grande de situações. Nessa ótica, FUSCO (1989)^{[8]*} em uma abordagem sobre as vantagens da madeira comenta:

"- De início, é preciso salientar que a madeira é o único material estrutural renovável e cuja produção é não solvente e tem baixo consumo energético.

- Como material estrutural, as duras tem resistência superior e rigidez equivalente às de um excelente concreto. E como material construtivo, a madeira pesa cerca de 1/3 do concreto e 1/8 do aço, tornando as infra e super-estruturas mais econômicas que aquelas construídas com os materiais anteriores.

- De forma análoga, o reduzido peso específico da madeira permite o emprego de estruturas pré-fabricadas em condições inimagináveis para o concreto ou o aço.

- Ainda como material construtivo, a usinagem da madeira é extremamente mais simples do que a usinagem do concreto e do aço. Consequentemente, os investimentos industriais necessários são muito menos onerosos e a qualificação da mão-de-obra a ser empregada é muitíssimo menos exigente".

Cita-se ainda como vantagens da madeira, o seguinte:

- Foi o primeiro material empregado capaz de resistir tanto a esforços de compressão como de tração.

- Permite fáceis ligações e emendas, em consequência apresenta facilidade de montagem e substituição de peças nas estruturas.

- Não estilhaça quando golpeado. A característica de resistência permite absorver choques que romperiam ou fendilhariam outro material.

- Apresenta excelentes propriedades isolantes, térmicas, acústicas e elétricas.

No entanto, a madeira apresenta algumas particularidades / complexidade, que devem ser levadas em consideração quando empregadas como material de construção:

- É um material fundamentalmente heterogêneo, anisotrópico, assimétrico e biologicamente perecível.

A heterogeneidade da madeira caracteriza-se por diferentes estruturas cujo elemento básico é a célula, variando de espécie para espécie, de árvore para árvore dentro de uma mesma espécie, e até mesmo dentro de uma mesma tora. Isto sugere que deva se fazer algo para contornar essa variabilidade.

* Os números indicam a ordem de chamada das ref. bibliográficas listadas no final do trabalho.

A anisotropia da madeira, inerente à sua origem biológica, confere resistências diferentes nas diferentes direções relativas à posição das fibras, ou seja, apresenta diferentes propriedades físico-mecânicas dependendo da direção que se considera.

Além da anisotropia, em cada direção, são diferentes as propriedades da madeira na tração e na compressão. Essa assimetria, que também existe no concreto, porém não no aço, sugere que sejam devidamente investigadas as propriedades da madeira nas diferentes direções, tanto na tração como na compressão.

A natureza biológica da madeira, torna-a suscetível ao ataque de fungos e insetos, devendo ser preservada afim de evitar essas agressões. Antes de ser utilizada em qualquer processo de industrialização, deve ser seca para evitar as contrações volumétricas. Essas medidas preventivas, tornam as estruturas de madeira tão duráveis quanto as de aço ou concreto, desde que sua elaboração respeite a certas regras de proteção do material.

A secagem da madeira apresenta uma série de importantes vantagens, com respeito a esse assunto, o DATE (1991)^[6] relaciona os seguintes tópicos:

- Substantial redução do peso, com a consequente diminuição dos custos de transportes.
- Aumento da resistência biológica após a secagem contra o ataque dos fungos manchadores e apodrecedores, bolores e a maioria dos insetos que a atacam.
- As contrações, isto é, os encolhimentos que acompanham a secagem ocorrem antes da madeira ser transformada no produto final.
- A secagem melhora a maioria das propriedades mecânicas da madeira, tais como resistência à compressão, resistência à flexão, dureza, e etc.
- As resistências das uniões ou juntas feitas com pregos e parafusos são maiores em madeira seca do que em madeira verde.
- A madeira úmida não é adequada para a colagem ou determinados processos de tratamento preservativo.
- A maioria das deformações, empenamentos e rachaduras da madeira (assuntos estes a serem abordados mais adiante) ocorrem durante a secagem mal conduzida. Produtos de madeira feitos com madeira seca estarão livres da ocorrência desses defeitos.

- A madeira somente pode receber pintura, verniz, laca e outros acabamentos se, pelo menos, for seca ao ar.

- A secagem aumenta a resistência elétrica da madeira, tornando-a isolante e melhorando suas propriedades de isolamento térmico.

- A madeira seca na construção de edificações fechadas colabora com o equilíbrio da umidade do ar, retirando água, quando o ar está úmido, e cedendo umidade para o ar, quando este está extremamente seco.

Destacam-se dentre os inúmeros métodos de secagem, a secagem natural ao ar livre e a secagem artificial, sendo os mais utilizados universalmente e, portanto os mais importantes do ponto de vista da prática industrial.

Os tratamentos de preservação da madeira, podem ser entendidos como a adoção de técnicas que têm como objetivo a proteção da madeira contra a ação dos agentes físicos, químicos e especialmente os biológicos, tanto no seu processo produtivo como na sua utilização. Dentre as técnicas existentes para preservar a madeira tem-se: A preservação natural, preservação indireta, preservação biológica e preservação química. No entanto, este tema foge do objetivo deste trabalho, e pela importância necessitaria de uma abordagem ampla e específica sobre o assunto, portanto não será tratado em seus pormenores, caso haja o interesse por parte do leitor poderá consultar a bibliografia específica, DATE (1991)^[6].

Essas impropriedades fizeram com que a madeira sofresse concorrência de outros materiais, produzidos através de processos industriais, como o aço e o concreto armado, surgindo um certo preconceito inibidor a utilização da madeira e relegando à execução de estruturas provisórias.

I.2 - A demanda do material madeira

Quanto à disponibilidade do material madeira, sabe-se que o Brasil possui uma extensa área territorial (8.511.865,00 km²) sendo que a Floresta Amazônica representa 70 % dos recursos florestais brasileiro e cerca de 20 % das florestas tropicais do mundo. Porém, o consumo interno de madeira per capita é pequeno, da ordem de 0,20 m³ / ano, ficando abaixo do consumo de países desenvolvidos como o Japão, Austrália, Estados Unidos, Canadá, França, etc, conforme citações do DATE (1991)^[6] e FREITAS (1986)^[1].

Em se tratando da possibilidade de mudança da política de uso da madeira como elemento principal de construção e também a crescente utilização na construção de residências, crescem com isso as dificuldades de se encontrar peças de madeira com grande dimensões, tendo em vista a cada vez maior escassez de árvores adultas, uma vez que o desmatamento desenfreado

provoca aos poucos a redução do potencial madeireiro de nossas florestas. Esse agravante se reflete mais especificamente na região sul e suldeste do país.

Com respeito a este assunto, SZÜCS (1983)^[9], apresenta a seguinte abordagem: "*Constata-se na região sul, que mesmo protegido pelo código florestal que desde 1965 proíbe o desflorestamento das matas de Araucária Angustifolia (Pinho do Paraná ou Pinho Brasileiro) de maneira desenfreada, permitindo apenas a sua exploração racional, ainda assim, os pinheiros do Brasil diminuíram rapidamente*". Desde que o código foi implantado, o Estado do Paraná por exemplo, perdeu cerca de 80 % de suas reservas, o Estado de Santa Catarina tem cerca de 3 % de sua mata original de pinheiros e o Estado do Rio Grande do Sul, a área não chega a 1,5 %.

Assim sendo, considerando a possibilidade de esgotamento total das florestas nativas e a pressão ecológica para a conservação das poucas espécies existentes na região sul e suldeste, surge como viabilidade favorável a utilização da madeira proveniente das regiões de reflorestamentos.

Os registros indicam que o primeiro reflorestamento no Brasil ocorreu em 1861, visando a recuperação dos mananciais do Morro da Tijuca no Rio de Janeiro. Enquanto que os primeiros projetos de reflorestamentos com finalidade econômica, ocorreram no início deste século, graças ao trabalho de Edmundo Navarro de Andrade, que introduziu a Eucaliptocultura no Brasil, objetivando a produção de lenha e dormentes para a Companhia Paulista de Estrada de Ferro; DATE (1991)^[6].

Já, a cultura do PINUS em escala de reflorestamento teve início na década de 50, visando a reposição das matas de Araucária que se encontravam em fase de exploração acelerada com consequente redução na oferta da madeira de "Pinho".

Numa abordagem sobre o desenvolvimento dos reflorestamentos no Brasil, FREITAS (1984)^[3] e MOOSMAYER (1986)^[4], descrevem que a partir de 1966 os reflorestamentos com Pinus tiveram início em escala acelerada por um grande número de empresas, as quais influenciadas por incentivos fiscais do IBDF (Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Florestal) investiram num reflorestamento da ordem de 400 mil hectares por ano, colocando o Brasil hoje entre o 3º e 4º país reflorestador do mundo. Isto significa dizer que em meados de 1996, quando a maioria dos reflorestamentos completarem a rotação dos 20 anos e o diâmetro médio das árvores atingirem em torno de 30 cm, ocorrerá então, uma demanda favorável ao uso dessa espécie no ramo da construção civil.

Especificamente para Santa Catarina, com dados do Inventário Nacional Contínuo, citado por PRUDENTES DE FONTES (1986)^[5], verifica-se um reflorestamento total de 352.000 hectares, sendo a espécie mais

representativa o PINUS com 291.000 hectares, originários da região de maior concentração, tais como Curitiba, Planalto de Canoinha, Campos de Lages e Colonial do Rio do Peixe.

I.3 - O uso da madeira de reflorestamento na engenharia

Em vários países desenvolvidos a madeira tem se destacado como um dos principais insumos empregados na construção civil. Contudo, no Brasil este material tem sido usado como um componente secundário na construção de habitações.

No entanto, a inversão desta situação de forma a levar a madeira a ocupar a posição de destaque compatível com os recursos florestais do País, só pode ser conseguida através do melhor conhecimento e difusão de suas propriedades tecnológicas, de forma a tirar maior proveito das vantagens que ela apresenta como material de construção, e evitando problemas que poderiam ser causados pelas suas eventuais desvantagens.

Sabe-se que a madeira apresenta uma importante característica, que é a trabalhabilidade, possibilitando sua usinagem sem a necessidade de grandes conhecimentos especializados ou ferramentas sofisticadas. Essa facilidade, muitas vezes tem desprestigiado a madeira, pelo baixo desempenho do material, que na verdade, é causado pelo seu uso inadequado, por pessoas que pouco conhecem a potencialidade da madeira. Assim sendo, em oposição a essa imagem criada, cada aplicação correta da madeira na engenharia será um exemplo permanente de que a madeira continua a ser um material de construção moderno, eficiente, durável, renovável e de baixo custo.

Um agravante a esta situação é verificado até nos dias de hoje, que pessoas habitantes em casas de madeira, assim que podem, mudam-se para casas de alvenaria, refletindo claramente a visão contra o uso do material madeira, sem se dar conta que o problema não é o material em si, mas o emprego inadequado do mesmo. Isto deve-se também em parte à tradição dos nossos colonizadores, que trouxeram os costumes dos países mediterrâneo, onde não possuíam grande afeição pelo uso da madeira. No caso particular de Santa Catarina, Paraná e parte do Rio Grande do Sul, onde a colonização foi feita por povos do norte da Europa, encontra-se nestes estados de clima frio, um grande número de habitações em madeira, talvez devido as suas propriedades isolantes.

O preconceito contra a madeira atingiu também os órgãos governamentais brasileiros financiadores das atividades da construção civil, existindo apenas facilidade de financiamento para a construção de casas de alvenaria, negligenciando a utilização de recursos para edificações em madeira. Com o intuito de mudança dessa mentalidade, o FÓRUM MADEIREIRO DE

1993, realizado em Curitiba, contou com cerca de 1800 (mil e oitocentos) empresas do setor florestal, as quais estiveram discutindo com técnicos do IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo) e com o próprio governo do Estado, possibilidades visando a construção de conjuntos habitacionais de casas populares utilizando a madeira como insumo principal de construção.

Segundo CLEVER DE OLIVEIRA (1993)^[2], a área reflorestada no período de 1967/1981 no estado do Paraná correspondeu a 605 mil hectares distribuídos em 492.000 de Pinus, 49.000 de Eucalíptos e 64.000 de Araucárias. Observa-se que o Pinus responde por 81,32 % deste total, podendo essa madeira vir a fornecer matéria prima para implantação desses projetos. De acordo com informações extra oficiais, esses projetos hoje, em 1995, encontram-se em implantação.

Ainda nesse mesmo encontro, foi apresentado um Modelo de casa pré-fabricada com madeira de reflorestamento, tornando essas moradias 40 % mais econômicas se comparadas com outra similar de processo construtivo em alvenaria, servindo como opção a baixo custo à projetos governamentais de casas populares.

Com a perspectiva de mudança da política de uso da madeira como principal elemento de construção em edificações, e sabendo que a construção civil é apontada como um dos seguimentos de grande consumidor de madeira, e considerando ainda a diminuição acelerada das florestas nativas, cresce a necessidade do uso da madeira de reflorestamento na implantação dessas habitações.

Santa Catarina vem rompendo o atraso brasileiro de aproximadamente 20 anos, no desenvolvimento da técnica de utilização de madeira de reflorestamento para a construção de casas. Uma indústria catarinense, a Battistella de Lages, com a consultoria da UFSC, vem utilizando essa matéria-prima para a fabricação de "casas prontas" de alto padrão de qualidade. Esta empresa que possui mais de 100 milhões de árvores de Pinus plantada no Estado e também no Paraná, tem como objetivo futuro exportar esses modelos para o Mercosul e para países Europeus, como a Alemanha e outros.

O Instituto de Pesquisas Tecnológica - IPT, também tem estudado formas de aplicação da madeira de reflorestamento de Pinus na procura de viabilizar técnica e economicamente o seu emprego. As atenções têm-se concentrado na área habitacional, procurando-se desenvolver alternativas tecnológicas para a produção de moradia de baixo custo para o estado de São Paulo.

Por outro lado, levando em consideração, conforme citado anteriormente no item I.2, que os plantios das áreas reflorestadas foram iniciadas quase que simultaneamente por um grande número de reflorestadores, é fundamental, conforme menciona SZÜCS (1983)^[9], a necessidade de aprofundar estudos no sentido de se conseguir a utilização racional da madeira disponíveis

nesses reflorestamentos. Nesse particular, pode ser citado como utilização técnica racional da madeira o processo de fabricação de elementos estruturais pela técnica da Madeira Laminada-Colada (MLC).

CAPÍTULO . II

REVISÃO TEÓRICA E BIBLIOGRÁFICA

II . REVISÃO TEÓRICA E BIBLIOGRÁFICA

II.1 - Introdução

Tendo em vista melhor situar na história a origem da madeira laminada-colada, será apresentado um breve histórico sobre o surgimento desta técnica e seu desenvolvimento como material adequado no emprego em estruturas, assim como, as etapas referentes a sua fabricação. Em continuidade, apresentar-se-á sob forma de revisão bibliográfica, os estudos teóricos sobre os parâmetros que orientarão a busca dos objetivos pretendidos com este trabalho.

II.2 - A madeira laminada - colada

Chama-se "Madeira Laminada-Colada" ou simplesmente MLC, como será adotado no decorrer deste trabalho, peças de madeira reconstituídas a partir de lâminas de madeira (tábuas), que são de dimensões relativamente reduzidas se comparadas às dimensões da seção transversal da peça final assim constituída. SZÜCS (1992)^[10].

As formas obtidas para o elemento estrutural podem ser retas ou curvas, com as fibras de todas as lâminas paralelas ao eixo longitudinal do elemento produzido. As lâminas necessitam apresentar espessura compatível com a altura e a curvatura final da peça, podem ter comprimentos diversos e possibilidade de serem solidarizadas lateralmente para alcançar maior largura.

A solidarização entre as peças componentes do elemento estrutural se deu ao longo da história, de forma evolutiva, passando por diversos estágios, tais como: prego, parafusos, anéis, até chegar finalmente a utilização de colas. Essa última é a mais empregada atualmente, razão pela qual deu origem ao nome mundialmente conhecido de Madeira Laminada-Colada (MLC).

A MLC tem sido reconhecida em diversas localidades do mundo como um dos melhores processos construtivos para a utilização em estruturas, podendo ser de fundamental importância principalmente se usada em locais que ficarão expostos a um meio corrosivo, ou então, quando existir alto risco de incêndio. Nas duas últimas décadas, vem sendo intensificadas as pesquisas técnicas e experimentais a respeito dos fatores condicionantes da resistência de vigas de MLC, buscando definir situações onde as mesmas possam ser otimizadas.

II.2.1 - Breve histórico

A aplicação da madeira utilizando o processo laminado-colado, na realidade, reúne duas técnicas distintas e bastante antigas. Como o próprio nome sugere, a MLC foi constituída a partir da técnica da colagem aliada à técnica da laminação, ou seja, da reconstituição da madeira a partir de lâminas.

Com relação a colagem, sabe-se que se trata de uma técnica muito antiga, pois baús de madeira unidos com colas orgânicas foram encontrados nas pirâmides do Egito, demonstrando que naquela época já se tinham o conhecimento dessa técnica, que demonstrou ao longo do tempo, a eficácia e durabilidade do processo de colagem.

Já a técnica de laminação é bem mais recente, pois conforme citação de SZÜCS (1992)^[10], sua aplicação concreta teve início no século XIX, tendo como exemplo marcante dessa época, arcos compostos por lâminas encurvadas e sobrepostas, mantidas unidas por ligações mecânicas. Essa técnica foi introduzida pelo coronel Emy no final do século passado.

Foi portanto em 1906, com o aparecimento da cola de caseína (derivada do leite) que o mestre carpinteiro suíço Otto Hetzer teve a idéia de substituir por cola, as ligações metálicas de abraçadeiras e parafusos, utilizadas pelo coronel Emy, obtendo assim uma seção mais homogênea sem os riscos de deslizamento entre as lâminas.

De acordo com SELBO e KNAUS citado por ROCCO LAHR (1991)^[11], destaca-se a afirmação de que o registro mais antigo a respeito de construções de peças de madeira colada se encontra em uma publicação suíça de 1911. Trata-se de um auditório com mais de 40 metros de vão livre, construído na Basileia para o encontro nacional de cantores. São arcos e vigas de MLC.

Daí para frente, a MLC expandiu-se em paralelo com o avanço ocorrido com as colas. No entanto, foi em 1940, com o aparecimento das colas sintéticas que o sistema laminado-colado conheceu seu grande progresso.

Apesar dessa tecnologia ter se desenvolvido na Suíça, difundiu-se muito rapidamente pela Europa, tendo como destaque os países como a França, Alemanha e Holanda. Indústrias importantes se instalaram também na Suécia, no início da década de 60, muito provavelmente em função da disponibilidade da matéria-prima, madeira.

Com o avanço da utilização da MLC na Europa, sua introdução nos Estados Unidos foi apenas uma questão de tempo. Segundo NEIVA (1992)^[12], nesse país, um dos primeiros exemplos ocorreu em 1934 na construção de um edifício para o Forest Products Laboratory (FPL) em Madison, Wisconsin.

MODDY, citado por ROCCO LAHR (1991)^[11], destaca a importância da publicação do Boletim nº 1069 do FPL, redigido por Selbo e Freas em 1954. Tal texto é considerado de suma importância para a grande expansão da indústria de MLC nos Estados Unidos, culminando com a criação do American Institute of Timber Construction (AITC), objetivando fornecer informações a respeito da fabricação de MLC. Muitas destas informações foram reunidas na norma US Comercial Standart 253-63.

O American Institute of Timber Construction em 1965, publicou um importante manual de construção sobre o estudo de construção em madeira o "Timber Construction Manual", AITC (1974)^[13], dando ênfase aos dados técnicos e recomendações sobre o emprego da madeira maciça e MLC. Em 1974, 1977, 1979, 1980 e 1985, outras publicações foram efetuadas com edições corrigidas e melhoradas.

Com o advento das primeiras normas e especificações de controle de qualidade dos fabricantes, a MLC obteve dentro da engenharia uma notável aceitação como material de construção. Portanto, o emprego da madeira sob a técnica do laminado colado, pouco conhecida no Brasil, é marcante em países como Estados Unidos, Canadá e grande parte da Europa.

Nesses países, a aplicação da MLC pode ser vista, sob as mais variadas formas estruturais. O seu emprego vai desde pequenas passarelas, escadas e abrigos até grandes estruturas concebidas sob as mais variadas formas estéticas. Como exemplo, SZÜCS (1992)^[10], cita a obra do Hall da Tours, na França, com 98 metros de vão livre, assim como o Palais d'Exposition d'Avignon, também na França, que tem mais de 100 metros de vão livre. E para citar o potencial do mercado das estruturas de MLC, verifica-se que só na França, existem hoje mais de 40 indústrias que trabalham na fabricação de estruturas de MLC e que estão distribuídas nas diversas regiões daquele país, afirma o pesquisador.

Os franceses têm demonstrado ao longo do tempo, bastante desenvolvimento na utilização dessa técnica. O Centre Technique du Bois - CTBA, publicou vários cadernos sobre a MLC. Pode-se destacar como os mais expressivos na área: " La Fabrication des Éléments de Structure en Bois Lamellé-Collé" (1971), "Les Structures en Bois Lamellé-Collé" (1973) e "Les Collage du Bois" (1983).

Como era de se esperar , com o crescente número de publicações e pesquisas a respeito de um material estrutural, logo surgiu a necessidade de textos voltados à normatização. A última complementação da American Society for Testing Materials - ASTM, foi redigida em 1983, ASTM-D3737 (1983). Esta norma trata da determinação das tensões últimas de cálculo estrutural de MLC, considerando também as propriedades mecânicas, as especificações de produção, inspeção e controle de qualidade. A British Standards Institution -BSI, também

publicou várias especificações sobre a MLC. Uma das últimas publicações foi a BS-5268 (1984).

O EUROCODE 5 (1987)^[14], traz especificações a respeito da madeira, dos adesivos e de propriedades para a fabricação de peças de madeira laminada-colada. Em tabelas correspondentes, há indicação dos valores médios e dos valores característicos de alguns parâmetros necessários para o cálculo das mencionadas peças.

Outras instituições de pesquisas, também publicaram normas sobre o cálculo e execução de MLC, destacando-se: SABS 876-76 (1976), Norma Sul Africana; CSA 0122-77 (1977) e CSA 0177 (1977), Norma Canadense. Esta norma fornece bases comuns de métodos de produção, ensaios, inspeção, identificação e verificação de estruturas de MLC, estimulando a fabricação de madeira laminada-colada, ROCCO LAHR (1991)^[11].

No Brasil, a primeira indústria de MLC foi fundada pelos Alemães em 1934 na cidade de Curitiba-PR. Trata-se da "Estruturas de Madeira Ltda" (ESMARA). Suas obras são marcantes na região sul do país, embora não existam registros desta experiência. Outras três indústrias de MLC merecem citação, a PREMOM também em Curitiba, LAMINARCO em São Paulo e a BATTISTELLA em Lajes-SC, esta última produzindo elementos estruturais, como vigas e pilares para moradias de alto padrão, a partir de madeira de reflorestamento tipo Pinus.

Com relação à pesquisa da MLC como elemento estrutural, a mesma vem sendo desenvolvida em importantes centros de pesquisas no Brasil. Hoje, a nacionalização da técnica da madeira laminada-colada está nas mãos dos professores e pesquisadores Carlos Alberto Szücs, da Universidade Federal de Santa Catarina-UFSC, e Edgar Vladimiro Mantilla Carrasco, da Universidade Federal de Minas Gerais-UFMG. O primeiro Dr. Szücs, vem estudando o uso da madeira de reflorestamento da espécie *Pinus*, com linha de pesquisa voltada ao desenvolvimento de novos equipamentos de ensaios e prensagem das vigas, caracterização física e mecânica da madeira, possibilidade de substituição das ligações de continuidade das tábuas por reforço lateral com fibras de vidro, variação da espessura das lâminas e diluição de cola e processos de classificações da madeira para produção de elementos estruturais. O segundo Dr Edgar, também utilizando madeira de reflorestamento da espécie *Eucalipto*, desenvolve estudos sobre a fixação de estruturas de laminado-colado, sistema de colagem, testes em protótipos com variações do número de lâminas, influência do tipo de emendas no comportamento da peça e problemas de retração e deformação entre lâminas. Os resultados dos estudos desses pesquisadores são sempre voltados para a interação da pesquisa com o mercado produtor de madeira laminada-colada.

Não poderia também deixar de ser citado, um dos mais importantes centros de pesquisas e formação profissional na área de madeira, o Laboratório de Madeira e de Estrutura de Madeira - LaMEM-USP, em São Carlos.

Como se vê, o estudo da MLC encontra-se em pleno desenvolvimento no Brasil, e necessita ainda de maior divulgação no meio acadêmico e empresarial, afim de possibilitar o conhecimento das vantagens do emprego dessa técnica na construção civil.

II.2.2 - Definições básicas

Sabe-se que a madeira laminada é aquela em que duas ou mais lâminas (tábuas) são unidas com o propósito de obter uma peça única. A figura II-01, mostra os elementos constituintes de uma peça laminada-colada.

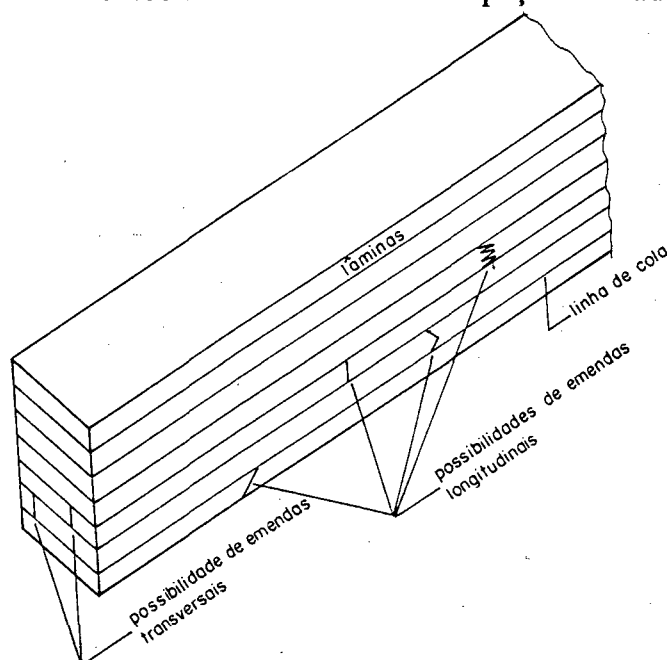


Fig. II.01 - Partes de uma peça de MLC

Algumas definições:

a) **Lâminas de madeira:** São tábuas unidas longitudinalmente que apresentam a espessura em função da altura e curvatura do elemento a ser constituído. Para peças retas, a espessura pode chegar a 50 mm (norma Canadense). No caso de elementos curvos, a espessura "e" é obtida em função do raio de curvatura "R".

b) **Linha de cola:** É formada por adesivo do tipo resorcina, resorcina-fenol, uréia-formol, etc. A escolha depende mais das condições de uso da estrutura do que da madeira. Logo é preciso levar em consideração o meio

em que a estrutura estará submetida, isto é, temperatura e teor de umidade.

c) **Emendas longitudinais:** Utilizadas para a obtenção do comprimento final desejado para cada lâmina. Podem ser simplesmente de topo, em diagonal, emenda de um dente e emendas por entalhes múltiplos, sendo esta última a mais eficiente e recomendada.

d) **Emendas transversais:** Podem ser de topo ou encaixe, sendo utilizadas para se obter uma largura superior às das peças disponíveis.

II.2.3 - As vantagens das estruturas de MLC

Não se pode esquecer que a MLC é antes de tudo "Madeira", logo além das vantagens da estrutura de MLC é preciso ressaltar as vantagens que estão reunidas na própria madeira e que já foram citadas no capítulo I.

Em comparação a outros materiais empregados com finalidade estrutural, a técnica do laminado-colado confere ainda às estruturas de madeira, as seguintes vantagens:

- Comparando-se com as estruturas de madeira maciça, as peças concebidas em MLC exigem um número bem menor de ligações, uma vez que essa técnica permite vencer grandes vãos.
- Possibilidade de se conseguir excelentes efeitos estéticos no conjunto arquitetônico, podendo ser obtidas peças com seções variáveis, raio de curvatura reduzido e até mesmo em planos diferentes.
- A possibilidade de conseguir seções e comprimentos não limitados pelas dimensões geométricas do tronco das árvores.
- Possibilidade de vencer grandes vãos livres, com peças de comprimento limitado apenas pelas circunstâncias de transportes.
- Eliminação inicial de defeitos naturais da madeira, permitindo a utilização de tábuas de inferior qualidade em áreas de menores esforços, sem afetar a integridade final da peça.
- Considerável melhoria das tensões médias de ruptura e uma redução na dispersão estatística de seus valores.
- A vantagem da pré-fabricação, podendo ser traduzido em racionalização da construção e o consequente ganho de tempo na entrega da obra.
- A leveza dessas estruturas oferece também vantagens relacionadas a mão-de-obra, facilitando a montagem, desmontagem e

possibilidade de ampliação. Além disso, com o peso morto reduzido, pode significar economia nas fundações.

- É mais aconselhada para o uso em construções sujeitas a riscos de incêndio, em face da conservação intacta da estrutura interna da seção transversal da peça, que fica protegida pela película carbonizada.

II.2.4 - Processo de fabricação

SZÜCS (1992)^[10], descreve de forma resumida as etapas de fabricação de elementos de MLC. A produção desses elementos em escala industrial, necessita de instalações específicas e organizadas para essa finalidade. No entanto, dependendo dos elementos a serem produzidos, desde que não sejam em grandes dimensões e em número elevado, poderão até mesmo serem conduzidos a uma produção em canteiros de obras.

No tocante a uma fabricação industrial, há de se cumprir três etapas distintas. Um esquema mostrando a visualização dessas etapas é apresentado e descrito a seguir.

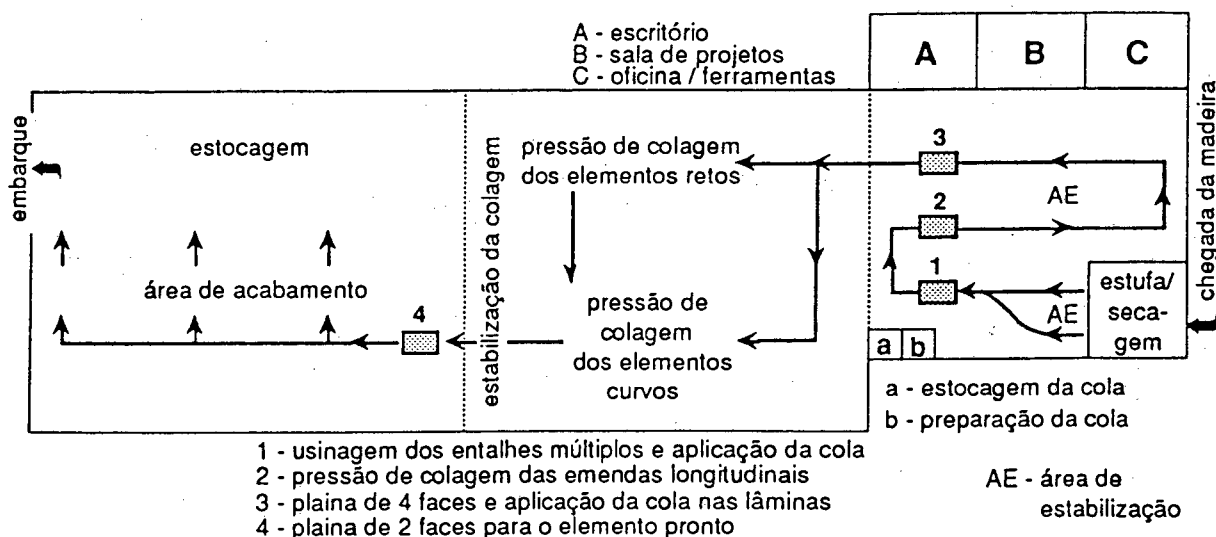


Fig. II.02 - Esquema do processo de fabricação de elementos de MLC

1ª Etapa: A preparação da madeira antes da colagem compreende a recepção, classificação, a eliminação de grandes defeitos, a estocagem, a secagem, a união longitudinal e transversal, se for o caso.

2ª Etapa: Compreende a aplicação da cola, a composição do elemento, a conformação sobre o gabarito (também chamado berço) e a aplicação da pressão de colagem.

3ª Etapa: É a fase do acabamento que compreende aplinar lateralmente, recortar as extremidades do elemento estrutural, executar certos furos e encaixes previstos nas ligações e aplicação de um preservativo ou simplesmente um selador ou verniz.

II.3 - Classificação Visual da madeira

Do ponto de vista econômico, um defeito na madeira, pode ser qualquer aspecto que diminua seu valor no mercado. Pode ser também uma anormalidade que reduza a resistência ou característica que limite seu uso a determinado fim. KOLMANN (1984)^[15].

PETRUCCI (1995)^[7], define como: toda e qualquer anomalia, que, prejudica o emprego do material na sua resistência ou durabilidade.

Como visto por esses dois autores, qualquer anomalia que prejudique o emprego do material a um uso específico, na resistência e durabilidade, é considerado como defeito. Variações na forma normal do tronco, nós e madeira de reação, são defeitos naturais, sobre os quais o homem pode controlar somente dentro de certos limites. Aliados intimamente a estes, mas diretamente atribuível a fatores ambientais como vento, carga excessiva na copa das árvores devido o acúmulo de neve quando for o caso e frio severo, são fatores que também ocasionam defeitos, que a gerência florestal pouco pode fazer para evitá-los.

De acordo com PETRUCCI (1995)^[7], os defeitos na madeira provém:

- Do crescimento anômalo da árvore; *defeitos naturais*.
- Do desdobro mal conduzido; *defeito de produção*.
- Da rápida alteração da condição de umidade; *defeito de secagem*.
- De alterações por agentes de deterioração; *insetos e fungos*.

Entretanto, quando a madeira é submetida a secagem natural ou artificial mal conduzida, surgem os chamados defeitos de secagem que compreendem as rachaduras, fendas, empenamentos, etc. Estes defeitos, bem como os defeitos naturais, oriundos do crescimento anômalo da árvore (nós, desvio de veio e descolamento entre fibras ou entre anéis de crescimento) interferem decisivamente na resistência da madeira, FURIATI (1981)^[16]. A figura seguinte exemplifica os principais defeitos da madeira.

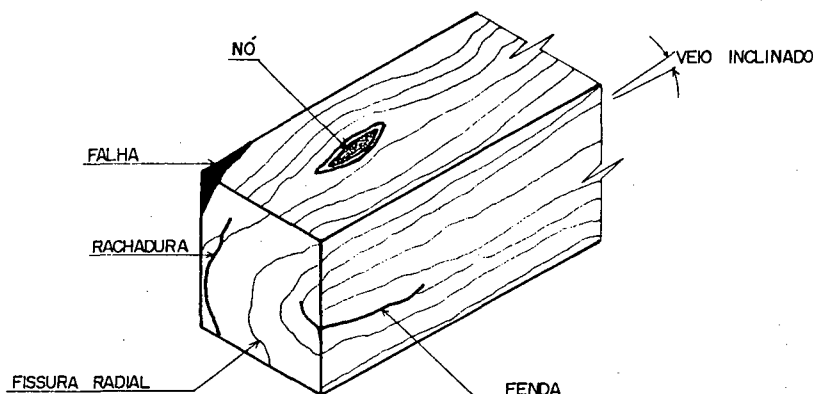


Fig. II.03 - Principais defeitos da madeira

III.3.1 - Defeitos Naturais

A bibliografia descreve que os principais defeitos naturais, oriundos da fase de crescimento das árvores são: nós e desvio de veio.

- **Nós:** A presença dos nós na madeira, é um fator de alteração de suas características físicas e mecânicas, para fins estruturais não há questão mais importante que a diminuição destes nós, em função de seu tipo, número, dimensões e localização. SIIMES (1914); GRAF (1983) citado por KOLLMANN (1984)^[15].

A presença de nós são e aderentes não diminui sensivelmente a resistência da peça à compressão: PETRUCCI (1995)^[7], assinala que a redução ultrapassa raramente a 20 % da resistência sem defeito. Quanto à tração, os nós tem uma influência considerável e podem determinar uma diminuição importante da resistência total. Nas peças destinadas a trabalharem na flexão deve-se procurar fazer com que os nós se localizem tanto quanto possível na zona de compressão. Nas vigas de MLC, esse defeito poderá ser amenizado, localizando as lâminas com maior incidência de nós ou grandes nós nas proximidades da linha neutra da seção transversal da peça, onde os esforços incidem de forma reduzida.

O valor de mercado da madeira serrada, está relacionado com a qualidade da mesma. Madeira limpa e com pouca presença de nós resulta em preços mais altos. Em contra partida, madeira serrada contendo nós maiores e mais numerosos é normalmente desvalorizada.

O processo utilizado para efetuar a medição do tamanho dos nós, objetivando definir a qualidade das lâminas, é feito através das especificações da

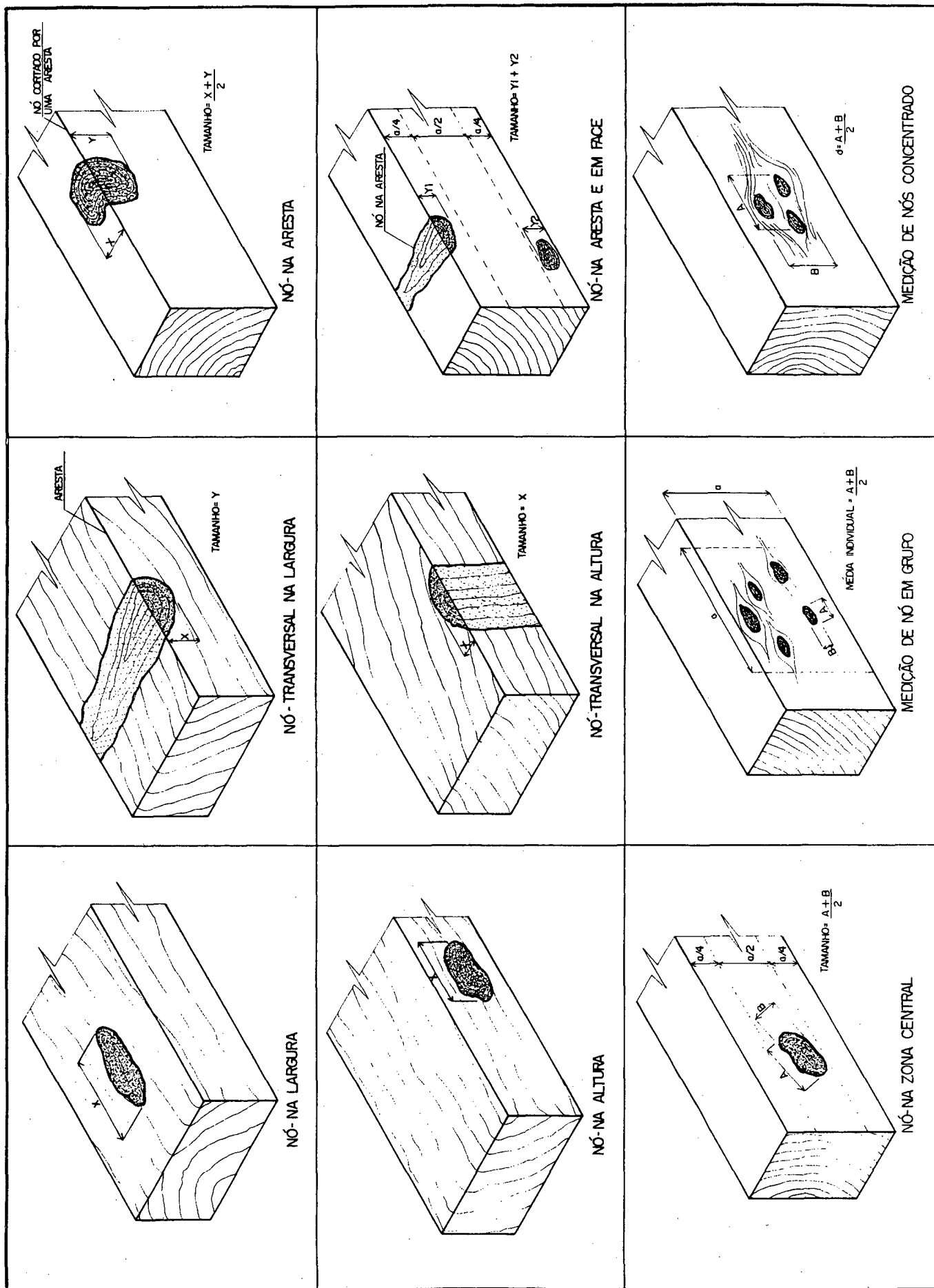


Fig. II.04 - Resumo dos critérios de medição dos nós - COPANT

COMISSION PANAMERICANA DE NORMAS TECNICA - COPANT 30:3-002 (1989)^[18], a figura **II.04** da página anterior, mostra o resumo dos critérios de medição. Também é utilizada a Norma Canadense CAN/SCA-01777-M89 (1989)^[19] para definir a qualidade dessas lâminas. Isto será abordado no ítem **IV.4.4**.

- **Desvio de veio, veio transverso:** O termo "veio transverso" é aplicado para condições em que o alinhamento das fibras não são paralelos ao eixo longitudinal da peça de madeira. Esta condição é bastante influente na efetiva redução da resistência da madeira usada estruturalmente, sendo então considerado como um defeito. Os desvios do veio são devido o crescimento das fibras periféricas, quando o crescimento interno permanece estacionário. A causa deste fenômeno é, em grande parte, controlado geneticamente, de acordo com NOSKOWIAK (1963) citado por KOLLMANN; CÔTE (1984)^[15], que examinou esse assunto através de medição, crescimento das amostras e fatores causais.

Existem outros defeitos naturais menos importantes segundo FURIATI (1981)^[16], que são as fendas e os buracos: As fendas reduzem a resistência ao cisalhamento em peças solicitadas a flexão, e é admitido que este efeito seja aproximadamente proporcional á redução da área resistente ao cisalhamento. Entretanto, as fendas não afetam a resistência de peças submetidas a esforços de compressão paralela, cuja limitação do emprego de tais peças, deve-se tão somente ao fato de que as fendas contribuem para o rápido apodrecimento da madeira.

Os buracos, estão diretamente ligados ao defeito dos nós, pois originam-se da queda destes, como também são provocados por insetos e vermes que atacam a madeira ou por instrumentos utilizados no manejo das toras. Esse defeito, causa a diminuição da área útil numa seção transversal, e os requisitos de aproveitamento, para este caso, são os mesmos adotados para os nós.

II.3.2 - Defeitos de processamentos

Os defeitos de desdobro compreendem as fraturas e as machucaduras do abate, cantos quebrados e fibras cortadas na serragem ou resserragem das peças. Geralmente são ocasionados pelo emprego de equipamentos inadequados ou até mesmo por falta de habilidade dos operadores. A escolha do tipo de desdobro, em desacordo com a finalidade da peça, pode agravar posteriormente os defeitos de secagem.

II.3.3 - Defeitos de secagem

São provocados pela retratibilidade do material na perda de umidade e compreendem, as rachaduras, os fendilhamentos e os empenamentos de abaulamento, arqueamento e encurvamento.

- **Rachaduras:** Abertura de grande extensão no topo das peças, afetando as propriedades de resistência da madeira de um modo geral. Seu controle é feito em função da aparência e da possibilidade de deterioração, devido a possibilidade de penetração da umidade.

- **Abaulamentos:** Empenamento no sentido da largura da peça, expresso pelo comprimento da flecha do arco respectivo.

- **Arqueamento:** Empenamento no sentido do comprimento da peça, expresso pela flecha do arco respectivo.

- **Curvatura:** Ligeiro empenamento longitudinal.

- **Curvatura lateral:** Ligeiro empenamento transversal.

Também são enquadrados como defeitos de secagem as alterações, provenientes do ataque de agentes deterioradores, tais como: Apodrecimento, Bolor e Furo de Insetos.

ZANDER (1979)^[20], em sua dissertação de mestrado, faz alusão à qualidade mínima da madeira a ser utilizada em elementos de MLC. Citando CHUGG, dá uma série de recomendações sobre os defeitos admissíveis e não admissíveis.

- **Fendas e Rachaduras:** São permitidos defeitos paralelos à face da tábua até uma profundidade de 1/4 da espessura. Rachaduras completas paralelas à tábua são permitidas até aproximadamente 1/4 do comprimento da tábua.

- **Empenamentos:** Torceduras ou empenamentos em arco de até 1,3 cm a cada 30 cm, são permitidas.

- **Curvatura lateral:** Até 0,7 cm a cada 30 cm é permitida.

- **Furos:** Furos pequenos e rasos são permitidos quando ocasionais.

- **Manchas:** Manchas são permitidas.

- **Apodrecimento:** Não é permitido.

- **Concavidade:** Concavidade máxima permitida (ver Tab.II.01)

Espessura (Pol.)	LARGURA - CONCAVIDADE "a"		
	4 Pol. ou menos	6 Pol.	8 Pol. ou mais
1	1/32	1/16	1/8
2	nenhum	1/32	1/16
Nota: os valores de "a" estão em polegadas.			

Tab.01 - Concavidade de tábuas de MLC

Os critérios recomendados pela Norma COPANT (1975)^[18] e ZANDER(1979)^[20], orientarão a seleção visual das lâminas referentes aos defeitos naturais, de processamentos e secagem, quando da ocasião de utilização dos cinco tipos de classificações a serem empregadas no item IV.5. Isto porque, no Brasil inexistem especificações de classificações de defeitos para o emprego em elementos de MLC e nem tão pouco a NB-11 faz referência a estes critérios. Deste modo foi necessário recorrer a outras indicações.

II.4 - Classificação e triagem das lâminas pela resistência

Sabe-se que a resistência de um elemento estrutural mede-se em função da tensão que este elemento necessita para atingir o ponto de rompimento. Nas madeiras a resistência à flexão (σ_F), para uma determinada espécie, varia principalmente em função dos seguintes parâmetros: módulo de elasticidade (E), densidade (D) e Umidade (H).

Em pesquisa efetuada por FURIATI (1981)^[16], foi desenvolvido um estudo de regressão múltipla utilizando as variáveis $\sigma_F = f(E, D, H)$. Constatou-se um elevado coeficiente de correlação, mas não preenche os requisitos necessários para realizar o controle tecnológico da madeira, visto que a determinação da umidade não é tarefa prática, nem mesmo imediata, pois somente depois de decorrer doze horas, com o corpo de prova em estufa, torna-se possível determinar esta variável, (MB-26).

Por outro lado, no estudo realizado, foi verificado que a influência da umidade, como variável na estimativa de " σ_F ", é desprezível, podendo ser eliminada da regressão sem que ocorra decréscimo considerável no coeficiente de correlação.

Em continuidade, foi efetuada a regressão de $\sigma_F = f(E, D)$, a qual segundo o pesquisador, preenche os requisitos necessários para realizar o controle tecnológico da madeira, pois estas variáveis são facilmente determinadas em canteiro de obra, sendo o módulo de elasticidade (E) obtido através do "Ensaio de Flexão à Três Pontos" e a densidade pelo "processo do paquímetro ou Palmer".

