



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO

**ESTUDO DA MADEIRA LAMINADA-COLADA COM
EMENDAS DE TOPO REFORÇADAS COM FIBRA DE
VIDRO**

Dissertação de Mestrado Submetida ao Curso
de Pós-Graduação em Engenharia Civil
Opção Construção Civil (Materiais e
Processos Construtivos), para Obtenção do
Grau de Mestre em Engenharia Civil.

ANDRÉ GRAEFF

Florianópolis, 28 de agosto de 1995

Referência Bibliográfica e Resumo

GRAEFF, André. *Estudo da Madeira Laminada-Colada com emendas de topo reforçadas com fibra de vidro*. Florianópolis, 1995. 129p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Carlos Alberto Szücs
Defesa: 28/08/95

Análise da substituição em peças estruturais de [madeira laminada-colada], da emenda por [entalhes múltiplos], por uma emenda de topo [reforçada por tecido de fibra de vidro]. Foi realizada caracterização físico-mecânica da [madeira] de [*Pinus taeda* e *elliottii*], uma análise do comportamento da madeira com a cola e a fibra de vidro, indicando a dimensão adequada do tecido de fibra de vidro a ser empregada. Foram ensaiadas vigas com e sem reforço de fibra de vidro, em uma análise comparativa do [comportamento mecânico], com as vigas com [ligações] por [entalhes múltiplos (finger-joints)] e sem emendas.

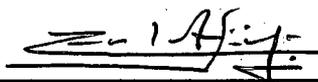
ESTUDO DA MADEIRA LAMINADA- COLADA COM EMENDAS DE TOPO REFORÇADAS COM FIBRA DE VIDRO

André Graeff

Esta dissertação foi julgada para obtenção do título de

Mestre em Engenharia

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

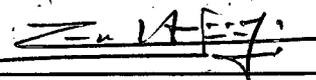


Prof. Dr. Carlos Alberto Szücs - (Orientador)



Prof. Dr. Carlos Alberto Szücs - (Coordenador do Curso)

Banca Examinadora



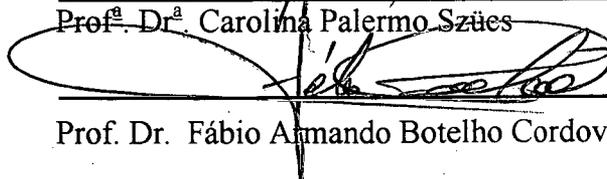
Prof. Dr. Carlos Alberto Szücs - (Presidente)



Prof. Dr. Carlito Calil Júnior



Prof.ª Dr.ª Carolina Palermo Szücs



Prof. Dr. Fábio Amando Botelho Cordovil

Aos meus pais *Geraldo e Gisela*,
fonte de inspiração e motivação para realização deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. CARLOS ALBERTO SZÜCS, pelo tema proposto, pelo incentivo, apoio moral e material demonstrados.

Ao colega e amigo Prof. FERNANDO AVANCINI TRISTÃO, pelo incentivo e apoio moral ao longo deste trabalho.

Aos colegas e amigos Prof. ADOLAR RICARDO BOHN e HUMBERTO ALEXANDRE CABRAL ARRUDA pela contribuição na realização dos ensaios, pelo intercâmbio de idéias e pelo apoio manifestado.

Aos bolsistas CLÁUDIO VICENTE ZANON e CRISTIANO INÁCIO RICARDO DE PAIVA pelo apoio prestado na realização dos ensaios.

Ao professor LUIZ ROBERTO PRUDÊNCIO JÚNIOR pela colaboração prestada no tratamento estatístico, bem como, a todos os demais professores deste curso que de alguma forma contribuíram com a transferência de seus conhecimentos.

Aos funcionários PAULO e IRIZETE, bem como aos demais colegas e funcionários do LEE/ECV pela colaboração prestada.

Aos departamentos de Arquitetura e Urbanismo (maquetaria), Engenharia mecânica (LABMAT), Biologia (Botânica) e Biblioteca Central que contribuíram com equipamentos, pessoal e informações para este trabalho, bem como a toda estrutura oferecida pela Universidade Federal de Santa Catarina.

A CAPES - Coordenação e Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pela ajuda financeira prestada na forma de bolsa de estudos.

As empresas BATTISTELLA IND. E COM. LTDA, OWENS CORNING e ALBA QUÍMICA, respectivamente pelo fornecimento da madeira, do tecido de fibra de vidro e do adesivo utilizados nesta pesquisa, demonstrando com isto, interesse no desenvolvimento tecnológico deste país.

A todos que de uma forma ou de outra colaboraram para a realização deste trabalho.

Finalmente, eu tenho que agradecer aos membros da banca examinadora que me deram a honra de julgar meu trabalho.

SUMÁRIO

	página
• LISTA DE FIGURAS	vi
• LISTA DE TABELAS	ix
• RESUMO	xii
• ABSTRACT	xiii
• SÍMBOLOS	xiv
<u>CAPÍTULO I</u> • INTRODUÇÃO	2
1.1 - Generalidades	2
I.2 - Os compósitos	6
I.3 - O “compósito natural “ madeira	7
I.4 - Os compósitos com a madeira	8
I.5 - Objetivos	9
I.5.1 - Objetivos gerais	9
I.5.2 - Objetivos específicos	10
<u>CAPÍTULO II</u> • REVISÃO TEÓRICA E BIBLIOGRÁFICA	12
II.1 - Formação da madeira	12
II.1.1 - Processo fisiológico	12
II.1.2 - Composição química	13
II.1.3 - Concepção anatômica	14

	página
II.2 - Técnica da madeira laminada-colada	15
II.2.1 - Origem e evolução do emprego da madeira laminada-colada	15
II.2.2 - Constituição, descrição e métodos construtivos da madeira laminada-colada	16
II.2.2.1 - Madeira	16
II.2.2.2 - Emendas	19
II.2.2.3 - Composição das lâminas com colas	22
II.2.3 - Composição da madeira laminada-colada com o tecido de fibra de vidro	24
II.2.3.1 - O tecido de fibra de vidro	24
II.2.3.2 - Madeira laminada-colada com fibra de vidro	26
II.2.3.3 - Recomendações e cuidados a serem observados na fabricação	27
II.2.4 - Comportamento mecânico experimental do elemento estrutural	28
II.2.4.1 - Peças submetidas à flexão simples	28
<u>CAPÍTULO III</u> . EXPERIMENTAÇÃO BÁSICA	33
III.1 - Introdução	33
III.2 - Objetivo	33
III.3 - Programação dos ensaios	34
III.4 - Materiais utilizados	36
III.4.1 - A madeira	36
III.4.2 - O adesivo	41
III.4.3 - O tecido de fibra de vidro	42

	página
III.5 - Ensaio de caracterização física e mecânica da madeira	43
III.5.1 - Ensaio físicos	43
III.5.1.1 - Teor de umidade e massa volumétrica	43
III.5.1.1.1 - Procedimento de ensaio	43
III.5.1.1.2 - Apresentação dos resultados	44
III.5.2 - Ensaio mecânicos	47
III.5.2.1 - Cisalhamento paralelo às fibras	47
III.5.2.1.1 - Procedimento de ensaio	47
III.5.2.1.2 - Apresentação dos resultados	48
III.5.2.2 - Compressão paralela às fibras	50
III.5.2.2.1 - Procedimento de ensaio	50
III.5.2.2.2 - Apresentação dos resultados	50
III.5.2.3 - Flexão simples	52
III.5.2.3.1 - Procedimento de ensaio	52
III.5.2.3.2 - Apresentação dos resultados	54
III.5.2.4 - Tração normal às fibras	55
III.5.2.4.1 - Procedimento de ensaio	55
III.5.2.4.2 - Apresentação dos resultados	56
III.5.2.5 - Tração paralela às fibras	58
III.5.2.5.1 - Procedimento de ensaio	58
III.5.2.5.2 - Apresentação dos resultados	58

	página
III.6 - Caracterização mecânica do reforço de tecido de fibra de vidro	60
III.6.1 - Objetivo	60
III.6.2 - Procedimento do ensaio	60
III.6.3 - Apresentação dos resultados	62
III.7 - Análise do comportamento dos elementos estruturais (vigas)	63
III.7.1 - Objetivo	63
III.7.2 - Procedimento de ensaio	63
III.7.3 - Apresentação dos resultados	72
<u>CAPÍTULO IV</u> • ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS	82
<u>CAPÍTULO V</u> • CONSIDERAÇÕES FINAIS E POSSIBILIDADES PARA NOVAS PESQUISAS	113
V.1 - Considerações finais	113
V.2 - Possibilidades para novas pesquisas	116
ANEXOS	118
A.1 - Análise estatística dos resultados	119
A.1.1 - Análise estatística preliminar	119
A.1.2 - Provas de hipótese e problemas de estimação quando não se conhece “σ”	122
A.1.3 - Comparação de “K” grupos	124
A.1.4 - Regressão	126
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	127

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I • **INTRODUÇÃO**

I.01 - Esquema da disposição das fibras dentro da madeira	7
I.02 - Esquema da substituição da emenda por entalhes múltiplos(finger-joints) por uma emenda de topo reforçada por tecido de fibra de vidro	10

CAPÍTULO II • **REVISÃO TEÓRICA E BIBLIOGRÁFICA**

II.01 - Evolução ocorrida nas emendas longitudinais entre as tábuas	19
II.02 - Pressão de colagem em função do comprimento dos entalhes	21
II.03 - Diagramas carga-deformação das ligações colada, pregadas e parafusadas	22
II.04 - Representação esquemática do tecido de fibra de vidro	25
II.05 - Representação esquemática da madeira com reforço de tecido de fibra de vidro	26

CAPÍTULO III • **EXPERIMENTAÇÃO BÁSICA**

III.01 - Esquema de retirada dos corpos de prova, para os ensaios de teor de umidade e compressão paralela às fibras da madeira	38
III.02 - Esquema de retirada dos corpos de prova, para o ensaio de tração normal às fibras da madeira	39
III.03 - Esquema de retirada dos corpos de prova, para os ensaios de tração paralela às fibras da madeira e flexão simples (ASTM D 143-52)	39
III.04 - Esquema de retirada dos corpos de prova, para o ensaio de cisalhamento paralelo às fibras da madeira	40
III.05 - Esquema de retirada dos corpos de prova, para o ensaio de tração paralela às fibras da madeira, para caracterização mecânica do reforço de tecido de fibra de vidro	41
III.06 - Características do tecido fibroso, a) nacional, b) francês	43
III.07 - Dispositivo utilizado no ensaio de cisalhamento e detalhes de fixação do corpo de prova e ruptura	48

III.08 - Esquema do ensaio de flexão simples a 4 pontos (ASTM D 143-52)	53
III.09 - Dispositivo utilizado no ensaio de tração normal às fibras e detalhes das garras com o corpo de prova	56
III.10 - Ilustração do corpo de prova inicial, para o ensaio de caracterização mecânica do reforço de tecido de fibra de vidro	60
III.11 - Ilustração do corpo de prova intermediário, para o ensaio de caracterização mecânica do reforço de tecido de fibra de vidro	61
III.12 - Ilustração do corpo de prova definitivo, para o ensaio de caracterização mecânica do reforço de tecido de fibra de vidro	62
III.13 - Gráfico representativo do módulo de elasticidade devido ao momento fletor em relação ao módulo de elasticidade total, em função do comprimento pela altura da viga	65
III.14 - Geometria e esquema de ensaio das vigas	66
III.15 - Posicionamento das emendas de topo com e sem reforço de tecido de fibra de vidro	67
III.16 - Dispositivo de aplicação de pressão de colagem	68
III.17 - Representação da montagem para flexão à quatro pontos	70
III.18 - Diagrama carga-deformação na tela do microcomputador	71
III.19 - Comportamento da viga VCA004 em flexão a 4 pontos	72
III.20 - Comportamento da viga VCB004 em flexão a 4 pontos	73
III.21 - Comportamento da viga VCC005 em flexão a 4 pontos	74
III.22 - Comportamento da viga VSA005 em flexão a 4 pontos	75
III.23 - Comportamento da viga VSB004 em flexão a 4 pontos	76
III.24 - Comportamento da viga VSC004 em flexão a 4 pontos	77
III.25 - Comportamento da viga VSE006 em flexão a 4 pontos	78
III.26 - Comportamento da viga VFJ003 em flexão a 4 pontos	79
III.27 - Geometria dos entalhes múltiplos (finger-joints)	79

CAPÍTULO IV • ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS

IV.01 - Tabela de classe de frequências e gráfico do histograma e das frequências acumuladas	87
IV.02 - Tabela de classe de frequências e gráfico do histograma e das frequências acumuladas	90
IV.03 - Tabela de classe de frequências e gráfico do histograma e das frequências acumuladas	91
IV.04 - Tabela de classe de frequências e gráfico do histograma e das frequências acumuladas	94

CAPÍTULO V • CONSIDERAÇÕES FINAIS E POSSIBILIDADES PARA NOVAS PESQUISAS

V.01 - Viga com emendas de topo na posição “B” e com reforço de tecido de fibra de vidro	117
---	-----

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO I • **INTRODUÇÃO**

I.01 - Diferença de comportamento entre a resistência da madeira e do aço quando submetidos à ação do fogo.	4
I.02 - Comparação dos valores do consumo de energia para produção dos principais materiais de construção.	4
I.03 - Comparação dos valores do comprimento de auto-ruptura de alguns materiais com a madeira.	5

CAPÍTULO II • **REVISÃO TEÓRICA E BIBLIOGRÁFICA**

II.01 - Valores da concavidade máxima permitida.	17
II.02 - Valores das dimensões de nós permitidos em função da largura da peça.	17
II.03 - Características geométricas dos entalhes múltiplos.	21
II.04 - Valores comparativos das colas empregadas no laminado-colado quando submetidas à ação do fogo.	23
II.05 - Escolha da cola em função do tipo de uso previsto para a estrutura.	23

CAPÍTULO III • **EXPERIMENTAÇÃO BÁSICA**

III.01 - Resultados dos ensaios de flexão a quatro pontos das vigas.	80
--	----

CAPÍTULO IV • **ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS**

IV.01 - Características numéricas dos resultados do ensaio de teor de umidade e massa volumétrica do <i>Pinus elliottii</i> e <i>Pinus taeda</i>	82
IV.02 - Características numéricas dos resultados do ensaio de cisalhamento paralelo às fibras da madeira de <i>Pinus elliottii</i> e <i>Pinus taeda</i>	83
IV.03 - Características numéricas dos resultados do ensaio de compressão paralela às fibras da madeira de <i>Pinus elliottii</i> e <i>Pinus taeda</i>	83
IV.04 - Características numéricas dos resultados do ensaio de flexão simples (ASTM D 143-52) do <i>Pinus elliottii</i> e <i>Pinus taeda</i>	84

IV.05 - Características numéricas dos resultados do ensaio de tração normal às fibras do <i>Pinus elliottii</i> e <i>Pinus taeda</i>	84
IV.06 - Características numéricas dos resultados do ensaio de tração paralela às fibras do <i>Pinus elliottii</i> e <i>Pinus taeda</i>	85
IV.07 - Apresentação comparativa dos resultados dos ensaios de caracterização física-mecânica das madeiras de <i>P.elliottii</i> e <i>P.taeda</i>	85
IV.08 - Valores dos resultados do ensaio de tração paralela às fibras da madeira de <i>P.elliottii</i> com reforço de fibra de vidro nacional.	86
IV.09 - Valores dos resultados do ensaio de tração paralela às fibras da madeira de <i>P.elliottii</i> com reforço de fibra de vidro francesa.	88
IV.10 - Valores dos resultados do ensaio de tração paralela às fibras da madeira de <i>P.elliottii</i> com reforço de fibra de vidro nacional e francesa.	89
IV.11 - Valores dos resultados do ensaio de tração paralela às fibras da madeira de <i>P.taeda</i> com reforço de fibra de vidro nacional.	91
IV.12 - Valores dos resultados do ensaio de tração paralela às fibras da madeira de <i>P.taeda</i> com reforço de fibra de vidro francesa.	92
IV.13 - Valores dos resultados do ensaio de tração paralela às fibras da madeira de <i>P.taeda</i> com reforço de fibra de vidro nacional e francesa.	93
IV.14 - Valores comparativos dos resultados dos ensaios de tração paralela às fibras das madeiras de <i>P.elliottii</i> e <i>P.taeda</i> com reforço de fibra de vidro nacional e francesa.	95
IV.15 - Valores dos resultados do ensaio de flexão a 4 pontos das vigas (VCA).	96
IV.16 - Valores dos resultados do ensaio de flexão a 4 pontos das vigas (VCB).	97
IV.17 - Valores dos resultados do ensaio de flexão a 4 pontos das vigas (VCC).	98
IV.18 - Valores dos resultados do ensaio de flexão a 4 pontos das vigas (VSA), sem valor espúrio - viga VSA001.	100
IV.19 - Valores dos resultados do ensaio de flexão a 4 pontos das vigas (VSB).	101
IV.20 - Valores dos resultados do ensaio de flexão a 4 pontos das vigas (VSC), sem valores espúrios - vigas VSC002/VSC001.	103

IV.21 - Valores dos resultados do ensaio de flexão a 4 pontos das vigas (VSE).	104
IV.22 - Valores dos resultados do ensaio de flexão a 4 pontos das vigas (VFJ).	105
IV.23 - Valores comparativos dos resultados dos ensaios de flexão a 4 pontos das vigas.	107
IV.24 - Tabela ANOVA dos resultados de tensão de ruptura dos “k” grupos.	107
IV.25 - Tabela das diferenças entre as médias ordenadas (tensão de ruptura).	108
IV.26 - Tabela ANOVA dos resultados do módulo de elasticidade dos “k” grupos.	109
IV.27 - Tabela das diferenças entre as médias ordenadas (módulo de elasticidade).	109
IV.28 - Tabela da prova de hipóteses com respeito a duas médias com “ σ ” desconhecido (tensão de ruptura).	110
IV.29 - Tabela da prova de hipóteses com respeito a duas médias com “ σ ” desconhecido (módulo de elasticidade).	111

RESUMO

A base deste trabalho é o estudo da análise da substituição em peças estruturais de madeira laminada-colada, da emenda usual por entalhes múltiplos, por uma emenda simplesmente de topo reforçada por tecido de fibra de vidro.

Apresenta-se um estudo das características intrínsecas da madeira e dos materiais combinados na constituição de um compósito. Um estudo bibliográfico dos materiais e técnicas envolvidas na produção do compósito madeira laminada-colada reforçada com fibra de vidro, faz-se necessário, a fim de fixar as idéias sobre a concepção da técnica.

Para atender claramente o objetivo definido, a parte experimental é complementada com um estudo da caracterização físico-mecânica dos materiais empregados na composição dos elementos estruturais, a saber, a madeira de *Pinus taeda* e *elliottii*, a cola resorcina-fenol-formol e a fibra de vidro.

É apresentado um estudo teórico do comportamento mecânico e do dimensionamento baseado na mecânica e resistência dos materiais.

O trabalho experimental compreende três partes: um estudo de caracterização dos materiais, um estudo do comportamento do compósito e o ensaio de elementos estruturais (vigas).

No primeiro estudo são realizados ensaios físico-mecânicos em pequenos corpos de prova para as duas espécies de madeira, que indicará a mais adequada para utilização.

No segundo estudo é realizada uma análise do comportamento da madeira com a cola de resorcina-fenol-formol e o tecido de fibra de vidro, indicando a dimensão adequada do tecido de fibra de vidro a ser empregada na emenda.

No terceiro estudo são realizados ensaios de flexão a quatro pontos em elementos estruturais com e sem reforço de fibra de vidro, a fim de se fazer uma análise comparativa do comportamento mecânico.

Em conclusão, são apresentados os resultados indicativos do comportamento mecânico dos elementos reforçados com fibra de vidro comparados com os elementos contendo ligações por entalhes múltiplos (finger-joints).

ABSTRACT

The work deals with experimental research developed to compare the use of wood glued-laminated (glulam) with fiberglass reinforcement with the usual finger-joint system.

The intrinsic wood characteristics are presented together with the characteristics of the composite material.

The literature review also shows the materials and techniques used to produce (glulam).

The experimental work composed the following steps : mechanical and physical characterization of the materials used (*Pinus taeda* and *Pinus elliottii*, phenol- formaldehyde resin and fiberglass tissue; tensile tests of the composite; and finally, flexural beam tests of the composite using 4 points-loading.

A theoretical study about the mechanical behaviour and design is also presented.

The main conclusion are presented together with a comparasion with composite beams wood of finger-joints.

SÍMBOLOS

CAPÍTULO I

- L** → direção longitudinal - paralela às fibras da madeira. ... direções
- R** → direção radial - paralela aos raios medulares. ... ortotrópicas
- T** → direção tangencial - tangente aos anéis de crescimento. ... da madeira

CAPÍTULO II

- | | |
|---|---|
| I → momento de inércia da seção transversal. | χ → coeficiente de correção da distribuição da tensão transversal para uma seção qualquer. |
| S ⇒ seção transversal. | δ → deformação de uma direção qualquer. |
| P' → carga auxiliar. | L → vão livre de uma viga. |
| M - M' → momento fletor da carga de serviço e de uma carga auxiliar. | S_i → seção transversal de uma lâmina. |
| N - N' → esforço axial da carga de serviço e de uma carga auxiliar. | t_i → distância entre o eixo de uma lâmina até o eixo neutro da seção transversal da peça. |
| V - V' → esforço cortante da carga de serviço e de uma carga auxiliar. | a → distância da carga atuante ao apoio da viga. |
| T - T' → momento torsor da carga de serviço e de uma carga auxiliar. | b → base da seção transversal. |
| G → módulo de elasticidade transversal. | d → altura da seção transversal. |
| I_{tor} → momento de inércia de torção. | E → módulo de elasticidade longitudinal. |

E_M → módulo de elasticidade devido a momento fletor.

\bar{X} → valor médio da amostra.

X_i → valor ordenado.

X_n → valor da amostra "n".

n → número de amostras.

s → desvio padrão da amostra.

σ → desvio padrão da população.

μ → valor médio da população.

C.V. → coeficiente de variação.

g_1 → medida de assimetria.

g_2 → medida de achatamento.