Entretanto, o prosseguimento da análise mostrou que a equação de correlação simples $\sigma_F = f(E)$, tomando o módulo de elasticidade (E) como única variável independente foi plenamente satisfatória, resultando em um coeficiente de correlação $r = 0,85116$, significando que o módulo de elasticidade (E), é conseqüentemente, o parâmetro de maior influência na classificação da madeira pela resistência.

MELO (1984)^[17], também destaca a afirmação de que "Em 1956 foi descoberta a relação estatística que existia entre a resistência da madeira à ruptura à flexão e seu módulo de elasticidade, medido sobre um vão relativamente curto". Esta descoberta possibilitou o desenvolvimento de máquinas que, automaticamente e continuamente classificam as peças de madeira quanto à resistência. Estas máquinas denominadas de Classificadora Eletro-Mecânica, são comumente utilizadas em alguns países da Europa, Estados Unidos, Canadá, Austrália etc., assim como também, em Institutos de pesquisas no Brasil, tais como LPF/IBDF e CPPF/INPA.

Neste trabalho devido a inexistência de uma máquina classificadora no LABORATÓRIO DE EXPERIMENTAÇÃO EM ESTRUTURAS - LEE/UFSC, busca-se a utilização de um ensaio prático e possível de ser assimilado pela indústria e que possibilite a determinação do módulo de elasticidade longitudinal das lâminas, com o objetivo do emprego destas nos 5 (cinco) tipos de classificação, abordadas no CAPÍTULO IV. O critério utilizado por SZÜCS (1991)^[25], isto é, ensaio não destrutivo de flexão a três pontos, encaixa-se perfeitamente no modelo pretendido, permitindo sua utilização em quaisquer condições de trabalho e até mesmo no canteiro de obra. O esquema utilizado por este pesquisador é mostrado na figura abaixo.

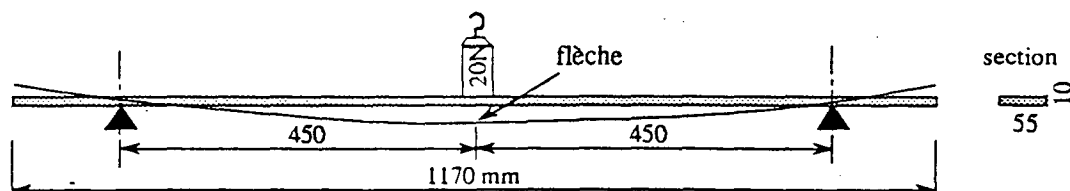


Fig. II.05 - Sistema de flexão a três pontos, SZÜCS (1991)^[25].

A metodologia adotada para a determinação do módulo de elasticidade longitudinal das lâminas, será abordada no ítem III.5.

II.5 - ESTUDO TEÓRICO SOBRE O EFEITO DO MOMENTO FLETOR E DO ESFORÇO CORTANTE

Em muitos casos de ensaios em laboratórios, a expressão empregada para a determinação do módulo de elasticidade longitudinal da madeira a partir de ensaios de corpos de prova, é simplificada, não sendo consideradas as deformações provenientes das tensões de cisalhamento.

Comumente, é utilizada a seguinte equação para o cálculo da flecha (δ) no ponto médio de um viga de madeira, submetida a ação de uma carga concentrada neste ponto:

$$\delta = \frac{P \cdot l^3}{48 \cdot E \cdot I} \quad \dots \text{ (II.01)}$$

Onde temos que: "P" carga aplicada, "l" vão da peça fletida, "E"- módulo de elasticidade longitudinal real da flexão da madeira e "I"- momento de inércia da seção transversal.

Na determinação do módulo de elasticidade à flexão a partir de dados experimentais obtidos ensaiando-se corpos de prova de madeira, a expressão adotada pela ABNT no Método Brasileiro para Ensaios Físicos e Mecânicos de Madeiras Nacionais / MB-26 (1940)^[22] é idêntica a II.01.

Nesta expressão, está considerada apenas a deformação na viga devido ao alongamento das fibras tracionadas e ao encurtamento das fibras comprimidas. No entanto, sabe-se que ocorre deformações devidas ao cisalhamento, provenientes do esforço cortante agindo na viga.

Objetivando minimizar a ação do esforço cortante sobre a flecha e conseqüentemente sobre o módulo de elasticidade, um estudo de deflexão foi realizado de maneira geral, tendo em vista estabelecer as relações entre as dimensões da viga e as condições de carregamento.

Isto foi desenvolvido a partir do princípio de D'Alambert KISELIOV(1973)^[23] e SÜSSEKIND (1979)^[24] e também de acordo com que apresenta SZÜCS (1991)^[25], que baseia-se no deslocamento e trabalho "virtual". Ou seja, se impusermos um deslocamento virtual sobre um ponto em equilíbrio, o trabalho "virtual" realizado pelo sistema de força em equilíbrio que háje sobre ele é nulo. *age*

Portanto, para um corpo elástico em equilíbrio, o trabalho virtual das forças externas que háje sobre ele (W_{ext}) é igual ao trabalho virtual dos *age*

esforços internos (W_{int}) no momento de um deslocamento vertical, compatíveis com as condições de contorno.

$$W_{ext.} = W_{int.}$$

Utilizando portanto um carregamento auxiliar (P'), aplicado segundo uma direção sobre a qual se deseja conhecer (δ) e de outra parte as expressões da resistência dos materiais para o trabalho virtual dos esforços internos, dado pela superposição do trabalho virtual de cada um entre eles, quer dizer "M"- "N"- "T"- "V", chega-se a expressão estabelecida por Mohr, que representa o equilíbrio do trabalho das forças externas e das forças internas.

$$P' \cdot \delta = \int_L \frac{M \cdot M' dx}{E \cdot I} + \int_L \frac{T \cdot T' dx}{G \cdot I_{tor}} + \int_L \frac{N \cdot N' dx}{E \cdot S} + C \cdot \int_L \frac{V \cdot V' dx}{G \cdot S} \quad \dots (II.02)$$

P' = carga auxiliar, simplificada como sendo = 1.

δ = deslocamento procurado.

MM' = mom. fletor (real e auxiliar).

TT' = mom. de torção (real e auxiliar).

NN' = esforço axial (real e auxiliar).

VV' = esforço cortante (real e auxiliar).

E = módulo de elasticidade longitudinal.

G = módulo de elasticidade de cisalhamento.

I = momento de inércia.

I_{tor} = momento de inércia da torção.

S = seção transversal.

C = coeficiente que representa a distribuição da tensão de cisalhamento em função do tipo da seção (para seção retangular "C" é igual a 1,2 BODIG (1982)^[26]).

Portanto, em se querendo conhecer a flecha no meio do vão de uma viga submetida a flexão a 4 pontos, utiliza-se um sistema auxiliar com uma carga aplicada neste local, ou seja no meio do vão.

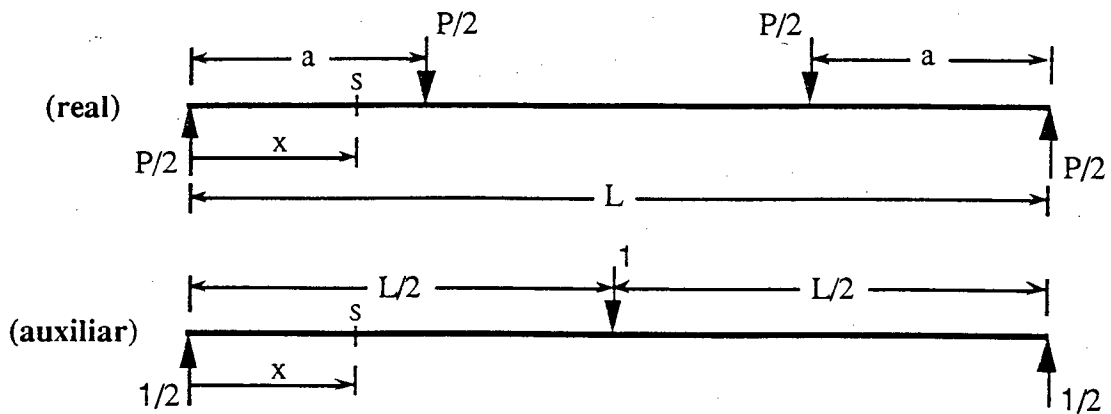


Fig.II.06 - Esquema de carregamento real e auxiliar.

A figura anterior mostra o esquema das vigas, uma com o carregamento real na flexão a 4 pontos, com as cargas $P/2$, distanciadas de "a" das extremidades e o sistema auxiliar com a carga unitária colocada no ponto onde queremos conhecer a flecha, que é no meio do vão, a $L/2$ de cada lado. Para o "x", compreendido entre "0" e "a", depois "a" e " $L/2$ ", depois entre " $L/2$ " e " $L-a$ ", em seguida no intervalo " $L-a$ " e " L ", isto é, fazendo variar o "x" desde "0" até " L ", passando pelas várias interrupções onde se encontra o carregamento. Prosseguindo, faz-se o equilíbrio das forças em uma seção "S" para poder determinar os esforços internos "M" e "N", ou seja, o momento fletor e o esforço cortante, para em seguida substituir na expressão ... (II.02), sabendo que "N" e "T" neste caso são nulos, não existindo esforço axial e nem de torção.

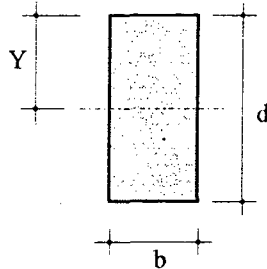
Tem-se portanto a seguinte expressão:

$$1.\delta = \frac{P}{4EI} \left[\int_0^a x^2 . dx + a . \int_a^{L/2} x . dx + a . \int_{L/2}^{(L-a)} (L-a) . dx + \int_{(L-a)}^L (L-a)^2 . dx \right] + \frac{C.P}{4.G.S} \left[\int_0^a dx + \int_{(L-a)}^L dx \right]$$

Resolvendo as integrais, resulta finalmente:

$$\delta = \frac{P.a}{48 E . I} [3 . L^2 - 4 . a^2] + C . \frac{P.a}{2 . G . S}$$

Para uma seção retangular temos:



Onde:

$$I \doteq \frac{b \cdot d^3}{12} \quad (\text{momento de inércia})$$

$$S = b \cdot d \quad (\text{seção retangular})$$

$$C = 1,2 \quad (\text{coef. de distribuição de cisalhamento})$$

Sabe-se ainda que para o material madeira, EUROCODE 5 (1987)^[14], BODIG ; JAYNE (1982)^[26] e SZÜCS (1991)^[25], pode-se considerar que a relação:

$$\frac{E_L}{G_{LR}} \cong 16$$

onde:

E_L = módulo de elast. longitudinal.

G_{LR} = mod. de elast. transversal num plano LR.

Isso nos permite escrever a expressão da maneira a seguir, que representa o módulo de elasticidade ($E_{(mf,ec)}$), levando-se em consideração a seção da viga e as parcelas de contribuição do momento fletor (M) e do esforço cortante (V).

$$E_{(mf,ec)} = \frac{P \cdot a}{\delta \cdot b \cdot d} \left[\frac{3 \cdot L^2 - 4 \cdot a^2}{4 \cdot d^2} + 9,6 \right] \quad \dots (II.03)$$

onde: $E_{(mf,ec)}$ = módulo de elasticidade longitudinal total, devido ao momento fletor (mf) e esforço cortante (ec).

Para extrairmos a equação representativa considerando apenas o momento fletor (M), basta excluir da equação precedente o valor " 9,6 ", que nada mais é do que a parcela pertinente a contribuição do esforço cortante, resultando a seguinte equação.

$$E_{(mf)} = \frac{P \cdot a}{\delta \cdot b \cdot d} \left[\frac{3 \cdot L^2 - 4 \cdot a^2}{4 \cdot d^2} \right] \quad \dots (II.04)$$

onde:

$E_{(mf)}$ = módulo de elasticidade longitudinal, devido apenas ao momento fletor (mf).

Em seguida faz-se a relação entre as equações II.04 e II.03 ($E_{(mf)}/E_{(mf,ec)}$) das expressões anteriores, originando a equação a seguir.

$$\frac{E_{(mf)}}{E_{(mf,ec)}} = \frac{3 \cdot \left(\frac{L}{d}\right)^2 - 4 \cdot \left(\frac{a}{d}\right)^2}{3 \cdot \left(\frac{L}{d}\right)^2 - 4 \cdot \left(\frac{a}{d}\right)^2 + 38,4} \quad \dots(\text{II.05})$$

Isto nos permite portanto, traçar o gráfico mostrado na figura II.07, de onde se tira a relação (L/d) aconselhado para as dimensões da viga, da mesma maneira, o afastamento "a", posicionando as cargas (P/2) das extremidades dos apoios, afim de que a parcela correspondente ao cisalhamento durante a fase de ensaio, seja a menor possível na contribuição da flecha, e por conseguinte no módulo de elasticidade. Assim sendo, podemos tirar a interferência mínima do esforço cortante, tanto na flecha quanto no módulo de elasticidade.

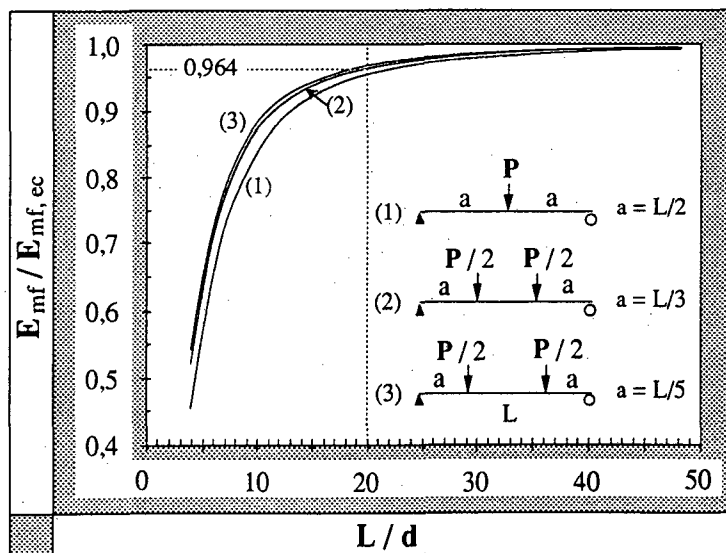


Fig.II.07 - Influência da relação L/d, assim como, do carregamento sobre o módulo de elasticidade

Este modelo permite também a análise da flexão a 3 pontos, uma vez que fazendo $a=L/2$, tem-se as duas parcelas de carga $P/2$ sendo superpostas no meio do vão como carga "P".

Ainda sobre a influência da relação L/d no módulo de elasticidade, ROCCO LAHR (1983)^[27], realizou ensaios para a relação de 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24 e 26, em corpos de prova de dimensões nominais (5x5x140) cm^3 , tendo em vista avaliar a interferência de L/d no valor do módulo de elasticidade, por ele chamado E_a (módulo de elasticidade aparente), ou seja, considerando apenas a contribuição do momento fletor. Observando os valores obtidos nos ensaios preliminares, foi possível evidenciar que para chegar a $E_{(mf)} = E_{(mf,ec)}$, conforme tem sido normalmente convencionado, deve-se ter como desprezível a influência das deformações provocadas pelo cisalhamento, na constituição da flecha total. Nesse estudo, esse pesquisador constatou ser válida essa convenção apenas para os casos em que os valores de L/d fosse superior a 20. Se observarmos no gráfico da figura II.07, isto equivale a dizer que 96,4 % do valor do módulo de elasticidade é devido a contribuição do momento fletor, assim sendo, a consideração do cortante para o cálculo da flecha e do módulo de elasticidade total é realmente desprezível.

NEWLIN e TRAYLER em 1956, mencionado por PINTO(1983)^[28], reforça o parágrafo anterior, afirmando ser negligência em não se considerar as deformações devido ao esforço cortante, erros de considerável dimensão pode ser introduzido especialmente se a viga tiver relação L/d pequena.

II.6 - Classificação da madeira no Brasil

Há duas décadas passadas, iniciaram-se os primeiros estudos objetivando introduzir um sistema de classificação para as madeiras nacionais, DELA LÚCIA (1975), FREITAS(1978) citado por MELO (1984)^[16]. A dissertação de mestrado de FURIATI (1981)^[17], sob a orientação do Dr. J.C. Hellmeister, pela Escola de Engenharia de São Carlos USP-SP, estabeleceu uma classificação de peças estruturais de Peroba Rosa, utilizando o que ele denominou de "Ensaio de Obra", objetivando a determinação do módulo de elasticidade de peças estruturais maciças, no local de execução da estrutura, através da incidência de um peso fixo (um saco de cimento ou cal) sobre a parte central de uma viga bi-apoiada solicitada como tábua, medindo-se em seguida a flecha correspondente, esses resultados comparados ao "Ensaio de Laboratório", conduziram a resultados compatíveis e altamente significantes em termos estatísticos, demonstrando por meio do método, de maneira simples e rápida a classificação das peças mais resistentes para a utilização na região de maior solicitação das estruturas de madeira.

A tese de Ph.D de Ricardo M. Della Lúcia, sob a orientação do Dr. F. Sent, da Purdue University, mostrou a possibilidade de se estabelecer uma

classificação mecânica de resistência para as madeiras brasileiras, utilizando peças estruturais de três espécies de madeiras da Amazônia (tachi, piquiá e virola), agrupando-as e derivando as classes de tensão conforme procedimento em uso nos Estados Unidos.

Amantino R. de Freitas, defendeu tese de doutorado pela Virgínia Polytechnic Institute and State University, Virgínia, EUA, onde procurou otimizar a relação entre a resistência à ruptura e o módulo de elasticidade a flexão para grupos de espécies, utilizando dados obtidos em pequenos corpos de prova isentos de defeitos, de 23 espécies de madeiras brasileiras.

Os Institutos de pesquisas em tecnologia da madeira, como INSTITUTO BRASILEIRO DE DESENVOLVIMENTO FLORESTAL - IBDF, em Brasília, e o INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS DA AMAZONIA - INPA, em Manaus, desenvolvem projetos de classificação mecânica de peças estruturais de madeira e a consequente obtenção das tensões admissíveis, utilizando, ambos, a versão australiana de máquina classificadora eletromecânica, MK-P-IVa.

JÚLIO MELO (1984)^[17], em sua dissertação de mestrado, sob a orientação do Dr. J.C. Hellmeister, pela Escola de Engenharia de São Carlos - USP/SP, efetuou estudos em 35 vigas de seis espécies diferentes, ensaiando-as tanto na máquina universal de ensaios como na classificadora eletromecânica. Os resultados obtidos, apresentaram um alto grau de correlação entre os módulos de elasticidade determinados nas duas máquinas, objetivando o estabelecimento das linhas de tensões admissíveis, e, conseqüentemente, a classificação estrutural pela resistência.

Este trabalho representa mais um esforço no sentido de tornar mais eficiente a utilização da técnica da madeira laminada-colada através do estudo de cinco tipos de classificações, pretendendo-se mostrar o ganho no comportamento final das vigas assim constituídas, e como conseqüência, indicando a classificação ideal baseada no módulo de elasticidade das lâminas, afim de que possa ser utilizada na linha de produção de uma indústria de madeira laminada-colada.

CAPÍTULO . III

CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA DA MADEIRA

III - CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA

III.1 - Introdução

A escolha e a utilização de uma determinada espécie para a indústria ou o uso na construção civil, só poderão ser realizadas com o conhecimento preciso de suas qualidades físicas e mecânicas.

Este conhecimento somente poderá ser adquirido por meio de estudos sistemáticos de ensaios convenientes baseado em normas previamente estabelecidas. É claro que o conhecimento das características de qualquer material é essencial para sua melhor utilização, e no caso da madeira, isto se torna muito importante, uma vez que a madeira, é um material formado dentro do processo fisiológico do crescimento das árvores, e como descreve HELLMEISTER (1983)^[29], "o solo e clima do local de onde provém a árvore, a classificação botânica e a fisiologia da árvore, a anatomia do tecido lenhoso e a variação da sua composição química, influem nas características físicas das madeiras".

Estes fatores são evidenciados nos valores indicativos do ensaio de diversos corpos de prova, os quais oscilam em torno de médias que caracterizam uma dada espécie e apresentam uma ampla dispersão de valores, de aparência nitidamente normal ou gaussiana.

À vista do grande número de variáveis inerentes a natureza do material, se faz necessário o conhecimento preciso das principais propriedades físicas e mecânicas da madeira utilizada nesta pesquisa, e este capítulo, objetiva a determinação desses valores, afim de que os mesmos sirvam de parâmetros na utilização industrial e estrutural de forma a evitar seu emprego inadequado e explorar suas virtudes naturais.

A determinação das características físicas e mecânicas das madeiras são feitas no Brasil conforme o MB-26. Mas, em virtude dessa norma ter sido implantada em 1940, hoje, algumas de suas recomendações encontram-se ultrapassadas. Por esta razão, buscou-se o apoio de metodologias prescritas por outras normas internacionais, as quais serão citadas no desenvolvimento dos ensaios.

Os resultados obtidos com os ensaios dos corpos de prova, são mostrados dentro do presente capítulo em forma de tabelas com o resumo estatístico individual respectivo aos ensaios. Também apresentar-se-á uma tabela resumo, comparando esses valores com os obtidos por outra Instituição.

III.2 - A madeira

A madeira foi fornecida pela EMPRESA BATTISTELLA INDÚSTRIA E COMÉRCIO, proveniente de uma área de reflorestamento com um plantio aproximado de 100 milhões de árvores, localizado na região do planalto serrano de Lages no estado de Santa Catarina.

A amostra enviada para o LABORATÓRIO DE EXPERIMENTAÇÃO EM ESTRUTURAS da UFSC, é de uma conífera da espécie *PINUS ELLIOTTII* "Slash Pine", nativo na Flórida e *PINUS TAEDA* "Lobolly Pine", nativo na Flórida e Golfo do México. Ambas variedades foram introduzidas com sucesso no Brasil, principalmente na região sul, devido as condições climáticas favoráveis a esta espécie.

A madeira enviada ao laboratório, foi em forma de madeira serrada, cortadas em barras, e recebidas de acordo com a relação abaixo:

Espécie	Quantidade de Barras	Dimensões (mm)	Finalidade
ELLIOTTII	6	20 x 20 x 2990	Teor de umidade/densidade e compressão paralela
TAEDA	6		
ELLIOTTII	6	50 x 50 x 2990	Flexão simples (ASTM D143-52) e tração paralela às fibras
TAEDA	6		
ELLIOTTII	6	40 x 100 x 600	Tração normal às fibras
TAEDA	6		
ELLIOTTII	6	30 x 100 x 1200	cisalhamento
TAEDA	6		
Total de madeira para esta etapa da pesquisa = 0,18 m ³ .			

Tab.02 - Relação de madeira para os ensaios de caracterização

Não se teve a informação precisa da seleção das árvores e da posição de retirada das barras nas respectivas toras, conforme recomenda algumas normas, como o MB - 26 (1940)^[22] e ASTM D143-52 (1978)^[30].

Quanto à retirada dos corpos de prova das respectivas barras, procurou-se aproximar-se de uma amostragem ocasional ou aleatória, adotando os seguintes procedimentos para a retirada dos mesmos:

- Os corpos de prova de teor de umidade, massa específica aparente e compressão paralela, foram retirados das 12 barras com dimensões de 20 x 20 x 2990 mm, obedecendo a sequência mostrada na figura **III.08**.

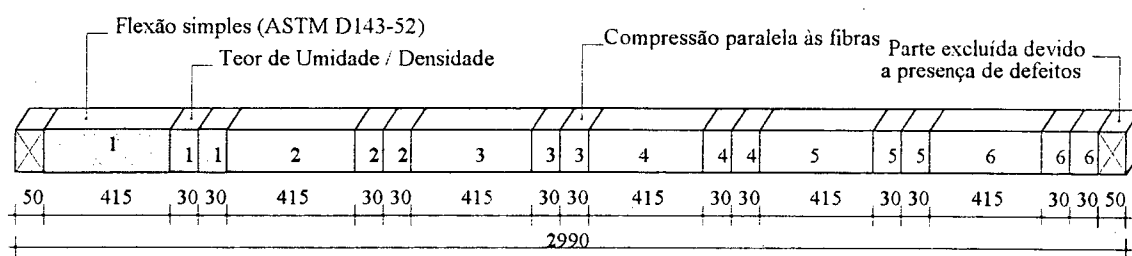


Fig. III.08 - Esquema de retirada dos CPs, (mm).

De cada barra retirou-se 50 mm de cada extremidade, para eliminar defeitos de rachaduras e arestas batidas. Para estes corpos de prova foram retirados 6 (seis) unidades de cada barra, totalizando 36 CPs por espécie e por ensaio.

- Para confeccionar os corpos de prova de tração paralela às fibras e flexão simples (ASTM D143-52), utilizou-se as 12 barras com dimensões de 50 x 50 x 2990 mm, sendo 6 (seis) barras de *Pinus Taeda* e 6 (seis) *Pinus Elliottii*. A retirada dos CPs foi feita de acordo com a figura III.09.

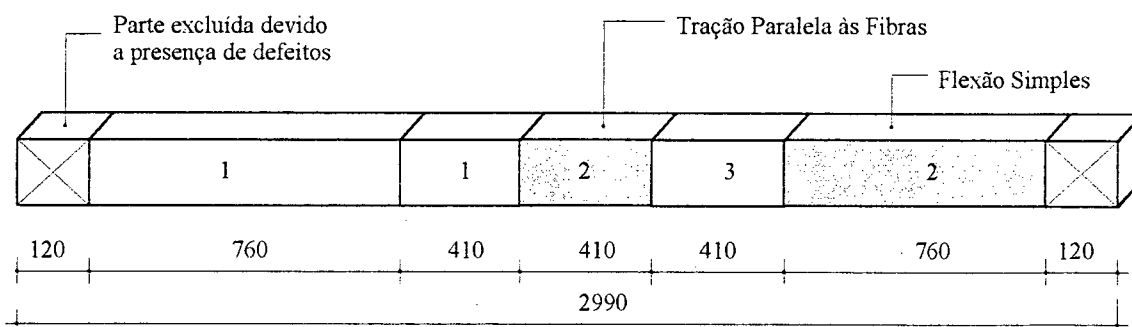


Fig. III.09 - Esquema de retirada do CPs de Flexão Simples (ASTM D143-52) e Tração Paralela às Fibras, (mm).

De cada barra foram retirados 2 (dois) corpos de prova de flexão simples, totalizando 12 CPs por espécie, os seis restantes para a complementação de 18 (dezoito) amostras retirou-se da sobra de outras barras. Desta mesma barra, também foram retirados 3 (três) corpos de prova para o ensaio de tração paralela às fibras, totalizando 18 CPs por espécie. Da extremidade destas barras excluiu-se 120 (cento e vinte) mm de cada lado para eliminar alguns defeitos.

- Os corpos de prova de tração normal, foram retirados das 12 (doze) barras com dimensões 40 x 100 x 600 mm, destas 6 (seis) eram de *Pinus Taeda* e 6 (seis) de *Pinus Elliottii*. A retirada dos corpos de prova se deu da seguinte maneira, ver figura III.10.

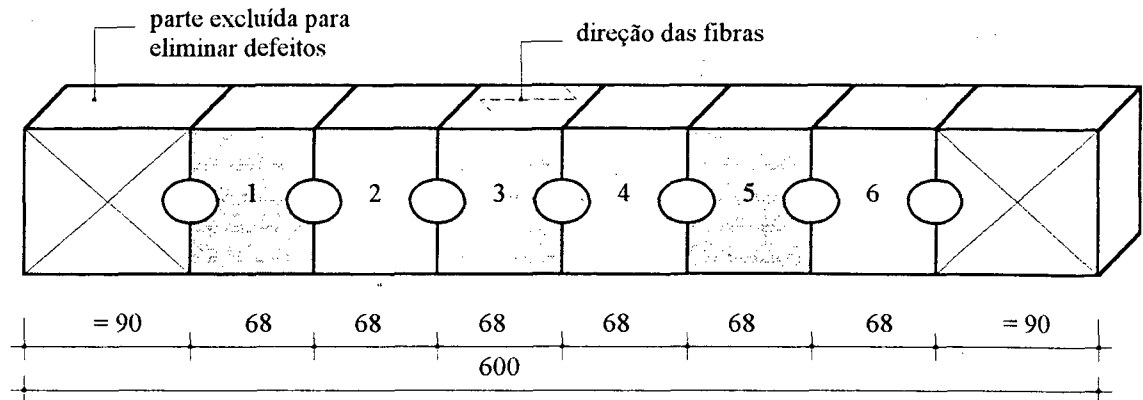


Fig. III.10 - Esquema de retirada dos CPs de tração normal às fibras, (mm).

De cada barra retirou-se 6 (seis) corpos de prova de tração normal, totalizando 18 CPs por espécie. Para estas barras eliminou-se 90 mm aproximadamente em cada extremidade, para que fossem eliminados os grandes defeitos, tais como: nós, rachaduras e cantos batidos, bastante presentes nestas barras.

• Para a retirada dos corpos de prova de cisalhamento, foram utilizadas 12 barras de 30 x 100 x 1200 mm, destas 6 (seis) eram de *Pinus Taeda* e 6 (seis) de *Pinus Elliottii*. A retirada dos CPs foram feita conforme mostra a figura III.11.

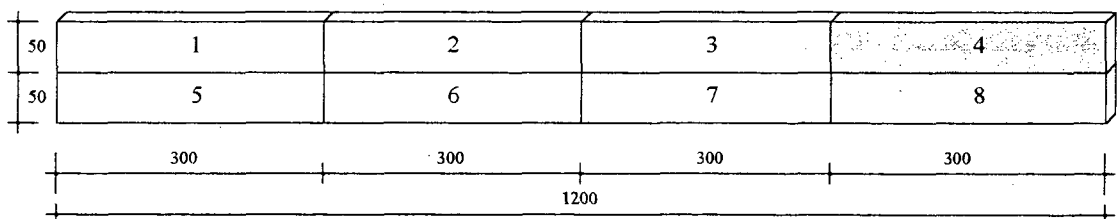


Fig. III.11 - Esquema de retirada dos CPs de cisalhamento

Cada barra possibilitou a retirada de 8 (oito) corpos de prova, totalizando 36 (trinta e seis) corpos de prova por espécie.

Quanto à numeração dos corpos de prova, adotou-se uma metodologia própria, inspirada no MB-26, conforme o modelo apresentado abaixo, por exemplo:

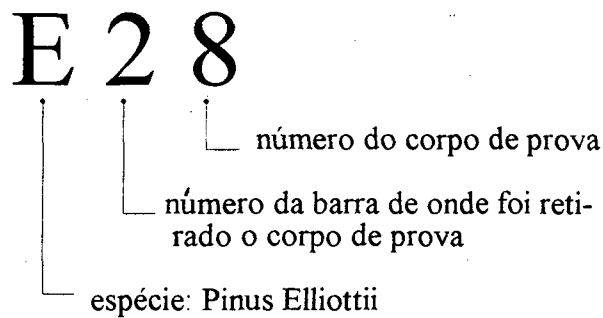


Fig. III.12 - Sistema de numeração dos corpos de prova

Desta forma, todos os corpos de prova destinados aos ensaios de caracterização físico-mecânicas foram pré-serrados, para em seguida receberem o acabamento de acordo com as normas que os regerão. Estes ensaios estão descritos a seguir de maneira generalizada.

III.3 - Propriedades Físicas

III.3.1 - Teor de Umidade

III.3.1.1 - Descrição geral

Encontra-se frequentemente na literatura, que o conhecimento do teor de umidade da madeira é de grande importância, pois todas as propriedades mecânicas, assim como a massa específica aparente, variam com o mesmo. Daí a necessidade do estudo da umidade da madeira.

• EQUIPAMENTOS:

- Balança MARTE, modelo AM 5500, precisão 0,01g.
- Estufa FANEM, modelo 315/2-250 °C, sensibilidade 1°C.

A determinação do teor de umidade foi baseado na metodologia prescrita pelo MB-26 (1940)^[22]. Para isso, 40 corpos de prova de Pinus Taeda e Elliottii com dimensões 20x20x30mm foram confeccionados de acordo com o esquema ao lado.

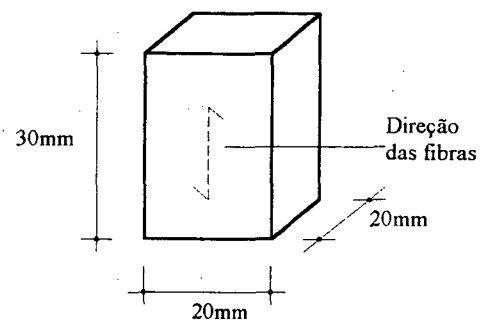


Fig. III.13 - Desenho esquemático do corpo de prova

Os corpos de prova foram colocados na estufa a $100 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ para a secagem até ser atingido o peso constante P_s . Finalmente o teor de umidade é determinado em relação ao peso seco em estufa utilizando-se a seguinte expressão.

Onde:

$$H = \left(\frac{P_h - P_s}{P_s} \right) \times 100$$

H = Umidade

P_h = Peso do corpo de prova úmido

P_s = Peso do corpo de prova seco a $100 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$

III.3.1.2 - Resultados: Resumo da estatística descritiva. O embasamento teórico da estatística é apresentado de forma resumida no ANEXO - 03 da página 146.

Parâmetros TEOR DE UMIDADE	PINUS TAEDA (%)	PINUS ELLIOTTII (%)
N (unidades)	40	40
Valor mínimo	10,79	9,78
Mediana	11,81	14,04
Valor máximo	12,68	16,56
Média	11,77	13,93
Desvio padrão	0,44	1,61
Coef. de variação (%)	3,71	11,55

Os resultados parciais de cada corpo de prova tanto do *Pinus Taeda* como do *Elliottii*, encontram-se nas páginas 130 e 131 do ANEXO-01.

III.3.2 - Massa específica aparente

III.3.2.1 - Descrição Geral

A densidade da madeira depende da espécie examinada, da árvore de onde provém, da localização dos corpos de prova na tora e da umidade da madeira. Como se vê, todas as características físicas e mecânicas estão diretamente relacionadas à sua massa específica aparente ou densidade (D_h).

• EQUIPAMENTOS:

- Paquímetro com precisão de 0,01 mm.
- Balança MARTE, modelo AM 5500, precisão de 0,01 g.
- Termo-Higrômetro Digital HEGRO-HD 820.

Para a definição dos corpos de prova, utilizou-se as dimensões recomendadas pelo MB-26 (1940)^[22], ou seja 20x20x30mm, afim de que fosse aproveitado o mesmo gabarito do corpo de prova do teor de umidade. Para cada espécie foram confeccionados 40 corpos de prova, tanto para o *Pinus Taeda* como o *Elliottii*.

Registou-se as condições ambientais através de um Termo-Higrômetro, umidade de equilíbrio do ar e a temperatura ambiente marcavam 66 % e 23 °C, respectivamente.

A determinação da massa específica aparente obedeceu as recomendações da norma Alemã DIN-52 182 (1952)^[31], esta opção se deu devido a facilidade da metodologia para a obtenção do volume seco ao ar. Esse volume, originou-se da média de quatro medidas das arestas correspondentes. A massa do corpo de prova com teor de umidade próxima ao ponto de saturação, foi determinada utilizando-se a balança de precisão.

Finalmente, a massa específica aparente foi calculada em função do peso por unidade de volume, a um determinado teor de umidade, isto se deu pela expressão abaixo:

$$D_h = \frac{P_h}{V_h}$$

Onde:

D_h = Massa esp. aparente da madeira com teor de umidade igual a n%.

P_h = Massa do CP com teor de umidade qualquer: n%.

V_h = Volume aparente do CP com teor de umidade qualquer: n%.

III.3.2 - Resultados: Resumo da estatística descritiva

Parâmetros M. E. APARENTE	PINUS TAEDA (g/cm ³)	PINUS ELLIOTTII (g/cm ³)
N (unidades)	40	40
Valor mínimo	0,37	0,41
Mediana	0,43	0,48
Valor máximo	0,58	0,59
Média	0,44	0,48
Desvio padrão	0,05	0,04
Coef. de variação (%)	11,51	8,7

Os resultados parciais de cada corpo de prova, tanto do *Pinus Taeda* como do *Elliottii* encontram-se na página 132 do ANEXO-01.

As correções necessárias dos valores obtidos para a massa específica padrão, a título de comparação dos resultados, foram corrigidas para a massa específica correspondente à umidade de 15 %. Isto foi feito através do diagrama de KOLLMANN adotado pela DIN 52182. E os valores são os seguintes: PINUS TAEDA, D (15%) = 0,48 g/cm³ e PINUS ELLIOTTII, D (15%) = 0,52 g/cm³.

III.4 - Propriedades Mecânicas

III.4.1 - Flexão simples

III.4.1.1 - Descrição geral

Em geral, a determinação da resistência à flexão de certos materiais como o aço e o concreto é feito sobre corpos de prova submetidos à flexão a três pontos. O MB-26, também recomenda essa metodologia para as madeiras. Neste caso a carga é aplicada no meio do vão provocando momento máximo neste ponto e forçosamente a ruptura será levada a ocorrer neste local. No entanto, este esquema de ensaio se adapta melhor para materiais isotrópos e homogêneos, não sendo este o caso das madeiras.

Para as madeiras é preferível adotar o esquema de ensaio de flexão a quatro pontos, recomendado pela norma Francesa NFB51-008^[32] e norma Inglesa BS 5820 (1979)^[33]. O ensaio se desenvolve sobre a aplicação de duas cargas equidistantes agindo sobre o vão, dando origem a momento máximo de flexão, uniforme nesta região. Com isso a ruptura se dará no local mais desfavorável e em função da constituição interna da madeira. Por essas razões, esse esquema de ensaio será adotado nesta pesquisa para a determinação do módulo de elasticidade e resistência à flexão.

Foram ensaiados 14 (quatorze) corpos de prova de *Pinus Taeda* e 17 (dezessete) de *Pinus Elliottii*, as dimensões adotadas foram 50x50x760 mm prescritas pela ASTM D143-52 (1978)^[30], possibilitando a instalação de dois relógios comparadores, e a obtenção gradual dos pares de carga-deformação.

• EQUIPAMENTOS:

- Unidade de pressão hidráulica, capacidade de 140 bar.
- Cilindro hidráulico W30, capacidade 10 ton.

- Anel dinamométrico, cap. 5 ton., constante de 2,07 Kg,
- c/ relógio comparador MITUTOYO, precisão 0,001-5 mm
- Dois relógios comparadores MITUTOYO, precisão 0,01-30 mm.
- Bases magnéticas
- Rótula

O carregamento foi aplicado por cilindro hidráulico com o acréscimo constante de carga, as leituras das cargas foram feitas por intermédio do anel dinamométrico e o tempo de duração de cada ensaio foi da ordem de 2 minutos. A figura abaixo mostra o esquema do ensaio adotado.

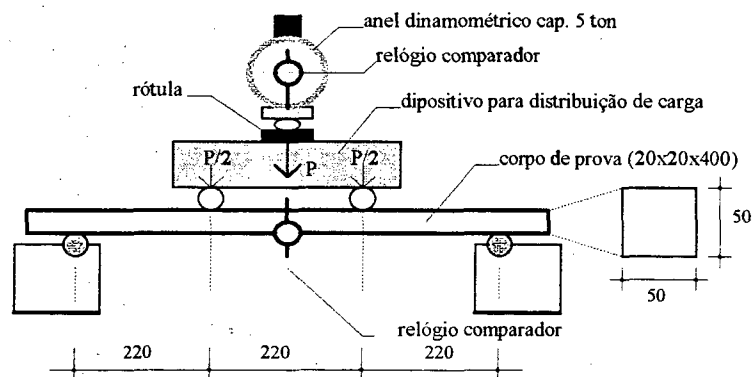


Fig.III.14 - Esquema do ensaio de flexão a 4 pontos

A velocidade de aplicação do carregamento foi aproximadamente de 10 MPa/min.. E a leitura da carga foi efetuada por meio do anel dinamométrico e as flechas obtidas pela média entre as leituras dos dois relógios comparadores, estes posicionados no meio do vão e instalados nas duas faces laterais do corpo de prova.

Finalmente a resistência e o módulo de elasticidade na flexão foram determinados de acordo com as expressões abaixo. Como a relação "L/d" do corpo de prova é igual a 13,2 e conforme estudo apresentado no item II.5, foi necessário considerar a parcela de contribuição do cisalhamento (9,6) para o cálculo do "E_f".

- Resistência à flexão $\rightarrow \sigma_f^{rup} = \frac{3.P.a}{b.h^2}$
- Módulo de elasticidade longitudinal $\rightarrow E_f = \frac{P.a}{\delta.b.d} \left[\frac{3.L^2 - 4.a^2}{4.d^2} + 9,6 \right]$

Onde:

E_f = mód. elasticidade na flexão a = distância da carga atuante ao apoio

P = carga atuante h = altura do corpo de prova
 b = base do corpo de prova L = distância entre apoios
 δ = flecha atuante

III.4.1.2 - Resultados: Resumo da estatística descritiva

Parâmetros (MPa)	PINUS TAEDA		PINUS ELLIOTTII	
	Resistência à flexão	Módulo de Elasticidade	Resistência à flexão	Módulo de Elasticidade
ENSAIO				
N (unidades)	14	14	17	17
Valor mínimo	32,25	11718.85	18,07	6860.83
Mediana	54,14	18281.06	31,45	9471.67
Valor máximo	91,82	33910.66	44,6	13854.09
Média	54,9	19442.41	31,4	9955.65
Desvio Padrão	16,24	5734.89	6,5	200146
Coef. de variação (%)	29,58	29.50	20,59	20.10

Os resultados parciais dos ensaios por espécie, encontram-se na página 133 do ANEXO-01.

II.4.2 - Compressão paralela às fibras

III.4.2.1 - Descrição geral

A resistência a compressão foi determinada conforme o MB-26, pela obtenção da resistência à flexão de 40 (quarenta) corpos de prova de 20x20x30 mm, isentos de defeitos.

- EQUIPAMENTOS
 - Unidade de pressão hidráulica, capacidade 140 bar.
 - Cilindro hidráulico W30, capacidade 10 ton.
 - Anel dinamométrico, cap. 5 ton., const. de 2,07 Kg (menor fração) com relógio comparador MITUTOYO, precisão 0,001-5 mm.
 - Paquímetro com precisão de 0,01 mm
 - Rótula

Os corpos de prova foram submetidos a um carregamento axial aplicado na extremidade rotulada, por meio de cilindro hidráulico com acréscimo constante de carga. Estas, foram obtidas através do produto da constante do anel pelas leituras registradas no relógio comparador. O tempo de duração de cada ensaio foi da ordem de 2 minutos, o que resulta numa velocidade de aplicação de carga de aproximadamente 14 MPa/min.

A área do corpo de prova foi determinada através da média das quatro medidas das arestas correspondentes. As dimensões nominais e o esquema do ensaio são apresentadas na figura abaixo.

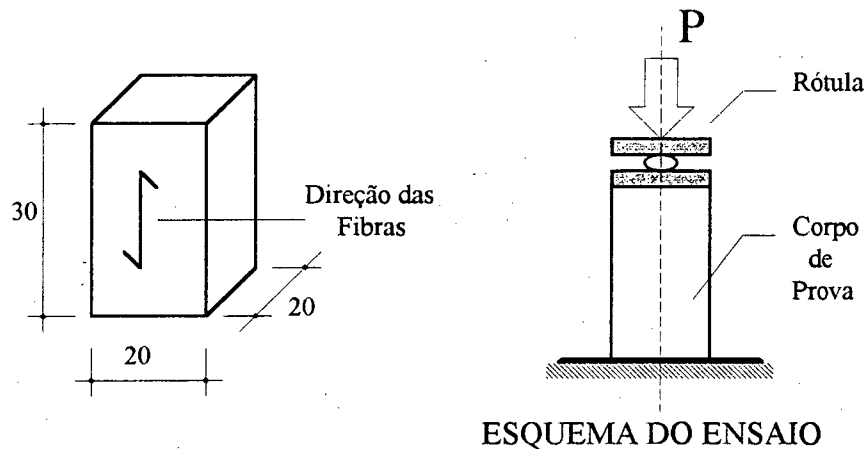


Fig.III.15 - Dimensões e esquema do ensaio de compressão paralelas às fibras

Com a equação apresentada a seguir, determinou-se a resistência à compressão às fibras de cada corpo de prova e seu respectivo valor médio.

Onde:

$$\sigma_{cp}^{rup} = \frac{P}{S}$$

σ_{cp}^{rup} = Resistência à compressão
paralelas às fibras

P = Carga atuante

S = Área da seção transversal

III.4.2.2 - Resultados: Resumo da estatística descritiva

Parâmetros RESIST. COMPRESSÃO	PINUS TAEDA (MPa)	PINUS ELLIOTTII (MPa)
N (unidades)	40	39
Valor mínimo	22,34	21,33
Mediana	28,7	27,11
Valor máximo	42,04	48,16
Média	29,02	28,91
Desvio padrão	4,96	7,09
Coef. de variação (%)	17,07	24,52

Os resultados parciais de cada corpo de prova tanto para o *Pinus Taeda* como do *Elliottii*, encontram-se nas páginas 134 e 135 do ANEXO-01.

III.4.3 - Tração paralela às fibras

III.4.3.1 - Descrição geral

Segundo HELLMEISTER (1983)^[29], "o ensaio de tração paralela às fibras apresentam inúmeras dificuldades, sendo, por paradoxo, a dificuldade mais séria, o fato de ser a resistência à tração paralela às fibras a maior apresentada pelas madeiras".

Esta colocação deve-se ao fato de que a madeira raramente rompe por tração quando submetida a experimentos, rompe quase sempre, sob a ação de esforços secundários, que acompanham geralmente a sollicitação de tração. Estes esforços secundários auxiliam o rompimento do material por fendilhamento, por cisalhamento ou por compressão normal.

A dificuldade na transmissão do esforço surge na determinação da carga de ruptura nos ensaios experimentais. Não é simples obter uma forma para as cabeças dos corpos de prova que transmita integralmente o esforço de tração, sem sofrer influência dos esforços secundários. Por esta razão, estes corpos de prova são providos de grandes cabeças.

Os ensaios de tração não estão normatizados pelas Normas Brasileira; por esta razão se faz necessário recorrer a outras normas. Será adotado o esquema de ensaio previsto pela DIN 52 188 (1952)^[34].

- EQUIPAMENTOS:

- Máq. de ensaios universais Wolpert Lestor - AMSLER / D6700
- Paquímetro com precisão 0,01 mm.