α → nível de significância.

CAPÍTULO III

H → teor de umidade da madeira.

M_h → massa da madeira à um teor de umidade "H".

M_0 → massa da madeira seca à $\cong 103^\circ\text{C}$.

M_v → massa volumétrica aparente à um teor de umidade "H".

V → volume da madeira.

τ_{pf} → tensão de cisalhamento paralela às fibras da madeira.

r_i → resíduos.

R_i → resíduo padronizado.

Z → distribuição normal.

t → distribuição de "Student".

E_r → erro relativo.

H_0 → hipótese à comprovar.

H_1 → hipótese alternativa.

GDL → graus de liberdade.

SQ → soma dos quadrados.

MQ → média quadráticas.

F → distribuição "F".

P → carga aplicada.

S_c → seção crítica.

σ_{cp} → tensão de compressão paralela às fibras da madeira.

S → seção transversal.

E_{Long} → módulo de elasticidade longitudinal.

a → distância da carga atuante ao apoio da viga.

L → vão entre apoios.

d → largura da seção transversal.

ϵ → deformação relativa.

l → distância entre apoios.

δ → flecha total.

h → altura da seção transversal.

b → largura da seção transversal.

I → momento de inércia.

σ_f → tensão de flexão.

σ_{tn} → tensão de tração normal às fibras da madeira.

σ_{tp} → tensão de tração paralela às fibras da madeira.

σ_{tp+fv} → tensão de ruptura da fibra de vidro em tração paralela às fibras da madeira.

E_M → módulo de elasticidade devido ao momento fletor.

VCA → vigas com reforço de tecido de fibra de vidro e posição de emenda de topo tipo "A".

VCB → vigas com reforço de tecido de fibra de vidro e posição de emenda de topo tipo "B".

VCC → vigas com reforço de tecido de fibra de vidro e posição de emenda de topo tipo "C".

VSA → vigas sem reforço de tecido de fibra de vidro e posição de emenda de topo tipo "A".

VSB → vigas sem reforço de tecido de fibra de vidro e posição de emenda de topo tipo "B".

VSC → vigas sem reforço de tecido de fibra de vidro e posição de emenda de topo tipo "C".

VFJ → vigas sem reforço de tecido de fibra de vidro e com emenda por entalhes múltiplos "finger-joints", com geometria de entalhes aconselhada para grandes esforços solicitantes conforme norma DIN 68 140^[16].

VSE → vigas sem reforço de tecido de fibra de vidro e sem emendas.

CAPÍTULO IV

H → teor de umidade da madeira.

M_h → massa da madeira à um teor de umidade "H".

M_0 → massa da madeira seca à $\cong 103^\circ\text{C}$.

M_v → massa volumétrica aparente à um teor de umidade "H".

V → volume da madeira.

τ_{pf} → tensão de cisalhamento paralela às fibras da madeira.

σ_{cp} → tensão de compressão paralela às fibras da madeira.

E_{Long} → módulo de elasticidade longitudinal.

σ_f → tensão de flexão.

σ_{tn} → tensão de tração normal às fibras da madeira.

σ_{tp} → tensão de tração paralela às fibras da madeira.

$\sigma_{\text{tp+fv}}$ → tensão de ruptura da fibra de vidro em tração paralela às fibras da madeira.

E_m → módulo de elasticidade médio.

VCA → vigas com reforço de tecido de fibra de vidro e posição de emenda de topo tipo "A".

VCB → vigas com reforço de tecido de fibra de vidro e posição de emenda de topo tipo "B".

VCC → vigas com reforço de tecido de fibra de vidro e posição de emenda de topo tipo "C".

VSA → vigas sem reforço de tecido de fibra de vidro e posição de emenda de topo tipo "A".

VSB → vigas sem reforço de tecido de fibra de vidro e posição de emenda de topo tipo "B".

VSC → vigas sem reforço de tecido de fibra de vidro e posição de emenda de topo tipo "C".

VFJ → vigas sem reforço de tecido de fibra de vidro e com emenda por entalhes múltiplos "finger-joints", com geometria de entalhes aconselhada para grandes esforços solicitantes conforme norma DIN 68 140^[16].

VSE → vigas sem reforço de tecido de fibra de vidro e sem emendas.

\bar{X} → valor médio da amostra.

X_i → valor ordenado.

X_n → valor da amostra "n".

n → número de amostras.

s → desvio padrão da amostra.

σ → desvio padrão da população.

μ → valor médio da população.

C.V. → coeficiente de variação.

g_1 → medida de assimetria.

g_2 → medida de achatamento.

α → nível de significância.

r_i → resíduos.

R_i → resíduo padronizado.

Z → distribuição normal.

t → distribuição de "Student".

E_r → erro relativo.

H_0 → hipótese à comprovar.

H₁ → hipótese alternativa.

GDL → graus de liberdade.

SQ → soma dos quadrados.

MQ → média quadráticas.

F → distribuição "F".

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

I . INTRODUÇÃO.

I.1 - Generalidades.

A madeira é certamente um dos mais antigos materiais de construção empregados pelo homem.

Em vários países desenvolvidos a madeira continua sendo o principal insumo para a construção de residências e pequenos edifícios. Contudo, por razões a serem abordadas mais adiante, no Brasil, a madeira é empregada apenas como um componente secundário na construção de habitações.

O Brasil possui uma grande extensão de reservas nativas, onde só a Amazônia brasileira cobre cerca de 340 milhões de hectares segundo FREITAS[1984]^[1], fazendo parte da maior reserva florestal tropical do planeta, tem-se também um grande potencial de produção das florestas plantadas (*Pinus* e *Eucalipto*). O Brasil apresentava-se, segundo FREITAS[1984]^[1], como o 3º ou 4º país reflorestador do mundo, através de incentivos fiscais que proporcionam um reflorestamento da ordem de 400 mil hectares por ano.

No entanto, a utilização da madeira como material para construção civil tem sido, via de regra, realizada de maneira ultrapassada e irracional, isso porque nem todos os que usam a madeira tem conhecimento das suas propriedades tecnológicas.

Esta situação deve-se também, em parte, à tradição dos nossos colonizadores portugueses, espanhóis e italianos que vindos de países mediterrâneos, apenas usavam cal, pedras e adobe. Tal é o preconceito que a orientação do principal órgão financiador da atividade da construção civil no país, o extinto Banco Nacional de Habitação (BNH) era o de promover casas de alvenaria, dificultando os financiamentos para as casas de madeira, segundo CASTRO et al [1986]^[2].

Altos níveis de poluição e diminuição do estoque de energia evidenciam a importância da capacidade produtiva dos sistemas naturais, bem como das florestas. Sua capacidade de absorver a poluição enquanto usam a energia solar para produzir biomassa tem dado às florestas, atualmente, um importante lugar na economia. Sua importância somente pode aumentar num mundo que está entrando numa escassez crítica de matéria prima.

Diante do esgotamento das florestas nativas pela exploração indiscriminada do material madeira, da crise energética prevista para o próximo século e da maturação dos plantios de reflorestamento, atingindo idades em torno dos 30 anos, abre-se uma ótima perspectiva para a entrada no mercado, da madeira proveniente de reflorestamentos.

Surge então, a necessidade de uma melhor utilização da madeira através do conhecimento adequado de suas propriedades tecnológicas, de forma a tirar o maior proveito das vantagens que ela apresenta como material de construção.

A decisão de utilizar o material madeira para compor os elementos de peças estruturais de construções em madeira, pode ser fundamental quando se tratar de estruturas que ficarão expostas a um meio corrosivo, ou então, quando existir o risco de incêndio, segundo SZÜCS [1991]^[6].

A madeira devido a sua grande inércia química, não apresenta problema de deterioração quando aplicada em meio corrosivo, logo, torna-se o material ideal para tal finalidade.

Quando se trata de construções sujeitas a risco de incêndio, a utilização da madeira na composição estrutural é aconselhada, pois a madeira que é um material de reação inflamável, queima rapidamente a camada superficial da peça e em seguida diminui consideravelmente a velocidade de propagação do fogo para o interior da mesma, segundo SZÜCS [1992]^[3], FREITAS [1986]^[5], SZÜCS [1991]^[6] e KUBLER [1980]^[7].

Isto porque, com a formação de uma camada de carvão nessa parte externa, o acesso de oxigênio para o interior da peça fica bastante dificultado e conseqüentemente a propagação do fogo perde a sua velocidade, o núcleo interno restante, é muitas vezes suficiente para resistir mecanicamente por cerca de 30 - 40 minutos, segundo SZÜCS [1992]^[3], tempo suficiente para evacuação da edificação.

Diante disso, é que se faz a diferença entre o comportamento da madeira e do aço, elemento normalmente utilizado nas ligações, representado principalmente por dois fatores. Estes fatores, que são determinantes, compreendem o comportamento do material diante da ação do fogo. São eles a: **reação ao fogo** e a **resistência ao fogo**.

- Pela **reação ao fogo** - Um material pode ser combustível ou incombustível. No caso de ser combustível, ele pode ser inflamável ou não inflamável. No caso da madeira ela é um material inflamável mas com baixo coeficiente de transmissão de calor.

- Pela **resistência ao fogo** - Vai-se restringir nosso estudo, à resistência mecânica. Se mede o tempo restante que um elemento estrutural pode continuar a suportar uma construção após a ação de um incêndio. No caso da madeira dimensionando-se seções transversais maiores, pelo fato de queimar rapidamente a camada exterior mantendo o interior íntegro capaz de resistir mecanicamente por um tempo necessário para a evacuação do prédio, diz-se que estruturas de madeira guardam "alta" resistência mecânica em presença do fogo.

Em vista destes dois fatores, de **reação ao fogo** e de **resistência ao fogo**, que são muito diferentes um do outro, pode-se dizer que um material não inflamável pode vir a ter uma resistência ao fogo quase nula, enquanto que um material inflamável, ao contrário, pode vir a ter uma excelente resistência ao fogo. Em resumo, as estruturas de madeira são consideradas de **reação inflamável** mas que guardam "alta" **resistência mecânica** em presença do fogo, segundo SZÜCS [1991]^[6].

Em termos comparativos de resistência ao fogo do material sobre os resultados de ensaios feitos no "Centre Scientifique et Technique du Bâtiment - CSTB"^{[6][15]}, apresenta-se a seguir a tabela I.01.

Ensaio de pilares submetidos à um carregamento de 10 toneladas	Duração da resistência ao fogo	
		Pilar de madeira maciça 0,15 x 0,15 x 2,30 m
Pilar sem proteção	52 minutos	8 à 10 minutos

Tabela I.01 - Diferença de comportamento entre a resistência da madeira e do aço quando submetidos à ação do fogo.

Isto nos leva a pensar em **privilegiar a boa resposta da madeira ao fogo** e por consequência investir na pesquisa e aplicação da madeira nas edificações, principalmente na parte estrutural.

A madeira é susceptível de destruição por agentes biológicos (biodeterioração), porém existem produtos químicos (preservativos), tais como os hidrosolúveis à base de cobre, cromo e arsênio (CCA) ou boro (CCB) que preservam a madeira após 30 anos de sua permanência em contato com o solo^[36] e até 40 anos se ao abrigo segundo técnicos da “ Associação Brasileira dos Preservadores de Madeira - ABPM “

Dentre as vantagens ligadas ao uso da madeira de reflorestamento está o fato de que este é um recurso material de fonte renovável, de baixo consumo energético para sua produção e que ainda possibilita a manutenção dos recursos florestais nativos, tão importante para a ecologia atualmente.

Sobre o consumo de energia na produção de material de construção, temos, em Kg equivalente de carvão (3.000 quilocalorias, com todos os rendimentos incluídos) os valores da tabela I.02^[1].

Para produzir uma tonelada de:	Consumo (Kg/carvão)
alumínio	4200
cal	1800
plástico	1800
aço	1000
vidro	700
cimento	260
tijolo cerâmico	140
bloco sílico-calcáreo	40
bloco de concreto	25
concreto simples	25
madeira	0,8

Tabela I.02 - Comparação dos valores do consumo de energia para produção dos principais materiais de construção

Por outro lado, em termos de comparação do comportamento mecânico da madeira com outros materiais, temos que para elementos estruturais previstos para mesma finalidade de uso, como por exemplo, uma viga de madeira e uma de aço, com massa que dê o mesmo **peso** para as duas, a viga de madeira possui o mesmo poder de resistência da viga de aço, segundo SZÜCS [1992]^[3].

De outra maneira, se for feita a comparação entre uma viga de madeira e uma de concreto, pode-se dizer que uma viga de madeira com o mesmo **volume** de uma viga de concreto armado comum, possui o mesmo poder de resistência, sendo no entanto, aproximadamente cinco vezes mais leve. Isto significa economia nas fundações.

Quanto à resistência mecânica, pode-se ressaltar a resistência mecânica da madeira por um outro parâmetro que se chama comprimento de auto-ruptura, que é o comprimento de uma barra de seção constante que se romperia pela ação do próprio peso, onde :

$$\text{comprimento de auto-ruptura} = \text{tensão de ruptura} / \text{densidade} \cdot \text{acel. da gravidade}$$

Podemos comparar a madeira com outros materiais, levando em conta seu peso e sua resistência, conforme tabela I.03^[1].

material	comprimento de auto-ruptura (Km)
acetato de celulose	75
cânhamo	40 a 75
linho	52 a 58
algodão	18 a 53
arame de aço duro	41
madeira de coníferas	11 a 30
madeira de dicotiledôneas	7 a 30
seda	25
bambu	10 a 35
arame de aço doce	7 a 10,8
aço de construção	6,7 a 8
cobre endurecido	4,7 a 5,4

Tabela I.03 - Comparação dos valores do comprimento de auto-ruptura de alguns materiais, com a madeira

Assim, enquanto que o comprimento de auto-ruptura do aço é 41 Km o da madeira é de 30 Km e o aço de construção é de até 8 Km. Assim, em termos de resistência/peso, a madeira é um dos materiais de construção mais resistentes que podemos encontrar, segundo FREITAS [1984]^[1].

O conhecimento de tais vantagens aliado ao emprego de novas técnicas de aplicação desse material nos sistemas estruturais, vem sendo empregado há décadas em vários países do hemisfério norte, notadamente nos que já tinham tradição no uso da madeira como material de construção. Logo, é preciso se pensar numa utilização que esteja vinculada à produção e exploração racional da madeira.

As desvantagens da madeira como material são a higroscopicidade, a combustibilidade, a susceptibilidade à deterioração biológica e a limitação quanto à forma e dimensão. No entanto, como vimos acima pode-se contornar estas desvantagens com o uso racional deste excepcional material de construção.

I.2 - Os compósitos.

Os materiais tradicionais empregados na construção em geral, vêm sofrendo nos últimos anos uma investigação minuciosa no sentido de se explorar de maneira racional as qualidades inerentes às suas características intrínsecas, no entanto, existe sempre o limite estabelecido pelas características inerentes a cada material.

No entanto, os avanços no sentido de ultrapassar esse limite, tem sido conseguido com a composição de dois ou mais materiais, objetivando melhorar as características negativas de uns com as características positivas de outras e vice-versa, resultando nos chamados materiais “compósitos”, segundo SZÜCS [1993]^[8] e BODIG e JAYNE [1982]^[9].

Os compósitos mais comuns são aqueles constituídos de dois materiais principais, um deles, geralmente de forma fibrosa, contínua ou descontínua, é disposto no interior do outro, chamado “matriz”.

Em se tratando de material compósito, é desejável que o material fibroso seja utilizado de maneira a proporcionar o reforço necessário ao conjunto, mas além disso que ele seja responsável pela absorção da maior parte do esforço aplicado. Portanto, é necessário que o seu módulo de elasticidade e a sua resistência mecânica, sejam nitidamente superiores às do material matriz, segundo SZÜCS [1993]^[8] e BODIG e JAYNE [1982]^[9].

Como exemplo, temos nos compósitos de fibra de vidro e resina, uma relação entre os módulos de elasticidade do reforço e da matriz, da ordem de 25, enquanto que em termos de resistência mecânica essa relação chega a ser de 40 a 60 vezes superior, a favor do material de reforço.

Os materiais fibrosos mais comumente utilizados na constituição dos compósitos são: o vidro tipo E, vidro R, carbono de módulo de elasticidade elevado ou de resistência mecânica elevada, silício, amianto, fibras orgânicas... Quanto ao material utilizado como matriz, os mais comuns são também variados como o alumínio, resinas do tipo poliéster, epóxica, fenólica, polipropileno, ou ainda, material do tipo elastômero, cerâmico, segundo SZÜCS [1993]^[8] e BODIG e JAYNE [1982]^[9].

Os compósitos são heterogêneos, anisotrópicos e ainda formados por camadas cujo comportamento difere umas das outras, a descrição matemática do comportamento físico e mecânico de um compósito, necessita na maioria dos casos, de um desenvolvimento mais complexo.

É portanto, fundamental conhecer-se o conjunto de propriedades físicas dos compósitos para com isso tentar prever, através de modelos matemáticos apropriados, as suas características mecânicas, segundo SZÜCS [1993]^[8] e BODIG e JAYNE [1982]^[9].

I.3 - O “compósito natural” madeira.

A partir da definição da constituição dos materiais compósitos, observa-se que o material madeira deve ele mesmo, ser considerado como um “compósito natural”, segundo SZÜCS [1993]^[8] e BODIG e JAYNE [1982]^[9].

A madeira, pela sua própria constituição anatômica, formada dentro do processo fisiológico de crescimento das árvores, possui a característica de ser:

- Um caso particular de material **anisótropo**, pois pela sua formação, a madeira tem praticamente 90% de suas fibras posicionadas segundo a direção preferencial do crescimento das árvores. Além disso, essas fibras são dispostas em camadas concêntricas formadas ao longo dos anos. Logo, a madeira é caracterizada por suas direções principais, definidas no seu processo de formação. São elas: a direção *longitudinal* ou *axial* que é a direção paralela à sua maior concentração fibrosa, portanto posicionada no sentido do crescimento da árvore; a direção *radial* que indica a direção que passa pelo raio do tronco e ainda, a direção *tangencial*, posicionada segundo um plano tangente aos anéis de crescimento da árvore.

Como essas três direções são ortogonais entre si (ver fig.I.01) diz-se que a madeira é um material “**ortótropo**” e como tal, possui características físicas e mecânicas diferentes em cada uma das três direções que foram formadas e orientadas naturalmente, dentro do processo fisiológico do crescimento das árvores. Ver figura representativa, apresentada por SZÜCS[1991]^[6]

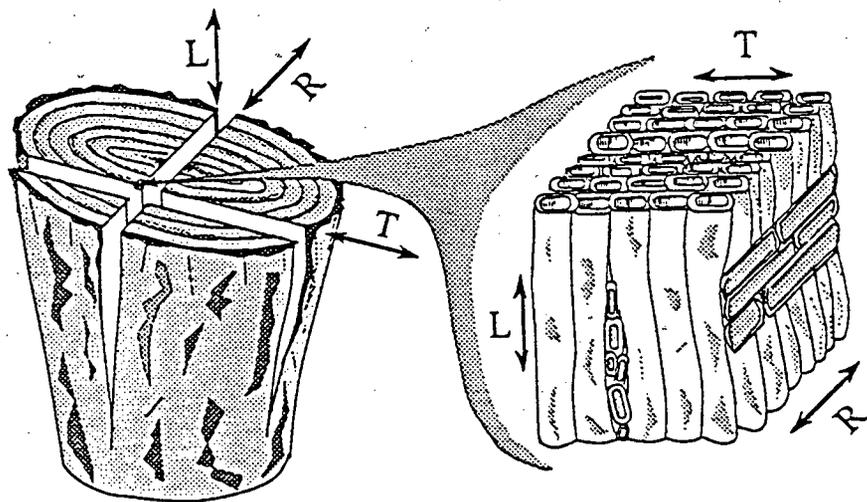


Fig. I.01 - Esquema da disposição das fibras dentro da madeira.

- Um material **heterogêneo**. Isto porque, pela sua formação ao longo do tempo, passa pelas estações do ano que conferem à madeira os chamados “anéis de crescimento”. Esses anéis reúnem elementos anatômicos que se formam de maneira diferente em cada faixa que corresponde à constituição da madeira numa determinada estação do ano.

Na primavera-verão, como existe maior quantidade de calor e luz na atmosfera, a madeira é formada mais rapidamente e expansivamente, logo, as suas fibras (tubos capilares) ficam com um diâmetro maior e de parede menos espessa, o que dá uma coloração mais clara e do ponto de vista mecânico, menos resistente.

Já no outono-inverno, a atmosfera passa a ser mais fria, a ter menos intensidade de luz e calor e com isso a madeira formada mais lentamente e de forma mais ordenada (fibras compactas), logo, as suas fibras ficam com um diâmetro menor e de parede mais espessa, o que denota uma coloração mais escura e que do ponto de vista mecânico, oferece maior resistência.

Além disso, pode existir em uma mesma seção transversal de um tronco de uma árvore, uma parte de madeira ainda porosa na forma de alburno e outra já com depósitos de resinas, gomas, óleos, taninos, etc, que é identificada como sendo o cerne da madeira. Nota-se então, que a madeira não possui a sua massa distribuída uniformemente em todo seu volume, ou seja, um material “**heterogêneo**”.

- Um material de comportamento **assimétrico**. Isto porque, pela sua própria constituição, se deforma e resiste mecanicamente de forma diferente conforme o sentido de solicitação, ou seja, seu comportamento não é o mesmo se a solicitação é de tração ou de compressão, e isto, segundo uma mesma direção. Logo, um material de comportamento “**assimétrico**”.

Devido a sua própria constituição interna, a madeira reúne as características de um material “**compósito**” e tem as suas direções preferenciais, ortogonais, que são definidas naturalmente dentro do processo fisiológico de crescimento das árvores, segundo SZÜCS [1993]^[8] e BODIG e JAYNE [1982]^[9].

I.4 - Os compósitos com a madeira.

A madeira é um material de resistência mecânica muito baixa na direção transversal às suas fibras, portanto pode-se pensar numa maneira de compô-la com um outro material fibroso, mesmo que não seja de forma a introduzi-lo no interior do seu próprio tecido fibroso, como estão os raios medulares, mas que de alguma forma, posicionado paralelamente ou cruzado com as fibras da madeira, venha a conferir uma maior resistência mecânica nessas direções, ou seja, venha a agir como um reforço.

Segundo trabalhos experimentais já realizados, a fibra de vidro adere perfeitamente à cola de resorcina-fenol-formol, e esta por sua vez faz uma perfeita ligação química clássica do tipo covalente e iônica entre os grupos de oxidrilas livres do adesivo e os grupos de oxidrilas livres das cadeias de celulose da madeira, através da formação de pontes de hidrogênio, segundo SZÜCS [1993]^[4]. É uma ligação bastante rígida e altamente resistente.

Na literatura encontra-se alguns trabalhos já realizados, estudando esta possibilidade de composição da madeira com a fibra de vidro, dentro da técnica do laminado-colado, a saber, são estes alguns :

- MOULIN^[6] (França), realizou estudos em elementos estruturais (vigas), reforçando a última linha de colagem com um tecido de fibra de vidro contínuo, ao longo do comprimento da peça, bem como estudos de caracterização deste tecido utilizado.

- SZÜCS [1991]^[6] (França), realizou estudos verificando a eficiência de conectores de madeira sendo reforçados na junção com tecido de fibra de vidro estudado por Moulin.

- MARTINS e SZÜCS [1994]^[34] (Brasil), realizaram estudos através de corpos de prova de tração transversal às fibras da madeira, do reforço com tecido de fibra de vidro, neste sentido cruzado às fibras da madeira.

- LARSEN e GUSTAFSSON [1994]^[20] (Dinamarca), realizaram estudos do reforço perpendicular às fibras da madeira com fibra de vidro.

I.5 - Objetivos.

I.5.1 - Objetivos gerais

O presente trabalho objetiva analisar o comportamento de elementos estruturais de madeira, através da possibilidade de reforçar as emendas, dentro da técnica do laminado-colado, substituindo os entalhes múltiplos que são utilizados na realização das emendas longitudinais das tábuas, pela aplicação do tecido de fibra de vidro.

Com isso pretende-se contribuir para a diminuição dos custos operacionais de produção desses elementos, pois sabe-se que a execução desses entalhes múltiplos é uma tarefa difícil e onerosa. Isto porque, necessita de equipamento caro e que deve estar sempre com o plano de corte perfeitamente afiado, além de operário especializado para operar o equipamento.

Portanto, se for possível substituir toda essa tarefa, pela simples colocação de dois pedaços de tecido de fibra de vidro, envolvendo uma emenda de topo, ganha-se tempo e dinheiro tornando viável a sua produção por indústrias do setor madeireiro de Santa Catarina.

Será portanto estudada a possibilidade de substituir os entalhes múltiplos que são de custo elevado para a sua preparação, por um reforço com dois pedaços de tecido de fibra de vidro, envolvendo uma emenda simplesmente de topo, como visto na fig.I.02.

Como o processo da madeira laminada-colada é pouco utilizado no Brasil, é evidente que estudos devem ser realizados no sentido de se proceder em cada região ou estado, uma investigação botânica, física e mecânica para a caracterização das madeiras que melhor possam se adaptar a essa técnica. Devem ter destaque nessa investigação, principalmente as madeiras de reflorestamento.

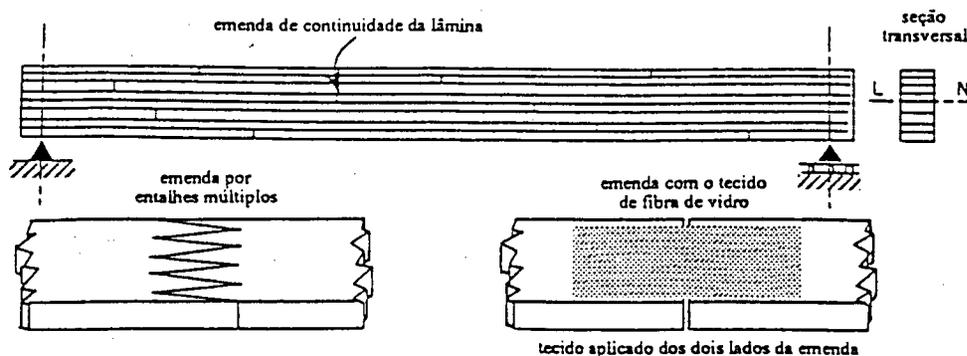


Fig. I.02 - Esquema da substituição da emenda por entalhes múltiplos (finger-joints) por uma emenda de topo reforçada por tecido de fibra de vidro.

I.5.2 - Objetivos específicos

- 1 - Através da análise dos dados experimentais, verificar o desempenho da resistência mecânica da emenda simplesmente de topo reforçada em ambos os lados em relação à emenda por entalhes múltiplos (finger-joint), e à própria madeira maciça.
- 2 - Fornecer um indicativo da área de ancoragem necessária de tecido de fibra de vidro a ser empregada no reforço da emenda simplesmente de topo.
- 3 - Fornecer um indicativo em qual posição na peça, o reforço tem um melhor desempenho.
- 4 - Fornecer uma referência que possa ser seguida pelas empresas que tiverem interesse de se lançar no mercado regional com a produção de elementos estruturais pré-fabricados de madeira laminada-colada, uma vez que o presente trabalho utiliza recursos materiais encontrados no estado de Santa Catarina.



CAPÍTULO II

**REVISÃO TEÓRICA E
BIBLIOGRÁFICA**

II . REVISÃO TEÓRICA E BIBLIOGRÁFICA.

II.1 - Formação da madeira

II.1.1 - Processo fisiológico

Como todas as plantas verdes, as árvores fabricam em suas folhas as substâncias para seu crescimento mediante o processo de fotossíntese. Este consiste em uma complexa reação química na qual, obtendo da luz solar a energia necessária, o dióxido de carbono do ar se combina com a água absorvida do solo para formar açúcares. Esta reação requer a presença de clorofila, substância verde que dá às folhas sua cor característica.

O dióxido de carbono passa diretamente ao interior da folha através de uns pequenos orifícios chamados estomas, mas a água deve realizar uma longa viagem desde o solo até o lugar de fabricação química, na folha. Entra no interior das raízes através dos pêlos capilares por osmose - fluxo de água que se forma desde uma solução de baixa concentração de sais, como a que há normalmente no solo, até outra solução de alta concentração de sais, como a das células dos pêlos. Logo, a seiva flui através do xilema, ou vasos lenhosos, até alcançar a parte superior da árvore.

A madeira tem outras importantes funções, além de conduzir a seiva. Proporciona à árvore a força mecânica necessária para sustentar o peso de sua copa e armazenar as substâncias nutritivas elaboradas pelas folhas. Estas substâncias são distribuídas, em forma de uma dissolução, desde as folhas a todas as demais partes da árvore pelo córtex interno, o floema, e podem ser utilizadas, imediatamente ou depois de um período de armazenamento, para formar novos tecidos.

A nova madeira é produzida por uma camada especializada de células chamada câmbio, que está situada entre o lenho e o floema, o líber. O câmbio rodeia as partes vivas da árvore e durante os períodos de crescimento ativo das células cambiais se dividem dando lugar a novas células lenhosas pela camada interna, e as células floemáticas pela camada externa; desta forma a madeira nova se superpõe ao núcleo de lenho pré-existente. Se alguma época do ano é pouco favorável para o crescimento devido ao frio ou a seca, o lenho se superpõe formando camadas estacionais de grossura distinta, que se reconhece a um simples olhar pelos anéis de crescimento a que dão lugar.

Na madeira de formação mais recente, chamada alborno, tem lugar duas importantes funções, a condução de seiva e o armazenamento de substâncias nutritivas. Não obstante, chega um momento em que a camada mais interna do alborno é deslocada da zona de crescimento ativo e morre e o conteúdo de suas células sofre transformações químicas, e as novas substâncias produzidas escurecem a madeira dando lugar ao cerne que se diferencia facilmente do alborno.

II.1.2 - Composição química

A madeira é composta de substâncias químicas orgânicas, originalmente produzidas pelos elementos anatômicos ativos da árvore, perto do câmbio. Na época do corte, entretanto, a maior parte da árvore não é de elementos anatômicos ativos. Em consequência, substâncias normalmente associadas aos elementos anatômicos ativos, tal como proteínas e outros materiais nitrogenados, estão praticamente ausentes na madeira. A composição da madeira é aproximadamente 50% carbono, 6% hidrogênio e 44% oxigênio, com um teor de cinza de 0,2 a 0,3% e nitrogênio de 0,1%, ou menos, segundo KUBLER [1980]^[7] e BODIG e JAYNE [1982]^[9]. O teor de cinza é um indicador dos constituintes minerais, que são principalmente cálcio, magnésio, carbonatos, óxidos, e, ocasionalmente, cristais de sílica.

Os constituintes orgânicos da madeira podem ser classificados como segue: 1- componentes das paredes dos elementos anatômicos, 2- substâncias estranhas, chamadas extratos. Os componentes da parede dos elementos anatômicos são os membros estruturais da madeira, e determinam predominantemente as propriedades físicas da madeira. Os extratos estão presentes na parede dos elementos anatômicos, mas na maioria das vezes prevalecem na cavidade dos elementos anatômicos ou em estruturas anatômicas especializadas, tal como vasos condutores e canais resiníferos. Embora não abundantes, os extratos podem causar importantes modificações nas propriedades físicas. Os extratos às vezes afetam o peso específico e a umidade, por isso indiretamente alteram certas propriedades físicas relacionadas.

Os componentes da parede dos elementos anatômicos podem ser classificados ou como carbo-hidratos ou fenóis. Todos os carbo-hidratos são essencialmente polímeros lineares (polissacarídeos), cerca de 75% da substância da madeira. A maioria dos fenóis são lignina, uma substância polímera tridimensional e complexa. A estrutura molecular da lignina ainda não é completamente entendida. Quando uma amostra de madeira é deslignificada em condições que retém os carbo-hidratos praticamente inalterados, o produto será a holocelulose. Esta deslignificação é diferente da maceração química, na qual a remoção da lignina raramente é completa. A maceração química também resulta na perda de algum material carbo-hidrato, e uma parte dos carbo-hidratos retidos é modificada. A holocelulose, ou fração de carbo-hidratos da madeira, pode ser separada, através de solução alcalina, em α -celulose e hemicelulose. (Para simplificar, a fração α -celulose é chamada de celulose).

A fração hemicelulose finalmente é composta por dois tipos de compostos químicos (xilose e manose), que diferem dependendo, se a origem é de conífera ou dicotiledônea, conceito descrito à frente. Substâncias pectinas formam um grupo menor de carbo-hidratos nos constituintes da parede do elemento anatômico. Porque as pectinas estão presentes em minoria e raramente são removidas por tratamentos químicos corriqueiros, elas muitas vezes são incluídas nos extratos. As dicotiledôneas, geralmente mais densas, contêm mais celulose que as coníferas, geralmente menos densas, (45% e 41%), e menos lignina (22% e 28%). Seu conteúdo de hemicelulose é aproximadamente igual - 30%. As dicotiledôneas são relativamente ricas em xilose, enquanto as coníferas contêm mais manose. Dicotiledôneas e coníferas são relativamente uniformes dentro de suas respectivas classes, mas umas poucas exceções ocorrem. O álamo, por exemplo, contém mais de 51% de celulose. Também a maioria das dicotiledôneas do clima tropical contêm 10% de lignina a mais que as do clima temperado.

II.1.3 - Conceção anatômica

As árvores comercialmente importantes são classificadas em dois grupos:

- a) **GINNOSPERMAS (CONÍFERAS)**, também denominadas de folhas perenes ou madeiras menos densas.
- b) **ANGIOSPERMAS (DICOTILEDÔNEAS)**, também chamadas de folhosas ou madeiras mais densas.

A terminologia mais comum é madeiras menos densas e madeiras mais densas. Isto, entretanto, é enganoso porque várias espécies de coníferas são na realidade mais densas que muitas das dicotiledôneas. Distinções entre os dois grupos, baseadas em características anatômicas, são mais precisas. Neste trabalho vamos nos ater ao estudo das chamadas **CONÍFERAS**, pelo fato que o material objeto da pesquisa provém desta classe de vegetais.

A madeira é um material **anisótropo**, como foi visto em I.3. Suas propriedades mecânicas não são idênticas em todas as direções. Devido ao fato de que, além do arranjo celular no tronco, também a constituição da própria parede celular obedece orientação bem definida, as propriedades físicas e mecânicas dependem do plano em que são consideradas. Dessa forma, são três os planos a serem considerados para o estabelecimento das propriedades da madeira: plano de topo, plano radial e plano tangencial.

A estrutura celular típica de uma conífera tem a maior porção do volume ocupado pelos traqueídeos com seus eixos longitudinais paralelos em relação ao eixo central da árvore. As seções transversais destes traqueídeos são substancialmente de dimensões diferentes em madeiras de formação inicial em contraste com madeiras finais. Os eixos longitudinais do raio medular são orientados na direção radial. O *raio da madeira* consiste de um agregado de células arranjadas em individuais ou múltiplas ordens. Estes agregados, algumas vezes visíveis a olho nu, abastecem a condução radial de fluídos e servem também como áreas para armazenagem de nutrientes para a vida da árvore.

A estrutura de algumas paredes de elementos anatômicos é de complexidade incomum. Por isso tipos diferentes de elementos anatômicos, como os traqueídeos e parênquimas apresentam organizações da parede diferentes. A madeira está formada por moléculas de celulose que se agregam para dar lugar a largas unidades, semelhantes a cordas, chamadas microfibrilas. Estas microfibrilas estão impregnadas de lignina e hemicelulose; as microfibrilas proporcionam à madeira sua resistência a tração por outro lado a lignina lhe confere a dureza.

A princípio, quando a célula acaba de ser formada pelo câmbio, possui uma parede primária formada por um agregado laxo de microfibrilas desordenadamente orientadas que permite que a célula siga crescendo. Ao crescer, pela parte interna da parede primária se deposita outra parede celular muito mais grossa; esta parede, geralmente, tem três camadas, segundo BODIG e JAYNE [1982]^[9] e JOHNSON [1986]^[10]. A camada interna e a externa são delgadas; a camada média é mais grossa e suas microfibrilas estão alinhadas compactamente ao longo do maior eixo da célula. As propriedades físicas e mecânicas da madeira dependem fundamentalmente desta grossa camada média da parede celular secundária. Em todos estes casos, contudo, as microfibrilas e outras substâncias estão organizadas em lamelas.

II.2 - Técnica da madeira laminada-colada

II.2.1 - Origem e evolução do emprego da madeira laminada-colada

Chama-se “Madeira Laminada-Colada - MLC” peças de madeira reconstituídas a partir de lâminas de madeira (tábuas), que são de dimensões relativamente reduzidas se comparadas às dimensões da peça final assim constituída. Essas lâminas, que são unidas por colagem, ficam dispostas de tal maneira que as suas fibras fiquem paralelas entre si segundo SZÜCS [1992]^[3]. A aplicação da madeira segundo o processo do laminado-colado reúne duas técnicas bastante antigas. Como o próprio nome indica, a madeira laminada-colada foi concebida a partir da técnica da colagem, (cujos representantes mais antigos foram encontrados em baús egípcios que usavam colas orgânicas), aliada à técnica da laminação, ou seja, da reconstituição da madeira a partir de lâminas (tábuas), técnica esta bem mais recente, remontando ao final do século XIX, introduzida pelo coronel Emy, segundo SZÜCS [1992]^[3].

No entanto, a junção das duas técnicas, para dar origem à **Madeira Laminada-Colada (MLC)** empregada na fabricação de elementos estruturais a serem utilizados na construção civil, só foi possível, com o surgimento de colas de alta resistência. Foi portanto, em 1906, com o aparecimento da cola de caseína (derivada do leite) que o mestre carpinteiro suíço **Otto Hetzer**^[3] teve a idéia de substituir pela cola, as ligações metálicas de braçadeiras e parafusos, utilizadas pelo coronel Emy. De acordo com SELBO e KNAUSS (1958)^[13], o registro mais antigo a respeito de construções de peças de madeira laminada-colada (MLC) encontra-se em uma publicação suíça de 1911. Trata-se de um auditório com mais de 40 metros de vão livre, construído em Basileia, para o encontro nacional de cantores. São arcos e vigas de MLC.

Daí para frente, a **MLC** evoluiu em paralelo com o progresso ocorrido com as colas, que foram se tornando cada vez mais eficientes. No entanto, foi em 1940, com o aparecimento das colas sintéticas que o sistema laminado-colado conheceu o seu grande progresso.

Esta técnica, que de alguma maneira surgiu também da necessidade de utilização da madeira de reflorestamento, basicamente formada por “*Pinus*” e que se apresentava em abundância em países principalmente europeus, teve nessa madeira de fácil trabalhabilidade e baixa densidade, a sua grande aliada.

Tendo esta tecnologia se desenvolvido na Suíça, difundiu-se rapidamente para países vizinhos como Alemanha, França, Holanda, entre outros. Indústrias importantes para fabricação de **MLC** se instalaram na Suécia no início da década de 1960, provavelmente em função da disponibilidade de madeira, segundo ZANDER [1979]^[13].

Como decorrência do avanço da **MLC** na Europa, sua introdução nos Estados Unidos da América foi apenas uma questão de tempo. Segundo o autor norte-americano MOODY^[13], em sua publicação de 1970, as primeiras edificações nos EUA onde foram utilizadas estruturas de MLC foram um edifício do Forest Products Laboratory (FPL), em Madison; um ginásio e um clube de danças, Wisconsin, em meados da década de 1930. Ressalta-se ainda a publicação do Boletim nº 1069 do FPL, redigido por SELBO e FREAS em 1954^[13]. Tal texto é considerado fundamental para grande expansão da indústria de MLC nos Estados Unidos, culminando com a criação do *American Institute of Timber Construction* (AITC), que fornece informações

uniformizadas a respeito da fabricação e construção em MLC, nos EUA. A partir de então, a MLC obteve dentro da engenharia uma notável aceitação como material alternativo e relevante. CHUGG (1964)^{[13][14]}, publicou um texto a respeito da fabricação da MLC. A AITC, em 1965, preparou e publicou um manual de construção em madeiras. Na França, o Centro Técnico da Madeira, publicou vários cadernos sobre MLC, como o “Étude technico-économique de l’aboutage”, CTBA(1973)^{[6][13][37]}. Na Inglaterra uma das maiores pesquisas começou com CURRY (1961)^[13]. Nos Estados Unidos a *American Society for Testing Materials* (ASTM), criou a norma ASTM -D3737(1983), que trata da determinação das tensões últimas de cálculo de estruturas de MLC. Surgiram então diversas normas em vários países sendo as mais importantes as normas alemãs (DIN 68 140^[16], DIN 68 141^[17]), norte-americanas (ASTM D 143-52^[18], ASTM D3737^[13] e AITC), britânicas (BS-5268^[13]) e canadenses (CSA 0122-77^[13], CSA 0177-77^[13]).

No Brasil, a primeira indústria de MLC foi a ESMARA Estruturas de Madeira Ltda., segundo ZANDER [1979]^[13], fundada em 1934 em Curitiba, Paraná, por alemães, que atualmente está sediada em Porto Alegre, Rio Grande do Sul. Surgiram outras pequenas indústrias em São Paulo e Curitiba. Quanto à pesquisa a respeito de MLC no Brasil, o engenheiro químico CALLIA(1961)^[13], do *Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo* (IPT), publicou um trabalho sobre MLC de Pinho do Paraná. A partir de então várias pesquisas vem sendo feitas em diversos centros de pesquisas, instituições e universidades, notadamente no IPT, Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira da Escola de Engenharia de São Carlos da *Universidade de São Paulo* (USP), Departamento de Engenharia de Estruturas da *Universidade Federal de Minas Gerais*(UFMG), Laboratório de Experimentação em Estruturas do Departamento de Engenharia Civil da *Universidade Federal de Santa Catarina* (UFSC).

II.2.2 - Constituição, descrição e métodos construtivos da madeira laminada-colada.

II.2.2.1 - Madeira

• Qualidade mínima da madeira

Dentre os vários critérios para avaliar a qualidade da madeira a ser empregada na fabricação de peças de madeira laminada-colada, CHUGG [1964]^[14] e ZANDER [1979]^[13] dão uma série de recomendações sobre os defeitos admissíveis e não admissíveis em produtos de madeira laminada-colada.

- Fendas e rachaduras: são permitidos defeitos paralelos à face da tábua até uma profundidade de $\frac{1}{4}$ da espessura. Rachaduras completas paralelas à tábua são permitidas até aproximadamente $\frac{1}{4}$ do comprimento da tábua.

- Empenamento: em arco até 1,3 cm a cada 30 cm .

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

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

- Manchas: são permitidas

- Apodrecimento: não é permitido.

- Concavidade: a máxima permitida é dada pela tab. II.01^[13].

Largura \ Espessura	101,60 mm ou menos	152,40 mm	203,20 mm ou mais
25,40 mm	1/32	1/16	1/8
50,80 mm	nenhuma	1/32	1/16

Tabela II. 01 - Valores da concavidade máxima permitida.

No entanto, nós achamos apropriado rever alguns itens, tais como a permissão de rachaduras e manchas, pois merecem um melhor estudo.

- Nós: nós sólidos e apertados, frouxos ou furos de nós são permitidos em qualquer lugar da peça sempre que as dimensões determinadas não ultrapassem a permitida de acordo com a largura da peça, dada pela tab. II.02^[13].

Largura da peça em (mm)	Nós em (mm)
101,60	41,275
152,40	66,675
203,20	88,90
254	114,30
304,80	139,70

Tabela II. 02 - Valores das dimensões de nós permitidos em função da largura da peça.

- inclinação das fibras: máxima permitida 1:8.

- Resistência da madeira

Há vários métodos para classificar a madeira: visual, através da densidade ou através do módulo de elasticidade. No entanto, para estimar a resistência da madeira somente através de ensaios de resistência do material.