Foram ensaiados 18 (dezoito) corpos de prova, tanto para o *Pinus Taeda* como para o *Elliottii*. O carregamento foi aplicado por cilindro com acréscimo constante de carga. A leitura da carga foi feita diretamente no painel de uma máquina de ensaio AMSLER com a escala de 20 KN. Neste ensaio anotou-se apenas a carga de ruptura de cada corpo de prova. O tempo de duração de cada ensaio foi da ordem de 4 minutos, o que resulta numa velocidade de aplicação da carga de aproximadamente 10 MPa / min. O esquema do ensaio e as dimensões do corpo de prova estão indicadas a seguir:

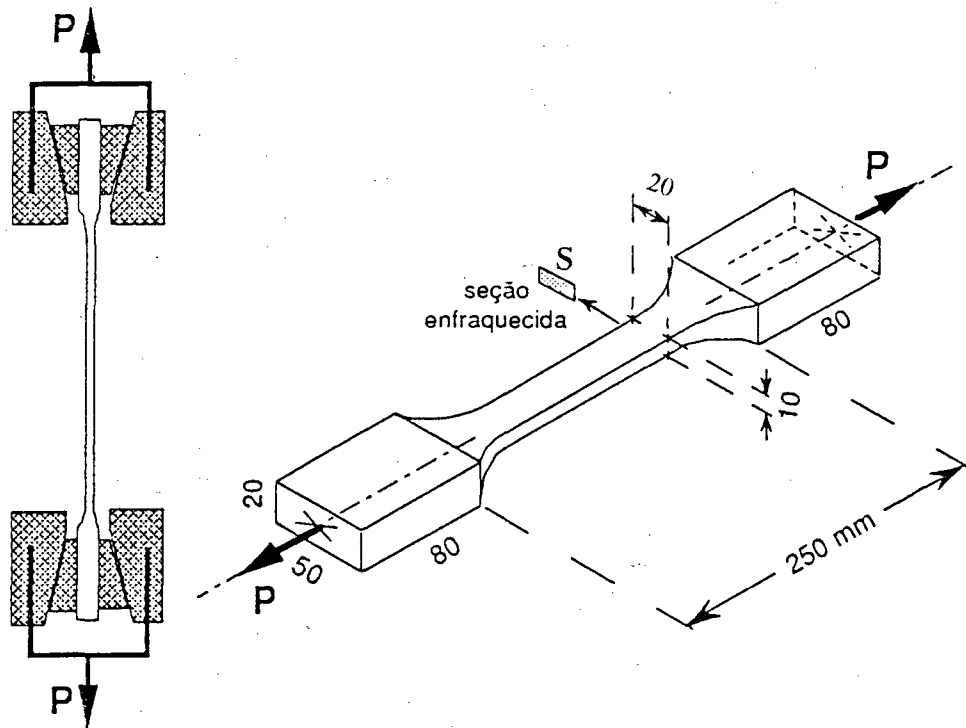


Fig. III.16 - Dimensões e esquema do ensaio de tração paralela às fibras

Finalmente a resistência à tração paralela às fibras foi determinada utilizando-se a seguinte expressão:

$$\sigma_{tp}^{rup} = \frac{P}{S_c}$$

Onde:

σ_{tp}^{rup} = Resist. à tração paralela às fibras

P = Carga atuante

S_c = Área crítica

III.4.3.2 - Resultados: Resumo da estatística descritiva

Parâmetros TRAÇÃO PARALELA	PINUS TAEDA (MPa)	PINUS ELLIOTTII (MPa)
N (unidades)	18	18
Valor mínimo	22,16	16,07
Mediana	46,83	38,8
Valor máximo	84,8	58,85
Média	53,1	38,2
Desvio padrão	19,69	11,31
Coef. de variação (%)	37,08	29,61

Os resultados parciais de cada corpo de prova tanto do *Pinus Taeda* como do *Elliottii* encontram-se na página 136 do ANEXO - 01.

III.4.4 - Tração normal às fibras

III.4.4.1 - Descrição geral

A madeira pouco resiste ao esforço normal às fibras, portanto, em termos práticos deve-se evitar todo e qualquer esforço deste gênero nas construções e, em caso de impossibilidade, procura-se prever dispositivo de reforço, afim de compensar a baixa resistência a este tipo de solicitação.

O ensaio de tração normal às fibras encontra-se normatizado pela ABNT através do MB-26. No entanto, estudos efetuados em pesquisas anteriores evidenciaram falhas na referida norma. Assim sendo, foi adotado o corpo de prova recomendado pela DIN 68 141 (1969)^[35], conforme mostrado na figura abaixo:

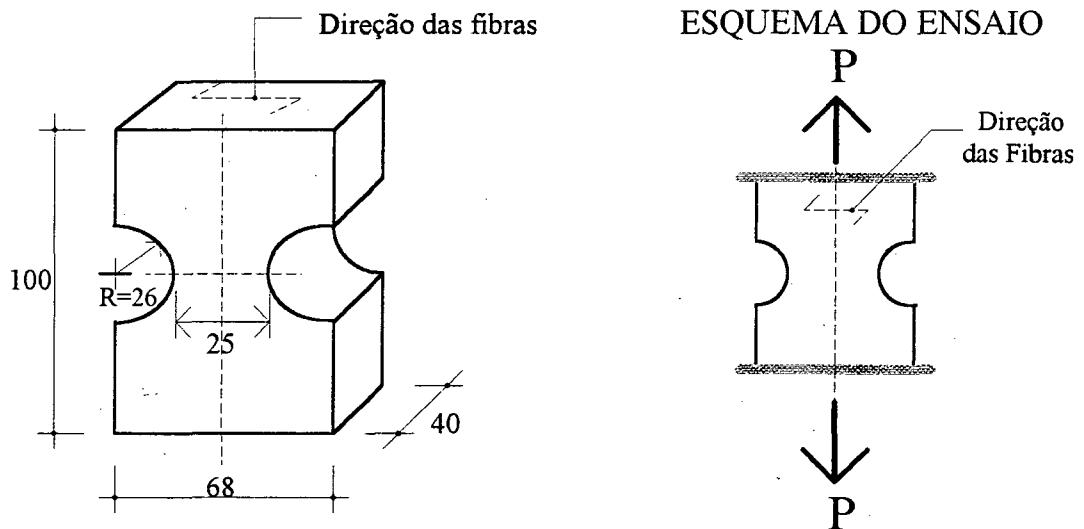


Fig.III.17 - Corpo de prova e esquema de ensaio de tração normal às fibras

Devido a máquina de ensaio universal de AMSLER ter apresentado defeito na época de realização deste ensaio, houve a necessidade da equipe do LEE/ECV desenvolver um dispositivo de ensaio que originasse esforços de tração a partir de uma solicitação de esforços de compressão, afim de substituir o equipamento anterior. Este dispositivo é mostrado na foto da página seguinte.

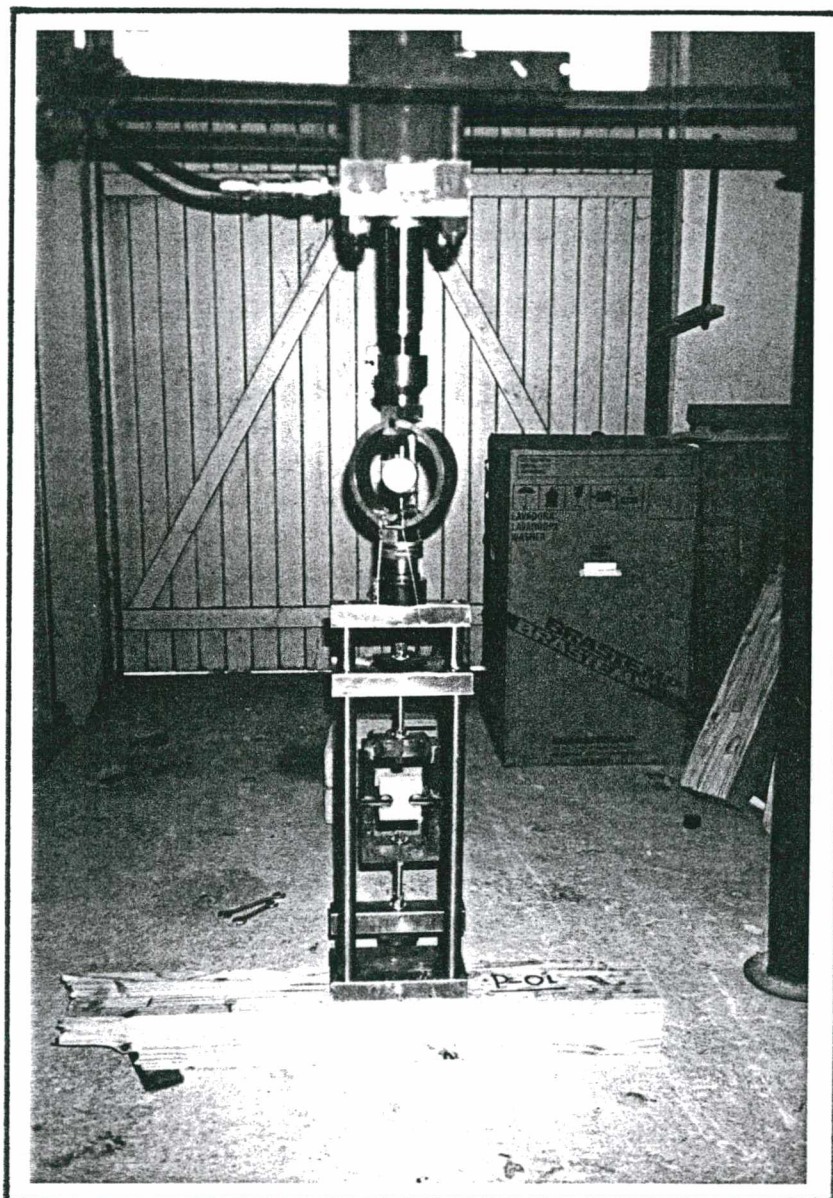


Fig.III.18 - Dispositivo desenvolvido para o ensaio de tração normal às fibras

Foram ensaiados 36 (trinta e seis) corpos de prova por espécie. O carregamento foi aplicado por cilindro hidráulico com acréscimo constante de carga e, através do esforço inicial de compressão aplicado na parte superior do dispositivo, foi produzido deslocamento vertical dando origem ao esforço de tração na base inferior fixada ao corpo de prova. A extremidade oposta do CP foi presa na barra superior do dispositivo, complementando o par de esforços ação-reação e o conseqüente rompimento na seção crítica por tração normal às fibras. A leitura da carga foi feita diretamente no anel dinamométrico acoplado ao cilindro, tendo como escala máxima 10 KN. Neste ensaio foi anotada apenas a carga de ruptura de cada corpo de prova. A velocidade de aplicação de carga foi equivalente a um acréscimo de tensão de aproximadamente 1 MPa/min.

EQUIPAMENTOS:

- Unidade de pressão hidráulica, cap. 140 bar.
- Cilindro hidráulico W30, cap. 10 ton.
- Anel dinamométrico, cap. 5 ton., const. 2,07 Kg, com relógio comparador MITUTOYO, sensibilidade 0,001 - 5 mm.
- Dispositivo de ensaio desenvolvido no LEE/ECV.
- Rótula.

De posse dos valores obtidos no ensaio e da equação representada a baixo, determinou-se a resistência à tração normal às fibras para cada corpo de prova e em sequência seu respectivo valor médio.

$$\sigma_{tn}^{rup} = \frac{P}{S_c}$$

Onde:

σ_{tn}^{rup} = Resistência à tração normal às fibras.

P = Carga atuante.

S_c = Seção crítica.

III.4.4.2 - Resultados: Resumo da estatística descritiva.

Parâmetros TRAÇÃO NORMAL	PINUS TAEDA (MPa)	PINUS ELLIOTTII (MPa)
N (unidades)	36	36
Valor mínimo	1,19	0,59
Mediana	2,44	2,99
Valor máximo	3,69	5,02
Média	2,43	2,7
Desvio padrão	0,67	1,39
Coef. de variação (%)	27,4	51,46

Os resultados parciais por espécie e de cada corpo de prova são apresentados nas paginas 137 e 138 do ANEXO - 01.

III.4.5 - Cisalhamento paralelo às fibras

III.4.5.1 - Descrição geral

Os esforços que originam o deslizamento de uma plano sobre outro são chamados de cisalhamento e ocorrem segundo planos paralelos às camadas de crescimento.

É muito difícil produzir somente tensões de cisalhamento experimentalmente. A maioria dos métodos de ensaios de cisalhamento adotado pelas normas, usam forças opostas, com alguma excentricidade, introduzindo além do esforço de cisalhamento, tensões adicionais para impedir a rotação. É o que vem ocorrendo com os ensaios utilizando o modelo do MB-26. Discorrendo sobre este assunto, FERREIRA; FUSCO (1993)^[36], comentam que foram realizados diversos ensaios no Laboratório de Estruturas e Materiais Estruturais da Escola Politécnica da USP-LEM, utilizando corpos de prova adotado pelo MB-26, e os resultados obtidos não foram satisfatórios, provando que o erro introduzido pelo estado complexo de tensões não é desprezível. Apenas 14 % do total de 21 corpos de prova romperam seguramente por cisalhamento. Por esta razão, não será seguido a metodologia prescrita pelo MB-26.

Há um estudo apresentado por KOLLMANN (1984)^[15], no qual é utilizado um corpo de prova para o ensaio de cisalhamento baseado nas recomendações da norma Francesa NF B5-32(1942)^[37]. Este corpo de prova é de fácil confecção e possibilita o uso do mesmo dispositivo utilizado no ensaio de tração normal às fibras, bastando apenas adaptar uma garra de fixação com pino removível para segurar o corpo de prova durante a solicitação dos esforços do ensaio. Isto foi feito sem dificuldades. Por estes motivos adotou-se este corpo de prova para a realização deste ensaio.

A figura seguinte apresenta o corpo de prova adotado e em seguida a foto do mesmo no dispositivo após a realização do ensaio.

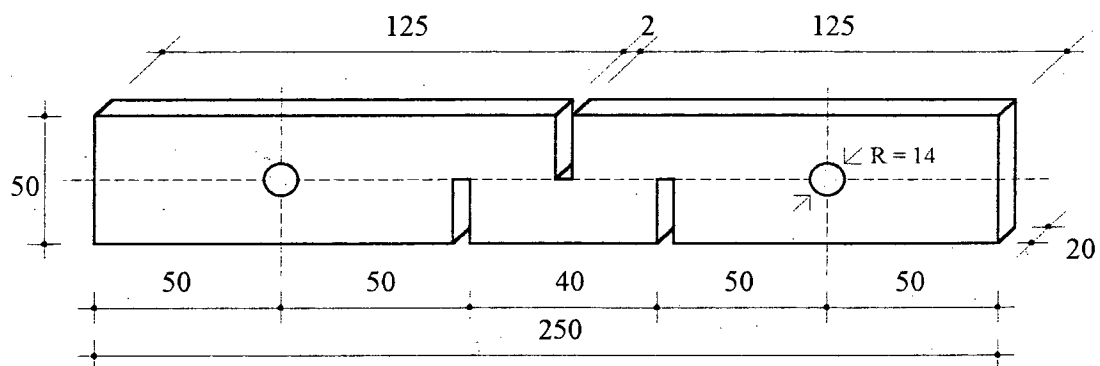


Fig. III.19 - Corpo de prova do ensaio de cisalhamento

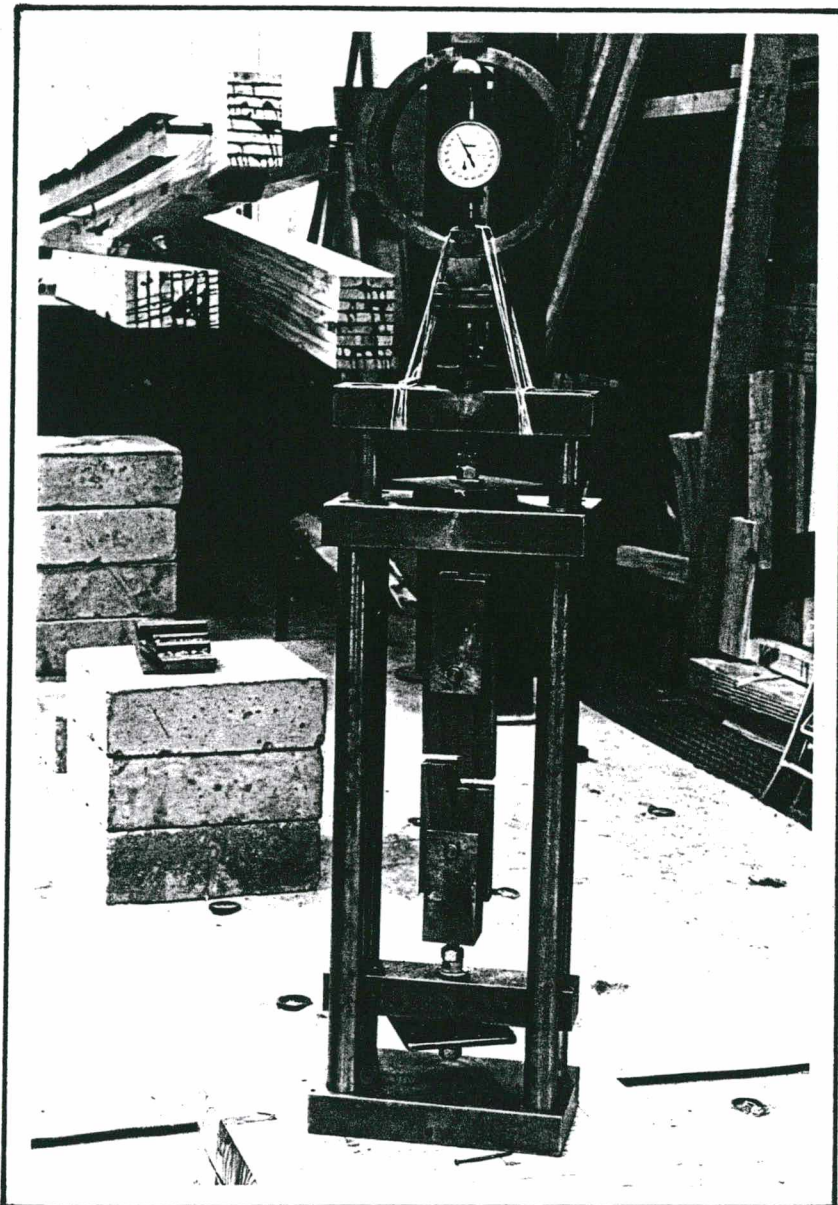


Fig.III.20 - Dispositivo do ensaio de cisalhamento

EQUIPAMENTOS:

- Unidade de pressão hidráulica, cap. 140 bar.
- Cilindro hidráulico W30, cap. 10 ton.
- Anel dinamométrico, cap. 5 ton., constante 2,07 Kg, com relógio comparador MITUTOYO, sensibilidade 0,001-5 mm.
- Dispositivo desenvolvido no LEE/ECV.
- Rótula.

Foram ensaiados 34 (trinta e quatro) corpos de prova de *Pinus Taeda* e 35 (trinta e cinco) de *Pinus Elliottii*. O carregamento se deu por meio de um cilindro hidráulico com acréscimo constante de carga e, por intermédio de um esforço inicial de compressão aplicado na parte superior do dispositivo, foi produzido deslocamento vertical dando origem ao esforço de tração na base inferior fixada ao corpo de prova por um pino metálico transversalmente ao eixo vertical do CP. Este, também preso na outra extremidade originando

esforços de ação-reação e o conseqüente rompimento das fibras na seção crítica por cisalhamento. A leitura da carga foi feita diretamente no anel dinamométrico acoplado ao cilindro, anotando-se apenas a carga de ruptura de cada corpo de prova.

Com os dados do ensaio acima e de posse da equação apresentada abaixo, determinou-se a resistência ao cisalhamento paralelo às fibras para cada corpo de prova e seu respectivo valor médio.

Onde:

$$\tau_{ci}^{rup} = \frac{P}{S_c}$$

τ_{ci}^{rup} = Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras.

P = Carga atuante.

S_c = Seção crítica.

III.4.5.2 - Resultados: Resumo da estatística descritiva:

Parâmetros CISALHAMENTO	PINUS TAEDA (MPa)	PINUS ELLIOTTII (MPa)
N (unidades)	34	35
Valor mínimo	3,62	3,67
Mediana	5,41	5,23
Valor máximo	8,85	10,19
Média	5,52	5,3
Desvio padrão	1,22	1,33
Coef. de variação (%)	22,01	25,18

Os resultados parciais de cada corpo de prova tanto do *Pinus Taeda* como do *Elliottii*, encontram-se nas páginas 139 e 140 do ANEXO-01.

O desempenho do dispositivo e do corpo de prova é avaliado, preliminarmente, quando se compara os resultados destes com os obtidos pelo INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICA (IPT). Na tabela seguinte, observa-se que para este ensaio, ocorreu uma boa aproximação em ordem de grandeza entre os valores das duas instituições.

No que se refere a caracterização da madeira de PINUS do Planalto de Lages / SC, observa-se na tabela seguinte, uma comparação dos resultados com os obtidos pelo IPT. Verifica-se uma pequena variação de ordem de grandeza, as quais justificáveis em função das árvores serem de regiões diferentes. Nota-se também, um melhor comportamento mecânico do PINUS TAEDA em relação ao PINUS ELLIOTTII.

FONTE / PROCEDÊNCIA	ESPÉCIE	CARACT. FÍSICAS		CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS						módulo de elasticidade flexão (MPa)
		teor de umidade (%)	massa específica aparente a 15% de umidade (10-6 N/mm ³)	compressão paralela às fibras (MPa)	flexão estática (MPa)	tração paralela às fibras (MPa)	tração normal às fibras (MPa)	cisalhamento (MPa)		
		H	D15%	σ_{cp}^{sup}	σ_f^{sup}	σ_{lp}^{sup}	σ_{ln}^{sup}	τ_{ci}^{sup}	E_f	
IPT	PINUS ELLIOTTII	-	4,8	19	49	49	3	6	6590	
Serra Cantareira-SP	PINUS TAEDA	-	4	15	37	37	3	6	4900	
UFSC*	PINUS ELLIOTTII	14	5	29	31	38	3	5	4356	
Planalto de Lages-SC	PINUS TAEDA	12	5	29	55	53	2	6	8696	

* Dados obtidos do capítulo III desta dissertação

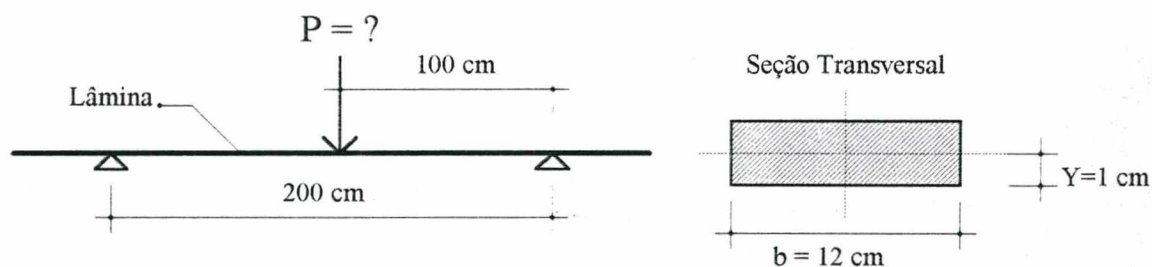
III.5 - Caracterização das lâminas (tábuas) por flexão simples

A EMPRESA BATTISTELLA, sediada em Lages, interessada no desenvolvimento de pesquisas com espécie de reflorestamento utilizando a técnica da madeira laminada-colada, forneceu 360 tábuas da espécie PINUS, das quais 70 % da variedade TAEDA e 30% ELLIOTTII. Estas tábuas de (20x120x2650)mm, totalizaram 2,30 m³ de madeira, e vem sendo utilizada como dimensões comerciais em sua linha de produção. Por esta razão, foram adotadas com as mesmas dimensões para o desenvolvimento dessa pesquisa.

Assim sendo, optou-se por fazer uma classificação e triagem sobre estas 360 tábuas, destinadas à formação das lâminas a serem utilizadas na produção de 30 (trinta) vigas de madeira laminada-colada.

III.5.1 - Procedimento do ensaio

Preliminarmente, houve a necessidade de calcular o peso máximo que as lâminas poderiam suportar, afim de ser evitado que as mesmas ao serem submetidas a carga de ensaio, não ultrapassasse o limite de proporcionalidade do material. Estabeleceu-se o máximo valor de carga em função da resistência no limite de proporcionalidade de flexão para o PINUS TAEDA, devido a representatividade deste na amostragem. A resistência à flexão para esta variedade foi determinada no ítem III.4, como sendo igual a 54 MPa (540 Kg/cm²). A determinação de "P" está descrita abaixo:



- momento máximo: $M = \frac{P.L}{4} \therefore \frac{200.P}{4} \therefore M = 50P$

- momento de inércia: $I = \frac{b.h^3}{12} \therefore I = 8 \text{ cm}^4$

- Tensão admissível na flexão, NBR 7190 (1984)^[21]: $\bar{\sigma} = 0,15 \times 550$ (do ensaio de caracterização, $\therefore \bar{\sigma} = 82,5 \text{ kg/cm}^2$).

$$\bullet \text{ Então : } \bar{\sigma} \leq \frac{M \cdot Y}{I} \quad \therefore 82,5 \leq \frac{50 \cdot P \cdot l}{8} \quad \therefore P \leq 13,2 \text{ Kgf.}$$

Sendo assim, optou-se em trabalhar com o peso de 12 Kgf, pois tinham-se disponíveis dois pesos parciais de 6 Kgf, os quais foram denominados de P_1 e P_2 .

Para a determinação dos valores do Módulo de Elasticidade Longitudinal (E_L) das lâminas, fez-se uma adaptação do modelo utilizado por SZÜCS (1991)^[25], conforme citação em II.4, originando o esquema representado abaixo.

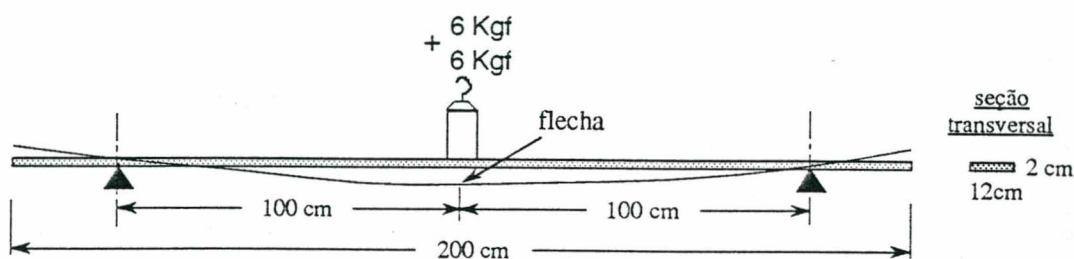


Fig.III.21 - Esquema adotado do ensaio de flexão a 3 pontos

Optou-se em trabalhar com dois pesos de 6 Kgf para simular uma deformação gradual, assim como também, efetuar duas medidas em ambas as faces das tábuas, para contornar defeitos de arqueamentos, provenientes de uma secagem mal conduzida (acelerada).

O ensaio das lâminas objetivando o cálculo do (E_L), obedeceu o seguinte procedimento:

a) As tábuas foram colocadas individualmente entre dois apoios (CAVALETES), distanciados de 200 cm um do outro.

b) Na FACE-1 de cada tábua, fez-se incidir o peso $P_1 = 6$ Kgf, medindo-se em seguida o deslocamento vertical (δ_1) registrado por um ponteiro metálico em uma escala milimétrica, estrategicamente posicionada no meio do vão. Em continuidade, aplicou-se o peso $P_2 = 6$ Kgf sobre o peso P_1 existente, anotando-se o deslocamento vertical (δ_2).

c) Na FACE-2, repetiu-se os passos empregados no item-b. Para todas as lâminas, o tempo de aplicação do peso foi aproximadamente igual a 30 seg., registrado a partir da colação do peso " P_1 " até a leitura da flecha " δ_2 ". A figura 20 elucida o que foi descrito.

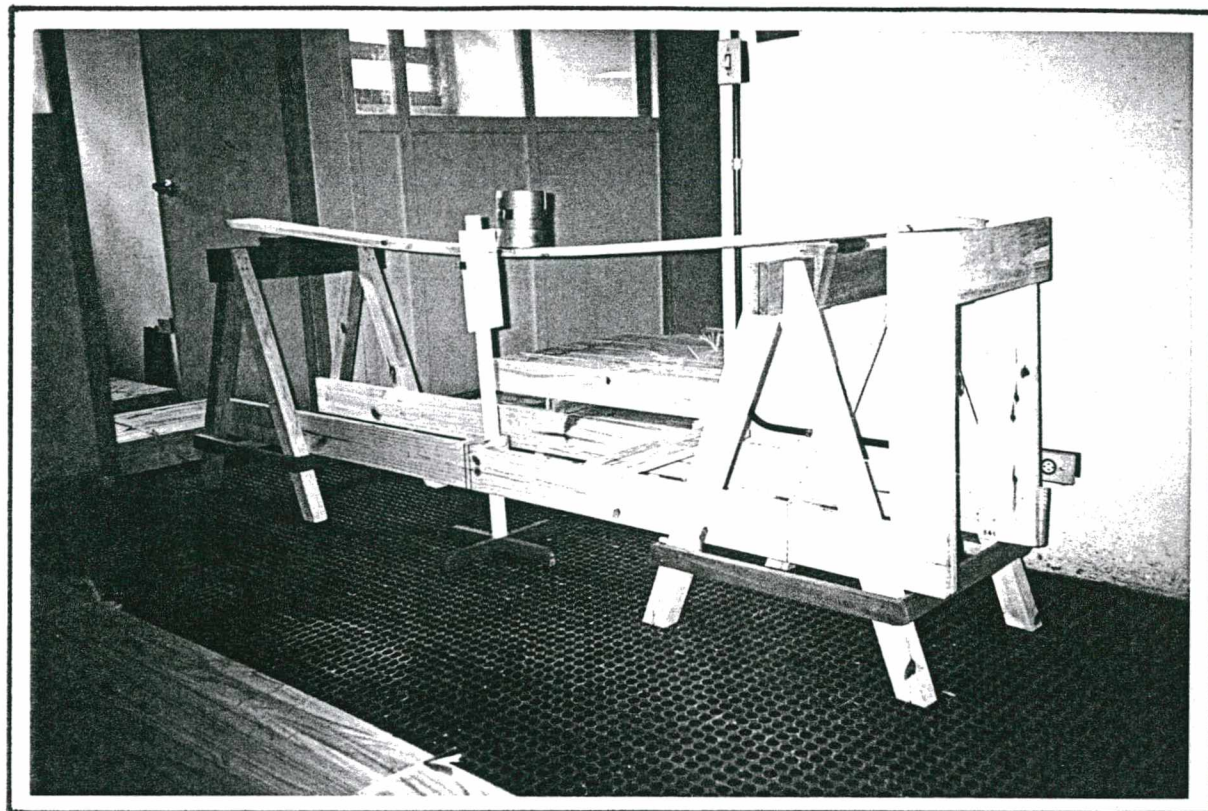


Fig. III.22 - Foto do dispositivo de ensaio das lâminas.

d) Após as etapas "b" e "c", as lâminas foram numeradas de 1 a 360 em uma das faces estreitas e no topo, e separadas em 8 (oito) lotes de 45 (quarenta e cinco) tábuas, para facilitar a futura composição das vigas. A figura-10 mostra essa identificação.

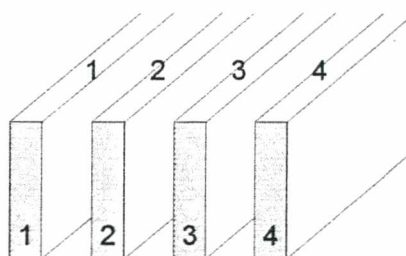


Fig.III.23 - Sistema de identificação das lâminas.

e) Utilizando-se a planilha eletrônica EXCEL 5.0, e de posse dos quatro pares de valores carga-deformação vertical, foi efetuado o cálculo do módulo de elasticidade longitudinal (E_L) correspondentes a cada um destes pares, mediante a aplicação da expressão advinda da resistência dos materiais e prescrita também pelo MB-26.

$$E_L = \frac{P \cdot L^3}{48 \cdot \delta \cdot I} \quad \dots(III.01)$$

Onde:

E = mód. de elast. long. das lâminas

P = Peso-1 = 6 Kg e Peso-2 = 12 Kg.

L = distância entre os apoios = 200 cm

I = momento de inércia = 8 cm⁴.

δ = flecha no meio do vão da lâmina (ensaio)

f) Com os valores parciais de E_1 , E_2 da (FACE-1) e E_3 , E_4 da (FACE-2), extraiu-se a média dos mesmos determinando assim o módulo de elasticidade definitivo de cada lâmina (E_L).

III.5.2 - Resultados

O resultado dos valores do módulo de elasticidade longitudinal (E_L) das 360 lâminas agrupados em intervalo de classe, apresentou a distribuição de frequência observadas e a curva de frequência acumulada de acordo com a figura abaixo.

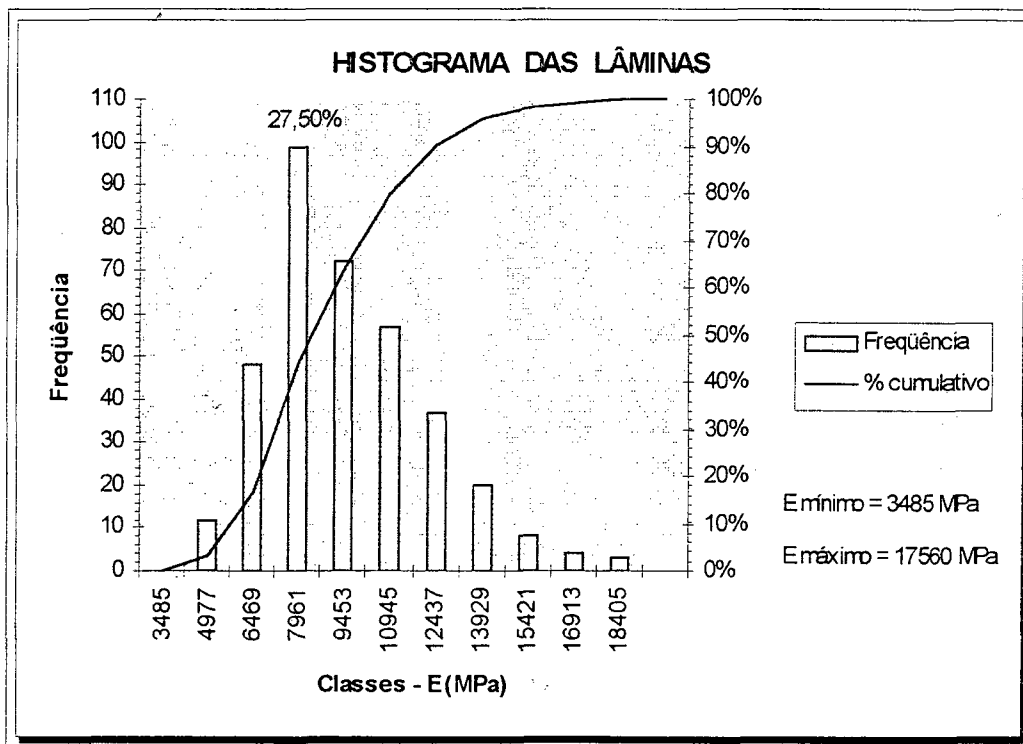


Fig.III. 24 - Histograma e curva de frequência acumulada das lâminas

Observa-se no histograma que a distribuição é assimétrica a direita, verificando-se também uma tendência de normalidade dos dados. Na tabela abaixo é apresentado o resumo da estatística descritiva dos valores experimentais dos módulos de elasticidades das lâminas.

Parâmetros	Valores (MPa)
N (unidades)	360
Valor mínimo	3485
Mediana	8300
Valor máximo	17560
Média	8841
Erro padrão	138
Desvio padrão	2612
Coef. de Variação (%)	30

Na tabela acima, verifica-se um coeficiente de variação "C.V." em torno da média amostral de 30 %, considerado acima do nível ideal que é de 25 % recomendado por NANNI (1986)^[38]. Porém, este valor pode ser considerado **ACEITÁVEL** para o caso em estudo, devido a constituição interna do material madeira, vindo a justificar a variabilidade dos resultados.

CAPÍTULO . IV

COMPOSIÇÃO DA AMOSTRAGEM E TIPOS DE CLASSIFICAÇÃO

IV. COMPOSIÇÃO DA AMOSTRAGEM E TIPOS DE CLASSIFICAÇÃO

IV.1 - Introdução

Nas últimas décadas, vem sendo intensificadas as pesquisas técnicas e experimentais a respeito dos fatores condicionantes da resistência de vigas de MLC. E nesta direção enquadram-se os objetivos pretendidos com esta pesquisa, sabendo-se que a produção de elementos estruturais através da técnica da madeira laminada-colada, permite a ação do homem sobre algumas características que interferem na qualidade final do produto.

Optou-se em trabalhar com elementos em escala real, devido a possibilidade de uma caracterização detalhada das lâminas que compõem os corpos de prova (vigas), facilitando a seleção e o posicionamento das mesmas no interior da seção transversal das vigas.

Neste capítulo será ^{a)}apresentado^s os elementos que definirão a composição das vigas, a saber: Estimativa do número de corpos de prova, concepção geométrica, análise do posicionamento das lâminas e descrição da metodologia empregada nos 5 (cinco) grupos de classificações utilizadas neste estudo.

IV.2 - Estimativa do número de corpos de prova

Tendo em vista a impossibilidade prática de se realizar um número elevado de corpos de prova (CP) em face de se estar trabalhando com vigas de tamanho real, procurou-se certificar-se estatisticamente se a quantidade de CP a ser utilizado será suficiente para a estimativa de uma média, ou comprovação de uma hipótese sobre essa média.

Para estabelecer o número mínimo de corpos de prova, partiu-se dos resultados de um "Ensaio Piloto" em vigas de MLC realizado no LEE-UFSC, enviadas e montadas de forma aleatória pela Empresa Battistella. Para tanto, foi programada a execução do ensaio em flexão estática a 4 pontos em três vigas de tamanho real com dimensões nominais de (100 x 300 x 2600)mm.

O resumo estatístico provenientes dos valores dos módulos de elasticidades destas vigas foram os seguintes: "N" = 3 unidades; média " \bar{X} " = 9536 MPa; desvio padrão "S" = 947 MPa e coeficiente de variação "CV" = 9,93 %.

O método utilizado para a estimativa do "N" mínimo, é apresentado por NANNI (1986)^[38], denominado de Processo Iterativo. Para tanto, foram admitidos alguns parâmetros:

ER = 10 % (erro relativo adotado para experimentos de engenharia)

$\alpha = 0,05$ (nível de confiabilidade 95 %)

Onde:

sendo:

X_c = valor de convergência comparativo

CV = desvio padrão da amostra

ER = erro relativo da estimativa

$$X_c = \frac{CV^2}{ER^2}$$

$$\text{Tem-se : } X_c = \frac{(9,93)^2}{(10)^2} \rightarrow X_c = \mathbf{0.986} \text{ (valor de convergência)}$$

Então, utilizando-se a tabela de Student (anexo em Nanni), para a retirada dos valores de $t \frac{\alpha}{2}(n-1)$, tem-se:

$$\bullet \text{ para } n = 12 \text{ e } \frac{\alpha}{2} = 0,025 \rightarrow \frac{12}{(2,201)^2} \therefore X_{c1} = 2.970$$

$$\bullet \text{ para } n = 9 \text{ e } \frac{\alpha}{2} = 0,025 \rightarrow \frac{9}{(2,206)^2} \therefore X_{c2} = 1.849$$

$$\bullet \text{ para } n = 6 \text{ e } \frac{\alpha}{2} = 0,025 \rightarrow \frac{6}{(2,571)^2} \therefore X_{c3} = \mathbf{0.908}$$

$$\bullet \text{ para } n = 5 \text{ e } \frac{\alpha}{2} = 0,025 \rightarrow \frac{5}{(2,776)^2} \therefore X_{c4} = 0.649$$

Como $X_{c3} = 0.908$ é o valor que mais se aproxima do valor de convergência $X_c = \mathbf{0.986}$, logo $n \geq 6$. Portanto, aceita-se como *suficiente* o ensaio de 6 (seis) corpos de prova (vigas) para as comparações entre os grupos a serem classificados.

Convém registrar a citação feita por HELLMEISTER, mencionado por ROCCO LAHR (1983)^[27], a cerca da suficiência de apenas seis corpos de prova, escolhidos ao acaso, para a determinação de propriedades físicas e mecânicas da madeira.

IV.3 - Características dos elementos estruturais

No item anterior ficou definido que seriam ensaiadas 6 (seis) vigas por grupo de classificação. Como se pretende utilizar 5 (cinco) tipos de classificações, isso nos dá um número total de 30 (trinta) vigas a serem produzidas.

Como citado anteriormente, a Empresa Battistella vem produzindo elementos estruturais de madeira laminada-colada (MLC). E uma das seções comercialmente utilizada em sua linha de produção tem dimensões de (100 x 150 x 2600)mm, composta aleatoriamente de 5 lâminas de 30 mm de madeira *Pinus Taeda* e *Elliottii*. E são fabricadas para serem utilizadas como pilares e vigas de casas de madeira de alto padrão.

Por outro lado, em pesquisa apresentada por NEIVA (1990)^[12], observa-se que o número de lâminas coladas em uma viga reta de MLC é fator fundamental na resistência da estrutura e nas propriedades mecânicas da flexão estática.

Então, buscou-se definir uma seção próxima da comercialmente utilizada pela Battistella, mas que tivesse um número maior de lâminas em sua seção transversal. Assim sendo, esses foram os fatores primordiais que influenciaram na escolha das dimensões geométricas das vigas dessa pesquisa. Até o momento, não houve a preocupação com a relação comprimento / altura das vigas (L/d), mas isto será verificado mais adiante.

Portanto, optou-se em trabalhar com vigas compostas por 8 (oito) lâminas de 20 mm e seção transversal final de 100mm por 160mm e comprimento de 2650mm. Ver desenho esquemático abaixo.

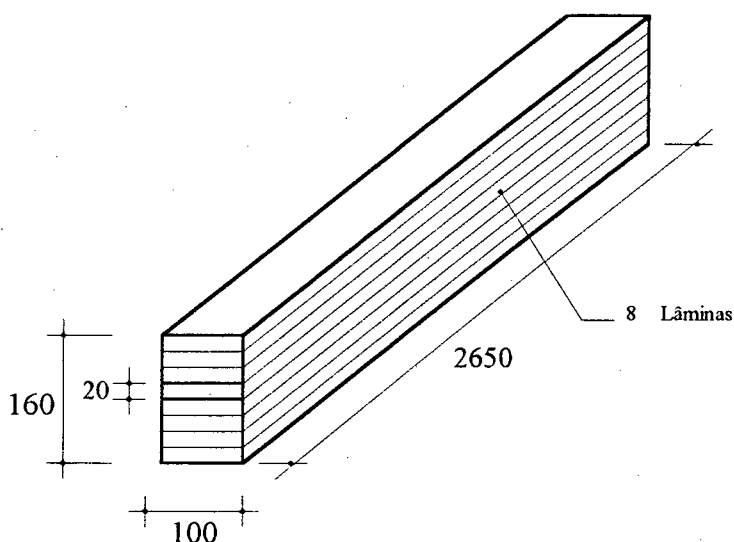


Fig. IV.01 - Dimensões geométricas das vigas (mm)

IV.4 - Análise do posicionamento das lâminas

Quando se trata da construção de estruturas de madeira laminada colada, um dos princípios básicos a ser levado em consideração quando se utiliza essa técnica, é o da seleção e posicionamento das lâminas de acordo com o esforço solicitante no interior da seção da viga.

No tocante a seleção das lâminas, no item III.5, determinou-se o módulo de elasticidade das 360 tábuas através do ensaio de flexão não destrutivo, o que possibilitará a etapa vindoura de composição das vigas.

Em se tratando do posicionamento das lâminas ao longo da seção transversal das vigas, BODIG & JAYNE(1982)^[26] e SZÜCS (1991)^[25] apresentam um estudo que será adaptado para o caso da seção das vigas desta pesquisa.

Como definido em IV.3, a seção das vigas serão compostas de 8 (oito) lâminas com (20 x 120)mm, que após aplainadas ficarão com uma base reduzida para 100mm e a inércia total dessa seção é determinada por:

$$I_{\text{total}} = \sum_{i=1}^8 (I_i) \quad \dots(\text{IV.01})$$

$$I_i = I_o + A_i \cdot (d_i)^2 \quad \dots(\text{IV.02})$$

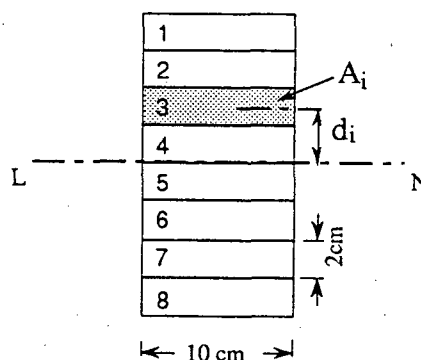
Onde:

I_i = Momento de inércia de cada lâmina em relação a linha neutra da viga.

I_o = Inércia da lâmina em relação a seu próprio eixo.

A_i = Área da seção de cada lâmina.

d_i = Distância entre a linha neutra da viga e a linha neutra da lâmina.



• Inércia total da viga:

$$100\% = \frac{I_1}{I_t} + \frac{I_2}{I_t} + \dots + \frac{I_7}{I_t} + \frac{I_8}{I_t}$$

Inércia das quatro lâminas mais externas:

$$\left(\frac{I_1}{I_t} + \frac{I_2}{I_t} + \frac{I_7}{I_t} + \frac{I_8}{I_t} \right) \cdot 100 = 87,5\%$$

Aplicando-se as equações anteriores, determina-se a inércia parcial de cada lâmina, em relação a linha neutra da peça, esses valores estão representados na figura ao lado. Efetuando-se o somatório da rigidez das lâminas "1" - "2" - "7" - "8", verifica-se que elas contribuem com 87,5 % da inércia total da seção, representando uma influência significativa na rigidez total da viga. Portanto, é evidente que as quatro lâminas situadas na região central da altura da viga, podem ter características inferiores que pouco influenciarão na rigidez final das vigas de madeira laminada-colada.

Li / It	
1	28,91 %
2	14,84 %
3	5,47 %
4	0,78 %
5	0,78 %
6	5,47 %
7	14,84 %
8	28,91 %

Inércia de cada lâmina em relação a inércia total da seção

Por outro lado, de posse dos módulos de elasticidades das lâminas (E_L), da contribuição inercial das mesmas e da inércia total de uma determinada seção, é possível através da equação abaixo calcular o **módulo de elasticidade teórico** ($E_{teórico}$) desta viga, sem que seja necessário submetê-la ao ensaio destrutivo de flexão. Isso está apresentado no exemplo abaixo para o caso de uma seção de oito lâminas!

100	
15395,22	1 — I = 986,66
13358,92	2 — I = 506,66
7198,30	3 — I = 186,66
3485,13	4 — I = 26,66
4927,41	5 — I = 26,66
7763,91	6 — I = 186,66
1428,86	7 — I = 506,66
17559,52	8 — I = 986,66

160

20

$$E_t \cdot I_t = \sum_{i=1}^8 (E_i \cdot I_i) \quad \dots (IV.03)$$

Onde:

E_t = módulo de elast. teórico.

I_t = inércia total da viga.

E_i = módulo de elast. das lâminas.

I_i = inércia de cada lâmina

* Rigidez de cada lâmina em relação a rigidez total da seção (cm⁴).