- Espessura das lâminas

A espessura de cada lâmina depende do raio de curvatura a ser empregado, ou seja, quanto maior o raio de curvatura menor é a necessidade de se ter uma lâmina de pequena espessura. No entanto, é evidente que existe um limite em termos de espessura máxima para cada lâmina. Essa observação deve ser feita mesmo no caso da composição de vigas retas. Segundo as recomendações de normas como por exemplo a do Canadá, a espessura máxima das lâminas deve ser de 50mm^{[3][13]}. Já, a normalização norte-americana e suíça, recomenda uma espessura máxima de 20 a 25mm^[3]. Por outro lado, a recomendação da norma francesa leva em consideração, não só a espessura, mas também a área máxima que deve ter a seção transversal de cada lâmina. Neste caso, além de se considerar uma espessura máxima, existe igualmente uma limitação em termos da largura da seção transversal. A norma francesa^[3] recomenda então uma espes

sura máxima de 50mm, desde que se observe simultaneamente uma área máxima de 60cm² para seção transversal da lâmina de madeira de baixa densidade, ou seja, menor ou igual a 0,5 e de 40cm² no caso de madeira com densidade mais elevada, ou seja, acima de 0,5 e inferior a 0,75. Esse limite superior da densidade se deve à dificuldade de colagem de madeiras de alta densidade. Já, a recomendação de não ultrapassar a espessura de 50mm, além do fato de lâminas espessas apresentarem rigidez levada, está ligada também ao problema da secagem, pois acima desse valor torna-se mais difícil uma secagem uniforme, sem a ocorrência de certos defeitos.

- Teor de umidade

A secagem das tábuas é necessária, para se conseguir um melhor efeito na etapa de colagem. Nesse sentido, é preciso que as tábuas estejam com um teor de umidade entre 7 e 14%^[3]. No caso de se ter um ambiente não climatizado no local onde será realizada a colagem, esse teor de umidade da madeira pode estar compreendido entre 12 e 16%^[3]. De qualquer maneira, é importante que não haja uma diferença entre o teor de umidade de tábuas adjacentes, de mais de 5%^[3]. O mais aconselhável no entanto, é, após a saída da estufa, deixar as tábuas empilhadas e aeradas, no próprio ambiente onde vai ocorrer a colagem. Isto, para que haja uma estabilização do teor de umidade da madeira com o ar atmosférico. Feito isto, é normalmente suficiente esperar um período de quatro dias^[3], antes de se proceder a colagem, para que as tábuas atinjam uma boa uniformidade entre seus teores de umidade, segundo SZÜCS [1992]^[3].

- Preparação da superfície das lâminas

As tábuas devem ser passadas na desempenadeira de dupla face de ação, para uniformizar a espessura das mesmas. É necessário se obter uma superfície suficientemente lisa, sem deixar “pelugens”, queimas, ondulações, marcas oleosas de dedos (é aconselhável uso de luvas), etc, além disso, deve-se observar que se essa operação de serragem é executada no mesmo ambiente da colagem, é necessário limpar a poeira da superfície das tábuas, antes da aplicação da cola. É necessário também se observar um período de no máximo 48 horas entre a preparação das lâminas e a aplicação da cola.

- Posicionamento das lâminas

As lâminas devem ser colocadas de acordo com sua resistência, nas áreas mais solicitadas, através de classificação pelo seu “módulo de elasticidade”. Nas faces externas de uma viga, por exemplo, sobretudo nas lâminas tracionadas, deve-se utilizar a melhor madeira e, além disso, deve-se utilizar o melhor tipo de emendas transversais.

Devido a taxa de retração e inchamento no sentido radial serem diferentes ao tangencial, é recomendado não dispor lâminas juntas orientadas em sentido tangencial e radial dentro de uma mesma viga. Por esta mesma razão não é recomendável o uso de diferentes taxas de retração e inchamento. A espécie mais resistente causa danos a espécie mais fraca, reduzindo a resistência da viga, embora nenhum dano na linha de cola seja observado. Duas espécies podem ser utilizadas se o coeficiente de retração não variar mais que 25% entre elas, segundo ZANDER [1979]^[13].

II.2.2.2 - Emendas

No caso da composição dos elementos estruturais de madeira laminada-colada, uma das grandes vantagens, é trabalhar com lâminas cujo comprimento não está limitado pelas dimensões do tronco da árvore, e isto só é possível graças a execução de emendas longitudinais entre as tábuas. Presta-se então a técnica do laminado-colado sobretudo para execução de obras que necessitem vencer grandes vãos.

O início da utilização da técnica de ligação de peças por colagem de entalhes data do período da segunda guerra mundial. Durante os anos de 1939 à 1945 esta técnica foi utilizada nos Estados Unidos notadamente na fabricação de hélices para aviões, também na Alemanha a ligação por entalhes foi empregada na construção de pontes, segundo SZÜCS [1991]^[6]. Depois disso, a ligação por entalhes não parou de se aperfeiçoar.

Na época do surgimento da técnica da madeira laminada-colada eram executadas apenas emendas de topo, sem nenhuma garantia de continuidade, evoluíram para as emendas em diagonal, depois em cunha e atualmente as mais eficientes, que são as realizadas por entalhes múltiplos. A representação das mesmas é mostrada na fig. II.01^[3].

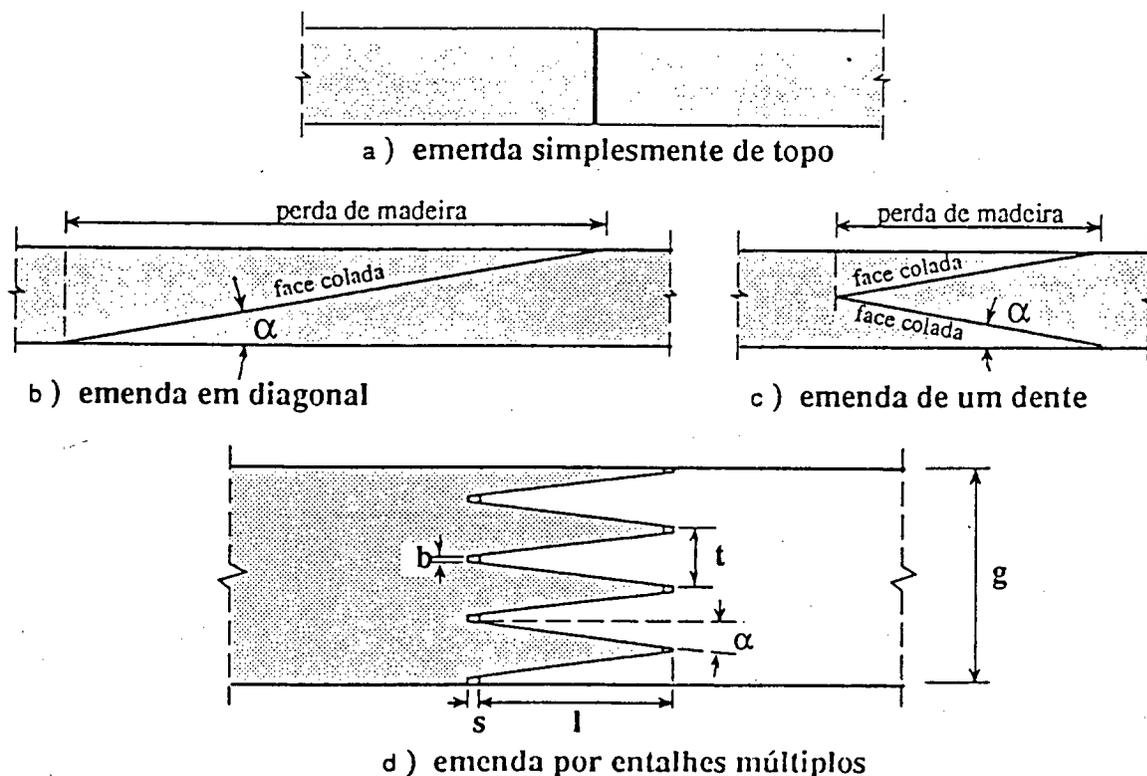


Fig. II.01 - Evolução ocorrida nas emendas longitudinais entre as tábuas.

A emenda por entalhes múltiplos, que aparece na fig. II.1-d tem as seguintes características geométricas, definidas pela norma DIN 68 140^[16]:

- l → comprimento dos entalhes.
- g → largura total da emenda.
- t → passo dos dentes.
- b → espessura da extremidade de um dente.
- s → folga do fundo da emenda.
- α → inclinação da face do dente.
- $e = \frac{s}{l}$ → folga relativa no comprimento da emenda.
- $v = \frac{b}{t}$ → grau de enfraquecimento.

Como a usinagem desses entalhes onera bastante o custo final do elemento estrutural fabricado em madeira laminada-colada, é possível se pensar em utilizar emendas simplesmente de topo nas regiões onde se sabe que os esforços são praticamente nulos. Como exemplo, pode-se citar a região da linha neutra de uma viga a ser submetida ao esforço de flexão simples. Por outro lado devido ao custo elevado para a usinagem desses entalhes, é necessário conhecer o grau de eficiência que os mesmos proporcionam, que depende da geometria e das dimensões desses entalhes conseguido através da proporção entre as dimensões da base dos dentes e o comprimento dos mesmos, conforme o grau de esforços a que será submetido.

No quadro da Tab.II.03^[16], são apresentados de forma resumida os valores recomendados pela norma alemã DIN 68 140 para a geometria dos entalhes múltiplos. Através do grau de enfraquecimento "v", o emprego dos entalhes múltiplos para aplicação de esforços elevados como nos elementos estruturais (**categoria I**) e de esforços menores como no exemplo de ligações empregadas em mobiliários (**categoria II**). Ainda essa norma DIN, prevê a pressão de colagem a ser empregada na emenda por entalhes múltiplos em função do comprimento dos entalhes e está apresentada no gráfico da fig.II.02^{[3][6][16]}. Este gráfico foi estabelecido pelo *Centre Technique du Bois e de L'Ameublement* - CTBA (França), com base na norma alemã. Relativo a resistência deste tipo de ligação, a norma DIN 68 140 prevê que a resistência ao cisalhamento nos flancos dos dentes deve ser maior ou igual a resistência à tração nas bases dos dentes.

$$\tau_{\text{cisal.}} \cdot S_{\text{cisal.}} \geq \sigma_{\text{traç.}} \cdot S_{\text{traç.}}$$

Essa relação proporciona uma geometria bastante equilibrada para os entalhes.

$$l \geq \frac{t}{2} \cdot \frac{1 - 2 \cdot v}{1 - e} \cdot \left(\frac{\sigma_{\text{traç.}}}{\tau_{\text{cisal.}}} \right) \text{ onde } \left(\frac{\sigma_{\text{traç.}}}{\tau_{\text{cisal.}}} \right) \Rightarrow \text{pela DIN 68 140} \cong 10$$

logo:

para $l \leq 10 \text{ mm} \rightarrow l \geq 3,6 \cdot t \cdot (1 - 2 \cdot v)$

para $l > 10 \text{ mm} \rightarrow l \geq 4,0 \cdot t \cdot (1 - 2 \cdot v)$

CATEGORIA	l	t	b	v
I e II	7,5	2,5	0,2	0,08
	10	3,7	0,6	0,16
	20	6,2	1	0,16
	50	12	2	0,17
	60	15	2,7	0,18
II	4	1,6	0,4	0,25
	15	7	1,7	0,24
	30	10	2	0,2

Tabela II. 03 - Características geométricas dos entalhes múltiplos.

A norma DIN 68 140^[16] recomenda uma pressão de colagem da ordem de:

12 N/mm² para $l = 10 \text{ mm}$

02 N/mm² para $l = 60 \text{ mm}$

em nenhum caso inferior a: 1N/mm².

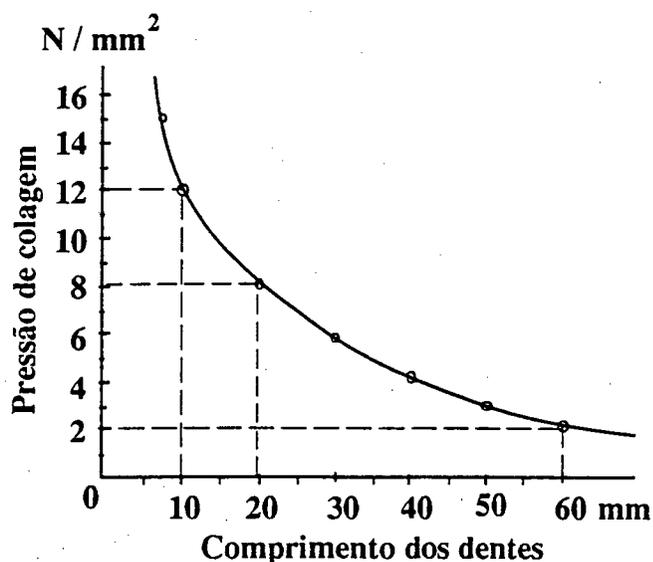


Fig. II.02 - Pressão de colagem em função do comprimento dos entalhes.

Uma vez usinados os entalhes múltiplos, é necessário se proceder a colagem dessa emenda longitudinal quase que imediatamente após a usinagem. Isto, para evitar variações na geometria dos dentes devido o movimento de retração ou inchamento da madeira. A cola empregada é a mesma da colagem entre as lâminas.

II.2.2.3 - Composição das lâminas com colas

Antes do desenvolvimento de resinas sintéticas para ligar madeiras, utilizava-se cola animal, vegetal e caseína de leite. Atualmente um número crescente de colas à base de resina sintética é disponível, seu uso melhora os produtos de madeira laminada-colada, sobretudo porque são à prova d'água, o que permite seu uso em compensados para uso externo, madeira laminada, pontes, barcos e outras peças expostas às intempéries. Os elementos estruturais compostos de madeira laminada-colada compreendem portanto a união das lâminas de madeira pela cola, através de uma ligação química clássica do tipo covalente e iônica que acontece entre o adesivo e os grupos químicos que formam a madeira. É uma ligação bastante rígida e altamente resistente, na fig.II.03^{[6][35]} tem-se o comportamento da ligação colada com outros tipos.

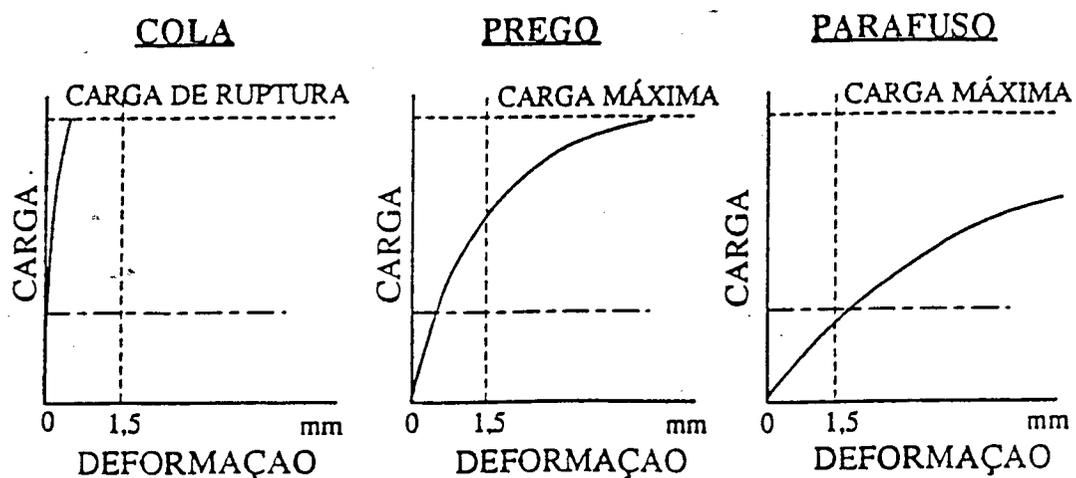


Fig. II.03 - Diagramas carga-deformação das ligações colada, pregadas e parafusadas.

O excelente comportamento das ligações químicas na composição das estruturas de madeira laminada-colada oferece:

- excelente característica mecânica pouco alterada em função da temperatura.
- boa resistência ao fogo, podemos constatar através da tab.II.04 dos resultados obtidos de ensaios realizados no “*Centre Technique du Bois e de L'Ameublement - CTBA*”^{[6][15]} com pilares em madeira maciça e madeira laminada-colada. Estes pilares foram expostos ao fogo num tempo análogo durante 35 minutos.

Corpo de prova (dimensões das lâminas)	Fração da seção destruída pelo fogo
Madeira maciça	52 %
Madeira laminada-colada de 10 mm [resorcina-formol]	49%
Madeira laminada-colada de 10 mm [caseína]	63%
Madeira laminada-colada de 10 mm [uréa-formol]	63%
Madeira laminada-colada de 17 mm [uréa-formol]	54%

Tabela II. 04 - Valores comparativos das colas empregadas no laminado-colado quando submetidas à ação do fogo.

Existem certos fatores envolvidos na produção da madeira laminada-colada, que não aparecem na construção convencional, são eles :

- preparação prévia da madeira a ser colada (corte e aparelhagem). O processo da laminação apresenta maior custo do que os sistemas convencionais .
- a fabricação de madeira laminada-colada necessita maior controle de qualidade, para reduzir a possibilidade de erros.
- devido ao fato da fabricação de madeira laminada-colada ser executada fora do canteiro de obras, as dimensões das peças ficam limitadas pelos meios de transporte.
- apresenta custo elevado do adesivo
- pode-se salientar a ruptura frágil por cisalhamento sem avisar.

Existe um grande número de colas sintéticas com diferentes fórmulas comerciais. Com finalidade estrutural, as colas mais comumente empregadas são: caseína, uréa-formol, resorcina-formol e resorcina-fenol-formol. Na maioria dos casos a escolha da cola, entre as de caseína, resorcina, resorcina-fenol-formol, uréa-formol, etc, depende mais das condições de uso da estrutura do que do tipo da madeira. Logo, é preciso levar em consideração principalmente o meio a que a estrutura vai estar submetida, ou seja temperatura e teor de umidade. Logo, tomando por base estudos realizados em laboratórios de países europeus e também norte-americanos, vemos na tab.II.05^[3], que a escolha da cola deve ser feita em função do tipo de uso previsto para a estrutura.

	boas condições atmosféricas	más condições atmosféricas	
	umidade da madeira		exposição em atmosfera contendo produtos químicos ou exposição direta às intempéries
	< 18 %	≥ 18 %	
temperatura elevada	resorcina caseína	resorcina	resorcina
temperatura normal	resorcina caseína uréa-formol	resorcina uréa-formol	resorcina

obs: As colas de resorcina-fenol devem oferecer as mesmas condições das colas de resorcina pura. Na dúvida, devem ser realizados ensaios de laboratório.

Tabela II. 05 - Escolha da cola em função do tipo de uso previsto para a estrutura.

A madeira laminada normalmente é colada sob pressão. Nas peças fletidas (retas ou curvas), as lâminas são coladas na posição horizontal. Contudo, as lâminas podem ser pregadas ou unidas pela combinação de cola e pregos, segundo SZÜCS [1992]^[3] e ZANDER [1979]^[13]. Em peças retas submetidas à flexão, as lâminas podem ser coladas na posição vertical, segundo ZANDER [1979]^[13]. No caso de utilização da cola de resorcina, o consumo é de aproximadamente 300 a 500g/m² com aplicação nas duas faces das lâminas. Uma vez as lâminas estando coladas e justapostas, dando portanto a composição e conformação do elemento estrutural, a aplicação da pressão de colagem deve seguir o que recomenda o fabricante da cola. No entanto, estudos realizados em alguns países, mostram que para a cola de caseína, a França e a Suíça recomendam uma pressão entre 5 e 8Kg/cm². Para a cola de uréa-formol, a França recomenda 7 a 10Kg/cm² no caso de junta fina e 3 a 5Kg/cm² no caso de junta espessa. Para a cola de resorcina, os norte-americanos recomendam uma pressão de 13Kg/cm² e os franceses entre 15 e 17Kg/cm². Já, o Canadá recomenda a aplicação de 7Kg/cm² em todos os casos.

Quanto à fabricação de elementos estruturais de madeira laminada-colada, no próprio canteiro de obra, empregando uma pressão de colagem, através do uso de pregos, deve-se ter os seguintes cuidados : a madeira esteja com um teor de umidade entre 12 e 15% , os pregos tenham comprimento de duas vezes a espessura das lâminas. A pressão deve se dar na base de um prego para cada 20cm² de superfície colada, segundo SZÜCS [1992]^[3].

II.2.3 - Composição da madeira laminada-colada com o tecido de fibra de vidro

II.2.3.1 - O tecido de fibra de vidro

Encontramos no trabalho de MOULIN^{[6][8]} a caracterização de um tecido de fibra de vidro do tipo unidirecional, identificado por UC 420-791(da empresa Sotiver de Lyon-França). Segundo os ensaios por ele realizados, essa fibra adere perfeitamente à cola de resorcina-fenol-formol. Cola essa, largamente utilizada nas indústrias de madeira laminada-colada. Algumas características desse tecido fibroso, mostrado esquematicamente na fig.II.04^[8], são as seguintes :

Trata-se de um tecido de fibra de vidro(tipo E). Nota-se uma disposição de mechas grossas e finas na direção principal que são mantidas juntas por uma amarração de fios transversais. A espessura média do tecido em seu estado natural é de 0,55 mm e a distribuição de sua massa por unidade de área é de 420 g/m². Pode-se observar ainda na sua composição, a presença de 3,5 mechas grossas + 4 finas por centímetro de largura do tecido e 2 fios de amarração, por centímetro de seu comprimento.

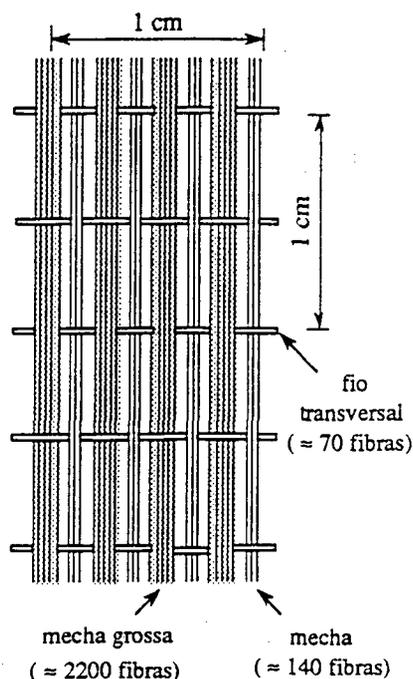


Fig. II.04 - Representação esquemática do tecido de fibra de vidro.