Esta composição dá um módulo de elasticidade teórico igual a 14506MPa. Esse cálculo será efetuado em todas as vigas desse estudo, para ser posteriormente comparado com o módulo de elasticidade obtido no ensaio de flexão das vigas.

IV.5 - Tipos de classificações

Após a realização da caracterização das lâminas por flexão simples, efetuadas no item III.05, assim como a definição do número mínimo de corpos de prova e da concepção geométrica das vigas, busca-se nesta etapa da pesquisa, descrever sobre os critérios empregados na composição destes elementos, objetivando alcançar alternativas para a melhoria das propriedades mecânicas dos componentes estruturais produzidos pela Empresa Battistella.

Os critérios de classificação que nortearão este estudo, foram baseados em pesquisas apresentadas por KOCK & BOHANNAN (1965)^[40], MOODY & BOHANNAN (1979)^[41] e ROCCO LAHR (1991)^[11]. Assim sendo, será feito a pré-montagem de 6 (seis) vigas para cada um dos 5 (cinco) critérios de classificação, a saber:

- Vigas compostas de forma aleatória → **Vigas -VA**
- Vigas classificadas pela rigidez → **Vigas -VR**
- Vigas classificadas pela rigidez elevada → **Vigas-VRE**
- Vigas classificadas pelo tamanho dos nós → **Vigas -VN**
- Vigas classificadas pelos anéis de crescimento → **Vigas -VAC**

Essa etapa chamada de pré-montagem das vigas, se deu após efetuadas as classificações, onde a superposição das lâminas originou cada viga. Estas, foram amarradas com cordas de nylon em três pontos ao longo do comprimento das vigas, para posteriormente serem consolidadas em definitivo através do processo de colagem e prensagem.

Ressalta-se que nesta etapa, os critérios visuais de verificação de defeitos citados no item II.3 foram postos em prática, rejeitando-se tábuas defeituosas que apresentavam empenamentos e abaulamentos além do limite mínimo, rachaduras excessivas e arestas quebradas acima de 1cm.

IV.5.1 - Vigas compostas de forma aleatória

A composição de vigas por este critério, prende-se ao fato de ser este o método utilizado até então pela Empresa Battistella, na montagem de seus elementos estruturais, além de ser também, o referencial para avaliar o desempenho entre as demais classificações.

As 360 (trezentos e sessenta) lâminas encontravam-se distribuídas em 8 (oito) lotes de 45 (quarenta e cinco) unidades, separadas ao acaso, conforme eram ensaiadas no item III.5.1.

O primeiro conjunto de vigas foi pré-montado obedecendo a seguinte metodologia: De cada um dos oito lotes, retirou-se uma lâmina aleatoriamente, até compor 6 (seis) vigas constituídas de 8 (oito) lâminas, posicionadas a esmo ao longo da altura na seção transversal e originando o seguinte conjunto.

9077.38	8143.94	5378.17	12500,00	6541.16	7072.77
12828.95	10529.89	6115.66	6536.77	7259.6	11116.6
6137.49	6063.08	10112.18	8005.71	10276.12	8957.17
11647.73	11309.52	11003.38	9615.38	10766.63	6137.49
7986.11	12202.38	9354.65	11524.21	7946.53	12862.89
7096.17	5104.17	9456.61	9034.14	5782.49	8005.71
5749.46	8414.94	4294.65	7049.25	11126.89	10216.35
5129.68	7579.24	10312.50	5129.68	8135.92	6290.06
VA-01	VA-02	VA-03	VA-04	VA-05	VA-06
Et=7741,56 MPa	Et=8151,57 MPa	Et=7321,91 MPa	Et=8209,77 MPa	Et=7988,43 MPa	Et=8105,39 MPa

Fig.IV.02 - Composição de cada viga-VA com a indicação dos módulos de elasticidade das lâminas e o módulo de elasticidade teórico estimado para cada viga.

A TABELA -03, exemplifica o cálculo efetuado para a viga VA-01, e da mesma forma estendido às demais, estando apresentado os valores do " E_L " das lâminas (determinados pela eq. III.01), " E_m " (média aritmética dos E_L), " E_t " (módulo de elasticidade teórico, eq. IV.03), " I_i " (momento de inércia de cada lâmina, eq. IV.02), assim como também, a contribuição percentual da inércia de cada lâmina em relação a rigidez total da seção (I_{total}).

CLASSIFICAÇÃO ALEATÓRIA					
Viga VA -01					
Nº das Lâminas	E_L das Lâminas (MPa)	E_m das Lâminas (MPa)	E Teórico da Viga (MPa)	I_i das Lâminas (cm ⁴)	I_i / I_t (%)
208	9077,38	8206,62	7741,56	986,66	28,91
331	12828,95			506,66	14,84
44	6137,49			186,66	5,47
309	11647,73			26,66	0,78
160	7986,11			26,66	0,78
94	7096,17			186,66	5,47
27	5749,46			506,66	14,84
16	5129,68			986,66	28,91
$I_{total} =$				3413,28 cm ⁴	

Tab.03 - Cálculo do módulo de elasticidade médio das lâminas (E_m) e do módulo de elasticidade teórico ($E_{teórico}$) da viga VA-01.

IV.5.2 - Classificação pela rigidez

Com os valores do " E_L " das lâminas determinados em III.5 e a análise efetuada a respeito do posicionamento das lâminas em IV.4, ficou evidente a distribuição bem definida dos esforços solicitantes ao longo da altura e do comprimento da peça. Deste modo, conhecendo-se o módulo de elasticidade de cada lâmina " E_L ", verifica-se a possibilidade de uma distribuição racional das mesmas no interior das vigas. Isto é feito, colocando as de ME mais elevado o mais afastado do eixo neutro.

Para uma viga composta de 8 (oito) lâminas como as que estão sendo utilizadas nos corpos de prova, observa-se que a inércia das 4 (quatro) lâminas mais afastadas do eixo neutro, pode representar 87,5 % da inércia total da seção. Isto representa um papel muito importante para a rigidez final das vigas assim constituídas, pois o posicionamento deve ser compatível com as tensões internas atuantes na estrutura, isto é, lâminas mais rígidas localizadas nas zonas de maiores tensões.

De posse desse estudo, foi montado o segundo grupo de 6 (seis) vigas, obedecendo o posicionamento em função do módulo de elasticidade determinado no item III.5.

A localização das lâminas foi feita de modo que a lâmina de melhor qualidade foi posicionada na borda externa tracionada, a seguinte na borda externa comprimida, e assim sucessivamente, com as lâminas de menor resistência nas proximidades da linha neutra da viga. O conjunto originado seguindo essa metodologia está abaixo apresentado.

15395.22	15132.23	14961.19	14527.17	14527.17	14344.42
13358.92	13358.92	13194.44	13194.44	13176.17	13011.70
7198.30	7177.45	7415.31	7638.42	7247.90	7198.30
3485.13	4115.99	4169.56	4181.32	4220.24	5056.09
4927.41	4740.50	4719.46	4695.98	4591.47	4294.65
7763.91	7942.71	8072.92	8068.72	7701.43	7673.81
14238.86	14140.17	13888.89	13792.95	13706.14	13706.14
17559.52	17485.12	17001.49	16443.45	16183.04	15885.42
VR-01	VR-02	VR-03	VR-04	VR-05	VR-06
Et = 14506,56 MPa	Et = 14406,48 MPa	Et = 14175,91 MPa	Et = 13886,78 MPa	Et = 13753,95 MPa	Et = 13753,95 MPa

Fig. IV.03 - Composição de cada viga - VR com a indicação dos módulos de elasticidade das lâminas e módulo de elasticidade teórico estimado para cada viga.

TABELA -04, exemplifica o cálculo efetuado para a viga VR-01, e da mesma forma estendido às demais, estando apresentado os valores do " E_L " das lâminas (determinados pela eq. III.01), " E_m " (média aritmética dos E_L), " E_t " (módulo de elasticidade teórico, eq. IV.03), " I_i " (momento de inércia de cada lâmina,

eq. IV.02), assim como também, a contribuição percentual da inércia de cada lâmina em relação à rigidez total da seção (I_{total}).

CLASSIFICAÇÃO PELA RIGIDEZ					
Viga VR - 01					
Nº das Lâminas	E_I das Lâminas (MPa)	E_m das Lâminas (MPa)	E Teórico da Viga (MPa)	I_i das Lâminas (cm ⁴)	I_i / I_t (%)
353	15395,22	10490,91	14506,56	986,66	28,91
341	13358,92			506,66	14,84
107	7198,30			186,66	5,47
1	3485,13			26,66	0,78
12	4927,41			26,66	0,78
151	7763,91			186,66	5,47
347	14238,86			506,66	14,84
360	17559,52			986,66	28,91
I total =				3413,28 cm ⁴	

Tab. 04 - Cálculo do módulo de elasticidade médio das lâminas (E_m) e do módulo de elasticidade teórico ($E_{teórico}$) da viga VR-01.

IV.5.3 - Vigas classificadas pela rigidez elevada

O terceiro conjunto de 6 (seis) vigas a ser pré-montado, foi o de vigas classificadas pela rigidez elevada, ou seja, procurou-se locar as lâminas com ME elevado posicionando-as na borda externa tracionada, a segunda na borda externa comprimida, e assim por diante. Nas quatro lâminas internas da seção e próximas a linha neutra, posicionou-se também lâminas com ME elevado.

Essa metodologia diferiu da anterior, uma vez que não se utilizou lâminas com ME baixo na zona de menor sollicitação de tensões.

A decisão de montar esse conjunto de vigas seguindo a metodologia acima descrita, deveu-se ao fato de comparar experimentalmente e especificamente com as vigas classificadas pela rigidez, esperando-se tirar conclusões sobre o comportamento global desses elementos utilizando lâminas com ME elevado nas proximidades da linha neutra.

O conjunto de vigas originado seguindo esse critério está apresentado a seguir.

12351.19	12351.19	12351.19	12231.57	12215.91	12130.23
11524.21	11498.92	11240.12	11057.69	11003.38	11003.38
10416.67	10312.50	10252.77	10252.77	10127.31	10016.03
9755.29	9615.38	9615.38	9568.45	9526.35	9526.35
9911.86	9911.86	9911.86	9911.86	9822.83	9815.71
11003.38	10890.15	10879.86	11003.38	10766.63	10662.47
12067.10	11978.29	11918.29	11783.01	11783.01	11546.27
13011.70	13011.70	13011.70	12664.47	12443.51	12351.19
VRE-01	VRE-02	VRE-03	VRE-04	VRE-05	VRE-06

Fig. IV.04 - Composição de cada viga -VRE com a indicação dos módulos de elasticidade das lâminas e módulo de elasticidade teórico estimado para cada viga.

TABELA -05, exemplifica o cálculo efetuado para a viga VRE-01, e da mesma forma estendido às demais, estando apresentado os valores do " E_L " das lâminas (determinados pela eq. III.01), " E_m " (média aritmética dos E_L), " E_t " (módulo de elasticidade teórico, eq. IV.03), " I_i " (momento de inércia de cada lâmina, eq. IV.02), assim como também, a contribuição percentual da inércia de cada lâmina em relação a rigidez total da seção (I_{total}).

CLASSIFICAÇÃO - RIGIDEZ ELEVADA					
Viga VRE - 01					
No das Lâminas	E_L das Lâminas (MPa)	E_m das Lâminas (MPa)	E Teórico da Viga (MPa)	I_i das Lâminas (cm ⁴)	I_i / I_t (%)
324	12351,19	11255,18	12158,37	986,66	28,91
304	11524,21			506,66	14,84
276	10416,67			186,66	5,47
247	9755,29			26,66	0,78
256	9911,86			26,66	0,78
290	11003,38			186,66	5,47
314	12067,10			506,66	14,84
335	13011,70			986,66	28,91
$I_{total} =$				3413,28	cm ⁴

Tab. 05 - Cálculo do módulo de elasticidade médio das lâminas (E_m) e do módulo de elasticidade teórico (E_t) da viga VRE-01.

IV.5.4 - Vigas classificadas pelo tamanho dos nós

A opção por utilizar essa classificação, mesmo estando ciente de que não é prática sua utilização em termos produtivos, justifica-se em termos experimentais. Isto porque, a madeira utilizada na pesquisa provém de um reflorestamento onde as árvores ali plantadas, destinavam-se única e exclusivamente ao uso como pasta de celulose para a fabricação de papel. E apresentam portanto um número excessivo de nós.

Com a mudança de rumo na política produtiva da Empresa Battistella, buscando novos mercados, essa madeira vem sendo utilizada também para a produção de elementos estruturais. Por outro lado, durante a etapa de crescimento das árvores, não houve uma preocupação relacionada ao gerenciamento do manejo florestal, como por exemplo, podagem gradual dos galhos objetivando a diminuição dos nós na madeira serrada. Não deve ter havido esse cuidado devido as árvores do reflorestamento não terem sido plantadas para fins estruturais.

Esses fatores nos levou a refletir sobre a incidência dos nós presentes na grande maioria das lâminas. Por esta razão decidiu-se estudar o comportamento das vigas concebidas com estes defeitos.

Como a madeira desse reflorestamento apresenta inúmeros nós, se faz necessário que se tome alguns cuidados na localização das lâminas no interior da seção transversal, pois certamente os nós influenciarão na resistência final dos elementos estruturais.

A redução da resistência à flexão de uma viga de MLC, devido a presença de nós, pode ser atribuída à redução da área da seção transversal da viga, de um valor igual a área ocupada pelo nó solto. Isto acarretaria numa redução do momento de inércia da seção transversal. Portanto, tomando como base a análise do posicionamento das lâminas efetuada no item IV.4 deste capítulo, fica claro que a presença de nós em uma lâmina situada nas proximidades da linha neutra, teria apenas uma pequena parcela de contribuição no efeito de redução da resistência à flexão da peça, do que teria um nó do mesmo tamanho, mas que estivesse localizado nas camadas mais afastadas da linha neutra ou na região de maior concentração de tensões.

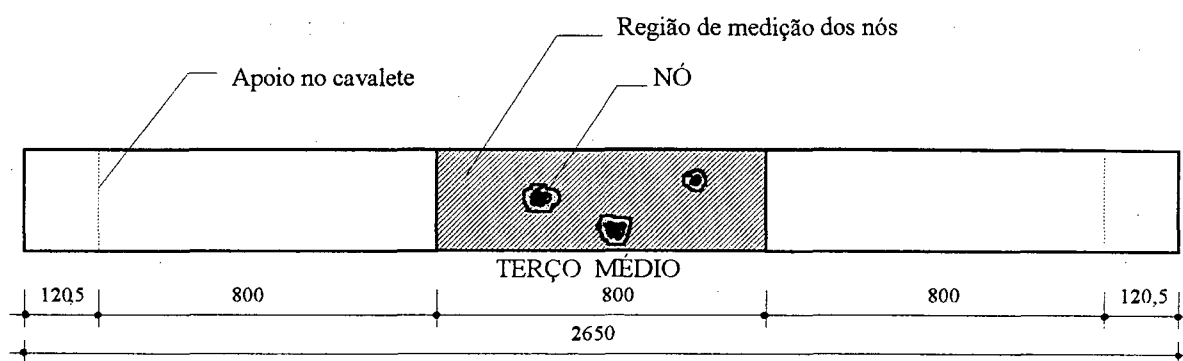
Com isso, define-se a metodologia a ser empregada, a qual está baseada também nos estudos desenvolvidos por KOCK; BOHANNAN (1965)^[40], dispondo-se as lâminas de melhores qualidades (as que possuem nós pequenos) nas regiões mais externas da seção transversal, onde sua resistência maior poderá ser efetivamente utilizada. E dispondo-se lâminas de piores qualidades (as que

possuírem nós maiores) na região central da seção transversal, onde sua resistência mais baixa não afetará grandemente a resistência da peça.

• **Metodologia de medição dos nós e qualidade das lâminas:**

- Em face da grande quantidade de nós encontrados em uma única lâmina, resolveu-se adotar uma limitação na região a ser efetuada a medição destes nós. Como as vigas seriam ensaiadas em flexão a 4 pontos, a região considerada para essa medição foi a de momento máximo uniforme. Isto é, no terço médio do vão das lâminas ($L = 800$ mm).

- Sobre os cavaletes utilizados para o ensaio não destrutivo das lâminas, montou-se um gabarito para agilizar o processo de definição do terço médio. As medidas desse gabarito são mostradas na figura abaixo.



- Inicialmente foram separadas intuitivamente as lâminas de boa qualidade, observando visualmente os nós contidos no terço médio do comprimento das peças. Esta separação inicial deu origem a dois lotes secundários, um com nós grandes / agrupados / concentrados e outro com nós pequenos.

- Em face da não existência de norma brasileira pertinente a classificação de madeira, buscou-se utilizar normas estrangeiras, afim de possibilitar os critérios a serem adotados na medição dos nós. Para isso utilizou-se as seguintes normas:

* Norma Panamericana . COPANT 30:3-002 (1975)^[18]

* Norma Canadense . CAN/CSA - 0122-M89 (1989)^[41]

- Destas normas criou-se uma metodologia própria. Para a medição do tamanho dos nós, seguiu-se as recomendações da Norma Panamericana e para a definição da qualidade das tábuas foi obedecido o que prescreve a Norma Canadense.

- Os nós presentes nas lâminas foram medidos de acordo com a metodologia seguinte; ver figura II.04 da página 19.

a) Foram medidos os nós contidos apenas no terço médio das lâminas, isto é, numa área com dimensões de $(120 \times 667) \text{ mm}^2$.

b) Foi considerado como nó concentrado aquele contido numa região limitada pelo comprimento de $L \leq 150 \text{ mm}$.

c) Foi considerado como nó isolado, quando a distância entre eles era de $L \geq 150 \text{ mm}$. E para efeito de medição quando existiam dois nós, considerou-se o nó que contribuisse com maior influência na seção crítica, o maior entre eles, devido a provável ruptura neste ponto.

d) Nó isolado: O tamanho do nó é determinado, medindo-se a distância entre duas tangentes paralelas às suas arestas e se mede a distância entre elas, em milímetros.

e) Nó transversal na altura e na largura: Se mede a distância entre a aresta e uma linha paralela a esta e tangente ao nó, em milímetros.

f) Nó na aresta: Se o nó está cortado por uma aresta, se mede seu diâmetro maior e menor em milímetros e calcula-se o diâmetro médio.

g) Nó na zona central: Se mede seu diâmetro maior e menor, em milímetros, e calcula-se o diâmetro médio. Isto, se mais da metade deste nó estiver situado na região de "a/2" da altura da peça.

h) Nó na aresta e na face: Se está cortado por uma aresta, mede-se a distância compreendida entre a aresta e uma linha paralela a esta e tangente ao nó, e se considera o diâmetro médio. Se pertencer à borda da face, ou seja, situado a "a/4" da altura, mede-se conforme o item "a". Caso tenha dois nós alinhados, soma-se estas medidas.

i) Nós em grupos: No caso de classificação pela resistência, se mede o diâmetro médio individual, em milímetros, e calcula-se a soma destes valores.

j) Nós concentrados: Se mede as distâncias, em milímetros, entre as linhas paralelas às arestas e entre as linhas perpendiculares a elas, que são tangentes

aos nós exteriores deste grupo e que o englobe totalmente, e considera-se como diâmetro médio a média aritmética entre as duas distâncias.

- No decorrer das medições dos nós, as tábuas de ambos os lotes receberam uma nova nomenclatura: $L_1, L_2, L_3, \dots, L_{199}$. As medidas dos nós de cada lâmina foram armazenadas em uma planilha eletrônica "EXCEL 5.0", afim de possibilitar com precisão e agilidade a determinação do tamanho do nó em cada uma das tábuas ensaiadas.

- De posse do tamanho dos nós existentes em cada uma das tábuas, utilizou-se a **Norma Canadense** para definir a qualidade das mesmas e possibilitar o posicionamento na seção transversal das vigas. "Por esta norma o tamanho do nó define a qualidade da tábua", subdividindo-se em 4 (quatro) qualidades, a saber:

- QUALIDADE "A" - os nós ocupam no máximo $1/10$ da seção transversal.
- QUALIDADE "B" - os nós ocupam no máximo $1/4$ da seção transversal.
- QUALIDADE "C" - os nós ocupam no máximo $2/5$ da seção transversal.
- QUALIDADE "D" - os nós ocupam no máximo $1/2$ da seção transversal.

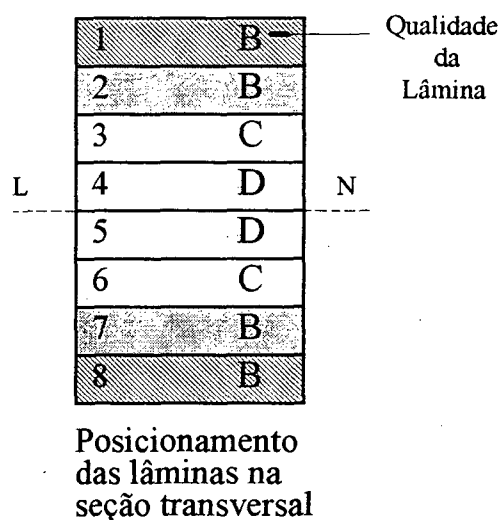
- Na medição dos nós obteve-se variados tamanhos, sendo necessário criar intervalos pré-definidos para qualificar as tábuas em função do tamanho máximo do nó permitido. Isto foi feito em função da qualidade e da largura das tábuas utilizadas na pesquisa. A tabela abaixo define melhor esses critérios.

QUALIDADE	TAMANHO DOS NÓS - (mm) $b = 120 \text{ mm}$	INTERVALOS P/ A QUALIFICAÇÃO DAS TÁBUAS
A	12	$0 \leq TN \leq 12$
B	30	$13 \leq TN \leq 30$
C	48	$31 \leq TN \leq 48$
D	60	$49 \leq TN \leq 60$

Tab. 06 - Qualidade e intervalos de qualificação das tábuas

Os valores da medição dos nós de cada uma das tábuas, assim como a definição da qualidade, estão apresentados nas tabelas do ANEXO-02, nas páginas 141 a 145.

Definida a qualidade das lâminas, estas foram separadas em lotes de acordo com a qualidade "A", "B", "C" e "D". Verificou-se que praticamente não houveram lâminas de qualidade "A". Em seguida retirava-se lâminas dos respectivos lotes, dando início a etapa de pré-montagem das vigas, conforme critério mencionado no início da descrição desta classificação. A figura ao lado, mostra o posicionamento das lâminas em função do tamanho do nó, obedecendo a localização de acordo com as solicitações de tensões no interior da seção transversal.



O conjunto de vigas originado seguindo a metodologia de classificação das lâminas pelo tamanho dos nós está abaixo apresentado:

7579.24	8563.75	7467.83	7300.00	5817.10	7408.65
8135.92	8928.57	11524.00	10767.00	7211.06	8482.14
8874.49	8625.82	9182.95	6372.30	6944.44	6376.36
5917.77	11458.00	8482.14	7523.53	6332.24	7352.94
7148.69	8221.73	7043.65	6670.32	7096.17	6145.32
7712.93	9651.12	9568.45	5467.63	7582.72	8516.21
7300.42	7046.57	8005.71	8068.72	8785.46	9105.98
10163.74	8960.70	8266.13	9182.95	9443.68	7046.57
VN-01	VN-02	VN-03	VN-04	VN-05	VN-06
Et = 8429,38 MPa	Et = 8590,23 MPa	Et = 8593,80 MPa	Et = 8318,93 MPa	Et = 7685,17 MPa	Et = 7709,09 MPa

Fig. IV.05 - Composição de cada viga - VN com a indicação dos módulos de elasticidade das lâminas e módulo de elasticidade teórico estimado para cada viga.

Observando-se a viga VN-02 da figura IV.05, nota-se que uma das lâminas classificada como de qualidade "D", ou seja, apresentando um tamanho de nó grande, possui um "ME" elevado (11458 MPa). Isto pode ser explicado através da constituição fisiológica da madeira que compõe essa lâmina, a qual foi verificada ser uma madeira de outono-inverno e conseqüentemente de alta propriedade mecânica. Na viga VN-05, ocorre o contrário, tendo-se uma lâmina de qualidade "B", mas com um "ME" baixo (5817,10 MPa), constatando-se ser uma lâmina constituída com maior proporção de madeira de primavera-verão. Essa observação leva-nos a supor que nem sempre uma lâmina qualificada de boa qualidade pelo tamanho dos nós pode ser considerada de alta resistência.

A TABELA -07, exemplifica o cálculo efetuado para a viga VN-01, e da mesma forma estendido às demais, estando apresentado os valores do " E_L " das lâminas (determinados pela eq. III.01), " E_m " (média aritmética dos E_L), " E_t " (módulo de elasticidade teórico, eq. IV.03), " I_i " (momento de inércia de cada lâmina, eq. IV.02), assim como também, a contribuição percentual da inércia de cada lâmina em relação a rigidez total da seção (I_{total}).

CLASSIFICAÇÃO - TAMANHO DOS NÓS						
Viga VN - 01						
No das Lâminas	Qualidade das Lâminas (mm)	E_L das Lâminas (MPa)	E_m das Lâminas (MPa)	E_t Teórico da Viga (MPa)	I_i das Lâminas (cm ⁴)	I_i / I_t (%)
L95	B	7579,24	7854,15	8429,38	986,66	28,91
L132	B	8135,92			506,66	14,84
L173	C	8874,49			186,66	5,47
L8	D	5917,77			26,66	0,78
L142	D	7148,69			26,66	0,78
L16	C	7712,93			186,66	5,47
L170	B	7300,42			506,66	14,84
L1	B	10163,74			986,66	28,91
I total =					3413,28	cm ⁴

Tab. 07 - Cálculo do módulo de elasticidade médio das lâminas (E_m) e do módulo de elasticidade teórico ($E_{teórico}$) da viga VN-01.

IV.5.5 - Vigas classificadas pela espessura dos anéis de crescimento

O crescimento da árvore em clima temperado aproximadamente sempre produz um anel de crescimento a cada ano. Tipicamente, um anel de crescimento consiste de duas partes distintas. A madeira formada inicialmente na estação de crescimento é leve em peso, com cavidade de células largas e é chamada *madeira inicial ou madeira de primavera-verão*. A porção do anel de crescimento a qual é densa, de cor escura, e tem cavidade de células pequenas é chamada *madeira final ou madeira de outono-inverno*. Por causa da quantidade de incremento da substância da parede da célula, a madeira final tem uma influência dominante em algumas das propriedades mecânicas da madeira.

Normas estrangeiras fazem referência à espessura máxima dos anéis de crescimento para a madeira utilizada na confecção de peças de madeira laminada-colada, limitando tal espessura a 5 mm. BOHN; SZÜCS (1995)^[42].

Verificando-se a amostragem das 199 (cento e noventa e nove) tábuas, percebeu-se uma grande variação na espessura dos anéis, sendo estes em média igual 9,76 mm. Isto talvez explicável devido o crescimento acelerado das árvores deste reflorestamento, favorecidas pelo clima da região sul do Brasil.

No caso do Pinus, é possível a distinção visual da espessura e coloração dos anéis de crescimentos. Isto facilitou a perceber durante o ensaio de rigidez das lâminas, que geralmente as tábuas possuindo anéis de crescimento de pouca espessura, pesavam mais em relação as de anéis espaçados. E, quando submetidas ao ensaio de flexão a três pontos apresentavam valores baixos para as flechas e conseqüentemente maiores valores para o módulo de elasticidade. Entretanto, há pouco dados na literatura sobre a influência da espessura dos anéis de crescimento nas propriedades mecânicas da madeira. Mas, a observação acima é confirmada pelo estudo realizado por BUCUR; HERBÉ; NOSEI (1994)^[46], em árvores de 27 anos de idade, colhidas no Uruguai, da espécie "Pinus Taeda", onde utilizaram técnicas de microdensidade por raio-X efetuando medições de densidade, dureza e módulo de elasticidade. Os resultados médios obtidos por estes pesquisadores para estas variáveis, indicam que a madeira de Outono-Inverno com anéis de pouca espessura, apresentou valores expressivos em comparação as de Primavera-Verão.

Assim sendo, isto nos levou a montagem do quinto grupo de 6 (seis) vigas, obedecendo um critério de posicionamento na seção transversal em função da espessura dos anéis de crescimento, e para isso adotou-se a seguinte metodologia.

a) Para a medição da espessura dos anéis, foi adotado a Norma Panamericana COPANT 30: 3 - 002 (1975)^[18], a qual estabelece os critérios para determinar a velocidade de crescimento das árvores.

b) De posse de um paquímetro, efetuou-se as medidas, em milímetros, no topo das tábuas. Em tábuas de medula visível, as medidas foram efetuadas em uma linha perpendicular aos anéis, a uma distância de 3 cm da medula. Quando a seção não possuía medula, a medida era tomada no ponto médio da linha perpendicular aos anéis. O critério adotado fica mais evidente, observando-se a figura seguinte.

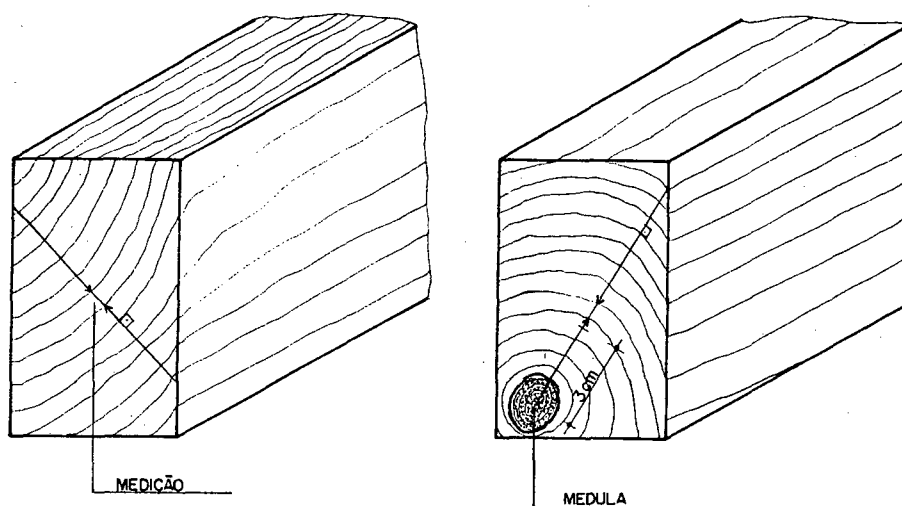


Fig. IV.06 - Critério de medição dos anéis de crescimento - COPANT.

Os valores da medição dos anéis de crescimento de cada uma das tábuas, estão apresentados nas tabelas do ANEXO - 02, nas páginas 141 a 145.

c) De posse das espessuras dos anéis de crescimento das tábuas, passou-se a etapa de pré-montagem das vigas. Para o posicionamento das tábuas na seção transversal, tomou-se como base o estudo efetuado no item IV.4, partindo-se da hipótese que lâminas com anéis de crescimento de pouca espessura apresentavam melhores características mecânicas em relação as lâminas com anéis espaçados.

d) A localização das lâminas foi feita de modo que a lâmina com anéis de crescimento de menor espessura foi posicionada na borda externa tracionada, a seguinte na borda externa comprimida, e assim sucessivamente, com as lâminas de anéis de crescimento com maior espessura ocupando a região próxima a linha neutra.

O conjunto de vigas originado seguindo essa metodologia está abaixo apresentado.

ANÉIS	ME
6,3	11287.47
7,5	7701.43
10	8405.17
13	7125.29
13	6806.15
10	9271.98
7	10662.47
4,4	7198.30

VAC-01

Et = 9145,00 MPa

ANÉIS	ME
6,4	8135.92
7,5	9354.65
10	7638.42
13	5884.74
13	6541.16
10	9526.35
7	9354.65
5	16703.87

VAC-02

Et = 10993,22 MPa

ANÉIS	ME
6,5	9803.77
7,2	12279.04
10	8818.12
13	6714.77
13	5782.49
10	7211.06
7	10225.40
5	12351.19

VAC-03

Et = 10718,93 MPa

ANÉIS	ME
6	12578.80
7,9	9815,71
10	6806,15
15	5211,80
14,5	5998,94
10	10653,41
7	7831,64
5,3	10897,73

VAC - 04

Et = 10155,23 MPa

ANÉIS	ME
6,2	6759,23
6,5	5052,08
10	6396,84
15	8068,72
17	6536,77
10	7812,50
6,5	8553,98
5	6536,77

VAC - 05

Et = 6772,77 MPa

ANÉIS	ME
5	8553,98
7	6913,02
10	8928,57
15	7096,17
14	6578,95
10	7579,24
7	9271,98
6	8553,98

VAC - 06

Et = 8224,56 MPa

Fig. IV.07 - Composição de cada viga - VAC com a indicação da espessura dos anéis de crescimento em (mm), módulo de elasticidade das lâminas e o módulo de elasticidade teórico estimado para cada uma das vigas, em (MPa).

A TABELA -08, exemplifica o cálculo efetuado para a viga VAC-01, e da mesma forma estendido às demais, estando apresentado os valores do " E_L " das lâminas (determinados pela eq. III.01), " E_m " (média aritmética dos E_L), " E_t " (módulo de elasticidade teórico, eq. IV.03), " I_i " (momento de inércia de cada lâmina, eq. IV.02), assim como, a contribuição percentual da inércia de cada lâmina em relação a rigidez total da seção (I_{total}).

CLASSIFICAÇÃO - ANÉIS DE CRESCIMENTO						
			Viga VAC - 01			
No das Lâminas	esp. dos anéis (mm)	E_L das Lâminas (MPa)	Em das Lâminas (MPa)	E Teórico da Viga (MPa)	Ii das Lâminas (cm ⁴)	Ii /It (%)
299	6,3	11287,47	8557,28	9145,00	986,66	28,91
147	7,5	7701,43			506,66	14,84
138	10,0	8405,17			186,66	5,47
98	13,0	7125,29			26,66	0,78
77	13,0	6806,15			26,66	0,78
218	10,0	9271,98			186,66	5,47
279	7,0	10662,47			506,66	14,84
102	4,4	7198,30			986,66	28,91
I total =					3413,28 cm ⁴	

Tab.08 - Cálculo do módulo de elasticidade médio das lâminas (E_m) e do módulo de elasticidade teórico ($E_{teórico}$) da viga VAC-01.

Desta forma todos os 5 (cinco) grupos de classificações passaram pela etapa denominada de "**pré-montagem**", estando prontos para serem concebidos em definitivos através dos processos de colagem, prensagem e aplainamento.

CAPÍTULO . V

CONCEPÇÃO E EXPERIMENTAÇÃO DOS ELEMENTOS ESTRUTURAIS

V. CONCEPÇÃO E EXPERIMENTAÇÃO DOS ELEMENTOS ESTRUTURAIS.

V.1 - Introdução

Este capítulo visa apresentar todos os pormenores a respeito das generalidades e considerações feitas para a concepção e experimentação das 30 (trinta) vigas classificadas e pré-montadas no capítulo anterior.

A experimentação desenvolvida nesta pesquisa, tem por objetivo examinar esse conjunto de corpos de prova submetendo-os ao ensaio de flexão, afim de permitir a coleta dos dados como o Módulo de Elasticidade Longitudinal (E_{real}) e a Resistência à Flexão (σ_f^{mp}) dos elementos estruturais, no caso em estudo as vigas, para em seguida serem analisados em busca dos objetivos pretendidos com esse estudo.

V.2 - Materiais e Métodos

V.2.1 - O Adesivo

Sabe-se que o tamanho das peças fornecidas pelas árvores é limitado pelo tamanho da mesma. Na prática, isto significa que tábuas de madeira raramente excedem 1 metro de largura, sendo que a maior parte da produção está limitada a larguras inferiores a 50 centímetros.

Para a elaboração de novas soluções estruturais, foi necessária a substituição de pregos e parafusos por outros elementos mais leves e versáteis, tornando possível a obtenção de ligações de alta resistência e de peças de tamanho e formas ilimitadas, como as estruturas de madeira laminada-colada, e nesse sentido os adesivos aparecem como solução ideal.

O desenvolvimento dos adesivos à base de resina sintética nos tempos modernos, veio a solucionar este problema e dar novo impulso à indústria madeireira em todo o mundo.

O fenômeno da adesão pode ser entendido como um mecanismo de transferência de tensões entre dois sólidos, através de processos mecânicos e moleculares. O modo pelo qual o adesivo adere à superfície de um sólido e as forças envolvidas neste processo, são objetos de várias teorias. De um modo geral, podem ser classificadas em: Teoria Mecânica e Teoria Química. Para maiores informações sobre o assunto consultar a bibliografia em NEIVA (1989)^[12].

Para a colagem das lâminas foi utilizado na interface de ligação o seguinte adesivo: CASCOPHEN RS - 216 M, resina sintética à base de resorcinol, lote 42131004, especialmente recomendada para colagens resistentes à água, solventes orgânicos, intemperismos e fungos. Este adesivo foi gentilmente doado para a pesquisa pela empresa Alba Química Indústria e Comércio Ltda.

V.2.2 - O Dispositivo de Pressão

Para a composição definitiva das vigas, foi utilizado um dispositivo de aplicação de esforços para a colagem de elementos estruturais desenvolvido no LABORATÓRIO DE EXPERIMENTAÇÃO EM ESTRUTURAS LEE-CTC/UFSC, sob a orientação do Prof. Szücs. Ver fotografia seguinte.

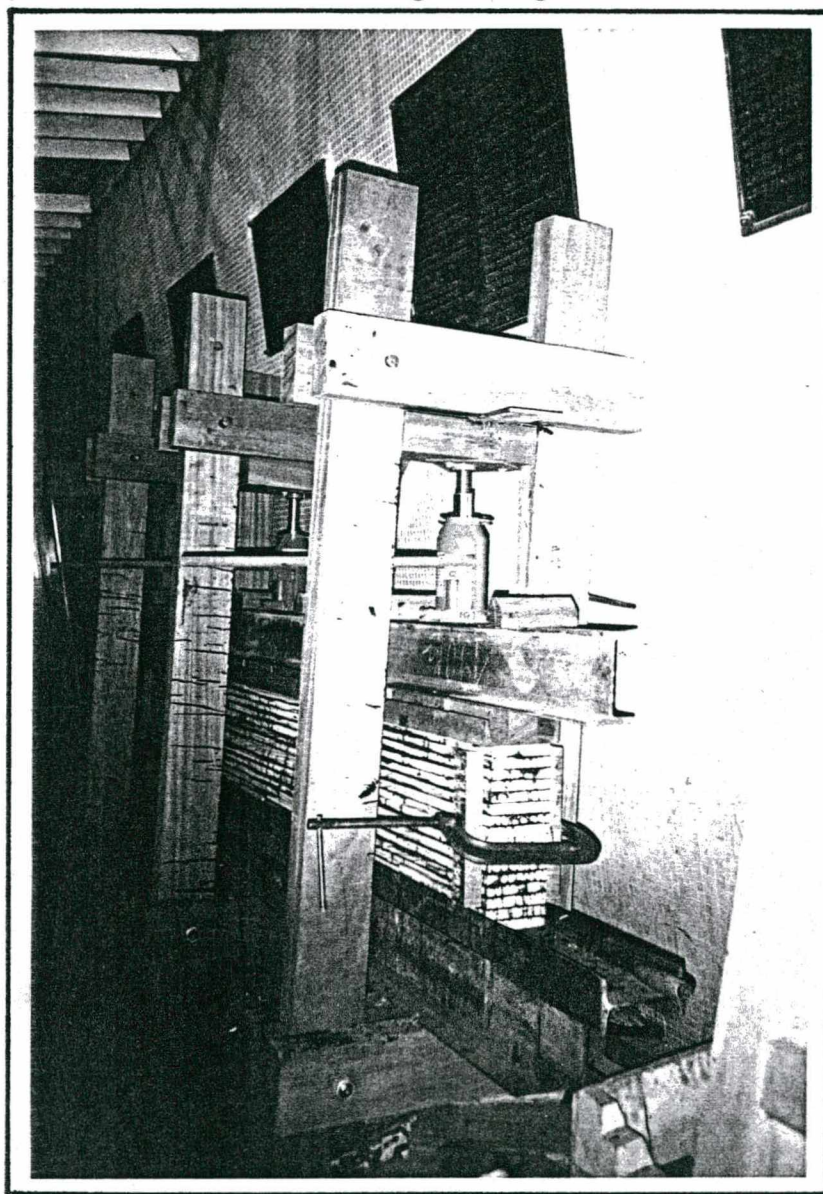


Fig. V.01 - Dispositivo desenvolvido para aplicação de pressão nas vigas

Este dispositivo composto em estrutura de madeira da espécie angelim vermelho, conjugado com perfis metálicos e construído a baixo custo, é constituído de 4 (quatro) módulos, possibilitando a fabricação de uma viga de até quatro metros, sendo cada módulo, responsável pela aplicação da pressão de colagem necessária à produção de um metro de viga. Para a aplicação dessa pressão, foram utilizados em cada módulo, um macaco hidráulico com capacidade de carga de 8 (oito) toneladas, garantindo que os elementos a serem colados, recebem uma pressão de colagem de **7,69 Kg/cm²**, superior a mínima preconizada pela norma Canadense CSA 0122 (1953)^[41] que propõe uma pressão de 7 Kg/cm² e atendendo também o que recomenda o Centre Technique du Bois (1976)^[43], que especifica uma pressão entre 7 a 15 Kg/cm² quando se utiliza cola a base de resorcina.

É importante frisar que a independência dos módulos permite a construção de peças com dimensões maiores, bastando para tanto, fabricar mais módulos conforme o necessário e acoplá-los em linha para obter o comprimento de prensagem desejado para a viga.

V.2.3 - Metodologia de fabricação das vigas

Uma vez definido o tipo de adesivo a ser utilizado na interface das lâminas e o dispositivo de pressão, começa-se a fase de execução das vigas de madeira laminada-colada do presente estudo.

Para esta fase é importante frisar que o processo de fabricação das vigas é bastante elementar não requerendo mão-de-obra especializada, podendo até serem feitas por carpinteiros convencionais sem grandes aperfeiçoamentos.

As etapas de fabricação desses elementos compreenderam basicamente no seguinte:

- Com o intuito de agilizar o processo de prensagem, uma vez que o dispositivo tinha altura suficiente para prensar mais de uma viga, optou-se em fabricar duas vigas ao mesmo tempo.
- As vigas já classificadas e pré-montadas conforme descritas anteriormente, eram trazidas duas a duas para as proximidades do dispositivo. Em seguida, todas as lâminas a serem coladas eram limpas com uma estopa, removendo-se a poeira ou resíduos de serragem, para não prejudicar o processo de aderência da cola.
- Paralelo à limpeza das lâminas, era feita a pesagem e o preparo do adesivo, **Fig. V.02**. Este, constituído de dois componentes, a resina de cola em cor marrom viscosa e líquida e o endurecedor em forma de pó. Os componentes eram pesados numa balança de precisão "KRATUS" em recipientes separados, na

proporção de 20 % de pó em relação à resina. Em seguida eram misturados e homogeneizados originando um composto líquido de 1,15 Kg, suficiente para a colagem de uma viga, considerando-se um consumo de cola da ordem de 500g/m² de lâmina. Para o ciclo completo de pesagem e mistura dos componentes, gastava-se em média 5 minutos.

- Prosseguindo, passava-se a etapa de aplicação do adesivo nas lâminas, **Fig. V.03**. A primeira lâmina era posicionada simetricamente em relação aos módulos e sobre o berço metálico inferior do dispositivo, neste local recebia a aplicação da cola através de um pincel do tipo comum. Simultaneamente outra pessoa aplicava o adesivo em uma das faces da segunda lâmina, para em seguida assentar sobre a lâmina existente no dispositivo. Dessa forma e neste ritmo foram coladas as demais lâminas, com a aplicação do adesivo sendo feito nas duas faces a serem justapostas, para que o adesivo fosse perfeitamente absorvido pela madeira seca. O tempo de aplicação de cola por lâmina era de aproximadamente 1,5 minutos. Como a aplicação era simultânea em duas lâminas, gastava-se aproximadamente 12 minutos para as duas vigas.

- Com as duas vigas no dispositivo, iniciava-se a etapa de fechamento e prensagem das mesmas, **Fig. V.04**. Na parte superior das vigas e ao longo de seu comprimento, eram postos perfis metálicos para uniformizar e distribuir a pressão imposta pelos macacos hidráulicos. Por meio de dois "sargentos" e nas duas extremidades das vigas, aplicava-se um ajustamento transversal ao eixo longitudinal das vigas e abrangendo todas as lâminas para que pudessem ser alinhadas e evitar o deslizamento lateral das mesmas quando submetidas à pressão de colagem. O tempo total médio de conclusão desta etapa, juntamente com as etapas anteriores até o início da prensagem se completava em 60 minutos, ficando dentro do intervalo de 45 minutos a 2 horas estabelecido quando se está utilizando cola de resorcina, conforme menciona ZANDER (1979)^[20].

- Uma vez aplicada a pressão de colagem, aguardava-se um período de 24 horas para a retirada da pressão. Essa retirada da pressão da colagem, se dava de forma gradual em toda a extensão do elemento estrutural, ou seja, não era brusca e nem localizada.

- Após a retirada das vigas do dispositivo, fazia-se uma inspeção visual a procura de falhas ou quebras nas linhas de colagens, não se verificando esta ocorrência em nenhuma das vigas. Em seguida, as vigas eram armazenadas por um período de 7 dias a uma temperatura ambiente de 20°C e umidade relativa do ar de 67 %, para que o adesivo atingisse a sua resistência máxima após o processo de polimerização.

- Completado o período de armazenagem, a etapa final de fabricação dos elementos estruturais, compreendia o acabamento. Nessa fase, as peças foram aplainadas lateralmente até ficarem nas dimensões finais de (100 x 160 x 2650)mm e prontas para serem submetidas ao ensaio de flexão.

Uma visão resumida do processo de fabricação das vigas é mostrado nas fotografias das figuras **V.02**, **V.03** e **V.04**.

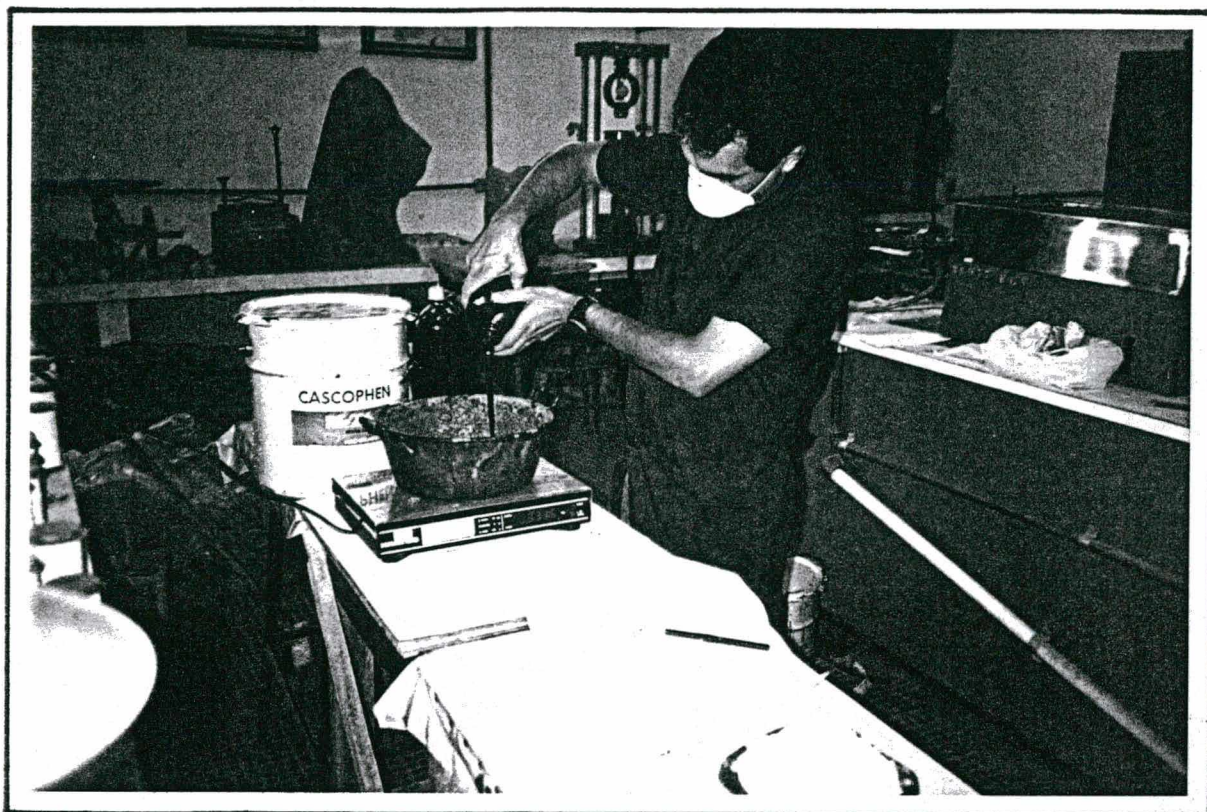


Fig. V.02 - Etapa de pesagem dos componentes do adesivo.

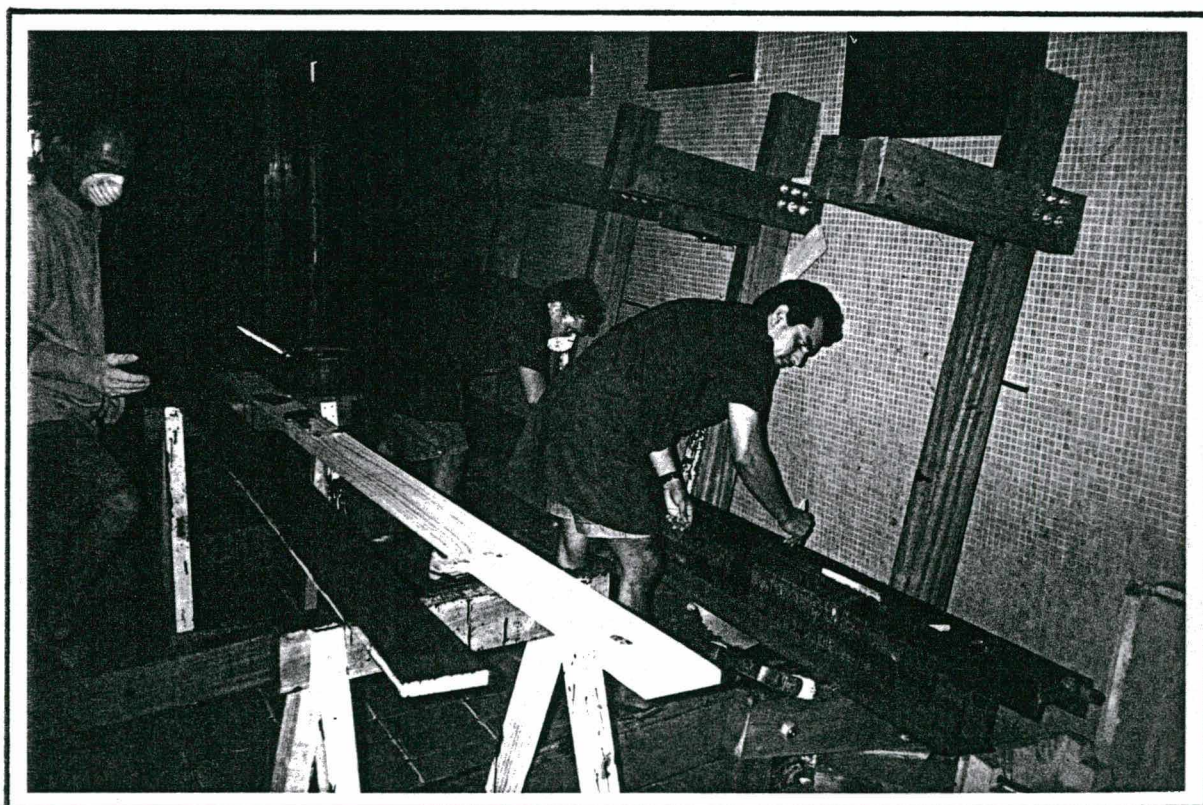


Fig.V.03 - Aplicação do adesivo nas lâminas

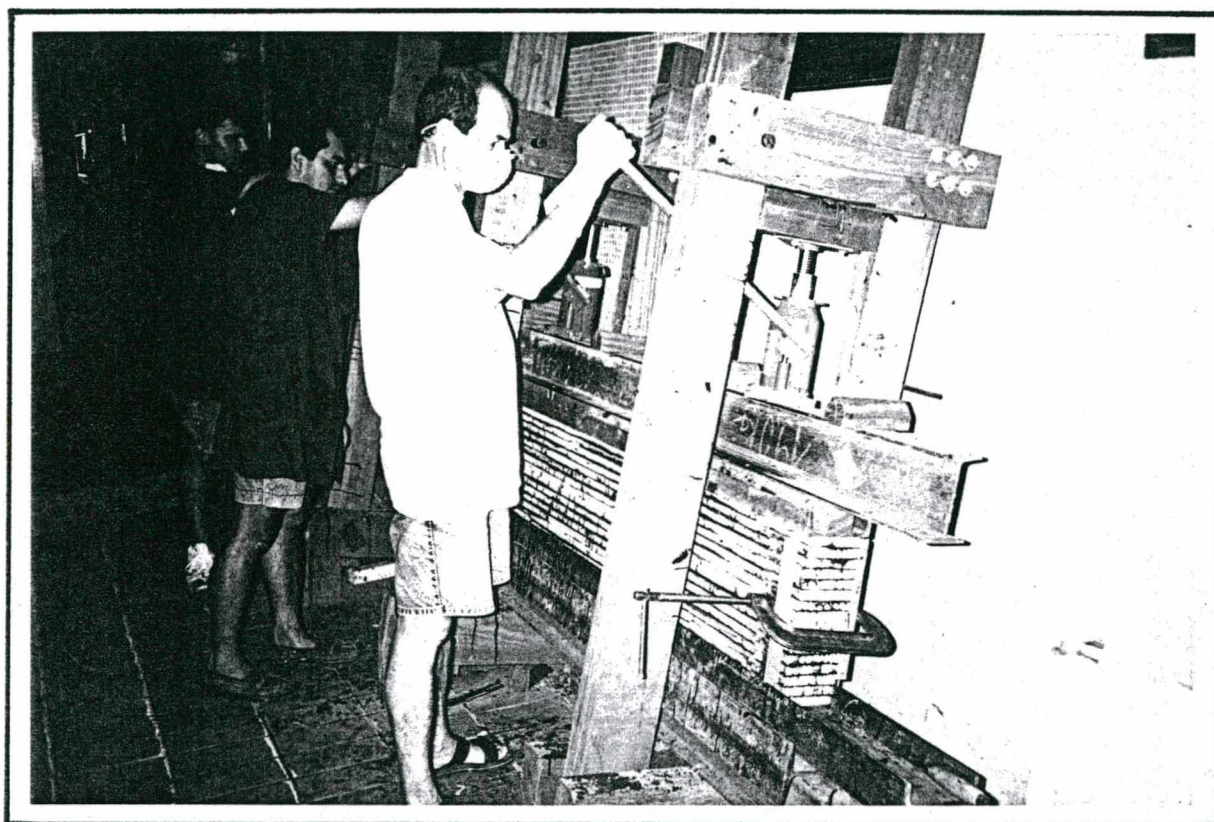


Fig. V.04 - Aplicação da pressão de colagem e sistema de prensagem

V.2.4 - Verificação da influência do momento fletor no módulo de elasticidade das vigas.

Quando se trabalha com peças de aço, por exemplo, a influência do cisalhamento na flexão normalmente é desprezada, por ser esta muito pequena. Para a madeira, é necessário uma seção bem maior para um mesmo vão livre de uma peça de aço. Portanto, nesta fase da pesquisa, é importante verificar a influência do esforço cortante na flecha total e conseqüentemente no módulo de elasticidade, pois erros de considerável dimensão podem ser introduzidos especialmente se a viga tiver relação L/d pequena.

Portanto, partindo-se da verificação da influência do momento fletor no módulo de elasticidade das vigas, ter-se-á a parcela complementar do esforço cortante, uma vez que a seção das vigas que se está trabalhando é a mesma adotada como dimensões comerciais pela Empresa Battitella.

Sabendo-se que o vão livre entre apoios é de 2400 mm e em função do esquema de ensaio adotado para as vigas nos fornecer um posicionamento simétrico de aplicação das cargas, isto é, $a = L/3$ $\therefore a = 800$ mm, tendo-se também a altura de 160 mm, obtém-se uma relação " L/d " $\cong 15$.

Utilizando-se a expressão II.05, deduzida no capítulo II, e efetuando-se as substituições dos valores acima, isto nos dá a participação do momento fletor " $E_{(mf)} / E_{(mf,ec)}$ " = 93,7 % no módulo de elasticidade total, portanto uma parcela complementar do esforço cortante de 6,3 %.

Considerando a recomendação de BODIG; JAYNE (1982)^[26], se o complemento de " $E_{(ec)} / E_{(mf,ec)}$ " ≥ 5 % há de ser considerada a contribuição do esforço cortante na flecha e no efeito final do módulo de elasticidade. *Assim sendo, para as vigas em estudo, será considerado a influência do momento fletor e do esforço cortante para o cálculo do módulo de elasticidade longitudinal das vigas.*

V.3 - Ensaio experimental das vigas

V.3.1 - Método de ensaio

O programa de ensaio a ser delineado, descreve a metodologia de ensaio das vigas, com o objetivo de determinar o módulo de elasticidade real e a resistência à flexão de cada viga. Parâmetros estes que servirão para indicar o ganho no comportamento mecânico entre os cinco tipos de classificações.

Os equipamentos utilizados no ensaio foram os seguintes:

- Unidade de pressão hidráulica, capacidade de 140 bar.
- Cilindro hidráulico W30, capacidade de 10 ton.
- Célula de carga, capacidade 50 ton.
- Fonte de aquisição de dados, HP 3852-A.
- Micro-computdor 386, compatível ao IBM.
- Bases magnéticas.
- Dois extensômetros do tipo LVDT.
- Rótula.
- Roletes metálicos para os apoios.

Os elementos de madeira laminada-colada, foram ensaiados na forma de vigas simplesmente apoiadas, submetidas à flexão a quatro pontos, conforme recomenda a Norma Francesa NF B51-008^[32] e a Norma Inglesa BS 5820 (1979)^[33], com observação do comportamento mecânico até o momento da ruptura. A opção por este modelo de ensaio, justifica-se plenamente para o caso do material madeira, uma vez que o mesmo se desenvolve sobre a aplicação de duas cargas equidistantes agindo sobre o vão, dando origem a momento máximo de flexão constante nesta região. Com isso a ruptura se dará no local mais desfavorável e em função da constituição interna das lâminas que compõe a seção transversal das vigas. Ver esquema de ensaio mostrado abaixo.

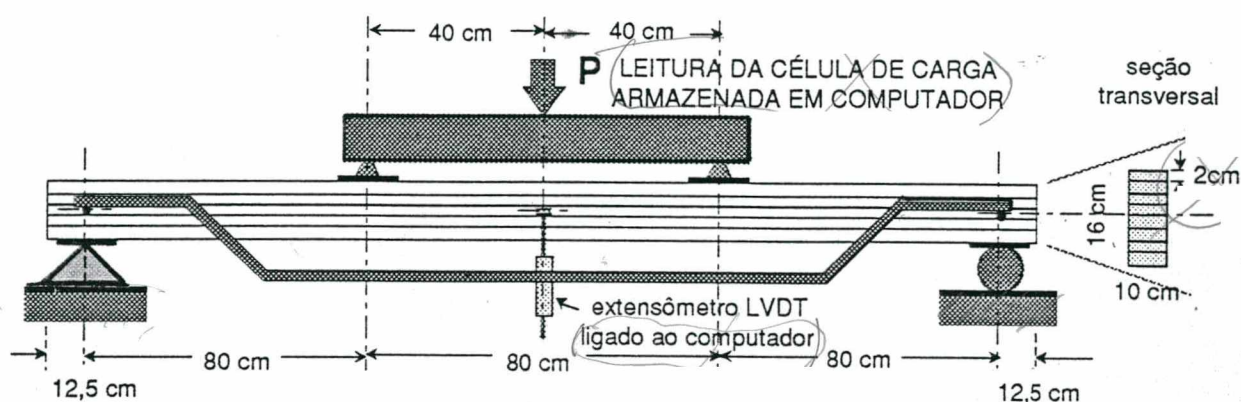


Fig. V.05 - Esquema de ensaio de flexão simples das vigas.

Para que a carga do pistão hidráulico fosse aplicada em dois pontos nas vigas de ensaio, foi necessário aplicá-la diretamente em uma viga metálica bi-apoiada a $L/3$ do vão livre e colocada em cima da viga ensaiada.

Os ensaios foram realizados em um conjunto montado sobre a laje de reação do LEE/UFSC, com rigidez e capacidade suficiente para romper todas as vigas. A aplicação de carga, no conjunto de reação, foi feita através de um cilindro hidráulico com acréscimo constante de carga de aproximadamente 2 MPa/min, acoplado a um painel de controle no qual um conjunto de válvulas permitia a alteração da vazão e pressão de óleo, possibilitando a regulação da velocidade de carregamento.

O acompanhamento do ensaio foi automatizado via micro-computador, com as leituras da carga e da flecha (esta, obtida no meio do vão) registradas em tempo real na tela do computador. Por intermédio de uma fonte de aquisição de dados HP 3852-A, os dados eram transmitidos por uma célula de carga e dois extensômetros do tipo LVDT, com precisão de milésimo de milímetros e curso máximo de 30 mm. Os quais foram posicionados nas duas laterais da viga, permitindo a obtenção do resultado médio das flechas.

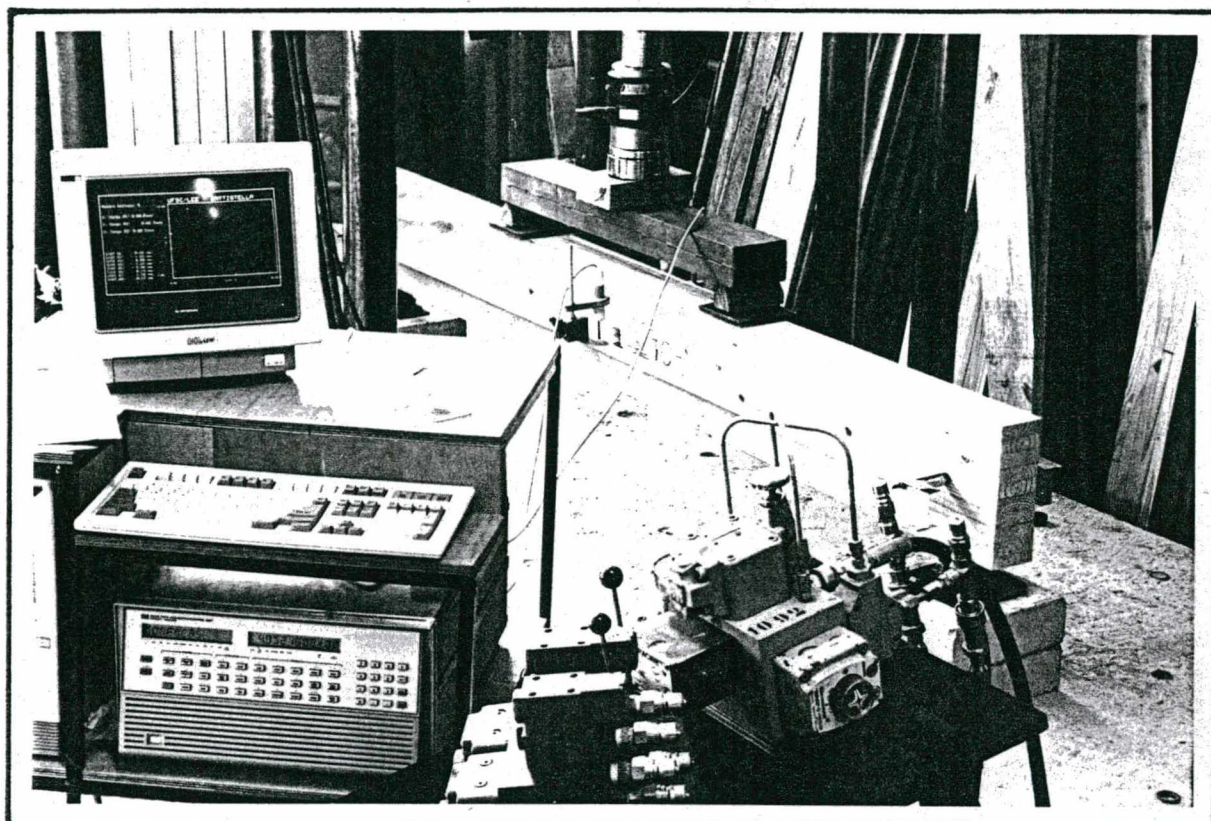


Fig.V.06 - Equipamentos de aplicação de carga e fonte de aquisição de dados.

V.3.2 - Determinação do módulo de elasticidade real das vigas

Como se trabalhou com dimensões comerciais adotadas na Empresa Battitella, o modelo de ensaio foi apoiado de modo a se ter uma relação "vão livre entre apoios / altura da viga" igual a 15. Neste caso de ensaio experimental, conforme verificado em V.2.3 ficou evidenciado a necessidade de se considerar um fator adicional referente à parcela de contribuição do esforço cortante. Deste modo, a equação II.03 será utilizada para o cálculo do módulo de elasticidade longitudinal das vigas, que será denominado de *módulo de elasticidade real* (E_{real}), sendo determinado da forma seguinte.

$$E_{\text{real}} = \frac{P \cdot a}{4 \cdot \delta \cdot b \cdot d} \left[\frac{3 \cdot L^2 - 4 \cdot a^2}{d^2} + 9,6 \right]$$

Onde:

- E_{real} → módulo de elasticidade real
- P → carga atuante
- a → distância da carga atuante ao apoio da viga
- δ → flecha atuante
- b → largura da viga
- d → altura da viga
- L → vão livre entre apoios.

V.3.3 - Determinação da resistência à flexão das vigas

No decorrer dos ensaios e nas proximidades dos 2/3 da carga estimada de ruptura, os dois LVDTs utilizados para os registros das deformações eram retirados, afim de preservá-los contra possíveis danos, sendo a carga levada até atingir a ruptura da viga, com o registro do valor de P_r (carga de ruptura) no sistema de aquisição de dados.

Da resistência dos materiais, NASH (1991)^[44], obtém-se a resistência das vigas de seção retangular para o ensaio de flexão a quatro pontos, utilizando-se a equação abaixo; a qual a rigor, só é válida no regime elástico do material. No entanto, os valores a serem obtidos servirão apenas como parâmetro comparativo entre as classificações.

$$\sigma_f^{\text{rup}} = \frac{M \cdot Y}{I} \quad \therefore \quad \frac{3 \cdot P_r \cdot a}{b \cdot d^2}$$

Onde:

- σ_f^{rup} → resistência à flexão
- P_r → carga de ruptura
- a → distância da carga atuante ao apoio da viga
- b → largura da viga
- d → altura da viga

V.3.4 - Resultados experimentais

Definido o modelo de ensaio das vigas e as fórmulas a serem empregadas para o cálculo do módulo de elasticidade real e a resistência à flexão, as

30 (trinta) vigas foram submetidas ao ensaio de flexão a quatro pontos. A fonte de aquisição de dados registrou as cargas parciais do carregamento e suas respectivas flechas, lidas através dos LVDT-1 e 2.

Para o cálculo do módulo de elasticidade real de cada uma das vigas, seguiu-se os seguintes critérios:

- No início do ensaio de flexão, era aplicada uma carga de acomodação de 200 Kgf, para ajustar o corpo de prova (viga) no sistema. Após isso, eram instalados os LVDTs e inicializado o ensaio propriamente dito.

- Com os pares de dados tensão x flecha, aplicava-se o processo de regressão linear simples ($y = A.x + B$). Plotava-se o gráfico para cada uma das vigas, conforme se observa na **fig.V.07**. Constatou-se que a reta ajustada a esses pontos não passava pela origem do eixo "XY", devido o ajuste inicial do corpo de prova. Consequentemente o valor do módulo de elasticidade seria irreal.

- Neste gráfico , fazendo-se uma extrapolação da reta ajustada para o segundo quadrante, determinava-se o valor do incremento das flechas a ser adicionado nos valores pontuais das mesmas. Aplicando-se novamente a regressão linear para os novos pares tensão x flecha, obtia-se o ajustamento ideal da reta passando pela origem dos eixos. Isto foi feito para todas as vigas ensaiadas. Desse modo corrigia-se ponto a ponto os valores do módulo de elasticidade. Como exemplo, é apresentado a seguir o gráfico que originou o incremento (**fig. V.07**) e o gráfico corrigido (**fig. V.08**) da viga VR-02.

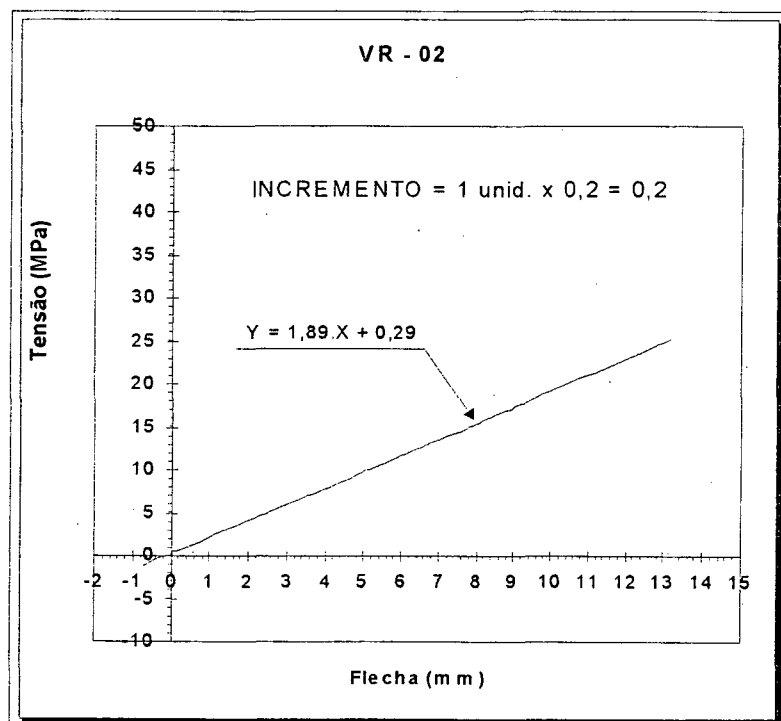


Fig. V.07 - Gráfico inicial tensão x flecha para a determinação do incremento

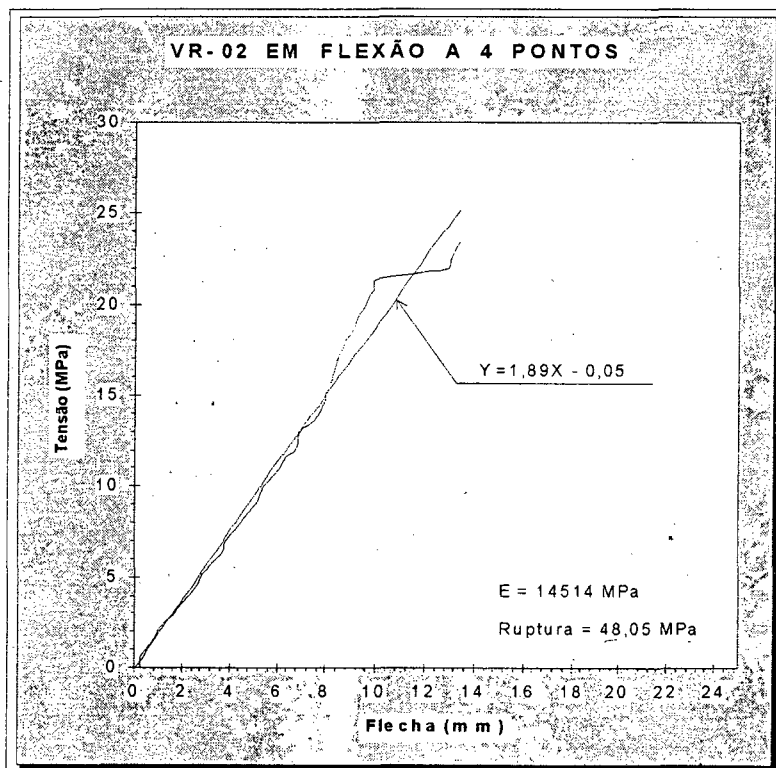


Fig.V.08 - Gráfico corrigido tensão x flecha da viga VR-02

VR-02		ENSAIO DE FLEXÃO A 4 PONTOS					
Registros No	Carga (ton)	Carga (N)	Tensão (MPa)	LVDT-1 (mm)	LVDT-2 (mm)	Flecha (mm)	E Real (MPa)
			0			0	
1	0,00281	28,06	0,03	-0,0224	-0,0055	0,2139	958
2	0,06362	636,16	0,60	-0,0147	-0,0084	0,2116	21974
3	0,12923	1292,27	1,21	-0,1142	-0,6755	0,5948	15875
4	0,18912	1891,22	1,77	-0,4746	-0,9778	0,9262	14921
5	0,25127	2512,74	2,36	-0,7905	-1,2294	1,2099	15176
6	0,30805	3080,55	2,89	-1,0352	-1,7081	1,5717	14323
7	0,36925	3692,54	3,46	-1,3369	-2,0737	1,9053	14162
8	0,43081	4308,06	4,04	-1,6885	-2,5455	2,3170	13587
9	0,49220	4922,04	4,61	-2,0198	-2,9470	2,6834	13404
10	0,55250	5524,96	5,18	-2,3073	-2,9465	2,8269	14282
11	0,61360	6136,01	5,75	-2,5657	-3,5235	3,2446	13819
12	0,67691	6769,10	6,35	-2,9367	-3,9973	3,6670	13489
13	0,73008	7300,75	6,84	-3,1579	-4,0115	3,7847	14096
14	0,78996	7899,57	7,41	-3,4173	-4,4615	4,1394	13945
15	0,84780	8478,02	7,95	-3,6257	-4,8814	4,4536	13911
16	0,91587	9158,75	8,59	-4,0018	-5,3218	4,8618	13766
17	0,97758	9775,77	9,16	-4,2875	-5,7125	5,2000	13738
18	1,04004	10400,42	9,75	-4,5523	-5,7090	5,3306	14257
19	1,09923	10992,33	10,31	-4,8097	-6,0815	5,6456	14228
20	1,16759	11675,87	10,95	-5,1973	-6,6758	6,1365	13904
21	1,22182	12218,24	11,45	-5,4636	-6,6709	6,2673	14246
22	1,28186	12818,60	12,02	-5,7914	-7,3876	6,7895	13797
23	1,33783	13378,28	12,54	-5,9372	-7,3792	6,8582	14255
24	1,39424	13942,41	13,07	-6,1448	-7,3856	6,9652	14628
25	1,45377	14537,70	13,63	-6,5275	-8,1576	7,5425	14085
26	1,51730	15173,03	14,22	-6,8436	-8,2948	7,7692	14271
27	1,57599	15759,89	14,77	-7,2187	-8,3278	7,9732	14444
28	1,63859	16385,92	15,36	-7,4268	-8,3227	8,0748	14829
29	1,69020	16902,00	15,85	-7,8003	-8,3131	8,2567	14959
30	1,74412	17441,17	16,35	-7,9133	-8,3257	8,3195	15320
31	1,90674	19067,37	17,88	-8,7510	-8,3252	8,7381	15946
32	1,97868	19786,84	18,55	-9,4659	-8,3317	9,0988	15891
33	2,04913	20491,26	19,21	-9,7925	-8,3213	9,2569	16176
34	2,10762	21076,23	19,76	-10,2181	-8,3275	9,4728	16259
35	2,16454	21645,40	20,29	-10,5727	-8,3324	9,6525	16387
36	2,21997	22199,67	20,81	-11,0118	-8,3228	9,8673	16441
37	2,27922	22792,21	21,37	-11,4573	-8,3248	10,0910	16505
38	2,33384	23338,40	21,88	-11,7604	-13,3407	12,7506	13376
39	2,39155	23915,51	22,42	-12,2408	-13,3509	12,9958	13448
40	2,44712	24471,17	22,94	-12,5428	-13,3498	13,1463	13603
41	2,50425	25042,47	23,48	-13,0022	-13,3618	13,3820	13675

42	2,58528	25852,81	24,24	-	-	-	-
43	2,64180	26418,00	24,77	-	-	-	-
44	2,69494	26949,38	25,27	-	-	-	-
45	2,74934	27493,45	25,78	-	-	-	-
46	2,82794	28279,35	26,51	-	-	-	-
47	2,88397	28839,66	27,04	-	-	-	-
48	2,93771	29377,10	27,54	-	-	-	-
49	2,99763	29976,27	28,10	-	-	-	-
50	3,05354	30535,39	28,63	-	-	-	-
51	3,14735	31473,50	29,51	-	-	-	-
52	3,23912	32391,18	30,37	-	-	-	-
53	3,30353	33035,31	30,97	-	-	-	-
54	3,36788	33678,82	31,57	-	-	-	-
55	3,43403	34340,32	32,19	-	-	-	-
56	3,50745	35074,51	32,88	-	-	-	-
57	3,57717	35771,75	33,54	-	-	-	-
58	3,62857	36285,69	34,02	-	-	-	-
59	3,68877	36887,67	34,58	-	-	-	-
60	3,75558	37555,83	35,21	-	-	-	-
61	3,82512	38251,24	35,86	-	-	-	-
62	3,88482	38848,25	36,42	-	-	-	-
63	3,94523	39452,30	36,99	-	-	-	-
64	4,00670	40067,04	37,56	-	-	-	-
65	4,06812	40681,25	38,14	-	-	-	-
66	4,12686	41268,58	38,69	-	-	-	-
67	4,18994	41899,41	39,28	-	-	-	-
68	4,24577	42457,69	39,80	-	-	-	-
69	4,32016	43201,58	40,50	-	-	-	-
70	4,37794	43779,42	41,04	-	-	-	-
71	4,43650	44364,97	41,59	-	-	-	-
72	4,48825	44882,51	42,08	-	-	-	-
73	4,60351	46035,07	43,16	-	-	-	-
74	4,68622	46862,25	43,93	-	-	-	-
75	4,75925	47592,55	44,62	-	-	-	-
76	4,86427	48642,70	45,60	-	-	-	-
77	4,92888	49288,80	46,21	-	-	-	-
78	5,00236	50023,57	46,90	-	-	-	-
79	5,07122	50712,15	47,54	-	-	-	-
80	5,12560	51255,98	48,05	-	-	-	-
Módulo de Elasticidade Real Médio (MPa) =							14514
Resistência à flexão (MPa) =							48,05

Tab.09 - Resultado do ensaio de flexão a 4 pontos da viga VR-02.

A tabela anterior exemplifica os dados do ensaio da viga VR-02. O módulo de elasticidade real médio para cada uma das vigas, foi calculado ponto a ponto, desprezando-se os valores iniciais referentes às deformações das cargas de acomodação, em função destes apresentarem valores distorcidos, que caso considerados iriam mascarar o resultado final do módulo de elasticidade real. Para o cálculo da resistência à flexão, utilizou-se a carga de ruptura, que para este exemplo foi de 5,12 ton.

Nas tabelas 10 a 14, estão sumarizados os resultados da experimentação à flexão a quatro pontos para cada uma das vigas dos cinco tipos de classificações. São eles: módulo de elasticidade médio das lâminas " E_m "; módulo de elasticidade teórico " E_t ", módulo de elasticidade real " E_{real} " e resistência à flexão " σ_F^{rup} ", todos em "MPa".

R E S U M O				
No das Vigas	Em das Lâminas (MPa)	E Teórico da Viga (MPa)	E Real da Viga (MPa)	Resistência à Flexão (MPa)
VA-01	8206,62	7741,56	6443	24,97
VA-02	8668,40	8151,57	8412	26,54
VA-03	8253,48	7321,91	7626	32,98
VA-04	8674,39	8219,77	7277	20,99
VA-05	8479,42	7988,43	7270	30,72
VA-06	8832,38	8105,39	7189	29,67

Tab. 10 - Resultado das vigas compostas de forma aleatória - VA.

R E S U M O				
No das Vigas	Em das Lâminas (MPa)	E Teórico da Viga (MPa)	E Real da Viga (MPa)	Resistência à Flexão (MPa)
VR-01	10490,91	14506,56	13225	51,06
VR-02	10511,64	14403,66	14514	48,05
VR-03	10427,91	14176,07	14263	38,63
VR-04	10317,81	13886,76	14904	43,43
VR-05	10169,20	14403,66	12035	49,68
VR-06	10146,32	13590,77	12473	54,49

Tab. 11 - Resultado das vigas classificadas pela rigidez - VR.

R E S U M O				
No das Vigas	Em das Lâminas (MPa)	E Teórico da Viga (MPa)	E Real da Viga (MPa)	Resistência à Flexão (MPa)
VRE-01	11255,18	12158,37	11784	49,09
VRE-02	11196,25	12128,45	12806	36,71
VRE-03	11147,65	12077,30	10829	55,58
VRE-04	11059,15	11901,58	12009	35,73
VRE-05	10961,12	11804,28	12414	38,51
VRE-06	10881,45	11705,85	11369	41,85

Tab. 12 - Resultado das vigas classificadas com rigidez elevada - VRE.

R E S U M O				
No das Vigas	Em das Lâminas (MPa)	E Teórico da Viga (MPa)	E Real da Viga (MPa)	Resistência à Flexão (MPa)
VN-01	7854,15	8429,38	8250	37,79
VN-02	8932,03	8590,23	7622	30,50
VN-03	8692,61	8594,8	8975	28,91
VN-04	7669,06	8318,93	7751	39,73
VN-05	7401,61	7685,17	7593	33,94
VN-06	7554,27	7709,09	8015	44,18

Tab. 13 - Resultado das vigas classificadas pelo tamanho dos nós - VN.

R E S U M O				
No das Vigas	Em das Lâminas (MPa)	E Teórico da Viga (MPa)	E Real da Viga (MPa)	Resistência à Flexão (MPa)
VAC-01	8557,28	9145,00	8600	26,57
VAC-02	9142,47	10993,22	6308	17,66
VAC-03	9148,23	10718,93	11609	31,97
VAC-04	8724,27	10155,23	10561	31,28
VAC-05	6964,61	6772,77	7339	26,61
VAC-06	7934,49	8224,56	9192	28,47

Tab. 14 - Resultado das vigas classificadas pelos anéis de crescimento - VAC.

Sobre o comportamento das vigas no ensaio de flexão a quatro pontos, observou-se o seguinte:

Constatou-se que uma das vigas do grupo classificadas pelos anéis de crescimento "VAC-02", ocorreu ruptura por cisalhamento sobre a junta de cola posicionada logo acima da linha neutra. Uma avaliação da região de ruptura indicou uma falha interna localizada na colagem, abrangendo uma extensão de aproximadamente 80 cm. Isso resultou em baixos valores para o módulo de elasticidade real assim como também - na resistência à flexão.

Com exceção da viga "VAC-02", que rompeu inicialmente por cisalhamento dentro da flexão (ocasionada pelo esforço cortante), todas as demais vigas ensaiadas, romperam por tensão normal à seção transversal (ocasionada pelo momento fletor), com a ruptura iniciando sempre na lâmina (tábua) da zona tracionada, o mais afastado da linha neutra e dentro da região de momento uniforme. A figura abaixo evidencia esse tipo de ruptura.

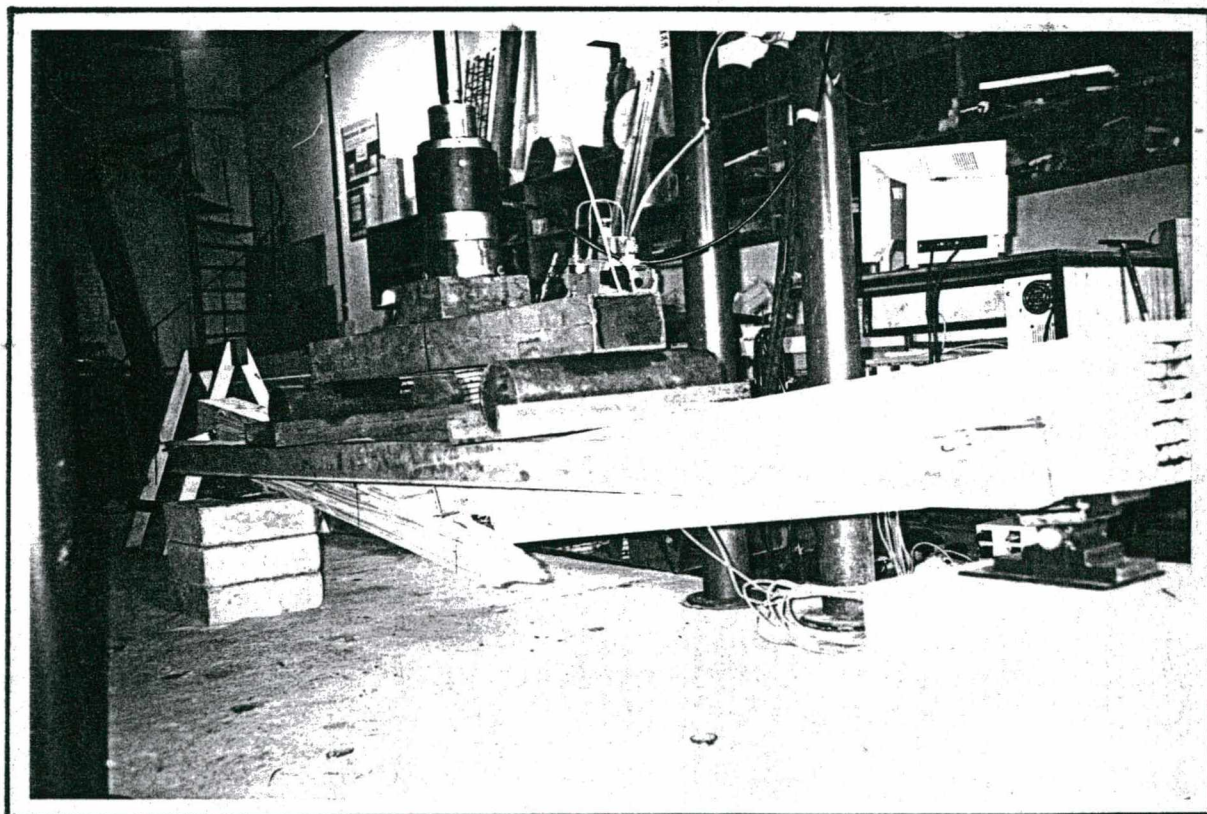


Fig. V.09 - Detalhe da ruptura na zona tracionada

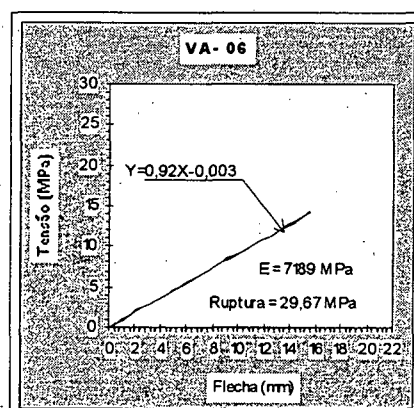
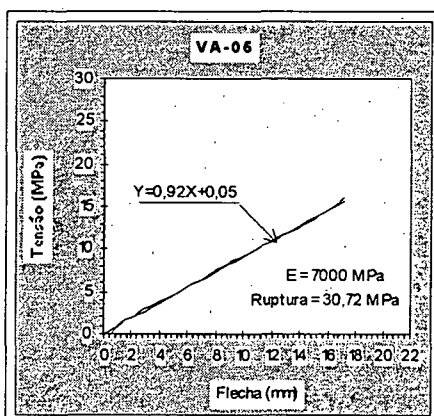
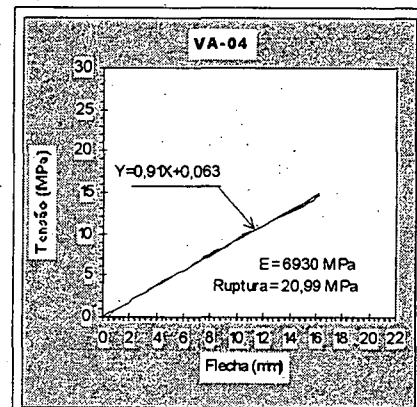
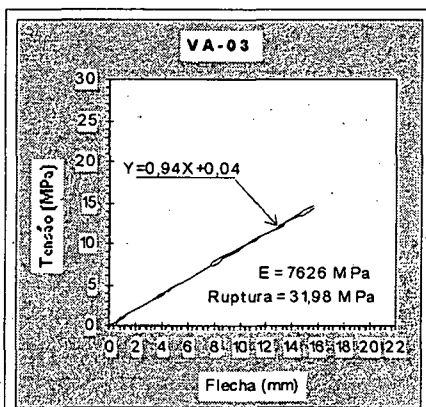
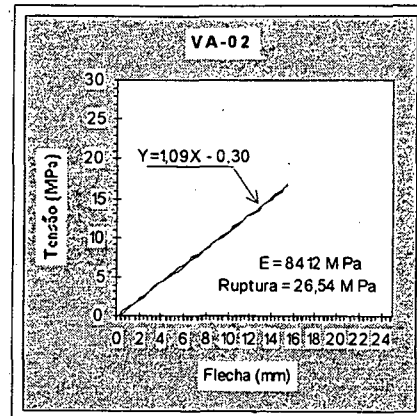
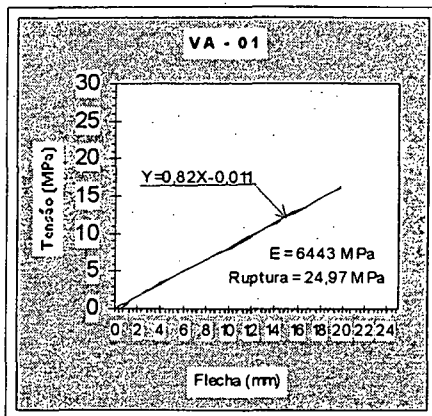


Fig. V.10 - Gráficos corrigidos tensão x flecha das vigas compostas de forma aleatórias

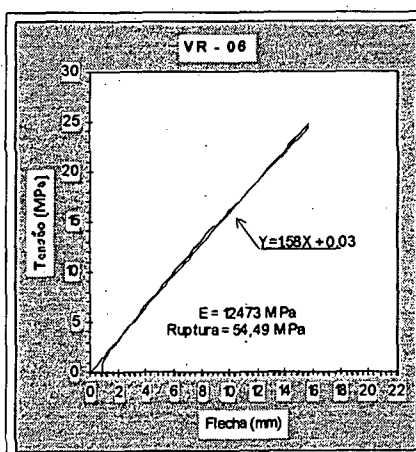
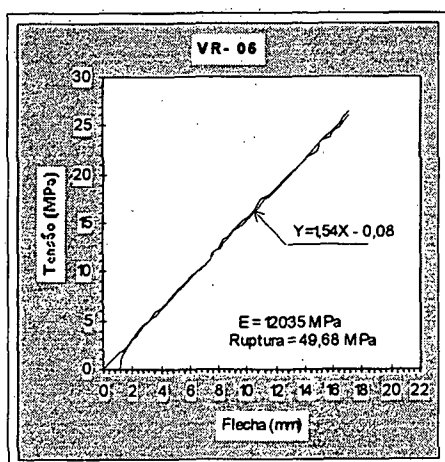
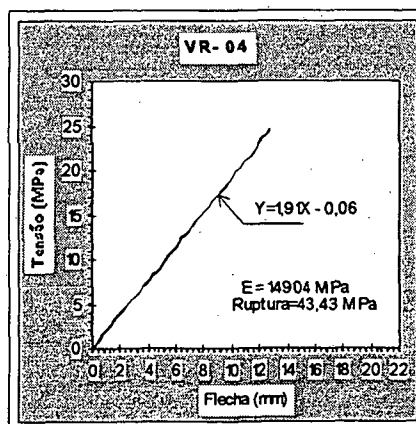
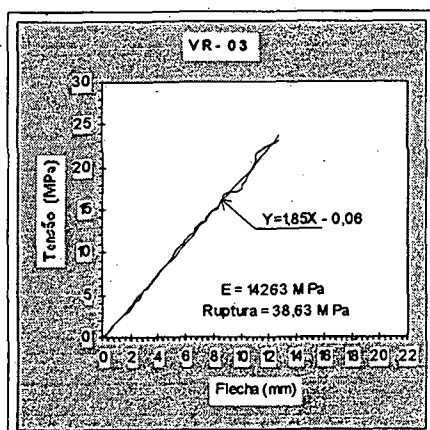
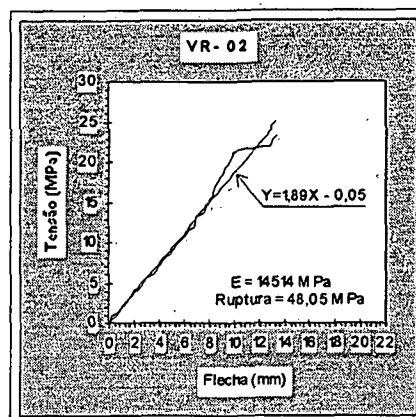
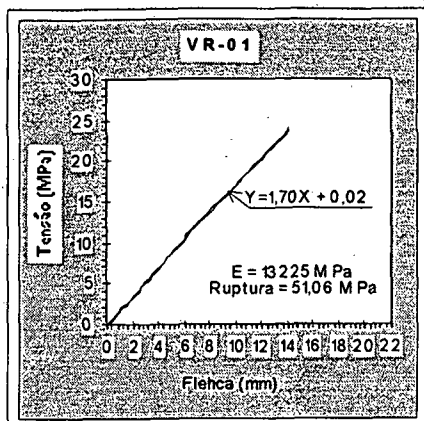


Fig.V.11 - Gráficos corrigidos tensão x flecha das vigas classificadas pela rigidez

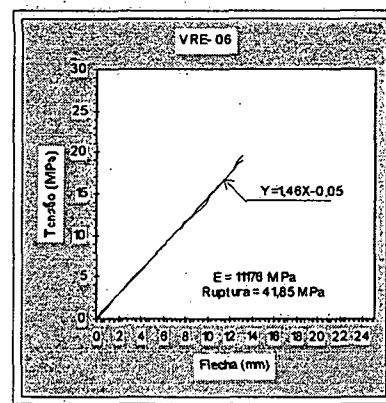
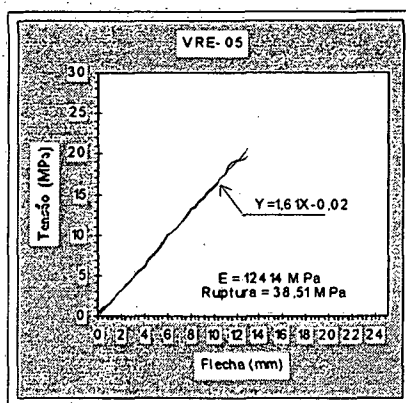
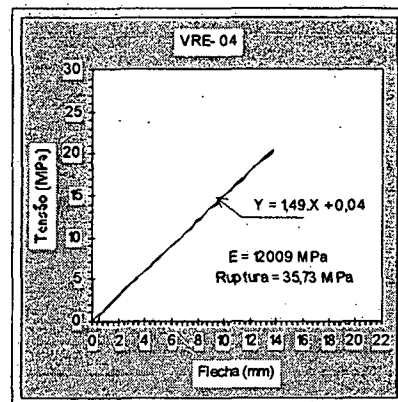
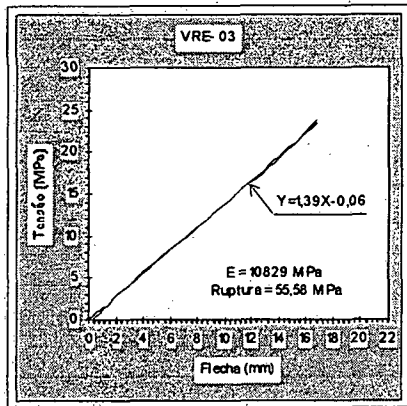
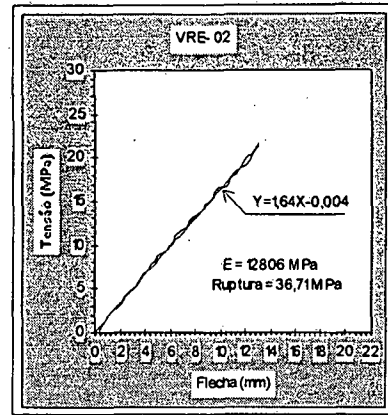
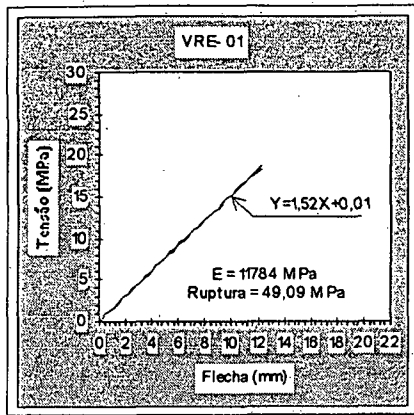


Fig.V.12 - Gráficos corrigidos tensão x flecha das vigas classificadas com rigidez elevada.