Cada fio é composto por cerca de 70 fibras e cada mecha fina possui 2 fios, ou seja, 140 fibras. Por outro lado, cada mecha grossa é composta pelo equivalente a 31,5 fios, ou seja, 2200 fibras. Sabendo ainda que o diâmetro de cada fibra é da ordem de $16 \mu\text{m}$ e que a massa de 1 metro de uma mecha fina é de 70 mg pode-se deduzir que a massa volumétrica da fibra de vidro é de $2,5 \text{ g/cm}^3$, enquanto que a massa volumétrica aparente do tecido de fibra de vidro é de $0,76 \text{ g/cm}^3$.

Finalmente, sabemos que os ensaios realizados por MOULIN^{[6][8]} em tração paralela às fibras desse tecido unidirecional de fibras de vidro, caracterizaram o material com os seguintes valores:

- módulo de Young $\rightarrow E_{fv} = 40200 \text{ MPa}$
- tensão de ruptura $\rightarrow \sigma_{fv} = 920 \text{ MPa}$

Segundo CIPRIANI [1992]^[19], a fibra de vidro (E-Glass), possui densidade de $2,6 \text{ g/cm}^3$, expansão máxima de 20 a 35%, diâmetro de 8 a $15 \mu\text{m}$ e resistência a temperatura máxima de 800°C , caracterizaram o material com os seguintes valores:

- módulo de Young $\rightarrow E_{fv} = 75000 \text{ MPa}$
- tensão de ruptura na tração $\rightarrow \sigma_{fv} = 2000 \text{ a } 4000 \text{ MPa}$

Segundo LARSEN e GUSTAFSSON [1994]^[20], a fibra de vidro (E-Glass), possui densidade de $2,7 \text{ g/cm}^3$, caracterizaram o material com os seguintes valores:

- módulo de Young $\rightarrow E_{fv} = 100 \text{ GPa}$ ou 101970 MPa
- tensão de ruptura $\rightarrow \sigma_{fv} = 1,50 \text{ GPa}$ ou $1529,55 \text{ MPa}$

II.2.3.2 - Madeira laminada-colada com fibra de vidro

Tendo em vista a conhecida eficiência das estruturas de madeira laminada-colada e a perfeita aderência da fibra de vidro com a cola de resorcina, é possível imaginar a combinação de lâminas de madeira (tábuas) com um tecido de fibra de vidro disposto no interior das juntas de cola. Essa combinação, onde o tecido de fibra de vidro fica disposto paralelo ou cruzado com as fibras da madeira, dá ao produto final o que SZÜCS [1993]^[8] denominou em seu estudo “*compósito de madeira laminada-colada reforçada com fibra de vidro - MLCR*”, ver fig.II.05. Primeiramente, é necessário compreender o tratamento dado aos compósitos quando solicitado segundo a direção onde o reforço foi introduzido.

Para isso vamos relembrar, da própria definição dos materiais compósitos, que já foi mencionado em I.2., e que é o seguinte:

Em se tratando de material compósito, é desejável que o material fibroso seja utilizado de maneira a proporcionar o reforço necessário ao conjunto, mas além disso que ele seja responsável pela absorção da maior parte do esforço aplicado. Portanto, é necessário que o seu módulo de elasticidade e a sua resistência mecânica, sejam nitidamente superiores às do material matriz.

No caso deste compósito, estamos diante de uma composição onde SZÜCS [1993]^[8] reforçou a madeira com um tecido de fibra de vidro que possui características mecânicas muito superiores às da madeira, principalmente se for considerada a baixa resistência da madeira em sollicitação normal às fibras.

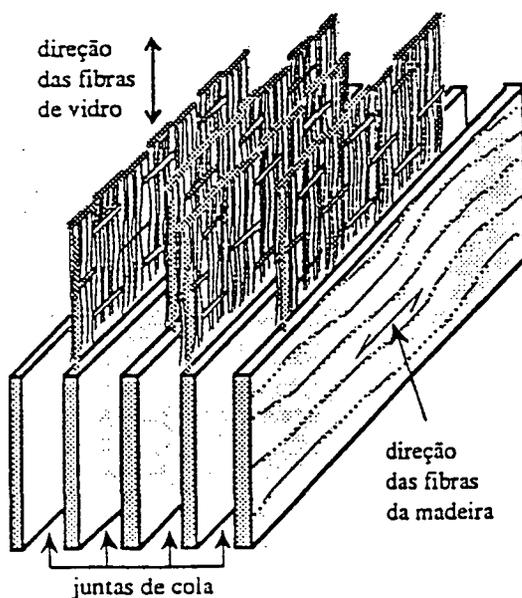


Fig. II.05 - Representação esquemática da madeira com reforço de tecido de fibra de vidro.

II.2.3.3 - Recomendações e cuidados a serem observados na fabricação da Madeira Laminada-Colada

No que diz respeito à composição de um elemento estrutural de madeira laminada-colada, deve-se observar que é recomendável se respeitar a seguinte distribuição das emendas no interior da peça, segundo SZÜCS [1992]^[3]:

- considerando as lâminas mais externas, ou seja, que se encontram na quarta parte externa da altura da seção transversal da peça, deve-se espaçar as emendas de continuidade de lâminas vizinhas de no mínimo 20 vezes a espessura da lâmina.
- na metade central da altura da peça o espaçamento entre emendas de lâminas vizinhas deve ser de no mínimo 12 vezes a espessura da lâmina.
- num comprimento de 305mm o número de emendas não deve ser superior ao número total de lâminas, dividido por 4.

Durante o processo de colagem, é necessário se observar também o tempo de “colagem aberta” e o tempo de “colagem fechada”.

- tempo de colagem aberta, é o tempo entre a aplicação da cola na lâmina e a sua colocação em contato com a adjacente.
- tempo de colagem fechada, é o tempo entre a colocação da lâmina em contato com a adjacente e a aplicação da pressão de colagem.
- tempo total, compreende o tempo decorrido desde a aplicação da cola na primeira lâmina até o momento da aplicação da pressão de colagem.

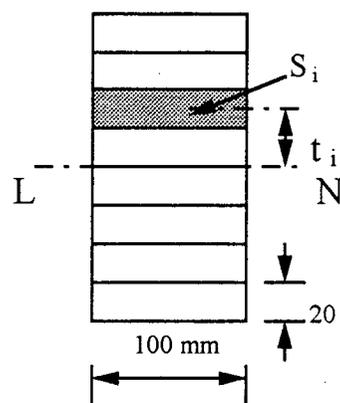
O tempo de colagem aberta deve ser reduzido ao mínimo uma vez que nessas condições a cola seca rapidamente devido a evaporação do solvente. O tempo total, depende evidentemente da cola empregada. Não deve, por exemplo, no caso da resorcina, ultrapassar uma hora. Isto, considerando um tempo máximo de colagem fechada, da ordem de 45 minutos. Uma vez aplicada a pressão de colagem, deve-se aguardar um período de 16 a 24 horas, para retirada da pressão. Essa retirada da pressão deve ser feita de forma gradual em toda a extensão do elemento estrutural, ou seja, não deve ser brusca e nem localizada.

Uma vez retirada a pressão de colagem, é necessário aguardar um período de sete dias, antes de se proceder o acabamento final do elemento estrutural. Este período é necessário para que a cola atinja a sua resistência máxima, após a sua polimerização. A etapa final de preparação do elemento estrutural, compreende o acabamento. Nessa etapa, a peça é aplainada lateralmente, tem as extremidades recortadas para dar a sua forma final, assim como, são realizados os furos e entalhes necessários para as ligações entre peças e também entre a peça e o apoio. O aspecto final depende do produto empregado como proteção fungicida e inseticida, assim como, da aplicação de produtos de impregnação decorativa.

II.2.4 - Comportamento mecânico experimental do elemento estrutural

II.2.4.1 - Peças submetidas à flexão simples

É importante conhecer o módulo de elasticidade de cada lâmina para se obter uma distribuição racional das lâminas no interior da peça. Deste modo, se coloca as lâminas de módulo de elasticidade mais elevado mais distantes do eixo neutro. Para uma viga composta de 8 lâminas, como nós utilizamos, vemos que a inércia das quatro lâminas mais distantes do eixo neutro representam 87,5% da inércia total da seção.



$$I_{\text{total}} = \sum_{i=1}^8 I_i$$

ou : $I_i = I_0 + S_i \cdot t_i^2 \rightarrow$ inércia de cada lâmina por razão ao eixo neutro da seção total.

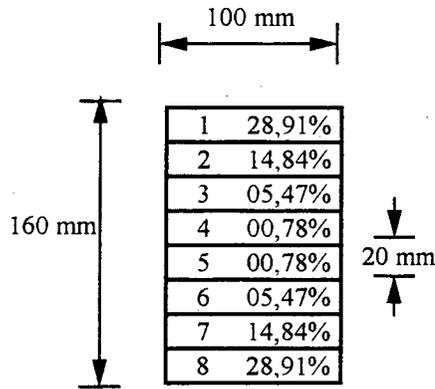
$I_0 \rightarrow$ inércia de uma lâmina por razão de seu próprio eixo neutro.

$$1 = \frac{I_1}{I_t} + \frac{I_2}{I_t} + \dots + \frac{I_7}{I_t} + \frac{I_8}{I_t}$$

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

Fica evidente que as lâminas de módulo de Young mais elevado em "1" - "2" - "7" - "8" contribuíram no melhoramento da rigidez final da viga. Isto se calcula pela soma da rigidez de cada lâmina.

$$E_t \cdot I_t = \sum_{i=1}^8 (E_i \cdot I_i)$$



• Concepção geométrica de vigas para o ensaio mecânico de flexão

No equilíbrio da viga submetida a ensaio de flexão. (Princípio d'Alembert) ou seja, aplicando uma carga auxiliar (P') na direção onde se deseja conhecer o deslocamento (δ) provoca-se um trabalho de forças externas que nada mais é do que ($P' \cdot \delta$). Este trabalho deve ser equilibrado pelo trabalho dos esforços internos que representam a resistência do material em termos de momento fletor, esforço normal, esforço cortante e momento torsor.

$$W_{\text{ext}} = W_{\text{int}}$$

Com isso chega-se à expressão estabelecida por "Mohr" que representa o equilíbrio entre o trabalho das forças externas e dos esforços internos.

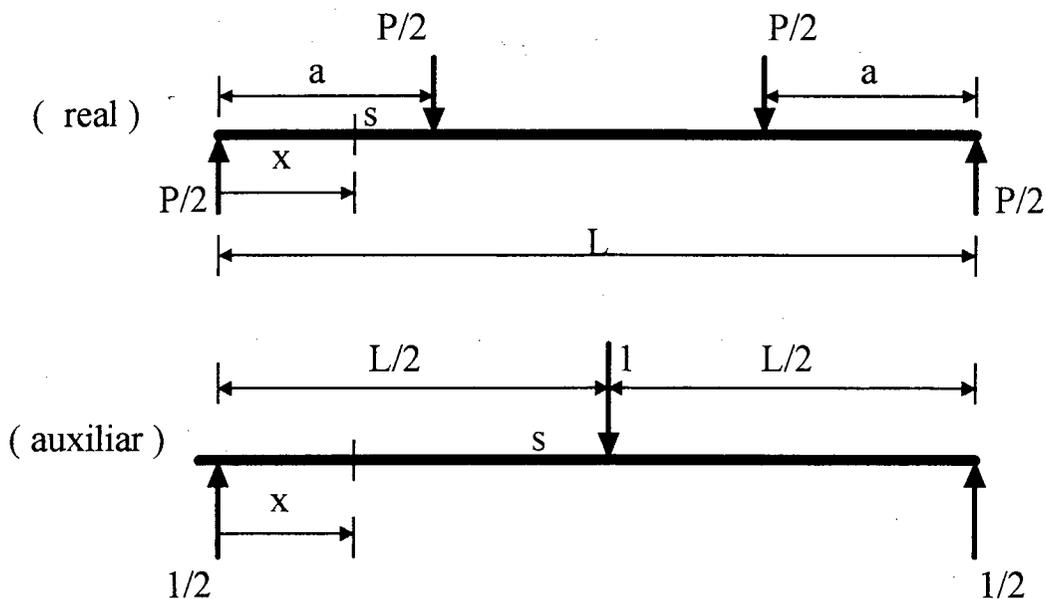
$$P' \cdot \delta = \int_L \frac{M \cdot M' dx}{E \cdot I} + \int_L \frac{T \cdot T' dx}{G \cdot I_{\text{tor}}} + \int_L \frac{N \cdot N' dx}{E \cdot S} + \chi \cdot \int_L \frac{V \cdot V' dx}{G \cdot S} \quad (\dots \text{II.01})$$

equação mais simplificada do que pode ocorrer numa viga, onde :

P' → carga auxiliar (para simplificar = 1).
 δ → deslocamento procurado (flecha).
 $M - M'$ → momento fletor (real - auxiliar).
 $T - T'$ → momento torsor (real - auxiliar).
 $N - N'$ → esforço axial (real - auxiliar).
 $V - V'$ → esforço cortante (real - auxiliar).
 E → módulo de elasticidade longitudinal.
 G → módulo de elasticidade obtido do cisalhamento.

I → momento de inércia.
 I_{tor} → momento de inércia de torsão.
 S → seção transversal.
 χ → coeficiente que representa a distribuição da tensão de cisalhamento em função da geometria da seção transversal (para seção retangular $\chi = 1,2$)^[6].

Assim, caso se deseje conhecer a flecha de uma viga submetida à flexão à 4 pontos, se utiliza um sistema auxiliar com uma carga unitária aplicada ao centro desta.



Com a expressão de “Mohr” calcula-se a flecha “ δ ” no meio do vão, tendo em vista o que ocorre nos intervalos “0” e ”a”, depois “a” e “L/2”, depois “L/2” e “L-a” e “L”, observar que neste caso não se tem esforço normal e nem torção, se faz o equilíbrio das forças para uma seção “S” para determinar os esforços internos “M” e “V” para aplicar a expressão (...II.01) onde “N” e “T” são nulos.

onde se tem :

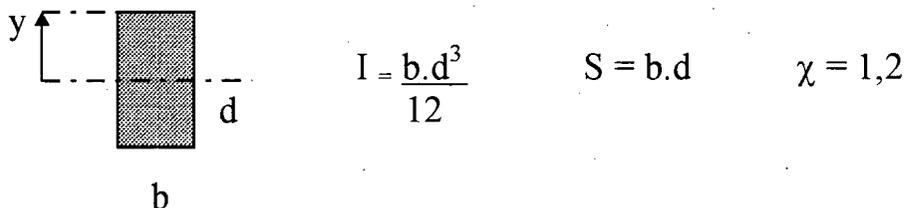
$$1.\delta = \frac{P}{4.E.I} \left[\int_0^a x^2 dx + a \int_a^{L/2} x dx + a \int_{L/2}^{L-a} (L-x) dx + \int_{L-a}^L (L-x)^2 dx \right] + \frac{\chi.P}{4.G.S} \left[\int_0^a dx + \int_{L-a}^L dx \right]$$

resultando finalmente :

$$\delta = \underbrace{\frac{P.a}{48.E.I} [3.L^2 - 4.a^2]}_{\text{(devido ao momento fletor)}} + \underbrace{\chi \cdot \frac{P.a}{2.G.S}}_{\text{(devido ao esforço cortante)}} \quad (... II.02)$$

(devido ao momento fletor) (devido ao esforço cortante)

Para uma seção retangular :



Sabe-se ainda que para o material madeira, segundo BODIG e JAYNE [1982]^[9], pode-se considerar que a relação :

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

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

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

Para extrairmos a equação representativa considerando apenas o momento fletor (M), basta excluir da equação (...II.03) o valor "9,6", que nada mais é do que a parcela pertinente a contribuição do esforço cortante, resultando a seguinte equação.

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

Isto nos permite escrever a expressão que representa E_M dentro do total em função do comprimento/altura da viga, fazendo a relação E_M/E das expressões (... II.03) e (... II.04).

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

Isto nos permite, traçar o gráfico mostrado na fig. III.13. De onde obtem-se a relação (L/d) aconselhada para as dimensões da viga, da mesma maneira, o afastamento "a", posicionando as cargas (P/2) das extremidades dos apoios, a fim de que a parcela correspondente ao cisalhamento durante a fase de ensaio, seja a menor possível na contribuição da flecha, e por consequência no módulo de elasticidade. Assim sendo, podemos tirar a interferência mínima do esforço cortante, tanto na flecha quanto no módulo de elasticidade. □

CAPÍTULO III
EXPERIMENTAÇÃO
BÁSICA

III . EXPERIMENTAÇÃO BÁSICA.

III.1 - Introdução

O uso diário da madeira para múltiplas propostas fizeram manifestar uma contínua falta de dados sobre suas propriedades físicas e mecânicas. A grande variedade de espécies, a variabilidade do material, a contínua troca de suprimentos, e muitos fatores que afetam os resultados dos ensaios, combinando-se para fazer a técnica dos ensaios de madeira única em sua complexidade.

A norma brasileira que trata de métodos de ensaio para caracterização física e mecânica da madeira é a antiga MB-26^[12], hoje identificada como NBR-6230, e que é a mesma desde 1940, trata a madeira segundo a teoria clássica da resistência dos materiais, apenas com alguns casos particulares de adequação ao comportamento peculiar deste material. Atualmente esta norma esta sendo reformulada.

No entanto, nós não adotamos integralmente as metodologias de ensaio descritas nesta norma, tendo em vista que, ela não se mostra adequada em alguns ensaios específicos ao fiel propósito deste trabalho, o qual é, caracterizar o material utilizado. Para exemplificar, no caso do ensaio de tração paralela às fibras da madeira, a NBR-6230, nada indica, no ensaio de cisalhamento paralelo às fibras da madeira o método adotado por esta norma, usa forças opostas, com alguma excentricidade, sendo discutível seu desempenho por FERREIRA e FUSCO [1993]^[23]. Faz-se então, necessário adotar metodologia de ensaio de outras normas.

A NBR-6230 adota a metodologia de ensaio de flexão a 3 pontos, ou seja, com carga centrada, onde o momento máximo se concentra num ponto. No entanto, pela própria anatomia da árvore, a ruptura pode não ocorrer neste ponto, se deslocando, devido a presença de um defeito natural por exemplo. No entanto, adotando-se a metodologia de ensaio de flexão a 4 pontos, onde a carga é distribuída em dois pontos aumenta-se a área do diagrama de momento fletor e também a probabilidade da ruptura ocorrer neste intervalo.

Resumindo, utilizou-se a norma brasileira NBR-6230(MB-26) como um referencial, entretanto, no caso de alguns ensaios específicos, ou pela referida norma ser omissa ou pela metodologia não ser considerada a mais adequada, utilizou-se metodologia de normas internacionais ou na falta, metodologia própria.

III.2 - Objetivo

Estes métodos abordam ensaios de pequenos corpos de prova de madeira e de modelos de tamanho pouco reduzido que são feitos para dispor-se em:

Terceira etapa : Ensaios de análise do comportamento dos elementos estruturais (vigas), ver fig.III.15.

- Ensaio de flexão simples a quatro pontos de vigas com reforço de tecido de fibra de vidro e composição de emenda de topo tipo “A”, ou seja, duas emendas de topo na última camada de lâminas.
- Ensaio de flexão simples a quatro pontos de vigas com reforço de tecido de fibra de vidro e composição de emenda de topo tipo “B”, ou seja, duas emendas de topo na penúltima camada de lâminas.
- Ensaio de flexão simples a quatro pontos de vigas com reforço de tecido de fibra de vidro e composição de emenda de topo tipo “C”, ou seja, uma emenda de topo na última camada de lâminas e duas emendas de topo na penúltima camada de lâminas.
- Ensaio de flexão simples a quatro pontos de vigas sem reforço de tecido de fibra de vidro e composição de emenda de topo tipo “A”, ou seja, duas emendas de topo na última camada de lâminas.
- Ensaio de flexão simples a quatro pontos de vigas sem reforço de tecido de fibra de vidro e composição de emenda de topo tipo “B”, ou seja, duas emendas de topo na penúltima camada de lâminas.
- Ensaio de flexão simples a quatro pontos de vigas sem reforço de tecido de fibra de vidro e composição de emenda de topo tipo “C”, ou seja, uma emenda de topo na última camada de lâminas e duas emendas de topo na penúltima camada de lâminas.
- Ensaio de flexão simples a quatro pontos de vigas sem reforço de tecido de fibra de vidro e com emenda por entalhes múltiplos “finger-joints”, aconselhada para grandes esforços solicitantes pela norma DIN 68 140^[16].
- Ensaio de flexão simples a quatro pontos de vigas sem reforço de tecido de fibra de vidro e sem emendas.

- dados de comparação das propriedades mecânicas das duas espécies de madeira analisadas,
- dados para o estabelecimento das corretas funções de resistência as quais, em conjunto com o resultado dos ensaios de madeiras em tamanhos estruturais, servirão de base para fixar resistências admitidas, e
- dados sobre os quais determina-se a influência sobre as propriedades mecânicas dos fatores físicos tais como densidade, teor de umidade, anéis de crescimento, idade, etc.

Tudo isso com o objetivo de caracterizar física e mecanicamente o material utilizado neste trabalho. Em posse dos dados faz-se um tratamento estatístico, obtendo-se desta forma constatações que possibilitem a análise final, que deverá constar das considerações finais deste trabalho, e posteriormente ser colocado como um referencial que possa ser consultado pelas empresas que tiverem interesse de se lançarem no mercado, com a produção de elementos pré-fabricados de madeira laminada-colada, bem como de pesquisadores da área.

III.3 - Programação dos ensaios

Os materiais encaminhados ao LEE/ECV, foram utilizados como corpos de prova para os ensaios estabelecidos previamente, através de um programa de ensaios experimentais. Esse programa de ensaios experimentais, estabeleceu os ensaios necessários para a devida caracterização física e mecânica dos materiais, bem como, a análise do comportamento mecânico destes materiais, de acordo com os objetivos propostos neste trabalho. Para tanto, esse programa de ensaios experimentais foi dividido em três etapas distintas, a saber, que são:

Primeira etapa : Ensaios de caracterização física e mecânica das madeiras de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*.