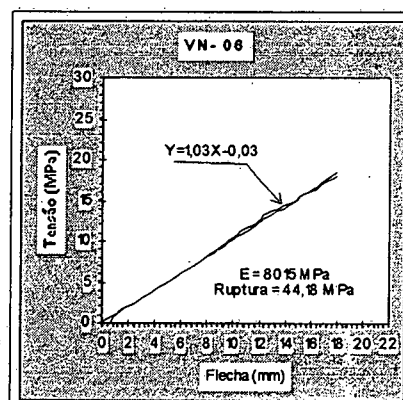
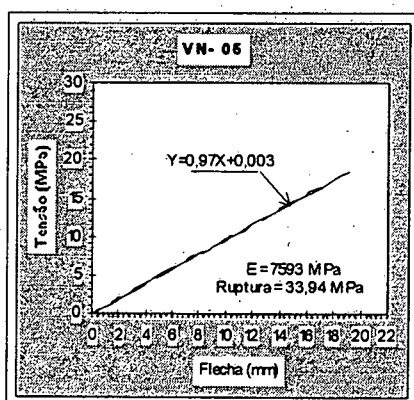
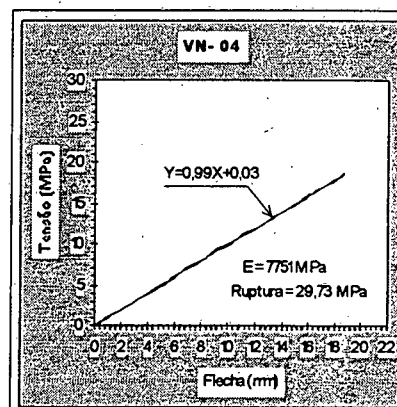
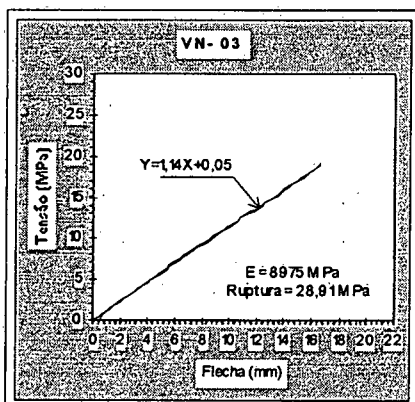
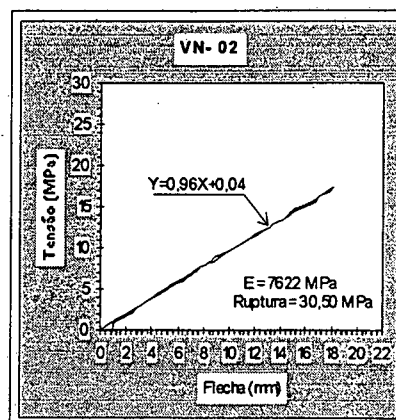
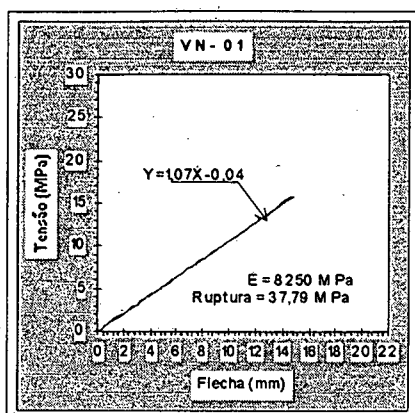


Fig.V.13 - Gráficos corrigidos tensão x flecha das vigas classificadas pelo tamanho dos nós.

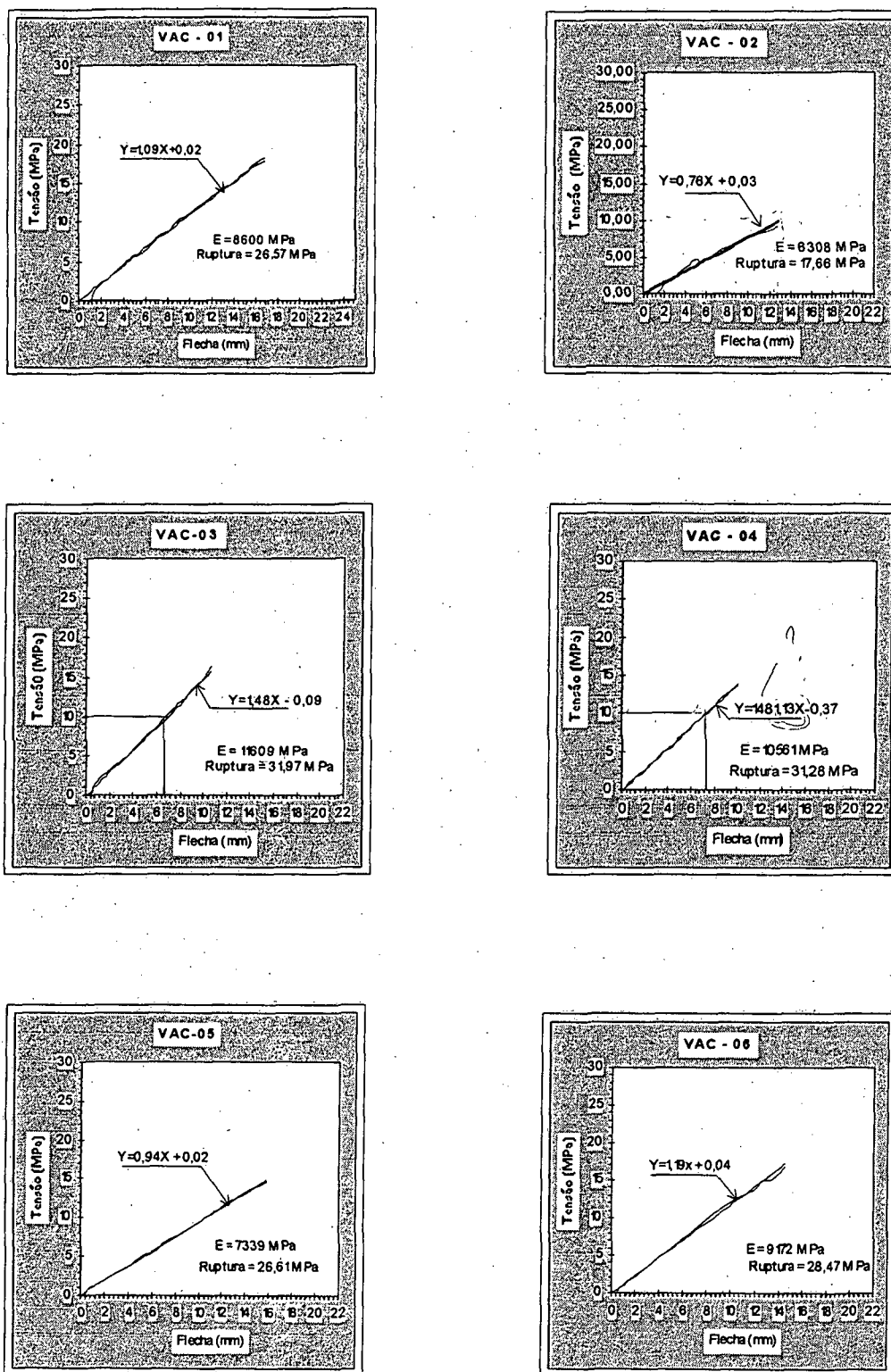


Fig.V.14 - Gráficos corrigidos tensão x flecha das vigas classificadas pelos anéis de crescimentos.

Esses dados serão analisados estatisticamente no capítulo seguinte.

CAPÍTULO . VI

ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS OBTIDOS

VI - ANÁLISE ESTATÍSTICA

VI.1 - Introdução

Objetivando melhor avaliar os resultados obtidos das vigas provenientes do ensaio de flexão a quatro pontos nos cinco tipos de classificações, procedeu-se a análise estatística dos dados.

A metodologia empregada no desenvolvimento da análise estatística, foi baseada em uma publicação de NANNI (1986)^[38] e principalmente nas notas de aulas do Prof. PRUDÊNCIO JR*.

O nível de significância empregado em todas as análises realizadas foi de 95 % de confiabilidade. O embasamento teórico da estatística é apresentado de forma reduzida no ANEXO-03, a partir da página 146.

VI.2 - Análise da estatística básica dos dados de ensaio

Os resultados da análise estatística básica para os valores do módulo de elasticidade real (E_{real}) e resistência à flexão (σ_f^{rup}) das vigas, foram obtidos utilizando-se a "Ferramenta Estatística Descritiva" do Microsoft Excel 5.0, sendo utilizado para os cinco tipos de classificações. O resultado dessa análise é apresentado nas tabelas 15 e 16.

Para que haja uma melhor compreensão dos parâmetros que compõem estas tabelas, foi elaborada uma descrição resumida sobre cada coluna que as integram.

Colunas:

Descrições:

1	- Denominação da viga.
2	- Tamanho da amostra, conforme IV.2.
3	- Módulo de elasticidade real médio e resistência à flexão média, em MPa.
4	- Desvio-padrão, em MPa.

* PRUDÊNCIO JR. L.R. - Projetos e análise de experimentos. Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, Florianópolis, SC, 1993.

- 5 - Coeficiente de variação, em %.
- 6-7 - Coeficiente de assimetria. A tabela apresenta o valor calculado " g_1 ", assim como também o " g_1 (tabelado)" para testar a existência ou não de assimetria.
- 8-9 - Coeficiente de curtose. Apresenta-se o valor calculado " g_2 " e o valor comparativo igual a "3", para testar se a distribuição possui uma altura acentuada ou um achatamento significativo.
- 10 - Valor mínimo observado, em MPa.
- 11 - Valor máximo observado, em MPa.
- 12-13 - Resultado do teste analítico de "Kolmogorov-Smirnov" (K-S). A tabela apresenta o valor calculado da distância máxima "DM" e o valor comparativo tabelado de " $D_\alpha(n)$ ", que depende do nível de probabilidade " α " e do tamanho da amostra "n". Se $DM > D_\alpha(n)$ a hipótese de normalidade não é rejeitada, admitindo-se a distribuição normal.
- 14 - Valor extremo espúrio. Toma-se o valor que mais se afasta da média da amostra, e que deveria ser rejeitado sob a hipótese que a distribuição analisada seja normal.

Os resultados mostrados nas tab. 15 e 16, revelam o seguinte:

VI.2.1 - Módulo de elasticidade real (E_{real}).

- Existe uma diferente ordem de magnitude entre as médias e os desvios-padrões das amostras, apontando a existência de um ganho em termos de resistência entre os cinco tipos de classificações.

VIGAS - Módulo de Elasticidade Real													
VIGAS	PARÂMETROS												
	N	\bar{X}	S	C.V. %	Assimetria		Curtose		Valor Mínimo	Valor Máximo	Teste de Normalidade		Valor extremo espúrio
					g1	g1 (tab)	g2	3			DM	D _{0,05} (6)	
VA	6	7369,5	642,19	8,71	0,287	< 1,024	2,714	< 3	6443	8412	0,178	< 0,319	não
VR	6	13569	1168,73	8,61	-0,193	< 1,024	1,441	< 3	12035	14904	0,159	< 0,319	não
VRE	6	11868,5	711,82	6	-0,158	< 1,024	1,955	< 3	10829	12806	0,095	< 0,319	não
VN	6	8034,33	524,75	6,53	1	< 1,024	2,717	< 3	7593	8975	0,205	< 0,319	não
VAC	6	8934,83	1970,83	22,06	0,035	< 1,024	1,786	< 3	6308	11609	0,124	< 0,319	não
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14

Tab. 15 - Análise estatística básica do módulo de elasticidade real

VIGAS - Resistência à Flexão													
VIGAS	PARÂMETROS												
	N	\bar{X}	S	C.V. %	Assimetria		Curtose		Valor Mínimo	Valor Máximo	Teste de Normalidade		Valor extremo espúrio
					g1	g1 (tab)	g2	3			DM	D _{0,05} (6)	
VA	6	27,48	4,12	14,99	-0,482	< 1,024	1,964	< 3	24,97	31,98	0,138	< 0,319	não
VR	6	47,56	5,69	11,96	-0,471	< 1,024	2,09	< 3	38,63	54,49	0,111	< 0,319	não
VRE	6	42,91	7,86	18,33	0,709	< 1,024	1,991	< 3	36,71	49,09	0,227	< 0,319	não
VN	6	34,18	5,9	17,27	0,815	< 1,024	2,28	< 3	28,91	44,18	0,232	< 0,319	não
VAC	6	27,08	5,15	19,01	-1,038	< 1,024	2,997	< 3	17,66	31,97	0,171	< 0,319	não
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14

Tab.16 - Análise estatística básica da resistência à flexão

- Para o coeficiente de variação (C.V.) das vigas VA, VR, VRE e VN, constata-se um "C.V." pequeno, demonstrando baixa variabilidade dos dados de cada uma das amostras. As vigas VAC apresentam um C.V. = 22,06 %, mais elevado em comparação as demais, mas segundo NANNI (1986)^[38], discorrendo sobre o assunto comenta o seguinte: "Geralmente se os dados de uma amostra têm um C.V. ≥ 25 %, a qualidade dessa amostra poderia ser considerada duvidosa". Não sendo esse o caso para os cinco tipos de classificações, pois em todas elas o "C.V." foi menor que 25 %. *Portanto, as amostras são aceitáveis.*

Por outro lado, o fato das vigas VAC, apresentarem um "C.V." elevado, é explicado em função da viga VAC-02 ter rompido primeiramente por cisalhamento, o que resultou em um valor mínimo para o " E_{real} ", influenciando na percentagem final de variação dos dados dessa amostra.

- As amostras VA, VN e VAC com " g_1 " positivo apresentam uma distribuição ligeiramente assimétrica à direita, enquanto nas amostras VR e VRE constata-se uma assimetria à esquerda, isto é, os valores do " E_{real} " das amostras não estão simetricamente distribuídos em torno da média. Em todas as classificações " $g_1 < g_1(tab.)$ " e não próximos de zero, por essa razão, não são considerados significativos para afirmar que as distribuições são normais.

- O coeficiente de curtose de todas as amostras, revelam um " $g_2 < 3$ ", portanto as distribuições são significativamente achatadas no meio e do tipo PLATICÚRTICAS.

- A opção pelo teste analítico de normalidade pelo método de "Kolmogorov-Smirnov" (K-S), justifica-se por ser este de boa potência, não existindo uma probabilidade de acatar a hipótese de normalidade quando ela não é verdadeira. Além do mais, pode ser usado para amostras pequenas de $n \geq 4$, o que não é possível com um outro método, como por exemplo o Qui-quadrado.

- O teste de (K-S) indica que a hipótese de normalidade das distribuições não são rejeitadas, em todos os casos $DM < D_{0,05}(6)$, logo admite-se que as mesmas são *normais*.

- Nos cinco grupos de vigas, realizou-se o teste de eliminação de valor espúrio, não se constatando nenhuma rejeição entre os valores das amostras.

VI.2.2 - Comportamento na ruptura

- Constata-se uma diferente ordem de magnitude entre as médias e os desvio-padrões das amostras, indicando uma possível diferença entre as classificações.

- Para o coeficiente de variação dos cinco grupos de vigas, observa-se que são de valores pequenos e próximos uns dos outros e menores que 25 %, o que confirma também a boa qualidade da amostra.

- As amostras VA, VR e VAC, revelam uma assimetria à direita e as VRE e VN uma assimetria à esquerda. Em todas as classificações " $g_1 < g_1$ (tab.)" muito distantes de zero, portanto, não significativos para afirmar a normalidade da distribuição.

- O coeficiente de curtose " $g_2 < 3$ " em todas as amostras dos grupos, sendo significativamente achatadas no meio e do tipo PLATICÚRTICAS.

- O teste de normalidade pelo (K-S), indicam um " $DM < D_{0,05}(n)$ ", logo a hipótese de normalidade não é descartada para nenhum dos grupos de classificações. Admitindo-se as distribuições **normais**.

- Não se constatou nenhuma rejeição de valor extremo espúrio entre os dados das amostras.

Em conclusão, pode-se afirmar que a distribuição **n o r m a l** poderá ser adotada na análise dos valores médios do módulo de elasticidade real (E_{real}) e da resistência à flexão (σ_f^{rup}) para todas as classificações estudadas.

IV.3 - Comparação múltipla de médias entre as cinco classificações.

Deseja-se verificar a possível existência ou não de uma diferença significativa entre as médias de cada uma das cinco classificações utilizadas na pesquisa. Para tanto, pretende-se testar a hipótese de que as médias entre elas são iguais, com alternativa de que sejam diferentes.

Para isso será utilizado um método estatístico, que indicará ou não a hipótese acima a ser testada. Essa comparação pertence a categoria dos testes fornecidos pela análise de variância "ANOVA", o qual baseia-se na distribuição "F". O valor calculado de "F" e o correspondente a um nível de significância de 5 % ($F_{0,05}$), são os parâmetros comparativos do teste. Se " $F < F_{0,05}$ ", *conclui-se que não existe uma diferença significativa entre as médias analisadas. O oposto conduzirá a uma rejeição desta hipótese.*

No desenvolvimento do teste, adotar-se-á a análise de grupos com níveis fixos (modelo-2 ANOVA de um fator).

Os valores destes testes são apresentados a seguir, tanto para as médias do módulo de elasticidade real como da resistência à flexão. Nas tabelas seguintes

são apresentados os valores das médias das 6 vigas de cada conjunto de classificação, assim como os cálculos numéricos de totais, médias e soma de quadrados, os quais servirão para determinar o valor de "F" procurado.

a) Valores obtidos para o módulo de elasticidade real (E_{real})

amostra	CLASSIFICAÇÕES em (MPa)					soma dos quadrados X^2_{ij}	
	Valores Médios do Módulo de Elasticidade Real						
	VA	VN	VAC	VRE	VR		
1	6443	8250	8600	11784	13225		327919219
2	8412	7622	6308	12806	14514		388679884
3	7626	8975	11609	10829	14263		498408251
4	7277	7751	10561	12009	14904		847701171
5	7270	7593	7339	12414	12035		1111536160
6	7189	8015	9192	11369	12473	total	3174244685
T _j	44217	48206	53609	71211	81414	T _{..} =	298657
X _j	7369,50	8034,33	8934,83	11868,50	13569,00	X _{..} =	9955,23
n _j	6	6	6	6	6	N =	30

Cálculos em (MPa)	Graus de Liberdade
CT = 2973200122	K - 1 = 4
soma $T^2_{.j} / n_j = 3142022054$	N - K = 26
SQT = 201044563,4	N - 1 = 29
SQR = 32222631,17	Hipóteses
SQB = 168821932,2	Ho: médias iguas
MQB = 42205483,05	H1: méd diferentes
MQR = 1239331,968	
F = 34,06	Falfa (k-1, N-K) = F_{0,05} (4, 29) = 2,70

Tab.17 e 18 - Comparação múltipla de médias para o E_{real} .

Para o módulo de elasticidade real (E_{real}), verifica-se que o valor de "F" é bastante expressivo em relação ao $F_{0,05}(4,29)$, indicando que a hipótese Ho é REJEITADA. Ou seja, existe diferença significativa entre as médias dos cinco tipos de classificações, com 95 % de confiabilidade. E em síntese, pode-se afirmar que as classificações possuem características diferentes.

b) Valores obtidos para a resistência à flexão (σ_f^{rup})

amostra	CLASSIFICAÇÕES em (MPa)					soma dos quadrados	
	Valores médios da resistência à flexão						
	VA	VN	VAC	VRE	VR		
1	24,97	37,79	26,57	49,09	51,06	4615,2	
2	26,54	30,5	17,66	36,71	48,05	7181,8	
3	31,98	28,91	31,97	55,58	38,63	4536,99	
4	20,99	29,73	31,28	35,73	43,43	11357,7	
5	30,72	33,94	26,61	38,51	49,68	13731,63	
6	29,67	44,18	28,47	41,85	54,49	total	41423,3
T.j	164,87	205,05	162,56	257,47	285,34	T.. =	1075,29
Xj	27,48	34,18	27,09	42,91	47,56	X.. =	35,84
nj	6	6	6	6	6	N =	30

Cálculos em (MPa)		Graus de Liberdade	
CT =	38541,61	K - 1 =	4
soma T2.j / nj =	40560,51	N - K =	26
SQT =	2881,65	N - 1 =	29
SQR =	862,76	Hipóteses	
SQB =	2018,89	Ho : médias iguas	
MQB =	504,72	H1 : méd. diferentes	
MQR =	33,18		
F =	15,21	Falfa (k-1, N-K) =	F _{0,05} (4, 29) = 2,70

Tab.19 e 20 - Comparação múltipla de médias para a resistência à flexão.

Com relação a resistência à flexão, observa-se também que o valor de "F" calculado é maior que o valor tabelado " $F_{0,05}(4,29)$ ", indicando que a hipótese Ho é REJEITADA. Isto é, com 95 % de confiabilidade pode-se afirmar a existência de uma diferença significativa entre as médias dos cinco tipos de classificações, revelando que as mesmas possuem características diferentes.

A respeito do cálculo do "F", NANNI (1986)^[38] comenta que: Se o valor de "F" indicar uma diferença significativa entre as médias, há de se fazer uma análise posterior para definir a média ou médias, que diferem significativamente entre si, para isso, deve-se utilizar o "Método de DUNCAN". O que será feito na etapa seguinte.

VI.4 - Método de "DUNCAN" entre as cinco classificações.

Devido o valor de "F" do teste anterior ter indicado a existência de uma diferença significativa entre as médias do módulo de elasticidade e da resistência à flexão, não se pode afirmar ainda com certeza, qual ou quais as classificações são as melhores entre os grupos estudados. Isso será possível com o emprego do método de "DUNCAN" (Studentized Range), o qual analisa a média ou médias que diferem significativamente das outras e com isso espera-se poder tirar conclusões sobre as classificações.

Para uma melhor compreensão da aplicação desta análise, o método será apresentado de forma resumida afim de deixar transparente o critério adotado para se chegar às considerações finais da pesquisa.

VI.4.1 - Análise das médias do E_{real} das vigas.

O procedimento é o seguinte:

- a) as médias são apresentadas em ordem crescente;

CLASSIFICAÇÕES em (MPa) - E_{real}				
VA	VN	VAC	VRE	VR
7369,5	8034,33	8934,83	11868,5	13569

b) Determinou-se o desvio padrão das médias ($S_{\bar{x}}$), sendo o desvio padrão combinado dado por:

$$S = \sqrt{MQR} \therefore \sqrt{123933197} \rightarrow S = 1113,25$$

Onde: MQR = a média dos quadrados dos resíduos

Como "n" depende das colunas, usa-se um valor aproximado "mh" (media harmônica) dado pela seguinte expressão:

$$\frac{1}{mh} = \frac{\sum \frac{1}{n_i}}{K} \therefore \frac{\frac{1}{6} + \frac{1}{6} + \frac{1}{6} + \frac{1}{6} + \frac{1}{6}}{5} = 6 \quad \text{Então:}$$

$$S_{\bar{x}} = \frac{S}{\sqrt{mh}} \therefore \frac{1113,25}{\sqrt{6}} = 454,48$$

c) Usando a tabela de "Studentized Range" em NANNI, determina-se os valores de R_k , dado por $R_k = S_{\bar{X}} \cdot r_k$, que depende do número de classificações, dos graus de liberdade de "S" e do nível de significância, aqui adotado como $\alpha = 0,05$.

Determinando-se: $\rho k = N - k \rightarrow \rho k = 30 - 5 \rightarrow \rho k = 25$ (graus de liberdade - GDL), da tabela tira-se os valores de r_k , em função de $(\rho k, k)$.

r_k	2	3	4	5
GDL = 25	2,93	3,53	3,9	4,18

• VALORES DE " R_K ":

$$R_2 = S_{\bar{X}} \cdot 2,93 = 1331.63 \qquad R_4 = S_{\bar{X}} \cdot 3.90 = 1772.50$$

$$R_3 = S_{\bar{X}} \cdot 3.53 = 1604.31 \qquad R_5 = S_{\bar{X}} \cdot 4.18 = 1899.73$$

e) As comparações são feitas em função das diferenças entre as médias ordenadas, que chamaremos de $X(j)$, com os valores de " R_k " da seguinte maneira: $\bar{X}_{(VR)} - \bar{X}_{(VA)}$ com R_5 ; $\bar{X}_{(VR)} - \bar{X}_{(VN)}$ com R_4 ; $\bar{X}_{(VR)} - \bar{X}_{(VAC)}$ com R_3 ; $\bar{X}_{(VR)} - \bar{X}_{(VRE)}$ com R_2 ; $\bar{X}_{(VRE)} - \bar{X}_{(VA)}$ com R_4 ; $\bar{X}_{(VRE)} - \bar{X}_{(VN)}$ com R_3 ; e assim sucessivamente até efetuar todas as comparações. Se a diferença entre as médias das classificações testadas for maior que o correspondente valor de " R_2 ", " R_3 ", " R_4 " e " R_5 ", a diferença é declarada significativa (DS). Em caso contrário, é declarada não significativa (DNS).

Para que as comparações fiquem mais evidentes, elaborou-se um desenho esquemático das mesmas, conforme apresenta-se abaixo:

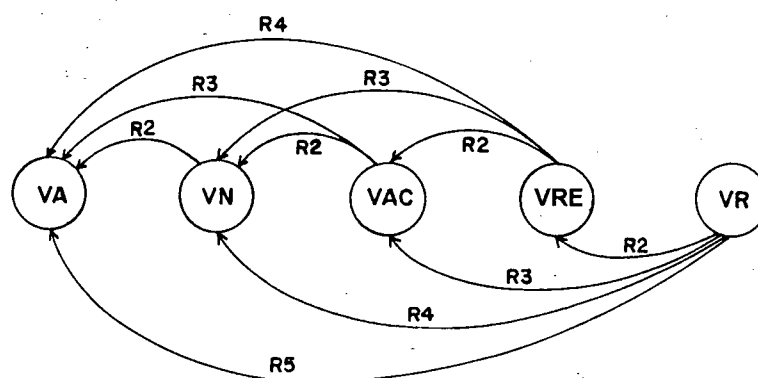


Fig.VI.01 - Esquema das comparações das médias do E_{real} .

Diferença entre as médias	COMPARAÇÕES	CONCLUSÕES
$X(VR) - X(VA) = 6199,50$	$6199,50 > R5 = 1899,73$	VR e VA ---- DS
$X(VR) - X(VN) = 5534,67$	$5534,67 > R4 = 1772,50$	VR e VN ---- DS
$X(VR) - X(VAC) = 4634,17$	$4634,17 > R3 = 1604,31$	VR e VAC ---- DS
$X(VR) - X(VRE) = 1700,5$	$1700,5 > R2 = 1331,63$	VR e VRE ---- DS
$X(VRE) - X(VA) = 4499$	$4499 > R4 = 1899,73$	VRE e VA ---- DS
$X(VRE) - X(VN) = 3834,17$	$3834,17 > R3 = 1604,31$	VRE e VN ---- DS
$X(VRE) - X(VAC) = 2933,67$	$2933,67 > R2 = 1331,63$	VRE e VAC ---- DS
$X(VAC) - X(VA) = 1565,24$	$1565,24 < R3 = 1604,31$	VAC e VA --- NDS
$X(VAC) - X(VN) = 900,50$	$900,50 < R2 = 1331,63$	VAC e VN ---- NDS
$X(VN) - X(VA) = 664,83$	$664,83 < R2 = 1331,63$	VN e VA --- NDS

Tab. 21 - Resultado do método de "DUNCAN" para o E_{real} .

O resultado pode ser apresentado também, usando barras horizontais acima das médias que *não diferem significativamente entre si*, em (MPa):

VA	VN	VAC	VRE	VR
7369,5	8034,33	8934,83	11868,5	13569

Em resumo, em termos de resistência mecânica considerando o módulo de elasticidade real (E_{real}) como variável, o método de "DUNCAN" nos indica com 95 % de confiabilidade, que:

- Existem diferença significativa entre as vigas classificadas pelo critério da rigidez (vigas-VR) em comparação às concebidas de forma aleatórias (vigas-VA), às classificadas pelo tamanho do nó (vigas-VN), pela espessura dos anéis de crescimento (vigas-VAC) e pela rigidez elevada (vigas-VRE).

- Observa-se também uma diferença significativa entre as vigas classificadas pelo critério da rigidez elevada (vigas-VRE), quando comparadas às vigas aleatórias (vigas-VA), às classificadas pelo tamanho do nó (vigas-VN) e pelo tamanho dos anéis de crescimento (vigas-VAC).

- Não há diferença significativa entre as vigas classificadas pelos critérios da espessura dos anéis de crescimento (vigas-VAC), pelo tamanho dos nós (vigas-VN) e as vigas aleatórias (vigas-VA).

VI.4.2 - Análise entre médias da resistência à flexão

Para analisar os valores médios obtidos para a resistência à flexão, procedeu-se com a mesma metodologia empregada no item VI.4.1. Os resultados fornecidos pelo método estão abaixo apresentados.

Diferença entre as médias	COMPARAÇÕES	CONCLUSÕES
$X(VR) - X(VA) = 18,47$	$18,47 > R5 = 9,8$	VR e VA ---- DS
$X(VR) - X(VN) = 20,08$	$20,08 > R4 = 9,17$	VR e VN ---- DS
$X(VR) - X(VAC) = 13,38$	$13,38 > R3 = 8,30$	VR e VAC ---- DS
$X(VR) - X(VRE) = 4,65$	$4,65 < R2 = 6,86$	VR e VRE ---- NDS
$X(VRE) - X(VA) = 15,82$	$15,82 > R4 = 9,17$	VRE e VA ---- DS
$X(VRE) - X(VN) = 15,43$	$15,43 > R3 = 8,30$	VRE e VN ---- DS
$X(VRE) - X(VAC) = 8,73$	$8,73 > R2 = 6,86$	VRE e VAC ---- DS
$X(VAC) - X(VA) = 7,09$	$7,09 < R3 = 8,30$	VAC e VA ---- NDS
$X(VAC) - X(VN) = 6,70$	$6,70 < R2 = 6,86$	VAC e VN ---- NDS
$X(VN) - X(VA) = 0,39$	$0,39 < R2 = 6,86$	VN e VA ---- NDS

Tab.22 - Resultado do método de "DUNCAN" para a resistência à flexão.

Finalmente, usando barras horizontais acima das médias que *não* diferem significativamente temos :

VA	VN	VAC	VRE	VR
27,48	34,18	27,09	42,91	47,56

Em síntese, em termos de comportamento mecânico considerando a resistência à flexão (σ_f^{mp}) como variável, o método de "DUNCAN" nos fornece com 95 % de confiabilidade, que:

- Comparando as vigas classificadas pela rigidez (vigas-VR) com as demais, constatou-se diferença significativa desta, entre as classificações pelos anéis de crescimento (vigas-VAC), pelo tamanho dos nós (vigas-VN) e entre as vigas concebidas de forma aleatórias (vigas-VA).

- Não foi constatado diferença significativa entre as vigas classificadas pelo critério da rigidez (vigas-VR) e rigidez elevada (viga-VRE). Mas, em se tratando da possibilidade do emprego de lâminas nas proximidades da linha neutra com características mecânicas inferiores, ou até mesmo refugo, com estas contribuindo apenas com aproximadamente 10 % na rigidez final das vigas, fica evidente a vantagem da classificação pela rigidez

- Não há diferença significativa entre as vigas classificadas pelos critérios da espessura dos anéis (vigas-VAC), tamanhos dos nós (vigas-VN) e as concebidas de forma aleatória (vigas-VA).

Como conclusão final do uso do método de "DUNCAN", na comparação das médias do módulo de elasticidade real e da resistência à flexão, é nítida a vantagem das vigas classificadas pela rigidez (vigas-VR) em comparação as demais.

VI.5 - Análise entre os módulos de elasticidade Real e o Teórico

VI.5.1 - Introdução

CHAHUD; ROCCO LAH (1989)^[45], comentam que: "O módulo de elasticidade longitudinal da madeira, é um parâmetro necessário para a avaliação dos estados limites de utilização de elementos componentes dos mais variados tipos de estruturas, construídas com esse material".

O Método Brasileiro para Ensaio Físicos e Mecânicos de Madeira , NBR-6230 (1940)^[22], recomenda que para o cálculo estrutural o módulo de elasticidade a ser utilizado deve ser E_c (módulo de elasticidade obtido no ensaio de compressão paralela às fibras), enquanto que E_f (módulo de elasticidade obtido no ensaio de flexão estática), deve ser utilizado somente para a comparação de espécies.

Por outro lado, ROCCO LAHR (1983)^[27], a partir dos resultados de ensaios de compressão paralela às fibras e de ensaios de flexão com "L/h" igual a 21, mostrou a equivalência estatística entre o " E_c " e " E_f " a um nível de confiança de 95 % de probabilidade, tratando-se de uma importante conclusão para consagrar o conceito de módulo de elasticidade longitudinal da madeira, aqui chamado de "Ereal", possibilitando o uso do valor deste em projeto sem incorreções significativas de erro.

Como visto anteriormente, sabe-se que a técnica do laminado-colado, nos permite a possibilidade de selecionar e posicionar as lâminas de acordo com o esforço solicitante no interior da seção da viga. E com os valores do módulo de elasticidade das lâminas e a contribuição inercial destas na inércia total da seção, nos é permitido calcular o módulo de elasticidade teórico " $E_{teórico}$ ", sem que seja

necessário submeter o elemento estrutural ao ensaio de flexão, isso foi demonstrado no item IV.4.

Conforme o exposto acima, e com base nos estudos de ROCCO LAHR (1983)^[27], pensou-se em avaliar a possibilidade de serem comparados os resultados do " E_{real} " (obtidos no ensaio de flexão estática) e o " $E_{\text{teórico}}$ " (calculado de acordo com a metodologia apresentada em IV.4), objetivando verificar se as médias destes valores dos cinco tipos de classificações são estatisticamente equivalentes.

VI.5.2 - Comparação entre o " E_{real} " e o " $E_{\text{teórico}}$ ".

A comparação dos resultados é feita empregando-se dois testes estatísticos, NANNI (1986)^[38], envolvendo os dois módulos de elasticidade " E_{real} " e " $E_{\text{teórico}}$ " dos cinco grupos de classificações. O primeiro, uma análise de duas variâncias, que indicará o procedimento a ser adotado para o segundo teste. Este, uma prova de hipótese a respeito de duas médias, o qual evidenciará ou não se existe diferença significativa entre os valores do " E_{real} " e do " $E_{\text{teórico}}$ ", para o caso das vigas estudadas.

É apresentada de forma resumida a análise feita para às vigas concebidas de forma aleatória (vigas-VA), e idêntico a este exemplo estendido as demais classificações, de acordo com os passos seguintes:

a) Um tratamento estatístico básico dos resultados do ensaio de flexão a 4 pontos " E_{real} " e nos valores do " $E_{\text{teórico}}$ " para as 6 (seis) vigas, nos fornece os seguintes resultados:

Vigas	E_{real}	$E_{\text{teórico}}$
VA-1	6443	7741,56
VA-2	8414	8151,57
VA-3	7626	7321,91
VA-4	7277	8209,77
VA-5	7270	7988,43
VA-6	7189	8105,39
Tratamento Estatístico Básico		
n =	6	6
\bar{X} =	7369,83	7919,77
S =	642,84	336,51

Nota: O " S_x " é sempre o da amostra de maior desvio padrão

↑
Sx

b) Admitindo-se que a distribuição é normal entre as duas populações e apartir das amostras, testar se " σ_{real} " difere de " $\sigma_{\text{teórico}}$ " empregando-se a equação 1.4.1 do ANEXO - 03.

- Formula-se as hipóteses \rightarrow Ho: $\sigma_{\text{real}} = \sigma_{\text{teórico}}$
H1: $\sigma_{\text{real}} \neq \sigma_{\text{teórico}}$

- Calcula-se $\rightarrow F = \frac{642,19^2}{336,51^2} = 3,64$

- Admitindo -se $\rightarrow F_{\alpha}(n_x-1; n_y-1) = F_{0,05}(5;5) = 5,05$ (tabelado)

- Tem-se a primeira conclusão:

"Como $F < F_{0,05}(5;5)$, não há diferença significativa entre o " σ_{real} " e " $\sigma_{\text{teórico}}$ ". E a hipótese Ho não é rejeitada, devendo ser utilizado para a comparação das médias a distribuição de Student "t".

c) Comparação das médias \bar{X}_{real} e $\bar{X}_{\text{teórico}}$.

- Calcula-se o desvio ponderado, utilizando-se a eq. 1.4.4, tem-se então $S_p = 513,07$.

- Formula-se as hipótese \rightarrow Ho: $\mu_{\text{real}} = \mu_{\text{teórico}}$
H1: $\mu_{\text{real}} \neq \mu_{\text{teórico}}$

- Calcula-se o $|t|$, servindo-se da eq. 144. Tem-se que $|t| = 1,86$

- Admitindo-se: $t_{\alpha/2}(n_x+n_y-2) = t_{0,05}(10) = 2,228$ (tabelado)

- Tem-se a segunda e definitiva conclusão:

"Como $|t| < t_{0,05}(10)$, não há diferença significativa entre " μ_{real} " e " $\mu_{\text{teórico}}$ ". E a hipótese "Ho" não é rejeitada. Ou seja, não existe diferença significativa entre as médias do " E_{real} " e " $E_{\text{teórico}}$ ", para as vigas - VA.

Na tabela 23, é apresentado o resultado para as demais classificações, utilizando-se os mesmos critérios acima. Para um melhor entendimento do significado dos valores fornecidos pela tabela, efetuou-se uma breve descrição dos parâmetros que a integram.

VIGAS	N	E _{real}			E _{teórico}			F	F _{0,05(5;5)}	teste de variância		Teste Comparativo			CONCLUSÃO
		\bar{X}	S	C.V.	\bar{X}	S	C.V.			t	t'	t _{0,05(10)}	sobre as médias		
VA	6	7369,5	642,19	8,71	7919,8	336,51	4,25	3,64	< 5,05	Não Diferem	1,86	-	< 2,228	Não Diferem	
VR	6	13569	1168,7	8,61	14161	357,15	2,52	10,71	> 5,05	Diferem	-	1,187	< 2,447	Não Diferem	
VRE	6	11869	711,82	6	11963	186,39	1,56	14,59	> 5,05	Diferem	-	0,313	< 2,447	Não Diferem	
VN	6	8034,3	524,75	6,53	8221,1	418,92	5,09	1,57	< 5,05	Não Diferem	0,68	-	< 2,228	Não Diferem	
VAC	6	8934,8	1970,8	22,06	9335	1623,1	17,38	1,47	< 5,05	Não Diferem	0,38	-	< 2,228	Não Diferem	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	

Tab.23 - Resultado da comparação de médias entre o E_{real} e o E_{teórico}

Colunas:	Descrição:
1	- Denominação das vigas.
2	- Tamanho da amostra.
3	- Média do módulo de elasticidade real das amostras, em MPa.
4	- Desvio padrão, em MPa.
5	- Coeficiente de variação, em %.
6	- Média do módulo de elasticidade teórico das amostras.
7	- Desvio padrão, em MPa.
8	- Coeficiente de variação, em MPa.
9 e 10	- Resultado da análise de duas variâncias. Como as amostras não são suficientemente grandes ($n < 30$), deve-se adotar a hipótese $H_0: \sigma_{\text{real}} = \sigma_{\text{teórico}}$ e $\sigma_{\text{real}} \neq \sigma_{\text{teórico}}$. A tabela apresenta o valor calculado utilizando a distribuição "F" e o valor comparativo $F_{\alpha}(n_x-1; n_y-1)$. Se $F < F_{0,05}(5; 5)$, a hipótese H_0 não é rejeitada, indicando que a comparação final será feita em função da distribuição de "Student" (t). Para o oposto, deve-se adotar a distribuição de "Student Modificada" (t'). Esse teste direcionará o critério a ser adotado no cálculo da distribuição de Student.
11	- Conclusão da análise de duas variâncias.
12, 13 e 14	- Resultado do cálculo dos valores da distribuição de Student (t) e (t'), assim como do valor comparativo de $t_{\alpha/2}(n_x + n_y - 2)$. Formula-se a hipótese $H_0: \mu_{\text{real}} = \mu_{\text{teórico}}$, com alternativa de $H_1: \mu_{\text{rea}} \neq \mu_{\text{teórico}}$. Se (t) ou (t') < $t_{0,05}(10)$ a hipótese

continuação - 12, 13 e 14

Ho não é rejeitada, concluindo-se que as médias não diferem significativamente entre si.

15

- Conclusão sobre a prova de hipótese a respeito de duas médias.

Os resultados mostrados na tabela - 23, revelam o seguinte:

- Em todas as cinco amostras, as médias dos valores do " $E_{\text{teórico}}$ " apresentam-se ligeiramente acima dos valores médios do " E_{real} ", mas bem próximas destes, demonstrando a boa aproximação deste método de cálculo, para módulo de elasticidade longitudinal na flexão nas vigas de madeira concebidas sob a técnica do lamindo-colado.

- O coeficiente de variação do " $E_{\text{teórico}}$ " das vigas - VA, VR, VRE e VN, apresentaram um "C.V." pequeno, o que demonstra a baixa variabilidade de cada uma dessas amostras. As vigas - VAC, apresentam um "C.V." = 17,38 %, abaixo do valor crítico de 25 %. Por esta ótica, os valores do " $E_{\text{teórico}}$ " podem ser considerados aceitáveis. Sobre o "C.V." do " E_{real} " já foi comentado no item VI.2.1.

- A análise estatística efetuada em todos os conjuntos de classificações das vigas (VA, VR, VRE, VN e VAC), a um nível de confiabilidade de 95 %, revela que não existe diferença significativa entre os módulos de elasticidade longitudinal da madeira " E_{real} " e o módulo de elasticidade teórico " $E_{\text{teórico}}$ " das vigas de MLC em estudo. **Isto evidencia a possibilidade de utilizar os valores do " $E_{\text{teórico}}$ " em projetos, sem incorreções significativas de erros.**

VI.5.3 - Correlação entre o " E_{real} " e o " $E_{\text{teórico}}$ "

Em função do resultado alcançado com a prova de hipótese a respeito de duas médias, optou-se em efetuar um estudo abrangendo em conjunto os valores das variáveis do " E_{real} " e do " $E_{\text{teórico}}$ ". Isto foi feito submetendo os cinco grupos de classificações a uma análise de regressão, objetivando estabelecer uma função matemática representativa dessas duas variáveis.

Inicialmente foi plotado o gráfico de dispersão entre os valores médios do módulo de elasticidade teórico em "X" em função do módulo de elasticidade real em "Y". A simples observação do aspecto visual de tais pontos, permitiu a conclusão de um ajuste ao modelo linear $Y = A + B.X$, para tanto, confirmou-se os valores de " $E_{\text{teórico}}$ " como variável independente e os valores de " E_{real} " como variável dependente.

Definida a equação, utilizou-se o pacote estatístico do Excel 5.0, para a determinação dos coeficientes "A" e "B" e a análise de vários outros parâmetros por eles fornecidos. Os resultados referentes a correlação estão sintetizados na tabela - 24.

PARÂMETROS	Equação proposta $Y = A + B.X$
Número de pontos: (N)	30
Interseção com o eixo y: (A)	286,69
Coefficiente angular: (B)	0,951
Desvio-padrão da estimativa: (Se)	828,65
Desvio-padrão da inclinação: (Sb)	0,061
Desvio-padrão da interseção: (Sa)	643,46
Índice "t".	15,676
valor comparativo: $t_{0,025}(28)$	2,052
Coefficiente de correlação: (r)	0,902
Coefficiente de determinação: (r^2)	81,30 %
Intervalo de confiança β	$0,762 < \beta < 1,109$

Tab.-24 - Correlação entre " E_{real} " e " $E_{teórico}$ " das vigas: Parâmetros da regressão linear.

A reta ajustada e as retas que delimitam os intervalos de confiança para a previsão de valores médios e individuais estão representados na figura abaixo.

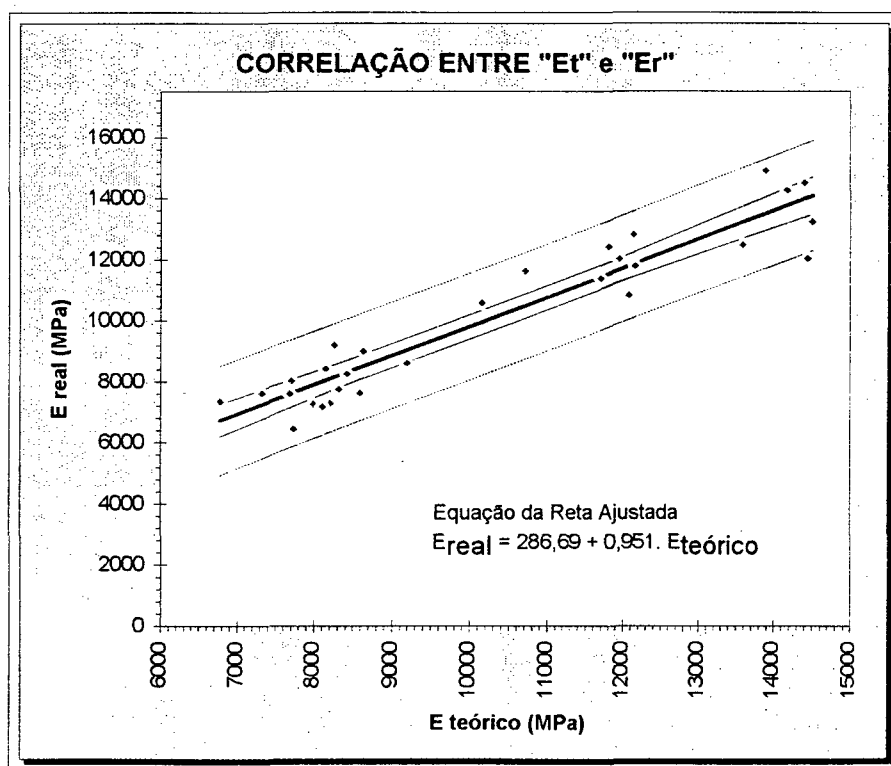


Fig.VI.02 - Relação entre " E_{real} " e " $E_{teórico}$ ".

Fazendo-se uma análise dos valores apresentados na tabela 24, conclui-se que:

a) - Como $t \gg t_{0,025}(n-2)$, ou seja, $15,676 \gg 2,052$, conclui-se que a hipótese de $\beta = 0$ é rejeitada, isto é, a relação linear entre o " E_{real} " e o " $E_{\text{teórico}}$ " é bastante significativa.

b) - A equação da reta ajustada entre as duas variáveis, a qual poderá ser usada para estimar ou prever valores do " E_{real} " a partir dos valores do " $E_{\text{teórico}}$ ", é dada pela seguinte expressão:

$$E_{\text{real}} = 286,69 + 0,951.E_{\text{teórico}}$$

c) - O coeficiente de correlação de "PEARSON" (medida de relação entre as variáveis), mostra o quanto a variável " E_{real} " pode ser explicada pela variável " $E_{\text{teórico}}$ ". Para o caso em estudo, obteve-se um " r " = 0,902, bastante próximo de "1", indicando que a relação linear é expressiva entre as duas variáveis. Ou seja, não existe diferença significativa entre o módulo de elasticidade longitudinal " E_{real} " e o módulo de elasticidade teórico " $E_{\text{teórico}}$ ", confirmando a possibilidade de uso do segundo em projetos.

d) - O intervalo de " β " contém o valor "1" vindo a confirmar também a relação existente entre o " E_{real} " e o " $E_{\text{teórico}}$ ".

CAPÍTULO . VII

PROPOSTA DE CLASSIFICAÇÃO DAS LÂMINAS

VII - PROPOSTA DE CLASSIFICAÇÃO DAS LÂMINAS

VII.1 - Introdução

No capítulo anterior, itens VI.4.1 e VI.4.2 ficou demonstrado que o critério de classificação pela rigidez apresentou melhor resultado em relação as demais classificações, podendo ser utilizado plenamente na composição de elementos estruturais de MLC, originando componentes com melhores características mecânicas.

No item VI.5.3, ficou evidente que não existe diferença significativa entre o " E_{real} " e o " $E_{\text{teórico}}$ ", permitindo com isso, a utilização do " $E_{\text{teórico}}$ " em projetos sem incorreções significativas de erros. Do ponto de vista do autor, trata-se de uma importante conclusão, para a produção de elementos de MLC, pois, uma vez possuindo as tábuas classificadas pela rigidez, pode-se compor os elementos estruturais e determinar o módulo de elasticidade teórico, utilizando-se da equação IV.03, sem que seja necessário submeter o elemento estrutural ao ensaio de flexão.

De posse dessa importante conclusão e com os valores do ensaio de rigidez das lâminas, pode-se pensar numa "*proposta de classificação*" pela rigidez, da madeira existente no reflorestamento do Planalto de Lages, PINUS TAEDA (espécie com 70% de representatividade na amostra), objetivando fornecer opção à Empresa Battistella de compor elementos estruturais com determinado padrão de resistência, baseado no *módulo de elasticidade teórico*.

VII.2 - Determinação das categorias para a proposta de classificação das lâminas.

No capítulo III, foi efetuado o ensaio de rigidez de 360 lâminas e calculado para estas os respectivos módulos de elasticidade (E_L). FURIATI (1981) [16], demonstrou estatisticamente que o módulo de elasticidade é um característico efetivo de resistência, e conseqüentemente, o parâmetro que definirá a classificação da madeira pela resistência. Baseado nesta conclusão, procedeu-se com a classificação de acordo com a seguinte metodologia.

Adotou-se uma distribuição em duas e em três categorias. Poder-se-ia também adotar outros intervalos, como por exemplo, para quatro ou cinco categorias de classificações. No entanto, este procedimento só conduziria a uma dispersão dos resultados, dificultando a posterior seleção da madeira em escala industrial. Por outro lado, os intervalos ficariam tão próximos sendo indiferente o uso de uma lâmina classificada como de 4^a ou de 5^a categoria. Assim sendo, fez-se a opção acima, 2 e 3 categorias.

Extraiu-se a média aritmética das 360 lâminas, $\bar{X} = 8841$ MPa, adotando-se como referencial 8200 MPa por corresponder a lâmina número "180" e ser esta, 50 % do número de lâminas ensaiadas.

A distribuição dos módulos de elasticidades em categorias foi convencionada em duas classificações: "A" e "B".

CLASSIFICAÇÃO - A: Distribuição dos valores do módulo de elasticidade das lâminas " E_L " em duas categorias. Adotou-se que as lâminas com valores de " E_L " acima do valor referencial (8200 MPa), seriam classificadas como de 1ª categoria e as abaixo deste valor como sendo de 2ª categoria.

CLASSIFICAÇÃO - A		
CATEGORIAS	INTERVALOS em MPa	% DA AMOSTRA
1a	$8200 \leq EL \leq 17560$	50
2a	$3485,13 \leq EL \leq 8200$	50

CLASSIFICAÇÃO - B: Distribuição dos valores do módulo de elasticidade das lâminas " E_L " em três categorias. Adotou-se que as lâminas com valores de " E_L " acima de 10.000 MPa seriam classificadas como de 1ª categoria, isto porque, valores acima deste vem a corresponder a 30 % da amostra ensaiada, e para a espécie estudada está se considerando como sendo um valor de módulo de elasticidade elevado. Valores entre 8200 MPa a 10.000 MPa como de 2ª categoria e abaixo de 8200 MPa classificadas como de 3ª categoria.

CLASSIFICAÇÃO - B		
CATEGORIAS	INTERVALOS em MPa	% DA AMOSTRA
1a	$10000 \leq EL \leq 17560$	30
2a	$8200 \leq EL \leq 10000$	20
3a	$3485,13 \leq EL \leq 8200$	50

Após a definição das classificações A e B, as lâminas foram separadas em lotes conforme as categorias, procurando simular de forma mais semelhante possível o que ocorrerá na prática quando efetuado em escala industrial.

O passo seguinte, foi iniciar a simulação da montagem de 12 vigas para cada classificação com seção de (100 x 160)mm, composta de 8 lâminas com 20 mm de espessura.

Para a concepção das vigas de **CLASSIFICAÇÃO - A**, o posicionamento no interior da seção se deu de modo que, as lâminas de 1ª categoria ocuparam as duas posições mais externas das zonas tracionada e comprimida. Na região central e nas proximidades da linha neutra, foram posicionadas as lâminas de 2ª categoria.

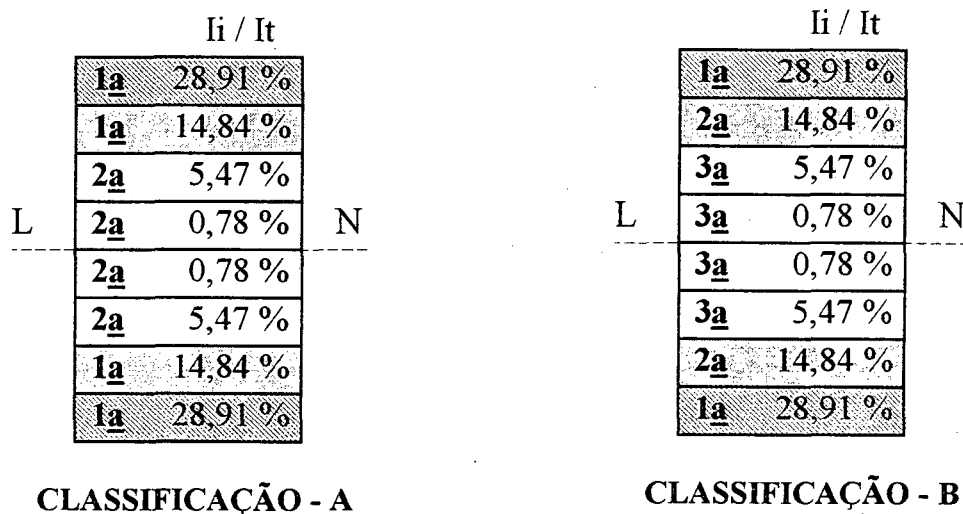


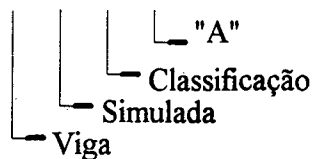
Fig. VII.01 - Posicionamento das lâminas em função da categoria e contribuição inercial em relação a inércia total.

Na composição das vigas de **CLASSIFICAÇÃO - B**, o critério adotado foi semelhante ao anterior, foram localizadas lâminas de 1ª categoria na primeira posição mais externa das zonas tracionada e comprimida. As de 2ª categoria, ocuparam a posição mais interna das bordas tracionada e comprimida. As de 3ª categoria, localizadas na região central e próximas da linha neutra.

Com essa metodologia, procurou-se posicionar as lâminas de melhores características mecânicas na região de maior solicitação de esforços e as de categorias inferiores na região central, onde pouco contribuirão na rigidez final do elemento estrutural, conforme mostrado em IV.4.

VII.02 - Resultados e análise dos dados

LEGENDA:

V S C A

O cálculo do " $E_{\text{teórico}}$ " de acordo com a equação IV.03 é apresentado a seguir para as 12 vigas simuladas das duas classificações.

CATEGORIA - A		CATEGORIA - B	
VIGAS	E teórico (MPa)	VIGAS	E teórico (MPa)
VSCA-1	9239	VSCB-1	10413
VSCA-2	10294	VSCB-2	11689
VSCA-3	9541	VSCB-3	9998
VSCA-4	10338	VSCB-4	11518
VSCA-5	11227	VSCB-5	10069
VSCA-6	11136	VSCB-6	12141
VSCA-7	9394	VSCB-7	10204
VSCA-8	10432	VSCB-8	10188
VSCA-9	10643	VSCB-9	11922
VSCA-10	7862	VSCB-10	10126
VSCA-11	9532	VSCB-11	11518
VSCA-12	10092	VSCB-12	11683

Tab.25 - " $E_{\text{teórico}}$ " para as vigas de classificação "A" e "B".

A análise estatística básica dos valores do " $E_{teórico}$ ", estão apresentados a seguir:

Estadística Básica (MPa)	CLASSIFICAÇÃO - A	CLASSIFICAÇÃO - B
N	12	12
Média	9977	10956
Desvio-Padrão	932	846
Coef. de Variação (%)	9,34	7,72
Valor Mínimo	7862	9998
Valor Máximo	11227	12141

Os resultados acima, revelam o seguinte:

- A média dos valores do " $E_{teórico}$ " para as vigas de classificação -B, apresentou valor ligeiramente acima das vigas de classificação - A, demonstrando um possível melhor comportamento mecânico para as vigas compostas dessa maneira.

- Os coeficientes de variações, podem ser considerados pequenos, o que revela uma baixa variabilidade dos dados e uma boa qualidade das amostras, pois ambos encontram-se abaixo do valor crítico de 25 %.

- A respeito dos valores mínimo e máximo, as vigas de classificação-B apresentaram valores acima que as de classificação - A, apontando um desempenho melhor.

- A prova de aderência dos dados à Distribuição Normal, realizada pelo teste de "Kolmogorov-Smirnov" demonstrou ao nível de 95 % de confiabilidade que:

$$\text{Para a classificação - A: } DM = 0,155 < D_{0,05} = 0,242$$

$$\text{Para a classificação - B: } DM = 0,223 < D_{0,05} = 0,242$$

Indicando que a hipótese de normalidade não é rejeitada, admitindo-se que ambas as distribuições são NORMAIS, assim sendo, podemos efetuar a comparação das médias.

VII.3 - Comparação estatística entre as classificações A e B.

Foi realizado a comparação entre as classificações A e B, envolvendo os valores médios do módulo de elasticidade teórico, empregando-se dois testes estatísticos: Análise de duas variâncias e prova de hipótese a respeito de duas médias.

Os dados da estatística básica, são:

CLASSIFICAÇÃO - A	CLASSIFICAÇÃO - B
N = 12	N = 12
$S_A = 932 \rightarrow S_x$	$S_B = 846 \rightarrow S_y$
$\bar{X}_A = 9977$	$\bar{X}_B = 10956$

a) Verificação se σ_A difere de σ_B da população, a partir dos dados da amostra:

- Cálculo de "F" $\rightarrow F = \frac{932^2}{846^2} = 1,213$

- $F_{0,05} = (n_x-1; n_y-1) = F_{0,05} (11; 11) = 2,820$ (tabelado).

- Então: Como $1,213 < 2,820$ a hipótese de $\sigma_A = \sigma_B$ não é rejeitada. Devendo-se utilizar para a comparação das médias a distribuição "t" de Student.

Não se conhecendo o desvio-padrão das populações, usa-se a média ponderada, a partir de S_A e S_B das amostras. Logo, $S_p = 890,04$.

b) Prova de hipótese a respeito das médias.

- Formula-se as hipótese $\rightarrow H_0: \mu_A = \mu_B$

$$H_1: \mu_A \neq \mu_B$$

- Calcula-se o $|t|$, servindo-se da eq. 1.4.1. Tem-se que $|t| = 0,237$

- $t_{\alpha/2} (n_A + n_B - 2) = t_{0,025} (22) = 2,077$ (tabelado).

- Conclusão: Como $0,237 < 2,077$, a hipótese "Ho" não é rejeitada. Não existindo diferença significativa entre as classificações "A" e "B".

A análise estatística comparando as duas classificações "A" e "B", a um nível de confiabilidade de 95 %, demonstrou a não existência significativa entre as médias do módulo de elasticidade teórico. Entretanto, observa-se uma melhora em termos de valores quantitativos entre as duas classificações. Esses resultados das vigas simuladas, comparados com as vigas compostas de forma aleatórias (VIGAS - VA), resulta em um ganho de 36 % para as vigas da classificação - A e 49 % para as vigas da classificação - B. Isso demonstra uma melhora considerável no desempenho mecânico que esses elementos estruturais possam vir a ter quando submetidos à solicitação de flexão.

Então, a opção pela **classificação - B**, é mais vantajosa por apresentar um ganho em termos de rigidez, quando comparadas com vigas concebidas de forma aleatórias, as quais não levam em consideração o posicionamento das lâminas em função da categoria das mesmas no interior da seção transversal.

Por outro lado, a metodologia de composição das vigas simuladas pela classificação "B", permite a possibilidade de lâminas de rigidez mais elevadas ocuparem a posição de maior solicitação de esforços. Isto ocorrerá em função da diminuição da amplitude percentual das categorias de 1^a e 2^a para 30% e 20% respectivamente.

CAPÍTULO . VIII

CONSIDERAÇÕES FINAIS

VIII - CONSIDERAÇÕES FINAIS

As seguintes considerações são baseadas na análise dos resultados experimentais efetuadas durante o estudo, estando relacionadas com a caracterização da madeira e a influência da classificação das lâminas na resistência final de elementos estruturais do tipo vigas, de eixo reto e sem emendas de continuidade, concebidas sob a técnica do laminado-colado (MLC). As considerações a seguir, estão itemizadas conforme a numeração dos objetivos contidos na página 2 do capítulo - I.

- 1 - Observando-se os valores médios dos resultados dos ensaios dos pequenos corpos-de-prova isentos de defeitos (tabela da página 50), verifica-se que na grande maioria dos ensaios de caracterização o **PINUS TAEDA** apresenta um melhor comportamento mecânico que o **PINUS ELLIOTTII**. Isto é constatado nitidamente no módulo de elasticidade na flexão. Enfim, essa etapa do estudo, pode ser considerada de grande importância, pois são valores que caracterizam a madeira existente no Planalto de Lages na região serrana de Santa Catarina.

- 2 - A análise estatística efetuada no capítulo VI, nos valores médios do módulo de elasticidade longitudinal (E_{real}) e resistência à flexão, obtidos no ensaio de flexão a quatro pontos das vigas, considerando as cinco classificações efetuadas, possibilitou tirar as seguintes conclusões:

- Existem diferença significativa em termos de E_{real} , entre as vigas classificadas pelo critério da rigidez (vigas-VR) em comparação às concebidas de forma aleatórias (vigas-VA), às classificadas pelo tamanho dos nós (vigas-VN), pela espessura dos anéis de crescimento (vigas-VAC) e pela rigidez elevada (vigas-VRE).

- Não foi constatado diferença significativa, em termos de resistência à flexão, entre as vigas classificadas pelo critério da rigidez (vigas-VR) e rigidez elevada (vigas-VRE). Mas, em se tratando da possibilidade do emprego de lâminas de qualidades inferiores posicionadas em locais de menores solicitações de esforços, fica evidente a vantagem da classificação pela rigidez, minimizando o custo final do elemento estrutural.

- Em termos de módulo de elasticidade longitudinal e resistência à flexão, não se verificou diferenças significativas entre as vigas classificadas pelos critérios da espessura dos anéis de crescimento (vigas-VAC), tamanho dos nós (vigas-VN) e as concebidas de forma aleatória. Sobre essas classificações pode-se comentar o seguinte: A não eficiência dessas classificações em relação às demais utilizadas nesse estudo, pode ser explicada em face da grande interferência humana no processo de medição dos nós e dos anéis, levando inevitavelmente a incorreções, assim como também a não praticidade destes critérios, tornando-os inviáveis de serem aplicados em escala industrial. As vigas concebidas de forma aleatória (vigas-

VA), resulta em desperdício de lâminas de qualidade elevada, quando posicionadas em local de menor concentração de esforços. Nessa ótica não sendo aconselhável seu emprego.

- Em termos quantitativos, comparando os valores médios do módulo de elasticidade longitudinal (E_{real}) e resistência à flexão das vigas classificadas, com as vigas montadas de forma aleatória, tem-se um *ganho* expresso em percentual, conforme a tabela abaixo:

Classificações comparadas às vigas aleatórias - VA	Ganho no módulo de elasticidade (E_{real}) (%)	Ganho na Resistência à flexão (%)
RIGIDEZ- VR	84	73
RIDIDEZ ELEVADA - VRE	61	56
ANÉIS DE CRESCIMENTO - VAC	21	-1,4
TAMANHO DOS NÓS - VN	9	24

- Em síntese, com os tópicos acima, auxiliados pela análise estatística e pelo ganho quantitativo em termos de resistência, fica patente sem sobra de dúvidas, que o critério de *classificação pela rigidez* (vigas-VR) é o mais indicado para a utilização em elementos estruturais de MLC, originando componentes de alta resistência mecânica e concebidos de forma racional. Vindo a demonstrar também, que o uso de um critério adequado para a seleção e posicionamento das lâminas é de fundamental importância na rigidez final das vigas, conforme comprovam os resultados. Nessa situação, pode-se conseguir significativa economia no custo final de produção de elementos estruturais de MLC, pois, essa técnica possibilita o emprego de lâminas com baixos valores de " E_L " na zona central, que em termos comerciais podem até ser adquiridas por preços reduzidos, se comparadas à lâminas com propriedades mecânicas elevadas. Além do mais, pode-se conseguir vigas mais eficientes com menor quantidade de material. Assim sendo, é o critério ideal que pode ser utilizado plenamente em uma linha de produção industrial, desde que auxiliado por uma classificadora eletro-mecânica, afim de agilizar o processo de seleção das lâminas.

- Em canteiro de obra, a classificação pela rigidez é também bastante viável, uma vez que o dispositivo de ensaio é de fácil operação, simples execução e construído a baixo custo.

- A respeito da classificação visual e considerando o ganho quantitativo, o uso do critério pelos anéis de crescimentos para o caso do PINUS, é mais vantajoso em relação ao critério do tamanho dos nós e processo aleatório. Porém, não sendo prático e pouco confiável em termos de produção industrial.

• 3 - Em se tratando do estudo entre o " E_{real} " e o " $E_{teórico}$ ", a análise estatística efetuada em todos os conjuntos de classificações das vigas (VA, VR, VRE, VN e VAC), revelou que não existe diferença significativa entre os módulos de elasticidade longitudinal da madeira " E_{real} " e o módulo de elasticidade teórico " $E_{teórico}$ " das vigas de MLC em estudo. Isto evidencia a possibilidade de utilizar os valores do " $E_{teórico}$ " no dimensionamento estrutural, sem incorreções significativas de erros.

- O parágrafo anterior é reforçado pelo estudo de correlação entre o conjunto de valores do " E_{real} " e do " $E_{teórico}$ ", originando um $r = 0,902$, bastante próximo de "1", indicando que a relação linear é expressiva entre as variáveis, mostrando o quanto a variável " E_{real} " pode ser explicada pela variável " $E_{teórico}$ ".

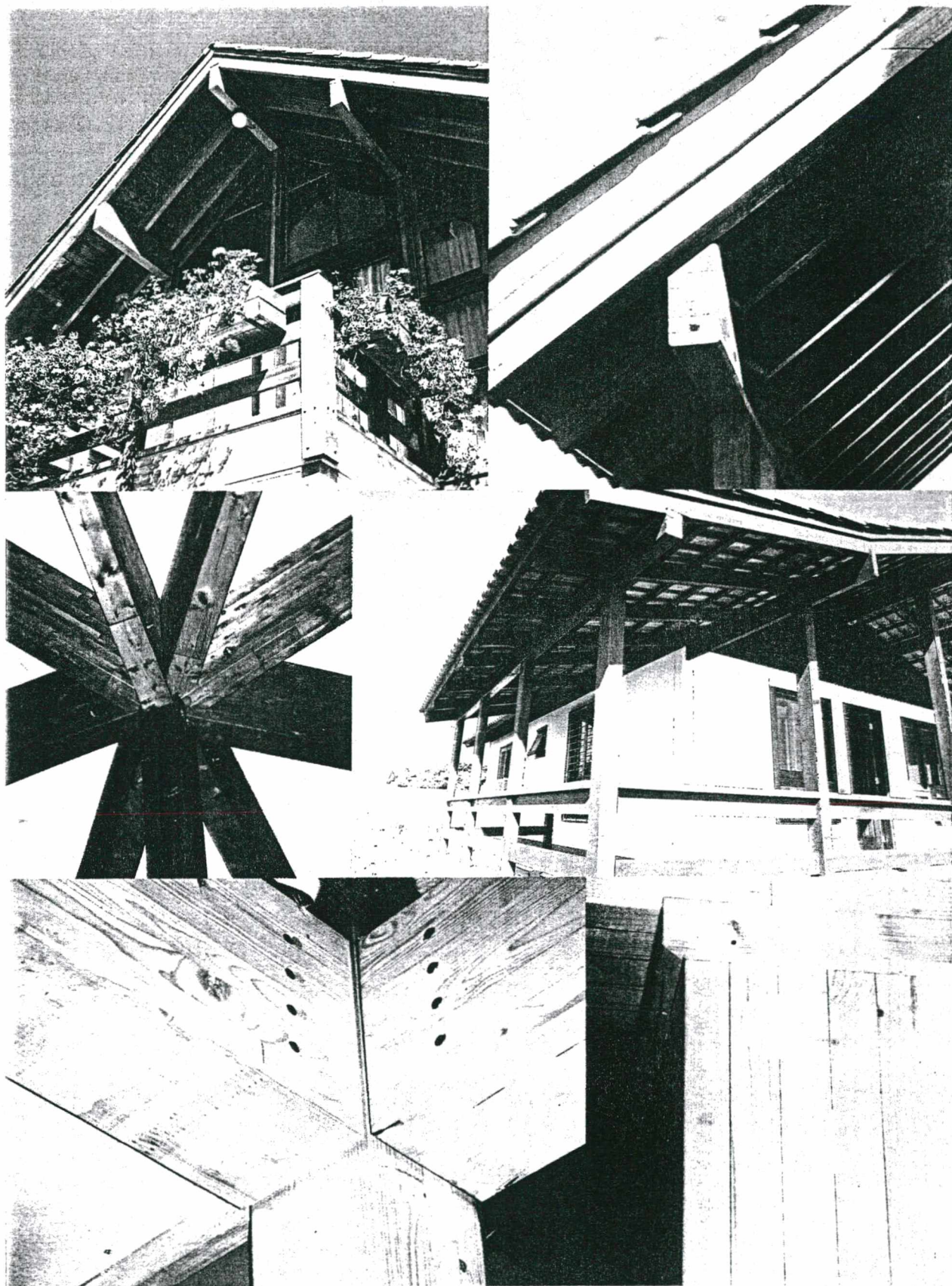
• 4 - De posse da importante conclusão da equivalência estatística entre o " E_{real} " e o " $E_{teórico}$ ", efetuou-se o estudo de uma "**PROPOSTA DE CLASSIFICAÇÃO**" pela rigidez, da madeira existente no reflorestamento do Planalto de Lages.

- A análise estatística comparando as duas propostas, A e B, demonstrou que não existe diferença significativa entre as médias do " $E_{teórico}$ ". Entretanto, observa-se uma melhora em termos de valores quantitativos, comparando as duas classificações com a média do resultado das vigas compostas de forma aleatória (vigas-VA). A média das vigas simuladas conforme a metodologia da **classificação-A**, resultou em um ganho de 36 %, enquanto as vigas da **classificação-B**, indicou um aumento de 49 %. Isso demonstra uma melhora considerável no desempenho mecânico, que esses elementos estruturais possam vir a ter quando submetidos à flexão. Então, a proposta de **classificação-B**, é a indicação mais vantajosa por apresentar um ganho maior em termos de rigidez.

- Por outro lado, caso se adote a classificação-B, em uma linha de produção, há condição de melhorar ainda mais a resistência mecânica desses elementos. Para isso, basta que diminua a amplitude percentual das lâminas de 1ª categoria, por exemplo 15 %, as de 2ª categoria para 35 % e conservando as de 3ª categoria em 50 % da amostragem. Com isso a probabilidade de se ter uma lâmina com módulo de elasticidade mais elevado posicionada na região de maior concentração de esforços é bem maior de ocorrer.

Com os resultados alcançados nesse estudo, espera-se ter contribuído a despertar nos projetistas, construtores e empresários o interesse pelo emprego racional de elementos de MLC, fabricados com madeira de reflorestamento da espécie PINUS, que até então, vem sendo utilizada apenas como pasta de celulose e no emprego secundário de produtos para construção civil.

APLICAÇÃO PRÁTICA DAS VIGAS EM ESTUDO



Utilização prática dos elementos estruturais desta pesquisa na produção de casas de alto padrão pela "Empresa Battistella Indústria e Comércio".

RECOMENDAÇÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

RECOMENDAÇÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

- Como o processo da MLC está em pleno desenvolvimento no Brasil, novos estudos devem ser realizados, no sentido de proceder em cada região, uma investigação botânica, física e mecânica para caracterizar as madeiras que melhor possam se adaptar a essa técnica. No caso do sul do país, devem ter destaque nessa investigação, principalmente as madeiras de reflorestamento.

- Efetuar análise de comportamento na colagem dessas novas espécies investigadas.

- Investigar o uso de espécies nativas, especificamente da região Amazônica, que possam ser utilizadas na produção de elementos de madeira laminada - colada.

- Estabelecer as categorias para a classificação do Pinus da região do Planalto de Lages - SC, a partir das percentagens obtidas no histograma das lâminas..

- Fazer novas simulações em função de novos intervalos percentuais do módulo de elasticidade, objetivando chegar a uma classificação ideal para o Pinus.

- Classificação e posicionamento dos "nós" no interior dos elementos estruturais, utilizando a metodologia de FREAS & SELBO e comparando-a em termos de resistência mecânica com a metodologia de KOCH & BOHANNAN utilizada neste estudo, com o intuito de verificar possíveis diferenças entre as resistências dos elementos assim constituídos.

ANEXO - 01

RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS C.P.

ENSAIO DE TEOR DE UMIDADE

Madeira: PINUS TAEDA - CP (20x20x30)mm

Corpo de Prova	Pêso Humido Ph (g)	Peso Seco em Estufa Ps-1 (g)	Peso Seco em Estufa Ps-2 (g)	Peso Seco em Estufa Ps-3 (g)	TEOR DE UMIDADE (%)
T11	5,03	4,54	4,55	4,54	10,79
T12	4,54	4,07	4,08	4,06	11,82
T13	4,31	-	-	3,85	11,95
T14	5,06	-	-	4,54	11,45
T15	5,29	-	-	4,73	11,84
T16	4,77	-	-	4,24	12,50
T27	4,67	4,21	4,22	4,19	11,46
T28	4,52	4,06	4,07	4,04	11,88
T29	4,44	-	-	3,97	11,84
210	4,47	-	-	3,98	12,31
T211	6,50	-	-	5,86	10,92
T212	5,46	-	-	4,88	11,89
T313	5,15	4,62	4,63	4,61	11,71
T314	4,59	4,09	4,10	4,09	12,22
T315	5,33	-	-	4,74	12,45
T316	5,67	-	-	5,04	12,50
T317	5,48	-	-	4,88	12,30
T318	5,91	-	-	5,27	12,14
T419	4,67	4,20	4,21	4,19	11,46
T420	4,26	3,83	3,84	3,81	11,81
T421	4,35	-	-	3,89	11,83
T422	5,18	-	-	4,62	12,12
T423	4,80	-	-	4,30	11,63
T424	5,95	-	-	5,35	11,21
T525	5,07	4,55	4,56	4,54	11,67
T526	4,71	4,22	4,24	4,21	11,88
T527	4,35	-	-	3,90	11,54
T528	4,87	-	-	4,38	11,19
T529	4,88	-	-	4,39	11,16
T530	5,21	-	-	4,66	11,80
T631	5,48	4,94	4,96	4,93	11,16
T632	5,03	4,52	4,54	4,51	11,53
T633	5,48	-	-	4,91	11,61
T634	6,06	-	-	5,44	11,40
T635	6,47	-	-	5,80	11,55
T636	6,61	-	-	5,90	12,03
T437	5,06	-	-	4,53	11,70
T238	4,72	-	-	4,23	11,58
T139	4,80	-	-	4,26	12,68
T340	5,37	-	-	4,79	12,11
Umidade Média (%) =					11,77

ENSAIO DE TEOR DE UMIDADE

Madeira: PINUS ELLIOTTIIS - CP (20x20x30)mm

Corpo de Prova	Peso Humido Ph (g)	Peso Seco em Estufa Ps-1 (g)	Peso Seco em Estufa Ps-2 (g)	Peso Seco em Estufa Ps-3 (g)	TEOR DE UMIDADE (%)
E11	5,73	4,98	4,97	4,96	15,52
E12	5,68	4,94	4,94	4,93	15,21
E13	5,41	-	-	4,69	15,35
E14	5,08	-	-	4,46	13,90
E15	5,16	-	-	4,55	13,41
E16	5,48	-	-	4,90	11,84
E27	5,77	5,05	5,03	5,03	14,71
E28	5,63	4,94	4,92	4,92	14,43
E29	5,55	-	-	4,83	14,91
E210	5,10	-	-	4,47	14,09
E211	4,78	-	-	4,27	11,94
E212	4,94	-	-	4,50	9,78
E313	5,83	5,08	5,07	5,05	15,45
E314	5,28	4,57	4,55	4,53	16,56
E315	5,15	-	-	4,47	15,21
E316	5,81	-	-	5,14	13,04
E317	5,52	-	-	4,90	12,65
E318	5,52	-	-	4,95	11,52
E419	6,55	5,86	5,84	5,84	12,16
E420	6,31	5,64	5,61	5,61	12,48
E421	6,72	-	-	5,93	13,32
E422	5,75	-	-	5,06	13,64
E423	6,77	-	-	5,90	14,75
E424	5,87	5,17	5,15	5,15	13,98
E525	5,60	-	-	4,88	14,75
E526	5,82	-	-	5,05	15,25
E527	5,37	-	-	4,62	16,23
E528	4,63	-	-	3,98	16,33
E529	5,18	-	-	4,57	13,35
E530	4,88	-	-	4,37	11,67
E631	5,15	4,58	4,58	4,56	12,94
E632	5,01	4,39	4,39	4,38	14,38
E633	5,23	-	-	4,52	15,71
E634	6,21	-	-	5,40	15,00
E635	5,63	-	-	4,87	15,61
E636	5,85	-	-	5,09	14,93
E237	5,03	-	-	4,56	10,31
E438	5,63	4,99	4,98	4,96	13,51
E639	6,15	-	-	5,41	13,68
E640	4,96	-	-	4,36	13,76
Umidade Média (%) =					13,93

ENSAIO DE MASSA ESPECÍFICA APARENTE

Corpo de Prova = (20x20x30)mm

PINUS TAEDA				PINUS ELLIOTTIIS			
Corpo de Prova	Peso Húmido Ph (g)	Volume Seco ao Ar (cm ³)	M. E. Aparente (g/cm ³)	Corpo de Prova	Peso Húmido Ph (g)	Volume Seco ao Ar (cm ³)	M. E. Aparente (g/cm ³)
T11	5,03	11,92	0,42	E11	5,73	11,18	0,51
T12	4,54	11,18	0,41	E12	5,68	11,22	0,51
T13	4,31	11,33	0,38	E13	5,41	11,52	0,47
T14	5,06	11,89	0,43	E14	5,08	11,48	0,44
T15	5,29	11,44	0,46	E15	5,16	11,87	0,43
T16	4,77	11,03	0,43	E16	5,48	11,75	0,47
T27	4,67	12,10	0,39	E27	5,77	11,59	0,50
T28	4,52	11,73	0,39	E28	5,63	11,51	0,49
T29	4,44	11,44	0,39	E29	5,55	11,40	0,49
T210	4,47	11,53	0,39	E210	5,1	11,29	0,45
T211	6,5	11,70	0,56	E211	4,78	11,68	0,41
T212	5,46	11,40	0,48	E212	4,94	11,49	0,43
T313	5,15	12,15	0,42	E313	5,83	11,50	0,51
T314	4,59	12,12	0,38	E314	5,28	11,04	0,48
T315	5,33	11,67	0,46	E315	5,15	11,40	0,45
T316	5,67	12,19	0,47	E316	5,81	11,49	0,51
T317	5,48	12,19	0,45	E317	5,52	11,46	0,48
T318	5,91	11,70	0,50	E318	5,52	11,60	0,48
T419	4,67	12,19	0,38	E419	6,55	11,75	0,56
T420	4,26	11,38	0,37	E420	6,31	11,81	0,53
T421	4,35	11,30	0,38	E421	6,72	11,59	0,58
T422	5,18	11,39	0,45	E422	5,75	11,51	0,50
T423	4,8	10,44	0,46	E423	6,77	11,43	0,59
T424	5,95	11,48	0,52	E424	5,87	11,69	0,50
T525	5,07	12,07	0,42	E525	5,6	11,46	0,49
T526	4,71	11,59	0,41	E526	5,82	11,43	0,51
T527	4,35	11,88	0,37	E527	5,37	11,27	0,48
T528	4,87	11,80	0,41	E528	4,63	10,79	0,43
T529	4,88	11,95	0,41	E529	5,18	11,50	0,45
T530	5,21	11,46	0,45	E530	4,88	11,73	0,42
T631	5,48	12,01	0,46	E631	5,15	11,49	0,45
T632	5,03	12,18	0,41	E632	5,01	11,21	0,45
T633	5,48	12,22	0,45	E633	5,23	11,61	0,45
T634	6,06	11,86	0,51	E634	6,21	11,48	0,54
T635	6,47	12,24	0,53	E635	5,63	11,41	0,49
T636	6,61	11,86	0,56	E636	5,85	11,48	0,51
T437	5,06	11,86	0,43	E237	5,03	11,15	0,45
T238	4,72	12,22	0,39	E438	5,63	11,53	0,49
T139	4,8	11,28	0,43	E639	6,15	11,64	0,53
T340	5,37	11,73	0,46	E640	4,96	10,98	0,45
M. E. Aparente Média (g/cm ³) =			0,44	M.E. Aparente Média (g/cm ³)=			0,48

ENSAIO

- (RESULTADO DE UM CORPO DE PROVA)

ENSAIO DE FLEXÃO SIMPLES

Madeira: PINUS ELLIOTTIIS - CP (50x50x760)mm

Constante do Anel(N)= 20,70

CP	Unidades do anel	EXT.1 (mm)	EXT.2 (mm)	Carga (N)	Deformações (mm)	E (MPa)
FSE-11	20	1,25	1,06	414,00	1,16	3587,28
	40	2,52	2,12	828,00	2,32	3571,82
	60	3,92	3,57	1242,00	3,75	3319,08
	80	5,45	4,96	1656,00	5,21	3184,10
	100	6,92	6,54	2070,00	6,73	3078,24
	120	8,03	8,39	2484,00	8,21	3028,00
	140	11,12	10,38	2898,00	10,75	2697,97
	160	13,82	12,89	3312,00	13,36	2481,95
	180	16,90	15,14	3726,00	16,02	2327,70
Ruptura=		193 Un			E médio (MPa) = 3030,68	
Carga de Ruptura =		3995,10 N		Tensão de Ruptura (MPa) = 22,07		

ENSAIO

RESUMO DO ENSAIO

PINUS ELLIOTTIIS		
Corpo de Prova (50x50x760mm)	Módulo de Elasticidade (MPa)	Resistência a Flexão (MPa)
FSE-11	3030.86	22.07
FSE-12	3712.91	31.045
FSE-13	3439.60	29.96
FSE-24	5188.10	30.06
FSE-25	5460.78	35.45
FSE-26	5290.32	39.45
FSE-37	3533.04	25.61
FSE-38	4260.12	32.02
FSE-39	3501.21	25.084
FSE-410	5791.38	38.65
FSE-411	6119.26	44.60
FSE-512	4184.02	33.81
FSE-513	4404.95	32.59
FSE-514	4067.18	28.59
FSE-615	3383.55	30.64
FSE-616	4133.69	18.07
FSE-617	4548.01	34.76

COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS**Madeira: PINUS ELLIOTTII - CP (20x20x30)mm**

Constante do Anel (N) = 20,70

Corpo de Prova	Unidades do Anel	Carga de Ruptura (N)	Area Critica (mm ²)	Resistência à Ruptura (MPa)
E11	426	8818,20	374,90	23,52
E12	528	10929,60	381,80	28,63
E13	504	10432,80	384,90	27,11
E14	520	10764,00	385,70	27,91
E15	482	9977,40	396,60	25,16
E16	608	12585,60	390,80	32,20
E27	482	9977,40	385,50	25,88
E28	520	10764,00	383,40	28,08
E29	530	10971,00	380,20	28,86
E210	472	9770,40	377,90	25,85
E211	554	11467,80	390,60	29,36
E212	577	11943,90	389,00	30,70
E313	420	8694,00	384,00	22,64
E314	385	7969,50	368,80	21,61
E315	415	8590,50	380,80	22,56
E316	535	11074,50	383,20	28,90
E317	565	11695,50	384,50	30,42
E318	774	16021,80	391,60	40,91
E419	775	16042,50	391,70	40,96
E420	794	16435,80	393,40	41,78
E421	875	18112,50	386,90	46,81
E422	885	18319,50	380,40	48,16
E423	720	14904,00	380,60	39,16
E424	400	8280,00	388,20	21,33
E525	465	9625,50	381,50	25,23
E526	510	10557,00	381,10	27,70
E527	474	9811,80	374,70	26,19
E528	402	8321,40	362,50	22,96
E529	534	11053,80	383,90	28,79
E530	486	10060,20	389,40	25,84
E631	505	10453,50	382,90	27,30
E632	482	9977,40	392,40	25,43
E633	CP c/ defeito	-	-	-
E634	406	8404,20	386,70	21,73
E635	422	8735,40	379,10	23,04
E636	423	8756,10	380,00	23,04
E337	736	15235,20	388,80	39,19
E438	404	8362,80	384,30	21,76
E639	468	9687,60	389,60	24,87
E640	468	9687,60	374,30	25,88
Resistência à compressão paralela às fibras (MPa) =				28,91

COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRASMadeira: **PINUS TAEDA - CP (20x20x30)mm**

Const. do Anel (N) = 20,70

Corpo de Prova	Unidades do Anel	Carga de Ruptura (N)	Area Crítica (mm ²)	Resistência Ruptura (MPa)
T11	529	10950,30	396,40	27,62
T12	445	9211,50	374,70	24,58
T13	449	9294,30	378,10	24,58
T14	506	10474,20	396,60	26,41
T15	448	9273,60	379,40	24,44
T16	418	8652,60	370,00	23,39
T27	517	10701,90	401,70	26,64
T28	463	9584,10	391,60	24,47
T29	438	9066,60	382,20	23,72
T210	433	8963,10	389,40	23,02
T211	544	11260,80	388,60	28,98
T212	534	11053,80	385,30	28,69
T313	586	12130,20	403,00	30,10
T314	502	10391,40	404,80	25,67
T315	640	13248,00	387,80	34,16
T316	642	13289,40	404,20	32,88
T317	583	12068,10	405,40	29,77
T318	587	12150,90	383,90	31,65
T419	523	10826,10	406,00	26,67
T420	434	8983,80	387,20	23,20
T421	562	11633,40	377,70	30,80
T422	528	10929,60	380,60	28,72
T423	518	10722,60	351,60	30,50
T424	594	12295,80	383,60	32,05
T525	500	10350,00	399,90	25,88
T526	470	9729,00	385,90	25,21
T527	483	9998,10	396,20	25,23
T528	632	13082,40	391,70	33,40
T529	630	13041,00	403,50	32,32
T530	413	8549,10	382,60	22,34
T631	704	14572,80	407,60	35,75
T632	605	12523,50	405,40	30,89
T633	685	14179,50	405,90	34,93
T634	800	16560,00	393,90	42,04
T635	791	16373,70	406,40	40,29
T635	750	15525,00	395,20	39,28
T437	612	12668,40	395,80	32,01
T438	569	11778,30	456,30	25,81
T139	423	8756,10	375,70	23,31
T340	557	11529,90	391,40	29,46
Resistência a compressão paralelas às fibras (MPa) =				29,02

TRAÇÃO PARALELA ÀS FIBRAS**Madeira: PINUS ELLIOTTIS - CP (20x20x250)mm**

Corpo de Prova	Carga de ruptura (N)	Área Crítica (mm ²)	Resistência à Ruptura (MPa)
E1	11700	208,60	56,09
E2	8900	200,80	44,32
E3	11800	200,50	58,85
E4	4800	208,80	22,99
E5	7200	208,60	34,52
E6	7400	203,40	36,38
E7	9000	213,30	42,19
E8	3300	205,30	16,07
E9	5800	192,10	30,19
E10	8100	210,80	38,43
E11	9700	212,90	45,56
E12	6300	207,90	30,30
E13	8300	211,90	39,17
E14	9900	220,00	45,00
E15	7900	212,90	37,11
E16	4500	212,90	21,14
E17	8200	202,80	40,43
E18	10100	207,10	48,77
Resistência à tração paralela às fibras (MPa) =			38,20

Madeira: PINUS TAEDA - CP (20x20x250)mm

Corpo de Prova	Carga de ruptura (N)	Área Crítica (mm ²)	Resistência à Ruptura (MPa)
T1	7800	203,90	38,25
T2	8500	216,80	39,21
T3	10800	220,40	49,00
T4	15300	224,50	68,15
T5	13000	227,00	57,27
T6	8800	223,30	39,41
T7	17300	204,00	84,80
T8	7700	201,30	38,25
T9	16400	210,50	77,91
T10	5500	208,60	26,37
T11	16100	213,30	75,48
T12	17400	206,50	84,26
T13	8700	205,60	42,32
T14	9200	206,00	44,66
T15	13100	209,00	62,68
T16	14400	211,50	68,09
T17	4700	212,10	22,16
T18	8200	218,20	37,58
Resistência à tração paralela às fibras (MPa) =			53,10

TRAÇÃO NORMAL ÀS FIBRASMadeira: **PINUS TAEDA** - CP (40x68x100)mm

Constante do Anel (N) =

20,70

Corpo de Prova	Unidades do Anel	Carga de Ruptura (N)	Área Crítica (mm ²)	Resistência à Ruptura (MPa)
T11	178	3684,60	999	3,69
T12	144	2980,80	990	3,01
T13	155	3208,50	1009	3,18
T14	157	3249,90	1033	3,15
T15	144	2980,80	1052	2,83
T16	156	3229,20	1040	3,11
T27	127	2628,90	994	2,64
T28	121	2504,70	1025	2,44
T29	117	2421,90	1024	2,37
T210	98	2028,60	1031	1,97
T211	93	1925,10	1038	1,85
T212	85	1759,50	1056	1,67
T313	62	1283,40	1081	1,19
T214	80	1656,00	1022	1,62
T315	85	1759,50	1036	1,70
T316	149	3084,30	1020	3,02
T317	93	1925,10	1028	1,87
T318	82	1697,40	1032	1,64
T419	112	2318,40	1081	2,14
T520	125	2587,50	1060	2,44
T521	114	2359,80	1047	2,25
T622	176	3643,20	1042	3,50
T623	158	3270,60	1072	3,05
T324	102	2111,40	1066	1,98
T525	103	2132,10	1094	1,95
T126	154	3187,80	1035	3,08
T527	80	1656,00	1073	1,54
T528	61	1262,70	1029	1,23
T529	93	1925,10	1040	1,85
T530	100	2070,00	1031	2,01
T631	163	3374,10	1095	3,08
T632	133	2753,10	968	2,84
T633	142	2939,40	998	2,95
T634	155	3208,50	1078	2,98
T635	138	2856,60	1012	2,82
T636	145	3001,50	1066	2,82
Resistência média à tração normal às fibras (MPa) =				2,43