- Ensaios físicos;

- Ensaio de teor de umidade e massa volumétrica

- Ensaios mecânicos;

- Ensaio de cisalhamento paralelo às fibras da madeira
- Ensaio de compressão paralela às fibras da madeira
- Ensaio de flexão simples
- Ensaio de tração normal às fibras da madeira
- Ensaio de tração paralela às fibras da madeira

Segunda etapa : Ensaio de caracterização mecânica do reforço de fibra de vidro.

- Ensaio de tração paralela às fibras da madeira

III.4 - Materiais utilizados

III.4.1 - A madeira

Toda a madeira utilizada na etapa de ensaios experimentais é proveniente dos plantios de reflorestamento próprios da empresa *Battistella Ind. e Com.* do município de Lages, no planalto da Serra Geral do estado de Santa Catarina, com quase 100 milhões de árvores em área superior a 70 mil hectares. Estes reflorestamentos tem idades em torno de 20 anos, sendo constituídos basicamente por duas espécies de coníferas, comercialmente falando, a saber, *Pinus elliottii* que representa cerca de 30% dos plantios da empresa e *Pinus taeda* que representam cerca dos 70% restantes. Botanicamente falando a classificação vegetal^[25] das duas espécies é a que segue:

<u><i>Pinus elliottii</i></u>		<u><i>Pinus taeda</i></u>	
Reino	vegetal	Reino	vegetal
Divisão	Gymnospermae	Divisão	Gymnospermae
Classe	Coniferophyta	Classe	Coniferophyta
Ordem	Pinales	Ordem	Pinales
Família	Pinaceae	Família	Pinaceae
Gênero	<i>Pinus</i>	Gênero	<i>Pinus</i>
Espécie	<i>Pinus elliottii</i>	Espécie	<i>Pinus taeda</i>

As duas espécies são originárias da América do Norte, mais precisamente do sul e leste dos Estados Unidos. Neste país o *Pinus taeda* atinge altura de 10,5 metros com idade de 20 anos, culminando com 27,5 a 33 metros de altura, entretanto o *Pinus elliottii*, não atinge tal porte, sendo considerado uma árvore de pequeno porte. A importação das primeiras mudas e plantio pela empresa Battistella Ind. e Com. ocorreu há cerca de 30 anos, com propósito de fornecer pasta de celulose, não havendo portanto um controle genético mais qualitativo em termos de defeitos naturais como nós, fendas, buracos, etc.

As duas espécies se adaptaram bem às condições climáticas da região serrana de Santa Catarina que possui um clima semelhante ao da região de origem, ou seja clima subtropical de altitude, com verões amenos e temperatura média anual de 18°C, solo basáltico e índice pluviométrico em torno de 1000 mm anuais bem distribuídos durante o ano, sem ocorrência de estação seca. No entanto, em pesquisa de VAN DER SLOOTEN [1976]^[26] a respeito da densidade de madeiras de plantios de *Pinus elliottii* no sul do Brasil, conclui que o principal fator envolvido na qualidade da madeira para fins construtivos em termos de densidade é a quantidade de chuvas ao longo do ano.

A empresa encaminhou ao LEE/ECV da Universidade Federal de Santa Catarina um primeiro lote de 0,390m³ de madeira das duas espécies, destinado aos ensaios de caracterização física e mecânica do material, após um segundo lote de 6,03 m³, destinados a produção dos elementos estruturais (vigas), somente da espécie *Pinus taeda*. Totalizando 6,42m³ ≅ 6,5m³ de madeira, destinados a suprir o material necessário para este trabalho e mais dois

outros em andamento, deste total 20% foi pedido para atender eventuais defeitos e perdas. No entanto, neste trabalho foram utilizados $2,25396\text{m}^3 \cong 2,25\text{m}^3$ de madeira. Estes lotes seguiram instruções de coleta e desdobro do material previamente estipuladas, servindo de base para coleta e armazenamento, a metodologia adotada pela norma norte-americana ASTM D 143-52^[18].

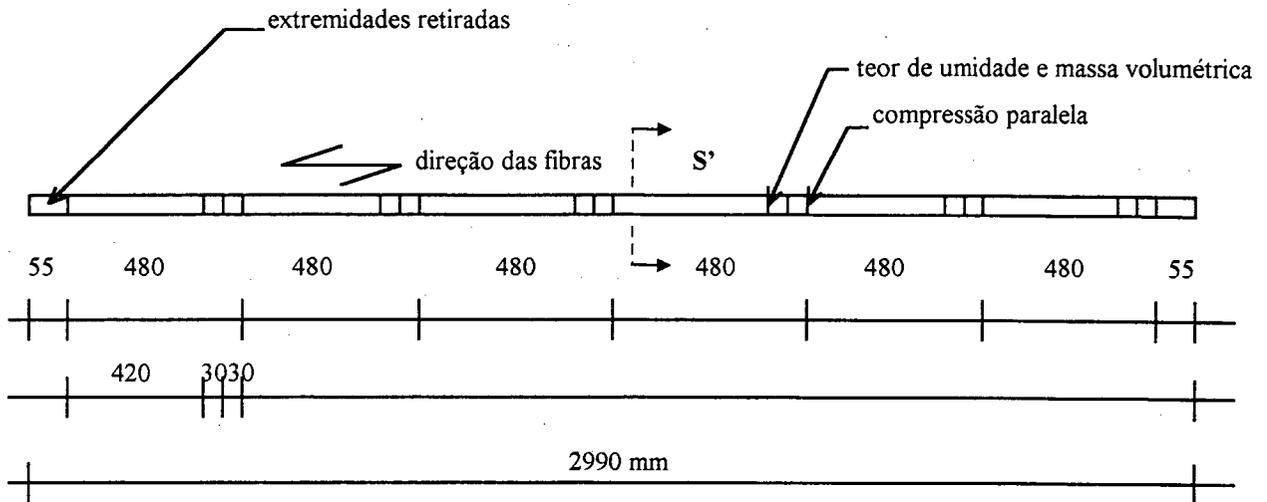
A madeira foi coletada de pelo menos cinco árvores de cada espécie e de locais diferentes dentro da área de plantio, para ser representativo. O material para cada espécie selecionada para o ensaio foi representativo do tronco comercializável da árvore, sendo retirado de alturas diferentes, para dispor informação sobre a variação das propriedades com a altura na árvore. O material já veio devidamente desdobrado, emparelhado e identificado de acordo com as especificações prévias. As dimensões e quantidades das peças foram estipuladas de acordo com as dimensões dos corpos de prova dos ensaios programados.

A estocagem foi feita no próprio LEE, protegido do sol e chuva, livres de contato com o solo e sob condições ambientais naturais (temp. $\cong 23^{\circ}\text{C}$ e umid. rel. $\cong 67\%$), acompanhados com um “termo-higrômetro digital Engro HD-820”. A madeira apresentava-se na chegada com um teor de umidade médio de 12%, medido através de um “medidor de teor de umidade de madeira DL-822 Digi-System com resolução 0,1% e leitura direta com aproximação de décimos”. Antes de se proceder a retirada dos corpos de prova, todas as peças foram marcadas com um número identificando: a espécie, a peça, posição dentro da peça, a sequência de retirada e o tipo de ensaio.

As extremidades das peças foram retiradas, não sendo aproveitadas, por estarem sujeitas a maior retração e defeitos ocasionados pelo transporte, sendo utilizado somente o material restante para a retirada dos corpos de prova. No caso, das lâminas ou (tábuas), estas foram previamente identificadas de acordo com a posição na composição do elemento estrutural. A madeira encaminhada ao LEE/ECV não foi tratada com produtos preservativos. É mostrado a seguir a metodologia adotada de retirada dos corpos de prova do material encaminhado pela empresa Battistella Ind. e Com. ao LEE/ECV.

- Ensaio de teor de umidade, massa volumétrica e compressão paralela às fibras da madeira;

Foram encaminhadas ao LEE/ECV, **doze (12) peças, seis (06)** por espécie, com o objetivo de suprir os corpos de prova para os ensaios de teor de umidade, massa volumétrica e compressão paralela às fibras da madeira. Os corpos de prova foram retirados intercalados, conforme o ensaio para permitir uma maior aleatoriedade na coleta do material e para representar o material de alturas diferentes do tronco, conforme o esquema de retirada a seguir;



SEÇÃO TRANSVERSAL (S') DA PEÇA

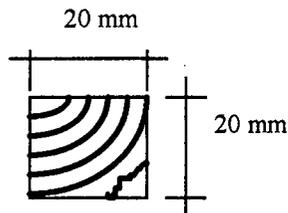
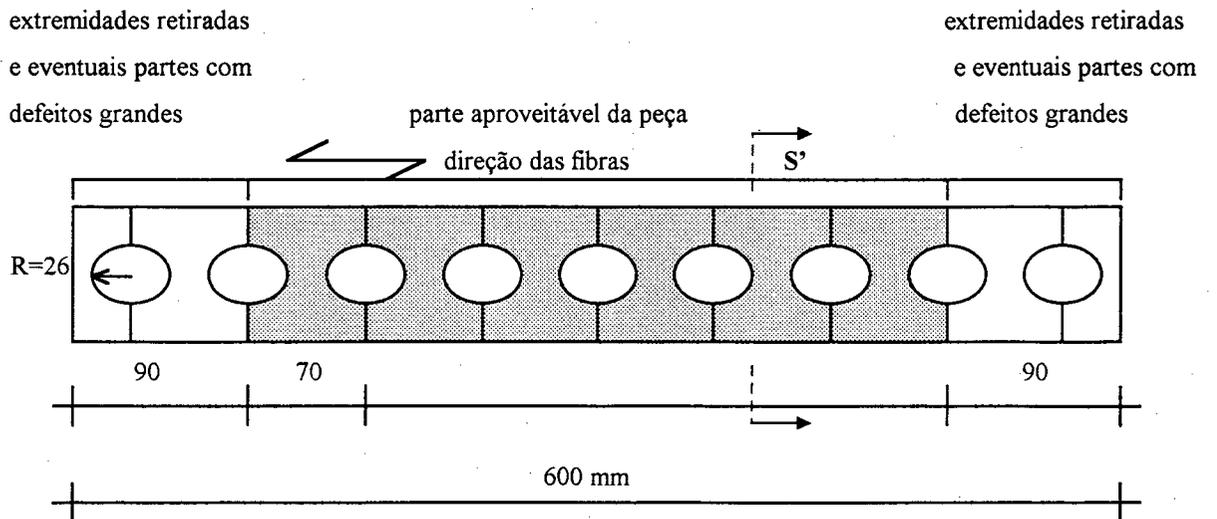


Fig.III.01 - Esquema de retirada dos corpos de prova.

- Ensaio de tração normal às fibras;

Foram encaminhadas ao LEE/ECV, **doze (12) peças, seis (06)** por espécie, com o objetivo de suprir os corpos de prova para o ensaio de tração normal às fibras da madeira, conforme o esquema de retirada a seguir;



SEÇÃO TRANSVERSAL (S') DA PEÇA

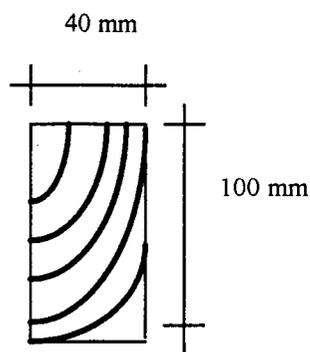
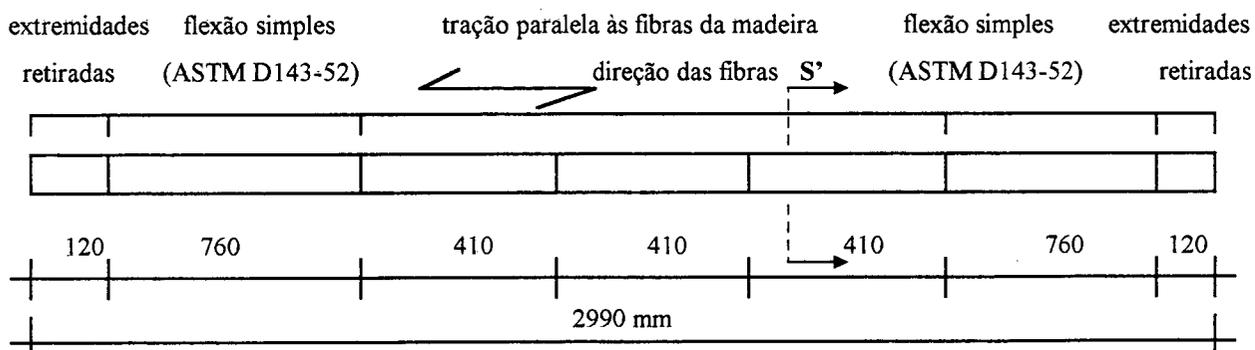


Fig.III.02 - Esquema de retirada dos corpos de prova.

- Ensaio de tração paralela às fibras e flexão simples (ASTM D 143-52);

Foram encaminhadas ao LEE/ECV, doze (12) peças, seis (06) por espécie, com o objetivo de suprir os corpos de prova para o ensaio de tração paralela às fibras da madeira e de flexão simples (ASTM D143-52), conforme o esquema de retirada a seguir;



SEÇÃO TRANSVERSAL (S') DA PEÇA

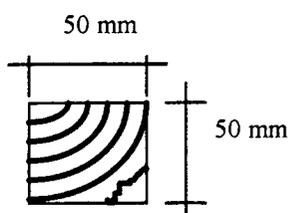
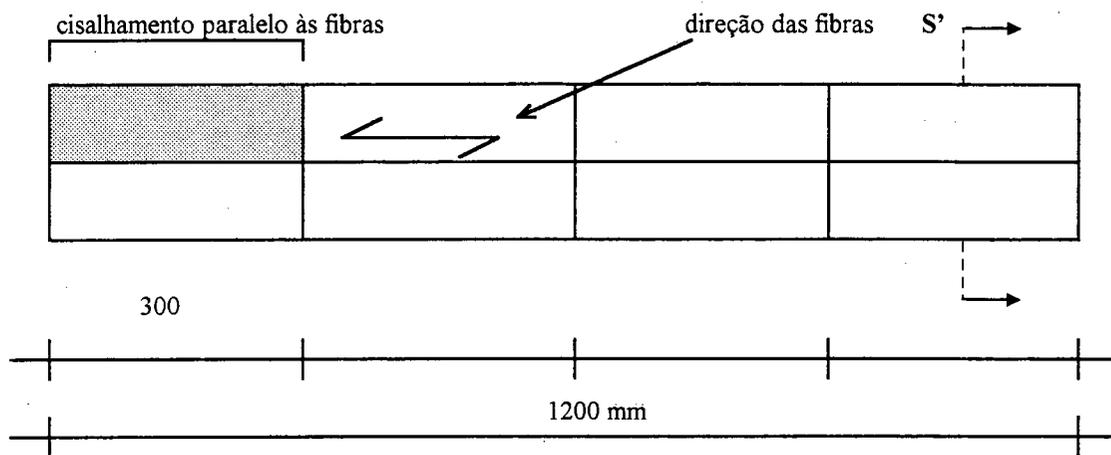


Fig.III.03 - Esquema de retirada dos corpos de prova.

- Ensaio de cisalhamento paralelo às fibras ;

Foram encaminhadas ao LEE/ECV, **doze (12) peças, seis (06)** por espécie, com o objetivo de suprir os corpos de prova para o ensaio de cisalhamento paralelo às fibras da madeira, conforme o esquema de retirada a seguir;



SEÇÃO TRANSVERSAL (S') DA PEÇA

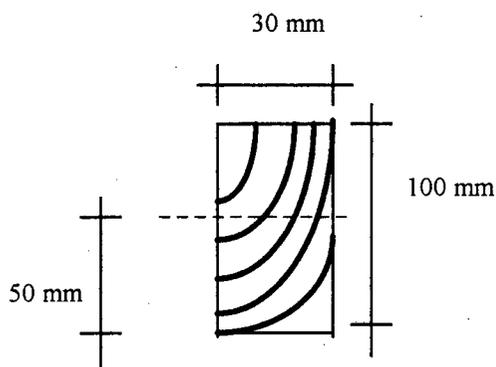
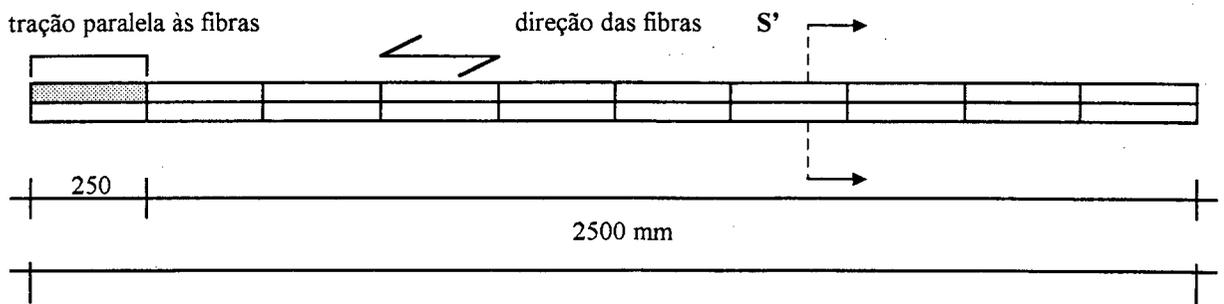


Fig.III.04 - Esquema de retirada dos corpos de prova.

- Ensaio de caracterização mecânica do reforço de fibra de vidro ;

Foram encaminhadas ao LEE/ECV, **dezesesseis (16) peças, oito (08)** por espécie, com o objetivo de suprir os corpos de prova de tração paralela às fibras da madeira, para o ensaio de caracterização mecânica do reforço de fibra de vidro, conforme o esquema de retirada a seguir;



SEÇÃO TRANSVERSAL (S') DA PEÇA

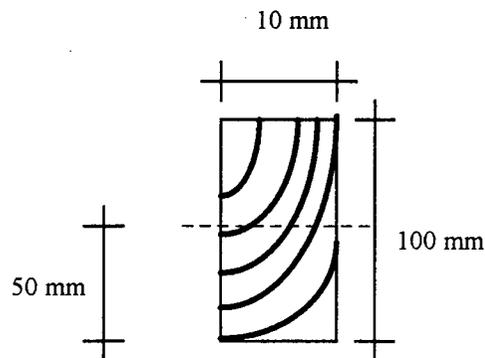


Fig.III.05 - Esquema de retirada dos corpos de prova.

- Ensaio de análise do comportamento dos elementos estruturais (vigas) ;

Para os ensaios de análise do comportamento dos elementos estruturais (vigas), foram encaminhadas ao LEE/ECV, trezentos e trinta e seis (336) lâminas com as seguintes dimensões : 20 x 120 x 2650 mm, para compor os elementos estruturais com e sem reforço de tecido de fibra de vidro, bem como, com e sem emenda de topo, todas da mesma madeira de *Pinus taeda*. Após a composição dos elementos estruturais as dimensões finais foram : 20 x 100 x 2650 mm.

III.4.2 - O adesivo

O adesivo utilizado nesta etapa de ensaios experimentais foi fornecido pela *Alba química Ind. e Com. Ltda* sediada no município de Cotia no estado de São Paulo. O adesivo é do tipo resorcina-fenol-formol cujo nome comercial é CASCOPHEN, popularmente conhecido por “cola naval”, devido à suas propriedades impermeabilizantes. É constituído da mistura de duas partes, a saber, a resina CASCOPHEN RS-216-M e o pó endurecedor FM-60-M, o fabricante recomenda a proporção de mistura de 20 partes por peso do endurecedor para 100 partes por peso de resina.

Adotou-se a proporção de mistura dos componentes recomendada pelo fabricante, na etapa de colagem das lâminas constituintes dos elementos estruturais. Segundo recomendações de técnicos da empresa Battistella Ind. e Com. a quantidade “usual na linha de produção da empresa” de adesivo por “m²” é de 400g/m². No entanto, devido à condições ambientais no local de confecção dos elementos estruturais - LEE (temperatura elevada 30±5°C e teor de umidade relativa do ar de 70±5%), o que ocasiona evaporação rápida da resina e consequentemente secagem rápida da resina em aberto, ver II.4.3.3., bem como, do processo utilizado para passagem do adesivo, feito manualmente com pincéis, utilizou-se uma quantidade de adesivo de 500g/m², que é também recomendada pela literatura, mantendo-se, no entanto, a proporção de componentes indicada pelo fabricante, ou seja, 20 partes por peso de pó endurecedor (100 g) e o restante de resina fenólica (400g), ver II.2.2.3.

III.4.3 - O tecido de fibra de vidro

Foram utilizados tecidos de fibra de vidro de dois fabricantes, nos ensaios experimentais. O primeiro foi fabricado no Brasil, pela empresa *Owens Corning* sediada na cidade de São Paulo, (SP). O segundo foi fabricado na França, pela empresa *Sotiver* na cidade de Lyon, identificado por UC 420-791. Ambos, são tecidos de fibra de vidro do tipo unidirecional, com fibra de vidro do tipo “E”. No entanto, ocorrem diferenças nas características destes dois tecidos fibrosos.