TRAÇÃO NORMAL ÀS FIBRAS**Madeira: PINUS ELLIOTTIIIS - CP (40x68x100)mm**

Constante do Anel (N) = 20,70

Corpo de Prova	Unidades do Anel	Carga de Ruptura (N)	Área Crítica (mm ²)	Resistência Ruptura (MPa)
E61	155	3208,50	1026	3,13
E62	165	3415,50	1052	3,25
E63	110	2277,00	1045	2,18
E14	29	600,30	1014	0,59
E15	55	1138,50	1049	1,09
E16	82	1697,40	1038	1,64
E17	58	1200,60	1031	1,16
E68	145	3001,50	999	3,00
E69	145	3001,50	1009	2,97
E210	63	1304,10	1047	1,25
E211	53	1097,10	1045	1,05
E212	75	1552,50	1031	1,51
E213	69	1428,30	1077	1,33
E214	52	1076,40	997	1,08
E615	134	2773,80	1029	2,70
E316	170	3519,00	1009	3,49
E317	50	1035,00	1078	0,96
E318	58	1200,60	1041	1,15
E319	54	1117,80	1076	1,04
E320	80	1656,00	1061	1,56
E421	209	4326,30	1063	4,07
E422	192	3974,40	1096	3,63
E423	222	4595,40	1028	4,47
E624	158	3270,60	1023	3,20
E425	222	4595,40	1106	4,15
E426	176	3643,20	1051	3,47
E427	216	4471,20	959	4,66
E528	226	4678,20	1043	4,49
E529	248	5133,60	1023	5,02
E530	218	4512,60	1043	4,33
E531	217	4491,90	963	4,66
E532	192	3974,40	1034	3,84
E533	192	3974,40	982	4,05
E534	182	3767,40	1008	3,74
E535	122	2525,40	963	2,62
E136	42	869,40	1043	0,83
Resistência média à tração normal às fibras (MPa) =				2,70

ENSAIO DE CISALHAMENTO

Madeira: PINUS TAEDA - CP (20x20x250)mm

Constante do Anel (N) = 20,7

Área Cisalhante (mm²) = 400

Corpo de Prova	Unidades do Anel	Carga (N)	Resistência ao Cisalhamento (MPa)
T11	127	2628,90	6,57
T12	113	2339,10	5,85
T23	109	2256,30	5,64
T24	136	2815,20	7,04
T35	171	3539,70	8,85
T36	CP c/ defeito	-	-
T47	146	3022,20	7,56
T48	149	3084,30	7,71
T59	111	2297,70	5,74
T510	CP c/ defeito	-	-
T1211	137	2835,90	7,09
T612	139	2877,30	7,19
T713	91	1883,70	4,71
T714	97	2007,90	5,02
T715	116	2401,20	6,00
T716	119	2463,30	6,16
T817	118	2442,60	6,11
T818	89	1842,30	4,61
T819	104	2152,80	5,38
T920	91	1883,70	4,71
T921	112	2318,40	5,80
T1022	108	2235,60	5,59
T1023	105	2173,50	5,43
T1124	89	1842,30	4,61
T1225	99	2049,30	5,12
T1326	93	1925,10	4,81
T1327	76	1573,20	3,93
T1328	84	1738,80	4,35
T1429	102	2111,40	5,28
T1430	81	1676,70	4,19
T1431	91	1883,70	4,71
T1432	70	1449,00	3,62
T1433	76	1573,20	3,93
T1534	87	1800,90	4,50
T1535	108	2235,60	5,59
T1536	84	1738,80	4,35
Resit.média ao cisalhamento paralelo às fibras			5,52

ENSAIO DE CISALHAMENTO

Madeira: PINUS ELLIOTTIIS - CP (20x20x250)mm

Constante do Anel (N) = 20,70

Área Cisalhante (mm²) = 400

Corpo de Prova	Unidades do Anel	Carga (N)	Resistência ao Cisalhamento (MPa)
E11	71	1469,70	3,67
E12	110	2277,00	5,69
E23	136	2815,20	7,04
E24	89	1842,30	4,61
E35	108	2235,60	5,59
E36	113	2339,10	5,85
E47	197	4077,90	10,19
E48	145	3001,50	7,50
E59	138	2856,60	7,14
E510	103	2132,10	5,33
E611	140	2898,00	7,25
E612	102	2111,40	5,28
E713	74	1531,80	3,83
E714	73	1511,10	3,78
E715	99	2049,30	5,12
E816	94	1945,80	4,86
E817	103	2132,10	5,33
E818	89	1842,30	4,61
E919	94	1945,80	4,86
E920	81	1676,70	4,19
E921	113	2339,10	5,85
E922	85	1759,50	4,40
E1023	87	1800,90	4,50
E1024	99	2049,30	5,12
E1025	103	2132,10	5,33
E1126	104	2152,80	5,38
E1127	84	1738,80	4,35
E1128	101	2090,70	5,23
E1229	79	1635,30	4,09
E1230	84	1738,80	4,35
E1231	74	1531,80	3,83
E1232	71	1469,70	3,67
E1333	121	2504,70	6,26
E1334	103	2132,10	5,33
E1335	113	2339,10	5,85
Resist. média ao cisalhamento paralelo às fibras			5,29

A N E X O - 0 2

RESULTADOS DOS ENSAIOS - TAMANHO DOS NÓS E
ESPESSURA DOS ANÉIS

**TAMANHO DOS NÓS - QUALIDADE DAS LÂMINAS
ESPESSURA DOS ANÉIS DE CRESCIMENTO**

Lâminas	Medição dos Nós no terço médio do vão (mm)								Tamanho do NÓ (mm)	Qualidade das Lâminas	Espessura dos Anéis (mm)
L1	14	14	0	0	0	0	0	0	14	B	9,6
L2	23	27,4	0	0	0	0	0	0	25,2	B	15,3
L3	22	18	33,5	23,6	0	0	0	0	48,55	C	5,3
L4	29,5	37	19	7,2	0	0	0	0	46,35	C	8,6
L5	42	27	0	0	0	0	0	0	34,5	C	10
L6	24,4	21	30,5	8,8	16	9,5	0	0	55,1	D	6,9
L7	24,4	29,3	0	0	0	0	0	0	26,85	B	13
L8	20	20	29,7	17,7	16	13,2	0	0	58,3	D	10
L9	26	45	20	15	0	0	0	0	53	D	11
L10	26	15	15	15	0	0	0	0	35,5	C	11,3
L11	27	10	31	27	0	0	0	0	47,5	C	8,5
L12	20,5	26,4	10	10	0	0	0	0	33,45	C	10
L13	46	25	11	12	0	0	0	0	47	C	10
L14	8,3	8,3	9	18	0	0	0	0	21,8	B	9,5
L15	50	28	0	0	0	0	0	0	39	C	10
L16	23	40	17	17	0	0	0	0	48,5	D	10
L17	45	28	0	0	0	0	0	0	36,5	C	10
L18	24	13	12	12	0	0	0	0	30,5	B	15
L19	16,5	16,5	36	23,2	0	0	0	0	46,1	C	5,5
L20	33	57	0	0	0	0	0	0	45	C	10
L21	26	38	19,5	23	0	0	0	0	53,25	D	9,4
L22	20	20	18	9	0	0	0	0	33,5	C	13
L23	15	24	5	5	16	16	0	0	40,5	C	8
L24	24	16	6	6	16	16	0	0	42	C	6,4
L25	16,5	23	17,5	36	0	0	0	0	46,5	C	9,5
L26	44	22,5	16	22	0	0	0	0	52,25	D	7
L27	23	17,5	26	18	0	0	0	0	42,25	C	8
L28	46	23	13	13	22	16	0	0	66,5	D	10
L29	20	20	37	25	0	0	0	0	51	D	10
L30	35	23	0	0	0	0	0	0	29	B	10
L31	18	39	26	17	0	0	0	0	50	D	4
L32	6	6	14	10	11	11	0	0	29	B	11
L33	11	18	13	23	11	11	0	0	43,5	C	9
L34	49	29	33	53	0	0	0	0	82	D	11
L35	20	20	22	40	0	0	0	0	51	D	12
L36	10	10	36	60	0	0	0	0	58	D	8
L37	22	20	15	22	0	0	0	0	39,5	C	5
L38	22	28	14	12	0	0	0	0	38	C	9
L39	23	32	24,5	22	8	10,2	0	0	59,85	D	9,5
L40	21	34	25	23	0	0	0	0	51,5	D	6,5
L41	20	34	0	0	0	0	0	0	27	B	11
L42	31	50	41	29	0	0	0	0	75,5	D	11,5

**TAMANHO DOS NÓS - QUALIDADE DAS LÂMINAS
ESPESSURA DOS ANÉIS DE CRESCIMENTO**

Lâminas	Medição dos Nós no terço médio do vão (mm)								Tamanho do NÓ (mm)	Qualidade das Lâminas	Espessura dos Anéis (mm)
L43	15	17	0	0	0	0	0	0	16	B	14
L44	11	15	15	13	13	35	0	0	51	D	11,5
L45	27	18	13	16	0	0	0	0	37	C	13
L46	30	18	11	11	20	20	0	0	55	D	12
L47	43	30	0	0	0	0	0	0	36,5	C	7,5
L48	13	28	0	0	0	0	0	0	20,5	B	10
L49	25	15	13	18	17	22	0	0	55	D	7,5
L50	7,5	38	5	61	0	0	0	0	55,75	D	12
L51	43	23	16	20	15	14	0	0	65,5	D	9
L52	28	52	14	14	0	0	0	0	54	D	14
L53	16	37	11	11	0	0	0	0	37,5	C	7,2
L54	16	12	11	7	18	20	0	0	42	C	17
L55	28	24	0	0	0	0	0	0	26	B	12,5
L56	31	19	22	4	0	0	0	0	38	C	12
L57	24	22	17	16	7	19	0	0	52,5	D	15
L58	33	47	0	0	0	0	0	0	40	C	10
L59	20	21	8	21	0	0	0	0	35	C	13
L60	15	20	7	7	29	5	0	0	41,5	C	10
L61	74	32	11	10	8	15	0	0	75	D	7
L62	35	14	16	11	0	0	0	0	38	C	6
L63	11	33	19	15	0	0	0	0	39	C	6,5
L64	11	28	17	5	0	0	0	0	30,5	C	8,5
L65	18,5	14	10	11	0	0	0	0	26,75	B	10
L66	20	20	15	14	9	4	0	0	41	C	11
L67	18,5	15	25	43	0	0	0	0	50,75	D	8
L68	47	19	13	13	0	0	0	0	46	C	10
L69	33	24	5	23	0	0	0	0	42,5	C	10
L70	16	32	0	0	0	0	0	0	24	B	12
L71	6	45	15	16	18	10	0	0	55	D	10
L72	21	55	42	18	0	0	0	0	68	D	12
L73	27	16	17	14	15	18	0	0	53,5	D	12
L74	20	47	32	22	0	0	0	0	60,5	D	13
L75	17	30	27	50	0	0	0	0	62	D	10
L76	6	6	16	11	21	14	0	0	37	C	13
L77	30	52	31,5	20	31	22	0	0	93,25	D	7,5
L78	32	21,5	7	7	20	33	0	0	60,25	D	9
L79	14	21	17	29	9	17	0	0	53,5	D	7,9
L80	17	17	19	22	0	0	0	0	37,5	C	14
L81	63	36	0	0	0	0	0	0	49,5	D	7,5
L82	26	8,5	15	27	0	0	0	0	38,25	C	10
L83	22	51	0	0	0	0	0	0	36,5	C	11
L84	47	27	40	24	0	0	0	0	69	D	19

TAMANHO DOS NÓS - QUALIDADE DAS LÂMINAS
ESPESSURA DOS ANÉIS DE CRESCIMENTO

Lâminas	Medição dos Nós no terço médio do vão (mm)								Tamanho do NÓ (mm)	Qualidade das Lâminas	Espessura dos Anéis (mm)
L85	31	18	17	7	0	0	0	0	36,5	C	12
L86	38	24	0	0	0	0	0	0	31	C	10
L87	26	38,5	20	31	0	0	0	0	57,75	D	12
L88	24	50	24	16	0	0	0	0	57	D	9,5
L89	36	70	17	16	0	0	0	0	69,5	D	9
L90	9	22	16	28	12,5	11,5	6	22	63,5	D	8
L91	15	22	20	27	0	0	0	0	42	C	10,5
L92	40	27	0	0	0	0	0	0	33,5	C	5
L93	8,5	32	16	12	0	0	0	0	34,25	C	10
L94	11,5	31	16	26	16	31	0	0	65,75	D	15
L95	14	25	0	0	0	0	0	0	19,5	B	10
L96	15	15	18	13	0	0	0	0	30,5	B	10
L97	52	26	10	22	0	0	0	0	55	D	5
L98	21	30	16	15	16	16	0	0	57	D	8,5
L99	20	17	10	33	0	0	0	0	40	C	10
L100	34	20	37	24	0	0	0	0	57,5	D	8
L101	33	22	13	21	0	0	0	0	44,5	C	6,2
L102	20	42	20	16	0	0	0	0	49	D	11
L103	37	16	41	20	0	0	0	0	57	D	6,5
L104	54	26	16	18	0	0	0	0	57	D	8
L105	39	26	0	0	0	0	0	0	32,5	C	10
L106	14	31	13	21	0	0	0	0	39,5	C	8
L107	15	19	0	0	0	0	0	0	17	B	6
L108	4	32	0	0	0	0	0	0	18	B	12
L109	13	22	0	0	0	0	0	0	17,5	B	6
L110	13	33	26	15	0	0	0	0	43,5	C	7
L111	15	19	10	18	0	0	0	0	31	C	10
L112	18	33	0	0	0	0	0	0	25,5	B	12
L113	19	20	20	21	14	32	9	9	72	D	13
L114	14	10	21	16,5	22	23	10	10	63,25	D	13
L115	41	21	0	0	0	0	0	0	31	C	9
L116	13	50	26	19	14	11	0	0	66,5	D	11
L117	51	19	0	0	0	0	0	0	35	C	10
L118	21	36	16	15	0	0	0	0	44	C	5
L119	38	23,3	0	0	0	0	0	0	30,65	B	10
L120	50	32	8,5	22	0	0	0	0	56,25	D	8
L121	16	24	0	0	0	0	0	0	20	B	9
L122	16	17	8,5	11	0	0	0	0	26,25	B	7
L123	14	10	10	24	0	0	0	0	29	B	6
L124	22,5	15	17	17	0	0	0	0	35,75	C	12
L125	44	23	0	0	0	0	0	0	33,5	C	9
L126	27	39	21	15	0	0	0	0	51	D	9

TAMANHO DOS NÓS - QUALIDADE DAS LÂMINAS
ESPESSURA DOS ANÉIS DE CRESCIMENTO

Lâminas	Medição dos Nós no terço médio do vão (mm)								Tamanho do NÓ (mm)	Qualidade das Lâminas	Espessura dos Anéis (mm)
	20	21	14	17,5	9	9	21	16			
L127	20	21	14	17,5	9	9	21	16	63,75	D	10
L128	37	16	17	23	15	18	0	0	63	D	11
L129	24	27	0	0	0	0	0	0	25,5	B	10
L130	12	13	11,5	13,5	0	0	0	0	25	B	8,5
L131	16	10	9,5	14	0	0	0	0	24,75	B	8
L132	15	22	0	0	0	0	0	0	18,5	B	14
L133	46	21	0	0	0	0	0	0	33,5	C	7
L134	20	46	0	0	0	0	0	0	33	C	12
L135	30	20	0	0	0	0	0	0	25	B	9,5
L136	30	12	12	25	11	22	0	0	56	D	13
L137	11	20	14	7,5	0	0	0	0	26,25	B	7,5
L138	31	20	0	0	0	0	0	0	25,5	B	7
L139	16	35	12	11	20	46	0	0	70	D	5,3
L140	22	28	19	11	0	0	0	0	40	C	11
L141	23	34	29	21	0	0	0	0	53,5	D	6
L142	40	20	18	42	0	0	0	0	60	D	8
L143	16	37	40	17	0	0	0	0	55	D	7,5
L144	35	18	16	32	0	0	0	0	50,5	D	12
L145	29	17	0	0	0	0	0	0	23	B	10
L146	26	18	12	18	11	11	0	0	48	C	8
L147	21	14	10	15	0	0	0	0	30	B	14,5
L148	12	25	12	17	8	8	0	0	41	C	15
L149	27	17	0	0	0	0	0	0	22	B	13
L150	28	19	10	19	0	0	0	0	38	C	7,5
L151	25	19	12	8	0	0	0	0	32	C	4,4
L152	6,5	12	12	14	0	0	0	0	22,25	B	9
L153	14	31	31	12	0	0	0	0	44	E	9
L154	14	35	10	18	12	12	0	0	50,5	D	17
L155	58	18	14	20	15	9,5	0	0	67,25	D	19
L156	29	19	23	8	26	20	0	0	62,5	D	9,5
L157	27	17	17	29	0	0	0	0	45	C	12
L158	34	25	20	27	0	0	0	0	53	D	8
L159	17	12	0	0	0	0	0	0	14,5	B	9
L160	17	17	0	0	0	0	0	0	17	B	10
L161	17	23	0	0	0	0	0	0	20	B	10
L162	17	23	0	0	0	0	0	0	20	B	7
L163	17,5	20	0	0	0	0	0	0	18,75	B	8
L164	21	16,5	0	0	0	0	0	0	18,75	B	11
L165	12,5	27	10	15	8,5	14	0	0	43,5	C	11
L166	28	62	0	0	0	0	0	0	45	C	10
L167	15	19	18	18	12	12	0	0	47	C	8
L168	15	14,5	0	0	0	0	0	0	14,75	B	6,5

ANEXO - 03

CONCEITOS E PROCEDIMENTOS ESTATÍSTICOS

ANEXO - 03

1.0 - CONCEITOS DO PROCEDIMENTO ESTATÍSTICO

Afim de apresentar os conceitos estatísticos que embasaram a análise estatística utilizada nos capítulos III, VI e VIII, foi elaborado este anexo, contendo o resumo teórico dos procedimentos utilizados. Cabe ressaltar que todos os conceitos e tabelas foram extraídos de uma publicação de NANNI (1986)^[38] e FRANCISCO (1993)^[47].

1.1 - Conceitos estatísticos básicos

Usar-se-á $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$; representando "n" valores obtidos em uma amostra aleatória de um experimento.

• Média Aritmética Simples: É obtida somando os valores de uma distribuição simples e dividindo essa soma pelo número de valores.

Deste forma, temos:
$$\bar{X} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n} \quad (1.1.1)$$

• Média ponderada: Dada pela seguinte expressão:

$$\bar{X} = \frac{x_1 \cdot f_1 + x_2 \cdot f_2 + x_3 \cdot f_3 + \dots + x_n \cdot f_n}{f_1 + f_2 + f_3 + \dots + f_n} \quad (1.1.2)$$

• Desvio Padrão: É a raiz quadrada positiva da variância. O desvio padrão da população é representado por " σ " e o desvio padrão da amostra por "S".

$$S = \sqrt{\sum \frac{(x_i - \bar{x})^2}{(n-1)}} \quad (1.1.3) \quad \sigma = \sqrt{\sum \frac{(x_i - \mu)^2}{n}} \quad (1.1.4)$$

Em geral se diz que a soma dos quadrados em (1.1.3) tem n-1 graus de liberdade, onde o conceito de grau de liberdade pode definir-se como:

• Grau de Liberdade: É o número de observações independente menos o número de restrições lineares.

• Coeficiente de Variação (C.V.): O coeficiente de variação é a relação entre o desvio padrão e a média. Ele é, geralmente, expresso em porcentagem, o que facilita a comparação de variabilidade entre variáveis com valores em unidades diferentes.

$$\text{Numa distribuição amostral o (C.V.) é: } (C.V.) = \frac{S}{\bar{X}} \quad (1.1.5)$$

O Valor de "C.V" dá a porcentagem de variação dos dados de uma amostra. Para que uma amostra seja aceitável o valor de "C.V." não deve ser grande. Geralmente, se os dados de uma amostra têm um "C. V." $\geq 25 \%$, a qualidade dessa amostra poderia ser considerada duvidosa.

• Coeficiente de Assimetria (g1): É definido pela relação entre a média aritmética dos cubos dos desvios e o cubo do desvio padrão "S". Usa-se o fator de correção igual a $\left(\frac{n-1}{n}\right)^{1/2}$ para relacionar o valor de "S" a um tamanho "n" da amostra, tem - se:

$$g1 = \frac{\sum (X_i - \bar{X})^3 / n}{\left[\left(\frac{n-1}{n}\right)^{1/2} \cdot S\right]^3} \quad (1.1.6)$$

Se o valor de "g1" é significativamente positivo, a distribuição é assimétrica a direita e se é significativamente negativo, ela é assimétrica a esquerda. O valor de "g1" deve ser comparado com $\gamma_{1\alpha}(n)$, tabelado em função de "n" e do nível de significância " α ". Se $|g1| \geq \gamma_{1\alpha}(n)$ o valor de "g1" é considerado significativo e a distribuição é assimétrica à direita. Se " $g1$ " $\leq \gamma_{1\alpha}(n)$ a distribuição é assimétrica a esquerda.

• Coeficiente de Achatamento ou Curtose (g2): É a relação entre a média das quartas potências dos desvios e a quarta potência do desvio padrão. Deve-se corrigir também pelo fator $\left(\frac{n-1}{n}\right)^{1/2}$, tem-se então:

$$g2 = \frac{\sum (X_i - \bar{X})^4 / n}{\left[\left(\frac{n-1}{n}\right)^{1/2} \cdot S\right]^4} \quad (1.1.7)$$

O Resultado deve ser comparado da seguinte maneira: Se " $g^2 \cong 3$ ", a Distribuição é Normal; se " $g^2 > 3$ ", a distribuição é acentuada no meio e se " $g^2 < 3$ ", é achatada no meio.

1.2 - Testes de normalidade da amostra (testes analíticos)

• Método analítico usando a prova do qui-quadrado (χ^2): Esta prova está baseada na comparação das frequências observadas e "esperadas". Para isso é necessário agrupar as observações num histograma e para cada intervalo, tira-se o valor de x_{is} - limite superior do intervalo "i". As frequências esperadas podem ser calculadas da seguinte maneira.

- se calcula $Z_i = (X_{is} - \bar{X})/S$, o valor padronizado de " X_{is} ", onde \bar{X} é a média e " S " o desvio padrão.

- se determina $\phi_i = \Pr(Z < Z_i)$ usando as tab. de dist. normal, a qual fornece a probabilidade que o valor de " X " seja menor ou igual ao valor de " X_{is} ".

- se determina a frequência esperada no intervalo "i" por meio de:

$$e_i = (\phi_i - \phi_{i-1}) \cdot n \quad (1.2.1)$$

- se calcula o valor de qui-quadrado, (QQ), o qual está baseado na comparação das frequências observadas no intervalo "i", " f_i ", com as frequências esperadas, " e_i " usando a expressão:

$$QQ = \sum_{i=1}^K [(f_i - e_i)^2 / e_i] \quad (1.2.2)$$

onde " K " é o número de intervalos usados no histograma. Somando os valores obtidos para cada intervalo, tem o "QQ". Esse valor é comparado com $\chi^2_{\alpha}(k-1-r)$ tabelado, com " $k-1-r$ " graus de liberdade e um nível " α " de significância. Isto é:

$$QQ < \chi^2_{\alpha}(k-1-r) \quad (1.2.3)$$

- Deve notar que se $QQ < \chi^2_{\alpha}$, não se deve concluir que os dados estão descritos por uma dist. normal. Somente se conclui que a hipótese de normalidade não é rejeitada.

- Como se observa, esta prova depende muito do número de intervalos usados na classificação dos dados do histograma. Por esta razão, é preferível usar uma outra prova que não dependa deste tipo de classificação.

• Método analítico usando a prova de Kolmogorov-Smirnov (K-S):

Esta prova consiste na comparação das frequências acumuladas observadas e as calculadas pela distribuição normal. Tem a vantagem de não depender, como a de χ^2 , de uma classificação arbitrária dos dados em intervalos, o que pode influenciar o resultado do ajuste. Podendo ser usada para valores pequenos de "n" ($n \geq 4$), o que não é possível com o χ^2 . A prova de (K-S) tem uma potência muito boa, isto é, não existe uma probabilidade grande de aceitar a hipótese de normalidade quando esta não é verdadeira. Para cada índice "i" : 1, N, se determina:

- a frequência acumulada observada para o valor ordenado $x(i)$, a qual é dada por: $S_N(x(i)) = (i/n)100$

- a frequência acumulada teórica usando a tabela da dist. normal, corresponde a: $Z(i) = (x(i) - \bar{x})/S$, isto é, $\phi(x(i)) = P_r(z < z(i))$

- O máximo das diferenças entre $S_N(x(i))$ e $\phi(x(i))$, isto é:

$$DM = \text{Max}_i | (x(i)) - \phi(x(i)) | \quad (1.2.4)$$

- Finalmente, compara-se o valor de "DM" com o valor de $D_\alpha(n)$ dado por uma tabela, que depende do nível de probabilidade α e do tamanho da amostra "n". Se: $DM \leq D_\alpha(n)$ a hipótese de normalidade não é rejeitada.

1.3 - Valor extremo espúrio (*)

Há casos em que existe um valor isolado na amostra que poderia ser descartado na hipótese da distribuição de dados ser normal. A existência de um valor extremo de X_i ($X(1)$ ou $X(n)$) espúrio pode ser verificada, conforme:

$T_1 = (\bar{X} - X(1)) / S$ e $T_n = (X(n) - \bar{X}) / S$ e comparando com o valor de "T" para uma distribuição normal, tabelado em função do número de observações "n" e do nível de significância α .

Se T_1 ou T_n forem maiores do que os valores tabelados, $X(1)$ ou $X(n)$ podem ser considerados espúrios. Neste caso, os valores de " \bar{X} " e "S" deveriam ser recalculados. Se houver dois ou mais valores de X_i tais que $[(\bar{X} - X(1)) / S] > T$, deve-se estudar as características da distribuição dos valores de "X". É muito provável que a distribuição não seja normal e, neste caso, tais valores de X_i podem pertencer à nova distribuição não devendo ser eliminados.

* PRUDÊNCIO JR. L. R. - Projetos e análise de experimentos. Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, Florianópolis, SC, 1993. Notas de Aulas.

1.4 - Prova de hipótese a respeito de duas médias

A comparação dos resultados é feita empregando-se dois testes estatísticos. O primeiro uma análise de duas variâncias, que indicará o procedimento adotado para o segundo teste. Este, uma prova de hipótese a respeito de duas médias, o qual evidenciará ou não se existe diferença significativa entre os valores de E, para o caso das vigas ensaiadas.

Na comparação de duas variâncias, deve-se usar a distribuição "F" e formula-se a hipótese a comprovar:

$$\begin{aligned} H_0 : \sigma_x &= \sigma_y && \text{com hipótese alternativa de;} \\ H_1 : \sigma_x &\neq \sigma_y \end{aligned}$$

Supondo que σ_x e σ_y provém de duas populações normais, isto é, que existem duas variáveis aleatórias X e Y, tais que $X \rightarrow N(\mu_x, \sigma_y)$ e $Y \rightarrow N(\mu_y, \sigma_y)$, decide-se tomar a amostra de cada população, de tamanho n_x e n_y , respectivamente, as quais fornecem os valores de \bar{X} , \bar{Y} , S_x e S_y .

Fixando-se um nível de significância, aqui adotado 95 %, determina-se: $F_\alpha (n_x - 1, n_y - 1)$, em seguida, calcula-se "F" dado por:

$$F = \frac{S^2_x}{S^2_y} \quad (1.4.1)$$

onde S^2_x é sempre o maior desvio padrão entre as amostras. A hipótese H_0 não é rejeitada, se:

$$F < F_\alpha (n_x-1, n_y-1).$$

Devendo ser utilizada para a comparação das médias a distribuição de Student "t". Se H_0 é rejeitada, usa-se uma modificação da distribuição de Student "t".

Para a comparação a respeito de duas médias, a hipótese a testar é:

$$\begin{aligned} H_0 : \mu_x &= \mu_y && \text{com alternativa de;} \\ H_1 : \mu_x &\neq \mu_y \end{aligned}$$

Como n_x e n_y (número de corpos de prova) são pequenos, temos então duas possibilidades: $\sigma_x = \sigma_y$ e $\sigma_x \neq \sigma_y$. Se no teste de "F" a hipótese H_0 não é rejeitada, tem-se:

$$\sigma_w = \sigma \cdot \sqrt{\frac{1}{n_x} + \frac{1}{n_y}} \quad (1.4.2)$$

Como σ não é conhecido, usa-se a média ponderada de S^2x e S^2y , definida por:

$$S^2p = \frac{(nx - 1) \cdot S^2x + (ny - 1) \cdot S^2y}{nx + ny - 2} \quad (1.4.3)$$

E a hipótese $\mu_x = \mu_y$ é rejeitada se:

$$|t| = \frac{|\bar{X} - \bar{Y}|}{Sp \left(\frac{1}{nx} + \frac{1}{ny} \right)^{\frac{1}{2}}} > t_{\frac{\alpha}{2}}(nx + ny - 2) \quad (1.4.4)$$

1.5 - Comparação múltipla de médias

Para a análise de "k" médias, poderíamos descrever os "k" grupos como "k" amostras de distribuições, independentes cada uma proveniente de uma distribuição normal como o mesmo σ . Sendo $x_{ij} \rightarrow N(\mu_j, \sigma)$.

O teste pertence à categoria dos testes fornecidos pela análise de variância, ANOVA, de "um fator com K níveis", o qual está baseado na distribuição "F", com nível de significância " α " e com grau de liberdade (k-1; N-k).

Existem dois modos do uso de ANOVA para o caso de uma fator k níveis:

Modelo-1: níveis aleatórios, com os efeitos α_j descritos por uma distribuição normal $\alpha \rightarrow N(0, \sigma_\alpha)$ a qual se supõe ser independente da distribuição do erro ϵ_{ij} .

Modelo-2: níveis fixos, onde os efeitos α_j são fixos, positivos ou negativos, tais que: $\sum_{j=1}^k \alpha_j = 0$

No caso em estudo os níveis do fator examinado são fixos, e deseja-se examinar a possível existência de uma diferença significativa entre as médias das classificações estudadas.

As observações podem ser descritas da seguinte maneira:

amostras	classificações				
	1	2	.....	K	
1	X1,1	X1,2	.....	X1,k	
2	X2,1	X2,2	.....	X2,k	
3	X3,1	X3,2	.....	X3,k	
.....	
n	Xni,1	Xni,2	.....	Xnk,k	
totais (Tj)	T.1	T.2	.....	Tk	T.. = $\sum T_j$
médias (\bar{X})	$\bar{X}.1$	$\bar{X}.2$	.....	$\bar{X}K$	$\bar{X}.. = \frac{\sum X}{N}$
núm. de amostras (nj)	n1	n2	.....	nk	N = $\sum nj$

Os cálculos são feitos, considerando as seguintes equações:

$$\bullet \sum_{ij} X_{ij}^2 = (X_{1,1})^2 + (X_{2,1})^2 + \dots + (X_{ni,1})^2 \quad (1.5.1) \quad \bullet CT = \frac{T..^2}{N} \quad (1.5.2)$$

$$\bullet \sum_j \frac{T.j^2}{n_j} \quad (1.5.3) \quad \bullet SQT = \sum_{ij} X_{ij}^2 - CT \quad (1.5.4)$$

$$\bullet SQR = \sum X_{ij}^2 - \sum \frac{T.j^2}{n_j} \quad (1.5.5) \quad \bullet SQB = \sum_j \frac{T.j^2}{n_j} - CT \quad (1.5.6)$$

O modelo estatístico para a análise é: $x_{ij} = \mu + \alpha_j + \epsilon_{ij}$, com: $\sum \alpha_j = 0$ e $\epsilon_{ij} \rightarrow N(0, \sigma)$. σ constante (não varia com as médias das classificações). A hipótese a testar é:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k; \quad \text{com alternativa de:} \quad H_1: \mu_i \neq \mu_j$$

Fonte	Soma de quadrados SQ	Graus de liberdade	Médias quadradas MQ	"F"
Blocos (entre grupos)	SQB	k-1	MQB=SQB/k-1	F=MQB/MQR
Residual dentro dos grupos	SQR	N-k	MQR=SQR/N-k	
total	SQT	N-1		

Para comprovar as hipóteses levantadas, compara-se o valor de "F" com o valor tabelado de $F_{\alpha}(k-1, n-k)$. Se $F > F_{\alpha}$, se rejeita H_0 e conclui-se que a variação entre as classificações é significativamente maior que a variação dentro das classificações, isto é, a hipótese de não existir diferença significativa entre as "k" médias deve ser rejeitada.

Em caso de níveis fixos, ocorrendo essa aceitação, há de se fazer uma análise posterior para identificar, dentro do conjunto de médias, qual ou quais diferem significativamente. Então, deve-se utilizar o Método de "DUNCAN", o qual está abaixo resumido.

- escreve-se as médias em ordem crescente.
- Determinar o desvio padrão das médias ($S_{\bar{x}}$).

- Calcular-se: $S = \sqrt{MQR}$ (1.5.7)

$$S_{\bar{x}} = S\sqrt{m_h} \quad (1.5.8)$$

Como "n" depende das colunas, usa-se um valor aproximado "mh", a média harmônica da pela expressão:

$$m_h = \frac{1}{\frac{\sum 1/n_i}{k}} \quad (1.5.9)$$

- Usando a tabela de "Studentized Range", retira-se os valores de r_k que é função do número de médias (k), dos graus de liberdade de "S" e do nível de significância. Adotado, $\alpha = 0,05$.

- Multiplica-se os valores de r_k com as diferenças entre as médias ordenadas.

$$\begin{array}{ll} \bar{X}_{j+1} - \bar{X}_j & \text{compara-se com } R_2 (j = 1, k-1) \\ \bar{X}_{j+2} - \bar{X}_j & \text{compara-se com } R_3 (j = 1, k-2) \end{array}$$

Se as diferenças entre as médias for maior que o correspondente valor de R_j , a diferença é declarada significativa **DS**. Em caso contrário, é declarada não significativa, **NDS**.

1.6 - Regressão Linear

O problema consiste em estimar os parâmetros "a" e "b" da equação de regressão. Para todos os pontos possíveis (x,y) existe uma reta de regressão, dada por $y' = \alpha x + \beta$. Como através de uma amostra, obteremos uma estimativa da verdadeira equação, denominamos: y' como o valor médio teórico de "Y"; α e β são parâmetros a estimar.

• Estimativa dos parâmetros

Utiliza-se as letras "a" e "b" como estimativas amostrais de α e β . Um dos métodos mais simples para o cálculo das estimativas dos parâmetros é o dos mínimos quadrados. Ou seja, minimizando:

$$S = \sum (y_i - a - b \cdot x_i)^2 \quad (1.6.1) \quad \text{obtendo-se:}$$

$$b = \frac{\sum y_i(x_i - \bar{x})}{\sum (x_i - \bar{x})^2} \quad (1.6.2) \quad a = \bar{y} - b \cdot \bar{x} \quad (1.6.3)$$

o modelo ajustado é dado por: $y = a + bx + \varepsilon$ (1.6.4)

Para o cálculo dos parâmetros a, b, Se, Sa e Sb, primeiro determina-se os valores de:

$$S_{xx} = \sum X_i^2 - (\sum X_i)^2 / n \quad (1.6.5) \quad S_{yy} = \sum Y_i^2 - (\sum Y_i)^2 / n \quad (1.6.6)$$

$$S_{xy} = \sum X_i \cdot Y_i - (\sum X_i) \cdot (\sum Y_i) / n \quad (1.6.7)$$

Com as quais se determina:

$$b = S_{xy} / S_{xx} \quad (1.6.8) \quad a = \sum Y_i / n - b \sum X_i / n \quad (1.6.9)$$

$$Se = \sqrt{\frac{S_{yy} - b \cdot S_{xy}}{n - 2}} \quad (1.6.10) \quad Sa = \sqrt{\frac{\sum X_i^2}{n \cdot S_{xx}}} (Se) \quad (1.6.10)$$

$$Sb = Se / \sqrt{S_{xx}} \quad (1.6.11)$$

• Testes de significância da relação:

No uso de uma regressão linear a relação entre as duas variáveis "x" e "y", é esperado que seja significativa, ou seja, a inclinação seja diferente de zero. Para essa verificação, usa-se a distribuição de Student. Formulando-se as seguintes hipóteses: $H_0: \beta = \beta_0$ e $H_1: \beta \neq \beta_0$

Como σ_b (desvio padrão da inclinação de uma reta) não é conhecido, calcula-se:

$$t = \frac{b - \beta_0}{S_b} \quad (1.6.12)$$

Este valor de "t", deve ser comparado com o valor de $t_{\alpha/2} (n-2)$ da distribuição de Student, tabelado. Se tivermos:

$$|t| > t_{\alpha/2} (n-2) \quad (1.6.13)$$

Conclui-se que a relação entre as variáveis "x" e "y" é SIGNIFICATIVA. E a hipótese "H₀" é rejeitada.

• Teste de significância da correlação:

É medido pelo coeficiente de correlação linear "r", o qual mede o grau de relação linear entre as duas variáveis.

O valor de "r", que sempre pertencerá ao intervalo (-1; +1), representa uma medida de intensidade entre as variáveis. Se $r = 1$, há uma perfeita correlação positiva, isto é, se os valores de uma variável aumentam (ou diminui), em correspondência os valores da outra variável também aumentam (ou diminui) na mesma proporção. O oposto também é verdadeiro. Se $r = 0$, não há correlação entre as variáveis. Onde:

$$r = S_{xy} / \sqrt{S_{xx} \cdot S_{yy}} \quad (1.6.14)$$

O quadrado de r, r^2 é conhecido como o coeficiente de determinação. Este indica a estimativa da proporção da variável de y que pode ser atribuída à sua regressão linear com a variável x.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] - FREITAS, Amantino Ramos de - Utilização racional da madeira na engenharia. Comunicação Técnica n. 1724, São Paulo, IPT, 25p. 1986.
- [2] - CLEVER DE OLIVEIRA, V. - Empresas defendem a isenção do ICMS. Revista a Madeira. ABPM - Associação Brasileira de Produtores de Madeira, ano 2, n.09. Jun./Ago 1993.
- [3] - FREITAS, Amantino Ramos de - Potencial de utilização de madeiras em construção. Comunicação Técnica n. 220, São Paulo, IPT, 5p. 1984.
- [4] - MOOSMAYER, Heinrich - Sistema de desdobro do Pinus ssp e sua valorização no Brasil. In: JORNADA FRANCO-BRASILEIRA / VALORIZAÇÃO INDUSTRIAL DA MADEIRA. Florianópolis, 1986. **Anais**. Santa Catarina. UFSC, 1986. p.174-191.
- [5] - PRUDENTES DE FONTES, Paulo - O governo e a floresta no Brasil. In: JORNADA FRANCO-BRASILEIRA / VALORIZAÇÃO INDUSTRIAL DA MADEIRA. Florianópolis, 1986. **Anais**. Santa Catarina. UFSC, 1986. p.30-59.
- [6] - DATE - Departamento de Apoio e Desenvolvimento Técnico. Biodeterioração e preservação de madeiras. Montana Química S.A.. São Paulo - SP. 74p. 1991.
- [7] - PETRUCCI, Eládio G. R - Materiais de construção. Porto Alegre. 1995. Editora Globo. 10^a edição. p.116-202.
- [8] - FUSCO, P. Brasiliense - Os caminhos da evolução da engenharia das madeira. In: ENCONTRO BRASILEIRO DE MADEIRA E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA - EBRAMEM. São Carlos, 1989. **Anais**. São Paulo. EESC-USP, 1989. v.6, p.07-18.
- [9] - SZÜCS, C. Alberto - A madeira laminada na coberturas de residencias. In: ENCONTRO BRASILEIRO DE MADEIRA E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA - EBRAMEM. São Carlos, 1983. **Anais**. São Paulo. EESC-USP, 1983, v.3, p.01-28.
- [10] - SZÜCS, C. Alberto - Aplicação estrutural da madeira sob a técnica do laminado-colado. Florianópolis, SC. Departamento de Engenharia Civil, UFSC. 13p. 1992.

- [11] - ROCCO LAHR, F. Antonio - Contribuição ao estudo de vigas retas de madeira laminada-colada. São Carlos. LaMEM-EESC-USP, 1991. Relatório de Iniciação Científica. 32p.
- [12] - NEIVA, G. Shirahama - Estudo de vigas retas de madeira laminada-colada (MLC). In: IV ENCONTRO BRASILEIRO DE MADEIRA E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA - EBRMEM. São Carlos, 1989. **Anais**. São Paulo. EESC-USP. 1992. v.4, pg.1-13.
- [13] - AMERICAN INSTITUTE OF TIMBER CONSTRUCTION - Timber construction manual. New York. Jonh Willey. 1974.
- [14] - EUROCODE 5 - Common unified rules for timber structures. Belgica.1987.
- [15] - KOLLMANN, Franz F.P.; CÔTE, W.A - Principles of wood science and tecnologia. New York. 1984. v.1. p.79-95.
- [16] - FURIATI, Marcos - Classificação estrutural de peças de madeira. São Carlos. 1981. 131p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- [17] - MELO, Júlio E - Classificação mecânica de peças estruturais de madeira. São Carlos. 1984. 84p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São de Carlos, Universidade de São Paulo.
- [18] - COMISSIÓN PANAMERICA DE NORMAS TECNICA - Madeiras: método de medicion de los defeitos. COPANT 30:3-002. COPANT, 1975. 22p.
- [19] - CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION - Structrural glud laminated timber.CAN/SCA - 0122-M89. 1989. Canadian Standards Association, Toronto, Canadá. 1989. 17p.
- [20] - ZANDER, J.R. Torres - Cálculo e execução de estruturas de madeira laminada. São Carlos. 1979. 167p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- [21] - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - Cálculo e execução de estruturas de madeira - NBR-7190. São Paulo. Brasil, ABNT, 1984.
- [22] - ASSOCIANÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - Ensaio físicos e mecânicos, método brasileiro- MB-26. Rio de Janeiro, Brasil, ABNT, 1940.

- [23] - KISELIOV V.A - Mecanica de construccion en ejeplos y problemas. Moscú (URSS). editora Mir. 1973.
- [24] - SÜSSEKIND, J.C - Curso de análise e estrutural / deformações em estruturas - Método das forças. Porto Alegre (Brasil). Editora Globo. 1979. v.1.
- [25] - SZÜCS. C. A - Étude d'un assemblage por pièce de coin im bàs lamillé-collé reforcé par fibras de verre. Metz, França. LPF 1991. 199p.
- [26] - BODIG, J.; JAYNE, B. A - Mechanic of wood and composites. New York, USA. Van Nostrand Reinold Company. 1982.
- [27] - ROCCO LAHR, F. Antonio - Verificação do módulo de elasticidade longitudinal aparente com a relação vão livre - altura de peças de madeira. In: I ENCONTRO BRASILEIRO DE MADEIRA E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA - EBRAMEM. São Carlos, 1983. **Anais**. São Paulo. EESC-USP. 1983. v.1, 16p.
- [28] - PINTO, M. Lara - Flexão em peças de madeira. In: ENCONTRO BRASILEIRO DE MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA - EBRAMEM. São Carlos, 1983. **Anais**. São Paulo. EESC-USP. 1983. v.1, 32p.
- [29] - HELLMEISTER, J. Cesar - Madeiras e suas características. In: ENCONTRO BRASILEIRO DE MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA-EBRAMEM. São Carlos, 1983. **Anais**. São Paulo. EESC-USP. 1983. v.1, pg. 1-37.
- [30] - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard methods of testing small clear specimens of timber - ASTM D143-52. Easton, 1978.
- [31] - DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG - Prüfung von holz. DIN 52 182, Berlin, Verlag, 1952.
- [32] - ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION - essai de flexion statique. NF B51-008. Paris, França. AFNOR.
- [33] - BRITISH STANDARDS INSTITUTION - Methods of test for determination of certain physical and mechanical properties of timber in structural size. BS 5820. Londo, UK, BSI, 1979.

- [34] - DEUTSCHES INSTITUT FUR NORMUNG - Keilzinkenverbindung von hollz. DIN 52 188 Berlin, Verlag, 1952.
- [35] - DEUTSCHES INSTITUT FUR NORMUNG - Prüfung von leimen und leimverbindungen für tragende holzbauteile. DIN 68141. Berlin, Verlag, 1971.
- [36] - FERREIRA, C.A.T; FUSCO, P.B. - Considerações a respeito da determinação da resistência ao cisalhamento paralelo às fibras da madeira. I ENCONTRO REGINAL EM MADEIRAS E ESTRUTURAS DE MADEIRA - IBRAMEM. São Paulo, 1993. **Anais**. São Paulo. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1993. v.1, p.31-42.
- [37] - ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION - essai de cisalhamment. NF B5-32. Paris, França. AFNOR, 1942
- [38] - NANNI, L.F. - Análise estatística de dados com o uso de técnicas computacionais. Porto Alegre, CPGEC/UFSC, 1986. 178p. (caderno técnico).
- [39] - MOODY, R. C.; BOHANNAN, B. - Flexural properties of glued-lamited southern pine beam with lamination positioned by visual sttiffeness criteria. Madison, USDA - Forest Products Laboratory - FS, 1970 (Res. Pap. FPL n° 127). 20p.
- [40] - KOCH, P.; BOHANNAN, b. - Beam strength as affected by placement of laminae. Forest Products Journal, USA, 1965. p.289-296.
- [41] - CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION - Structural Glued - Laminated Timber CAN/CSA - 0122- M89. Toronto, Canadá, 1989.
- [42] - BOHN, A. R.; SZÜCS, C.A. - Influência da espessura dos anéis de crescimento no comportamento mecânico dos elementos de madeira laminada-colada. V ENCONTRO BRASILEIRO DE MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA. Belo Horizonte, 1995. **Anais**. Minas Gerais. EEUFMG, 1995. v.1, 8p.
- [43] - CAHIERS DU CENTRE TECHNIQUE DU BOIS. CTB - La fabrication des éléments de structure em bois lamellé collé. Paris - França. 1976.
- [44] - NASH, W. A. - Resistência dos Materiais. Editora Mcgran-Hill do Brasil Ltada, 1ª edição, 384p. 1991.

- [45] - CHAHUD, Eduardo; ROCCO LAHR, F. Amtonio. - O módulo de elasticidade longitudinal da madeira. In: III ENCONTRO BRASILEIRO DE MADEIRA E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA - EBRAMEM. São Carlos, 1989. **Anais**. São Paulo. EESC-USP, 1989. p.103-129.
- [46] - BUCUR, V.; HERBÉ, C.; NOSEI, G. - Annual ring characteristics of pinus taeda measured by ultrasonic and X-ray techniques. *Aiwa, Journal*, vol. 15 (2), 1994. p.121-132.
- [47] - FANCISCO, WALTER DE. - Estatística: síntese da teoria, exercício propostos e resolvidos. Piracicaba, Unimep, 1993. 219 p.