O tecido de fibra de vidro francês, segundo o trabalho de MOULIN^{[3][6]}, apresenta espessura média do tecido em seu estado natural de 0,55 mm e a distribuição de sua massa por unidade de área é de 420g/m². É composto por 3,5 mechas grossas mais 4 mechas finas por centímetro de largura do tecido na sua direção principal e 2 fios de amarração transversais, por centímetro de seu comprimento, ver fig.III.01.b. Cada fio é composto por cerca de 70 fibras e cada mecha fina possui 2 fios, ou seja, 140 fibras. Por outro lado, cada mecha grossa é composta pelo equivalente a 31,5 fios, ou seja, 2200 fibras. O diâmetro de cada fibra é da ordem de 16µm e a massa de 1 metro de uma mecha fina é de 70mg, de onde se deduz que a massa volumétrica da fibra de vidro é de 2,5g/cm³, enquanto que a massa volumétrica aparente do tecido de fibra de vidro é de 0,76 g/cm³. Através de ensaios de tração paralela às fibras, obteve-se os seguintes valores que caracterizam o material:

- módulo de elasticidade → = 40200 MPa
- tensão de ruptura → = 920 MPa

O tecido de fibra de vidro nacional, segundo o análise em microscópio ótico LABOVAL 4 - Carl Zeiss/Jena com aumento de 400 vezes e uso de câmara clara, no Laboratório de botânica do curso de biologia da Universidade Federal de Santa Catarina é composto por 4,33 mechas por centímetro de largura do tecido na sua direção principal e 2 fios de amarração transversais, por centímetro de seu comprimento, ver fig.III.01.a. Cada mecha é composta por aproximadamente 1410 fibras. O diâmetro de cada fibra é da ordem de 16,753333µm, pela literatura consultada, ver II.4.3.1, se deduz que a massa volumétrica da fibra de vidro tipo “E” é de aproximadamente 2,5g/cm³.

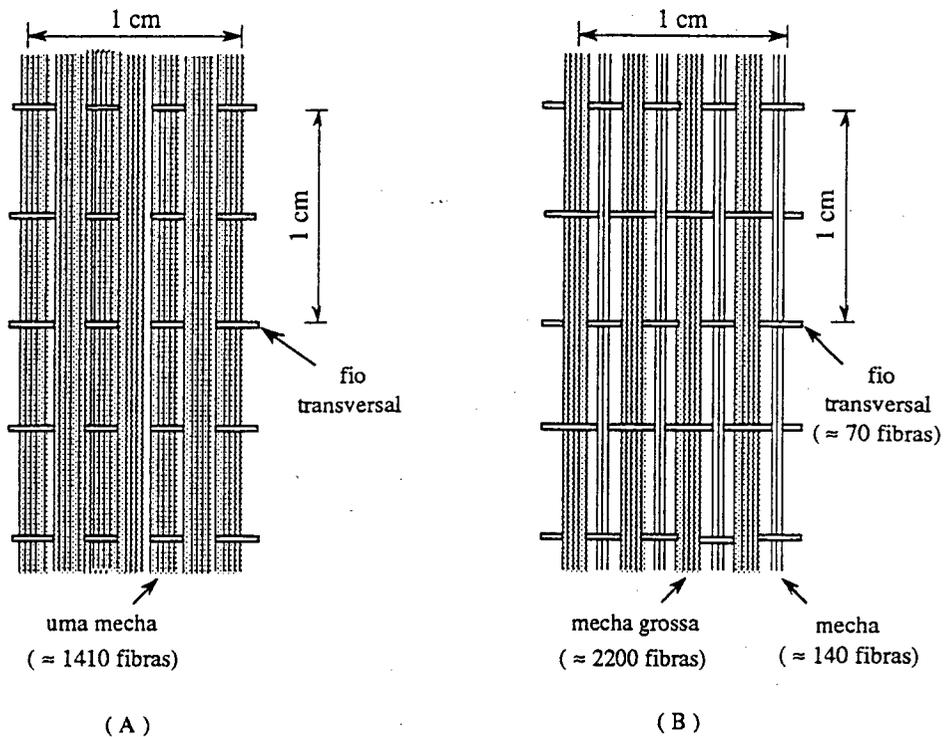


Fig.III.06 - Características do tecido fibroso, a) nacional, b) francês.

III.5 - Ensaio de caracterização física e mecânica da madeira

III.5.1 - Ensaio físicos

III.5.1.1 - Teor de umidade e massa volumétrica

III.5.1.1.1 - Procedimento de ensaio

O teor de umidade e a massa volumétrica da madeira disponível para fabricação dos modelos reduzidos foram definidos a partir da retirada de 40 corpos de prova por espécie, provenientes de peças, como mostrado na fig.III.01.

As dimensões de cada corpo de prova e a metodologia de ensaio de teor de umidade, seguiram o previsto pela norma brasileira NBR 6230(MB-26)^[12]. Os corpos de prova foram inicialmente pesados em balança com precisão de milésimo de grama. Sendo que a primeira medida corresponde à massa da madeira à h% de umidade, " M_h ". Após, os corpos de prova, foram secos em estufa à 100-105°C, até constância de peso, ou seja, quando a última pesagem não diferir da anterior em mais de 1%, obtendo-se assim, a massa da madeira seca " M_0 ". A umidade é referida à madeira seca e é obtida pela seguinte fórmula:

$$\bullet \text{ teor de umidade} \rightarrow H = \frac{M_h - M_0}{M_0} \cdot 100 \quad [\%]$$

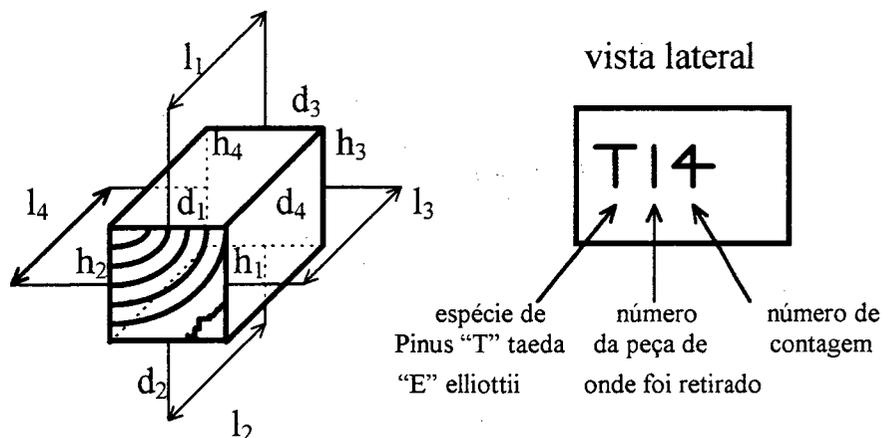
A massa volumétrica utiliza os mesmos corpos de prova do ensaio de teor de umidade, entretanto, a metodologia de ensaio segue o previsto na norma alemã DIN 52 182^[27]. Os corpos de prova foram inicialmente pesados em balança com precisão de milésimo de grama, correspondendo esta medida à massa da madeira à h% de umidade, “M_h”. Após os corpos de prova foram medidos por meio de um paquímetro de precisão 0,01mm, são tomadas medidas de todas as arestas do corpo prismático, cuja média, fornece o volume “V” da madeira à h% de umidade. Finalmente, a massa volumétrica é calculada através da seguinte fórmula:

$$\bullet \text{ massa volumétrica} \rightarrow M_v = \frac{M_h}{V} \quad [\text{g/cm}^3]$$

Equipamentos utilizados:

- balança Marte mod. AM 5500 automarte precisão 0,001g.
- estufa Fanem mod. 315/8 capacidade de 250°C, sensibilidade de 1°C.
- paquímetro de precisão 0,01mm.

Esquema de medição e identificação dos corpos de prova:



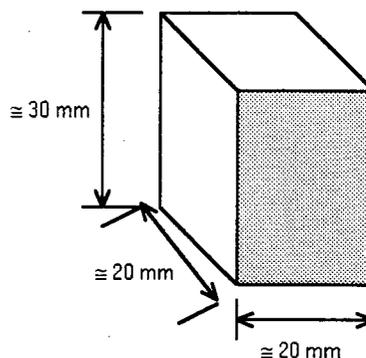
III.5.1.1.2 - Apresentação dos resultados

DETERMINAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE E DA MASSA VOLUMÉTRICA DO PINUS ELLIOTTII

CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DO CORPO DE PROVA

condições ambientais:

- temp.: 23°C
- umidade relat. : 67%



IDENTIFICAÇÃO	MASSA A H% DE UMIDADE M_h [g]	MASSA A 0% DE UMIDADE M_0 [g]	TEOR DE UMIDADE H [%]	VOLUME A H% DE UMIDADE V [cm ³]	MASSA VOLUMÉTRICA M_v [g/cm ³]
E11	5,73	4,96	15,52	11,18	0,51
E12	5,68	4,93	15,21	11,22	0,51
E13	5,41	4,69	15,35	11,56	0,47
E14	5,08	4,46	13,90	11,48	0,44
E15	5,16	4,55	13,41	11,87	0,43
E16	5,48	4,90	11,84	11,75	0,47
E27	5,77	5,03	14,71	11,59	0,50
E28	5,63	4,92	14,43	11,51	0,49
E29	5,55	4,83	14,91	11,40	0,49
E210	5,10	4,47	14,09	11,29	0,45
E211	4,78	4,27	11,94	11,68	0,41
E212	4,94	4,50	9,78	11,49	0,43
E313	5,83	5,05	15,45	11,50	0,51
E314	5,28	4,53	16,56	11,02	0,48
E315	5,15	4,47	15,21	11,40	0,45
E316	5,81	5,14	13,04	11,49	0,51
E317	5,52	4,90	12,65	11,46	0,48
E318	5,52	4,95	11,52	11,60	0,48
E419	6,55	5,84	12,16	11,75	0,56
E420	6,31	5,61	12,48	11,81	0,53
E421	6,72	5,93	13,32	11,59	0,58
E422	5,75	5,06	13,64	11,51	0,50
E423	6,77	5,90	14,75	11,43	0,59
E424	5,87	5,15	13,98	11,69	0,50
E525	5,60	4,88	14,75	11,53	0,49
E526	5,82	5,05	15,25	11,46	0,51
E527	5,37	4,62	16,23	11,43	0,47
E528	4,63	3,98	16,33	11,23	0,41
E529	5,18	4,57	13,35	10,79	0,48
E530	4,88	4,37	11,67	11,50	0,42
E631	5,15	4,56	12,94	11,73	0,44
E632	5,01	4,38	14,38	11,49	0,44
E633	5,23	4,52	15,71	11,21	0,47
E634	6,21	5,40	15,00	11,61	0,53
E635	5,63	4,87	15,61	11,48	0,49
E636	5,85	5,09	14,93	11,41	0,51
E237	5,03	4,56	10,31	11,48	0,44
E438	5,63	4,96	13,51	11,54	0,49
E639	6,15	5,41	13,68	11,64	0,53
E640	4,96	4,36	13,76	10,98	0,45

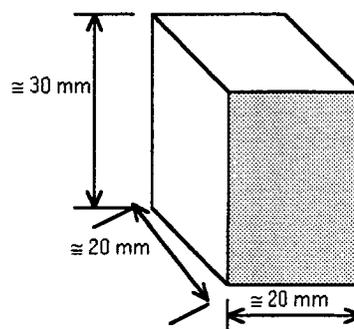
DETERMINAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE E DA MASSA VOLUMÉTRICA DO PINUS TAEDA

CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DO CORPO DE PROVA

condições ambientais:

- temp.: 23°C

- umidade relat. : 67%



IDENTIFICAÇÃO	MASSA A H% DE UMIDADE M_h [g]	MASSA A 0% DE UMIDADE M_o [g]	TEOR DE UMIDADE H [%]	VOLUME A H% DE UMIDADE V [cm ³]	MASSA VOLUMÉTRICA M_v [g/cm ³]
T11	5,03	4,54	10,79	11,92	0,42
T12	4,54	4,06	11,82	11,18	0,41
T13	4,31	3,85	11,95	11,33	0,38
T14	5,06	4,54	11,45	11,89	0,43
T15	5,29	4,73	11,84	11,44	0,46
T16	4,77	4,24	12,50	11,04	0,43
T27	4,67	4,19	11,46	12,10	0,39
T28	4,52	4,04	11,88	11,73	0,39
T29	4,44	3,97	11,84	11,44	0,39
T210	4,47	3,98	12,31	11,53	0,39
T211	6,50	5,86	10,92	11,70	0,56
T212	5,46	4,88	11,89	11,40	0,48
T313	5,15	4,61	11,71	12,15	0,42
T314	4,59	4,09	12,22	12,12	0,38
T315	5,33	4,74	12,45	11,67	0,46
T316	5,67	5,04	12,50	12,19	0,47
T317	5,48	4,88	12,30	12,19	0,45
T318	5,91	5,27	12,14	11,70	0,50
T419	4,67	4,19	11,46	12,19	0,38
T420	4,26	3,81	11,81	11,38	0,37
T421	4,35	3,89	11,83	11,30	0,38
T422	5,18	4,62	12,12	11,39	0,45
T423	4,80	4,30	11,63	10,44	0,46
T424	5,95	5,35	11,21	11,48	0,52
T525	5,07	4,54	11,67	12,07	0,42
T526	4,71	4,21	11,88	11,59	0,41
T527	4,35	3,90	11,54	11,88	0,37
T528	4,87	4,38	11,19	11,80	0,41
T529	4,88	4,39	11,16	11,95	0,41
T530	5,21	4,66	11,80	11,46	0,45
T631	5,48	4,93	11,16	12,11	0,45
T632	5,03	4,51	11,53	12,18	0,41
T633	5,48	4,91	11,61	12,22	0,45
T634	6,06	5,44	11,40	11,86	0,51
T635	6,47	5,80	11,55	12,24	0,53
T636	6,61	5,90	12,03	11,86	0,56
T437	5,06	4,53	11,70	11,86	0,43
T238	4,72	4,23	11,58	12,22	0,39
T139	4,80	4,26	12,68	11,28	0,43
T340	5,37	4,79	12,11	11,73	0,46

III.5.2 - Ensaio mecânicos

III.5.2.1 - Cisalhamento paralelo às fibras

III.5.2.1.1 - Procedimento de ensaio

O cisalhamento paralelo às fibras da madeira disponível para fabricação dos modelos reduzidos foram definidos a partir da retirada de 36 corpos de prova por espécie, provenientes de peças, como mostrado na fig.III.04.

As dimensões de cada corpo de prova e a metodologia de ensaio para cisalhamento paralelo às fibras, seguiram o previsto pela norma francesa NF B 5-32^[28]. Foi criado no LEE/ECV um dispositivo que através da aplicação de carga de compressão, provoca tração, e garras que possibilitem a fixação do corpo de prova no dispositivo. Então, com um esquema de tração funcionando por carga de compressão, aplicado por uma unidade de pressão hidráulica, através de um cilindro hidráulico com acréscimo constante de carga e utilizada uma rótula para garantir a distribuição dos esforços no dispositivo, foi executado o ensaio até a carga de ruptura, ver fig.III.07. A leitura da carga foi feita através de um relógio comparador que mediu a deformação de um anel dinamométrico calibrado com sensibilidade de menor fração 2,07 Kg. A velocidade de aplicação da carga foi equivalente a um acréscimo de tensão de aproximadamente 1MPa/min.

O princípio do ensaio e da geometria do corpo de prova é que em se separando o corpo de prova para obter o equilíbrio de forças, obtem-se a área que contribui para ocorrência do cisalhamento (20 x 20mm). Por outro lado a área de 2 vezes (20 x 20mm) estará sujeita a tensão quando ocorre a sollicitação da carga P, mas durante a atuação da carga que provocará a tensão de ruptura surge uma convergência de tensões para uma das áreas de (20 x 20mm) originando a ruptura em uma delas. Assim sendo a tensão de ruptura será dividida por 40mm².

Com a aquisição da carga de ruptura e a geometria da seção crítica se calcula a tensão de cisalhamento paralelo às fibras pela seguinte expressão :

$$\bullet \text{ tensão de cisalhamento } \rightarrow \tau_{pf} = \frac{P}{S_c}$$

P → carga aplicada | **S_c** → seção crítica

Equipamentos utilizados:

- unidade de pressão hidráulica com capacidade de 140 bar.
- cilindro hidráulico W30 SHF NC SB Vickers com capacidade de 10 ton.
- anel dinamométrico com capacidade de 5 ton. calibrado com sensibilidade de menor fração de 2,07 Kg.
- rótula.
- dispositivo de tração à compressão (criado no LEE/ECV).

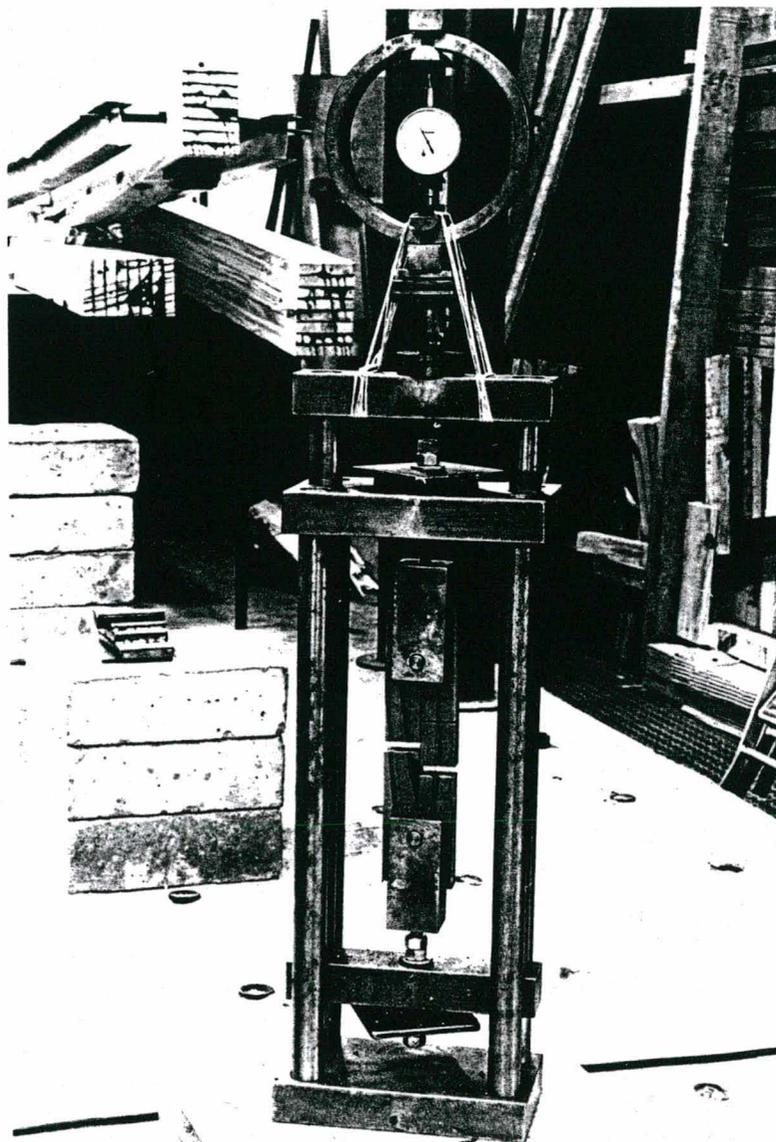


Fig.III.07 - Dispositivo utilizado no ensaio de cisalhamento e detalhes de fixação do corpo de prova e ruptura.

III.5.2.1.2 - Apresentação dos resultado

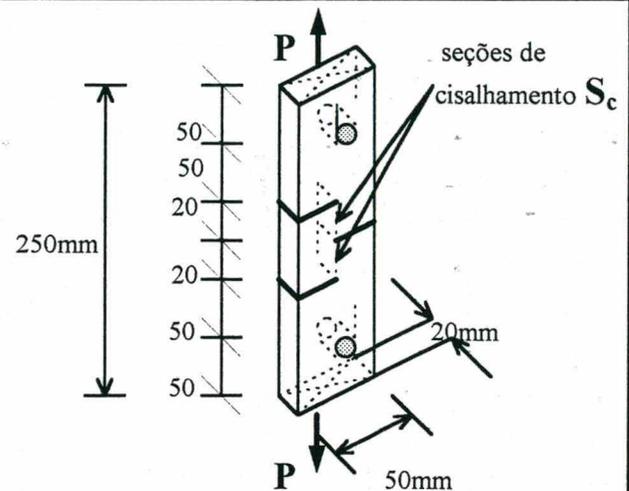
RESULTADO DOS ENSAIOS DE CISALHAMENTO PARALELO ÀS FIBRAS DO PINUS ELLIOTTII E DO PINUS TAEDA

CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DO CORPO DE PROVA

condições ambientais:

- temp.: 23°C

- umidade relat. : 67%



Pinus elliottii

IDENTIFI- CAÇÃO	SEÇÃO [mm ²]	CARGA DE RUPTURA [N]	RESISTÊNCIA [MPa]	IDENTIFI- CAÇÃO	SEÇÃO [mm ²]	CARGA DE RUPTURA [N]	RESISTÊNCIA [MPa]
E11	400	1470	4	E919	400	1946	5
E12	400	2277	6	E920	400	1677	4
E23	400	2815	7	E921	400	2339	6
E24	400	1842	5	E922	400	1759	4
E35	400	2236	6	E1023	400	1801	4
E36	400	2339	6	E1024	400	2049	5
E47	400	4078	10	E1025	400	2132	5
E48	400	3001	7	E1126	400	2153	5
E59	400	2857	7	E1127	400	1739	4
E510	400	2132	5	E1128	400	2091	5
E611	400	2898	7	E1229	400	1635	4
E612	400	2111	5	E1230	400	1739	4
E713	400	1532	4	E1231	400	1532	4
E714	400	1511	4	E1232	400	1470	4
E715	400	2049	5	E1333	400	2505	6
E816	400	1946	5	E1334	400	2132	5
E817	400	2132	5	E1335	400	2339	6
E818	400	1842	5				

Pinus taeda

IDENTIFI- CAÇÃO	SEÇÃO [mm ²]	CARGA DE RUPTURA [N]	RESISTÊNCIA [MPa]	IDENTIFI- CAÇÃO	SEÇÃO [mm ²]	CARGA DE RUPTURA [N]	RESISTÊNCIA [MPa]
T11	400	2629	7	T920	400	1884	5
T12	400	2339	6	T921	400	2318	6
T23	400	2256	6	T1022	400	2236	6
T24	400	2815	7	T1023	400	2173	5
T35	400	3540	9	T1124	400	1842	5
T47	400	3022	8	T1225	400	2049	5
T48	400	3084	8	T1326	400	1925	5
T59	400	2298	6	T1327	400	1573	4
T1211	400	2836	7	T1328	400	1739	4
T612	400	2877	7	T1429	400	2111	5
T713	400	1884	5	T1430	400	1677	4
T714	400	2008	5	T1431	400	1884	5
T715	400	2401	6	T1432	400	1449	4
T716	400	2463	6	T1433	400	1573	4
T817	400	2443	6	T1534	400	1801	4
T818	400	1842	5	T1535	400	2236	6
T819	400	2153	5	T1536	400	1739	4

III.5.2.2 - Compressão paralela às fibras

III.5.2.2.1 - Procedimento de ensaio

A caracterização do *Pinus elliottii* e *Pinus taeda* em compressão paralela às fibras da madeira é feita com a apresentação dos resultados dos modelos reduzidos definidos a partir da retirada de 40 corpos de prova por espécie, provenientes de peças, como mostrado na fig.III.01.

As dimensões de cada corpo de prova e a metodologia de ensaio para compressão paralela às fibras, seguiram o previsto pela norma brasileira NBR 6230(MB-26)^[12]. Com um esquema de compressão axial, aplicado por uma unidade de pressão hidráulica, através de um cilindro hidráulico com acréscimo constante de carga, foi executado o ensaio até a carga de ruptura. A leitura da carga foi feita através de um relógio comparador que media a deformação de um anel dinamométrico com calibrado com sensibilidade de menor fração 2,07 Kg. A velocidade de aplicação da carga foi equivalente a um acréscimo de tensão de aproximadamente 10MPa/min.

Com a aquisição da carga de ruptura e a geometria da seção crítica se calcula a tensão de compressão paralela às fibras pela seguinte expressão :

$$\bullet \text{ tensão de compressão } \rightarrow \sigma_{cp} = \frac{P}{S}$$

P → carga aplicada | **S** → seção transversal

Equipamentos utilizados:

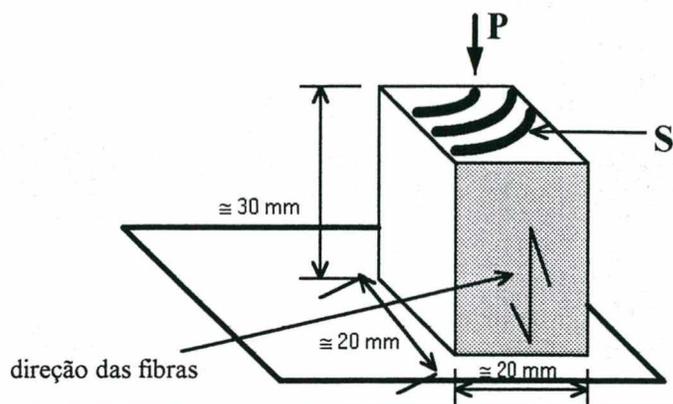
- unidade de pressão hidráulica com capacidade de 140 bar.
- cilindro hidráulico W30 SHF NC SB Vickers com capacidade de 10 ton.
- anel dinamométrico com capacidade de 5 ton. calibrado com sensibilidade de menor fração de 2,07 Kg.

III.5.2.2.2 - Apresentação dos resultados

RESULTADO DOS ENSAIOS DE COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS DO PINUS ELLIOTTII E DO PINUS TAEDA

CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DO CORPO DE PROVA

condições ambientais:
 - temp.: 23°C
 - umidade relat. : 67%



IDENTIFI- CAÇÃO	SEÇÃO [mm ²]	CARGA DE RUPTURA [N]	RESISTÊNCIA [MPa]	IDENTIFI- CAÇÃO	SEÇÃO [mm ²]	CARGA DE RUPTURA [N]	RESISTÊNCIA [MPa]
E11c	374,80	8818	24	E421c	386,67	18112	47
E12c	381,71	10930	29	E422c	383,44	18319	48
E13c	384,84	10433	27	E423c	380,53	14904	39
E14c	382,89	10764	28	E424c	388,16	8280	21
E15c	394,62	9977	25	E525c	381,33	9625	25
E16c	390,68	12586	32	E526c	380,89	10557	28
E27c	385,43	9977	26	E527c	374,53	9812	26
E28c	383,18	10764	28	E528c	362,34	8321	23
E29c	380,15	10971	29	E529c	383,73	11054	29
E210c	377,91	9770	26	E530c	392,53	10060	26
E211c	390,63	11468	29	E631c	382,71	10453	27
E212c	388,96	11944	31	E632c	376,37	9977	27
E313c	383,77	8694	23	E634c	386,69	8404	22
E314c	368,24	7928	22	E635c	378,95	8735	23
E315c	380,63	8590	23	E636c	382,96	8756	23
E316c	383,08	11074	29	E337c	388,86	15235	39
E317c	384,44	11695	30	E138c	384,15	8363	22
E318c	391,52	16022	41	E639c	389,44	9688	25
E419c	391,73	16042	41	E640c	374,21	9688	26
E420c	393,46	16436	42				
IDENTIFI- CAÇÃO	SEÇÃO [mm ²]	CARGA DE RUPTURA [N]	RESISTÊNCIA [MPa]	IDENTIFI- CAÇÃO	SEÇÃO [mm ²]	CARGA DE RUPTURA [N]	RESISTÊNCIA [MPa]
T11c	396,41	10950	28	T421c	377,76	9563	25
T12c	374,61	9211	25	T422c	380,51	10930	29
T13c	377,98	9294	25	T423c	351,56	10723	30
T14c	396,61	10474	26	T424c	383,60	12296	32
T15c	379,32	9274	24	T525c	399,87	10350	26
T16c	369,59	8653	23	T526c	385,78	9729	25
T27c	401,74	10702	27	T527c	396,01	9998	25
T28c	391,54	9584	25	T528c	391,73	13082	33
T29c	382,12	9067	24	T529c	403,47	13041	32
T210c	384,83	8963	23	T530c	382,68	8549	22
T211c	388,58	11261	29	T631c	407,50	14573	36
T212c	385,28	11054	29	T632c	405,31	12523	31
T313c	402,91	12130	30	T633c	405,89	14179	35
T314c	404,71	10391	26	T634c	393,80	16560	42
T315c	387,83	13248	34	T635c	406,40	16374	40
T316c	404,01	13289	33	T636c	395,11	15525	39
T317c	405,42	12068	30	T437c	395,70	12668	32
T318c	389,89	12151	31	T238c	406,51	11778	29
T419c	405,92	10826	27	T139c	375,64	8756	23
T420c	387,08	8984	23	T340c	391,33	11530	29

III.5.2.3 - Flexão simples

III.5.2.3.1 - Procedimento de ensaio

A caracterização do *Pinus elliottii* e *Pinus taeda* em flexão simples da madeira é feita com a apresentação dos resultados dos modelos reduzidos definidos a partir da retirada de 18 corpos de prova por espécie, provenientes de peças, como mostrado na fig.III.03, destinados ao ensaio previsto na norma norte-americana.

Foram realizados ensaios de flexão simples, que adotaram as dimensões de cada corpo de prova seguindo o previsto pela norma norte-americana ASTM D 143-52^[18], e a metodologia de ensaio para flexão simples a quatro pontos, seguindo o previsto pela norma francesa NF B 51-008^[29].

Foram realizados estes ensaios, pois, inicialmente se adotaria o ensaio de flexão simples previsto pela norma brasileira. No entanto, esta norma adota a metodologia de carregamento centrado ou três pontos, o que induz a ruptura a ocorrer neste ponto. No entanto, pela própria anatomia da árvore, por um defeito natural como um nó por exemplo, a ruptura pode ocorrer em um outro local. Ao adotar-se a metodologia da norma francesa, com o carregamento dividido em dois pontos, aumenta a área do gráfico de momento fletor e conseqüentemente a probabilidade da ruptura se situar neste intervalo, ver III.1. O esquema de flexão a quatro pontos privilegia uma solicitação máxima para um momento fletor constante entre os dois pontos de aplicação da carga, sem a interferência do cisalhamento. E o corpo de prova da norma norte-americana se aproxima mais da realidade.

Com um esquema de compressão axial, aplicado por uma unidade de pressão hidráulica, através de um cilindro hidráulico com acréscimo constante de carga, foi executado o ensaio até a carga de ruptura. A leitura da carga foi feita através de um relógio comparador que media a deformação de um anel dinamométrico calibrado com sensibilidade de menor fração 2,07 Kg. A velocidade de aplicação da carga foi equivalente a um acréscimo de tensão de aproximadamente 10MPa/min. A leitura dos deslocamentos foi feita, no meio do vão, através de dois relógios comparadores de sensibilidade 0,01 e curso de 30 mm, cada, fixados por meio de bases magnéticas à chapas metálicas dispostas longitudinalmente ao longo de cada lateral do elemento estrutural, fixadas a viga por meio de furos feitos na região dos apoios, a altura do eixo neutro da peça, conforme pode ser visto na fotografia da fig.III.08.

Com a medição da flecha, a aquisição da carga de ruptura e a geometria do corpo de prova se calcula a tensão de flexão e o módulo de elasticidade pelas seguintes expressões :

- módulo de elasticidade $\rightarrow E_{\text{long}} = \frac{P \cdot a}{48 \cdot \delta \cdot I} \cdot (3 \cdot l^2 - 4 \cdot a^2)$
(desprezando a parcela devido a esforço cortante)

- tensão de flexão $\rightarrow \sigma_f = \frac{3 \cdot P \cdot a}{b \cdot h^2}$

P → carga aplicada		δ → flecha total
a → distância da carga aplicada ao apoio		h → altura da peça
l → comprimento total		b → largura da peça
		I → momento de inércia

Equipamentos utilizados:

- unidade de pressão hidráulica com capacidade de 140 bar.
- cilindro hidráulico W30 SHF NC SB Vickers com capacidade de 10 ton.
- anel dinamométrico com capacidade de 5 ton. calibrado com sensibilidade de menor fração de 2,07 Kg.
- rótula.
- dois relógios comparadores Mitutoyo com sensibilidade 0,01 e curso de 30mm.
- duas bases magnéticas Mitutoyo.

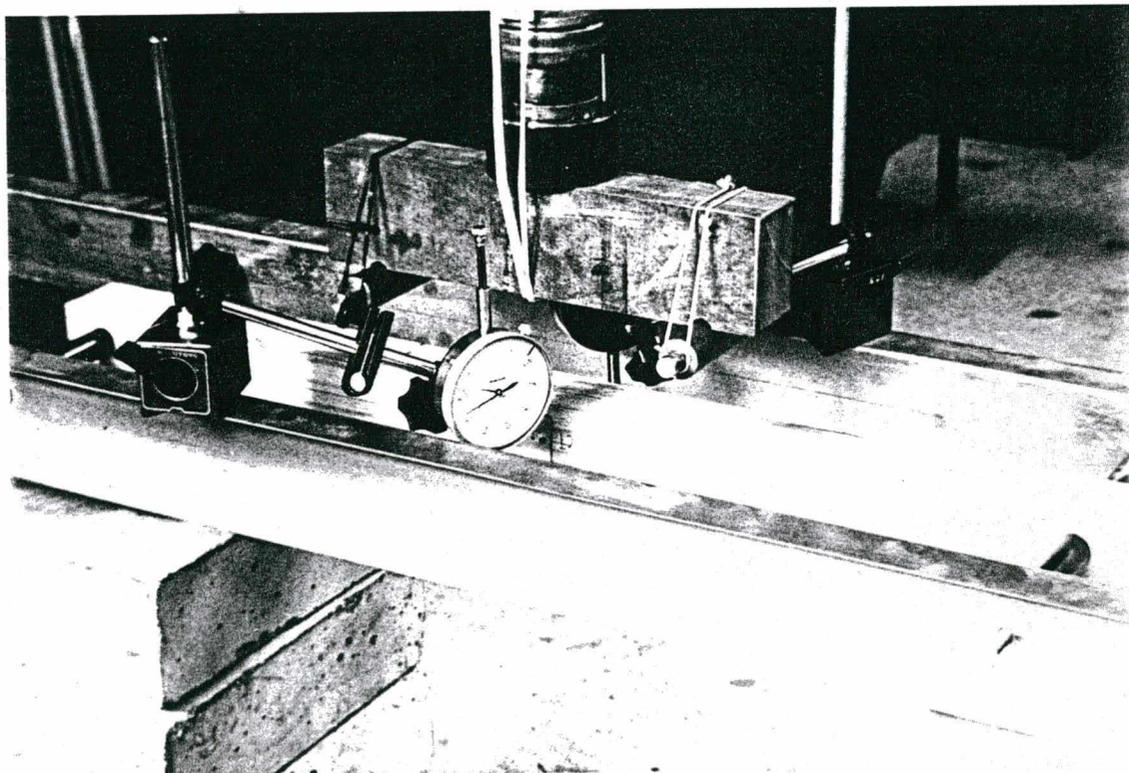


Fig.III.08 - Esquema do ensaio de flexão simples a 4 pontos (ASTM D 143-52).

III.5.2.3.2 - Apresentação dos resultados

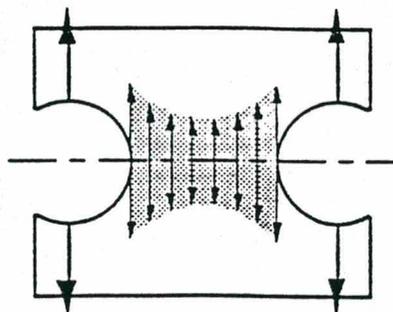
RESULTADO DOS ENSAIOS DE FLEXÃO SIMPLES (ASTM D 143-52) DO PINUS ELLIOTTII E DO PINUS TAEDA					
<u>CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DO CORPO DE PROVA</u> condições ambientais: - temp.: 23°C - umidade relat. : 67%					
<i>Pinus elliottii</i>					
IDENTIFI- CAÇÃO	RESIS- TÊNCIA [MPa]	MÓDULO DE ELASTICI- DADE [MPa]	IDENTIFI- CAÇÃO	RESIS- TÊNCIA [MPa]	MÓDULO DE ELASTICI- DADE [MPa]
FE11	22	3539	FE410	39	6763
FE12	32	4251	FE411	45	7147
FE13	30	4017	FE412	35	5039
FE24	31	6156	FE513	33	5144
FE25	36	6908	FE514	29	4750
FE26	40	6190	FE615	31	4852
FE37	26	4124	FE616	18	4792
FE38	32	4975	FE617	35	5311
FE39	26	4073			
<i>Pinus taeda</i>					
IDENTIFI- CAÇÃO	RESIS- TÊNCIA [MPa]	MÓDULO DE ELASTICI- DADE [MPa]	IDENTIFI- CAÇÃO	RESIS- TÊNCIA [MPa]	MÓDULO DE ELASTICI- DADE [MPa]
FT11	56	11473	FT58	56	9828
FT22	67	10709	FT59	53	8347
FT33	37	9096	FT510	70	13274
FT34	33	7125	FT611	43	6045
FT45	36	8309	FT612	73	12598
FT46	52	9890	FT613	93	17529
FT47	54	7898	FT214	55	8389

III.5.2.4 - Tração normal às fibras

III.5.2.4.1 - Procedimento de ensaio

A caracterização do *Pinus elliottii* e *Pinus taeda* em tração normal às fibras da madeira é feita com a apresentação dos resultados dos modelos reduzidos definidos a partir da retirada de 36 corpos de prova por espécie, provenientes de peças, como mostrado na fig.III.02.

As dimensões de cada corpo de prova e a metodologia de ensaio para tração normal às fibras, seguiram o previsto pela norma alemã DIN 68 141^[17]. Foi criado no LEE/ECV um dispositivo que através da aplicação de carga de compressão, aplicado por uma unidade de pressão hidráulica, através de um cilindro hidráulico com acréscimo constante de carga e utilizada uma rótula para garantir a distribuição dos esforços no dispositivo, provoca tração, e garras que possibilitem a fixação do corpo de prova no dispositivo, perfeitamente rotuladas e bem alinhadas de modo à transmitir uma sollicitação “bem” distribuída pela seção crítica do corpo de prova.



Foi executado o ensaio até a carga de ruptura, ver fig.III.09. A leitura da carga foi feita através de um relógio comparador que mede a deformação de um anel dinamométrico calibrado com sensibilidade de menor fração 2,07 Kg. A velocidade de aplicação da carga foi equivalente a um acréscimo de tensão de aproximadamente 1MPa/min.

Com a aquisição da carga de ruptura e a geometria da seção crítica se calcula a tensão de tração normal às fibras pela seguinte expressão :

- tensão de tração $\rightarrow \sigma_m = \frac{P}{S_c}$

P \rightarrow carga aplicada | **S_c** \rightarrow seção crítica

Equipamentos utilizados:

- unidade de pressão hidráulica com capacidade de 140 bar.
- cilindro hidráulico W30 SHF NC SB Vickers com capacidade de 10 ton.
- anel dinamométrico com capacidade de 5 ton. calibrado com sensibilidade de menor fração de 2,07 Kg.
- rótula.
- dispositivo de tração à compressão (desenvolvido no LEE/ECV).

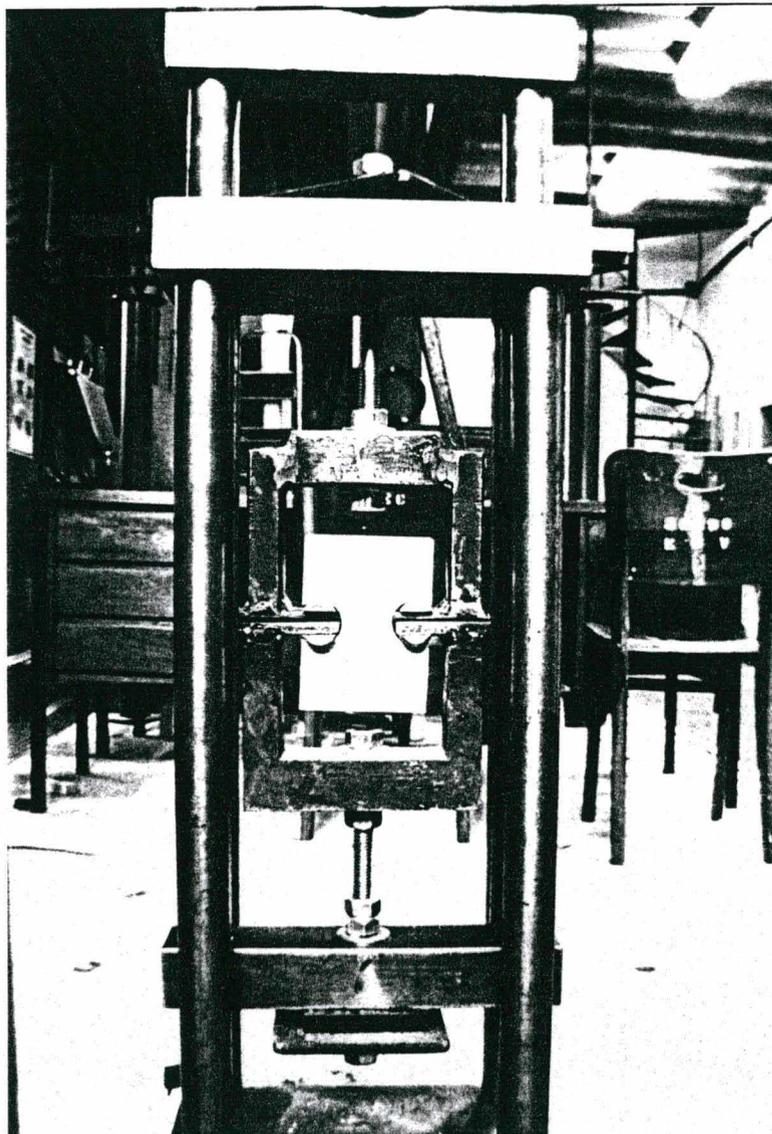


Fig.III.09 - Dispositivo utilizado no ensaio de tração normal às fibras e detalhes das garras com o corpo de prova.

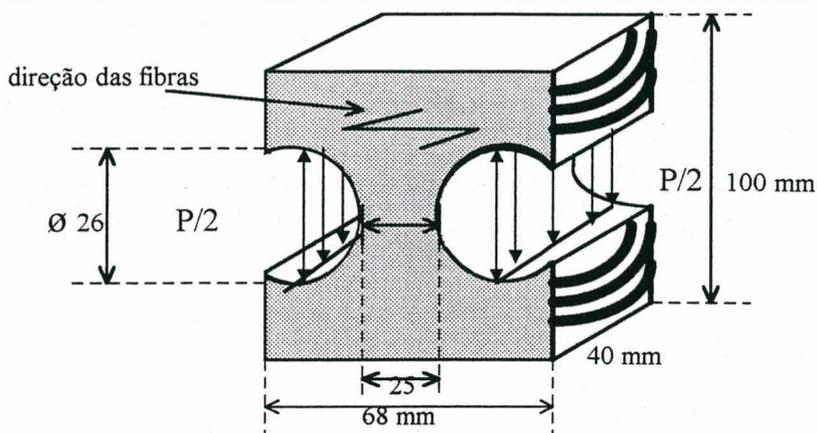
III.5.2.4.2 - Apresentação dos resultados

RESULTADO DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO NORMAL ÀS FIBRAS DO PINUS ELLIOTTII E DO PINUS TAEDA

CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DO CORPO DE PROVA

condições ambientais:

- temp.: 23°C
- umidade relat. : 67%



Pinus elliotii

IDENTIFICAÇÃO	SEÇÃO [mm ²]	CARGA DE RUPTURA [N]	RESISTÊNCIA [MPa]	IDENTIFICAÇÃO	SEÇÃO [mm ²]	CARGA DE RUPTURA [N]	RESISTÊNCIA [MPa]
E61	1026	3208	3	E318	1041	1201	1
E62	1052	3415	3	E319	1076	1118	1
E63	1045	2277	2	E320	1061	1656	2
E14	1014	600	1	E421	1063	4326	4
E15	1049	1138	1	E422	1096	3974	4
E16	1038	1697	2	E423	1028	4595	4
E17	1031	1201	1	E624	1023	3271	3
E136	1043	869	1	E425	1106	4595	4
E615	1029	2774	3	E426	1051	3643	3
E68	999	3001	3	E427	959	4471	5
E210	1047	1304	1	E528	1043	4678	4
E211	1045	1097	1	E529	1023	5134	5
E212	1031	1552	2	E530	1043	4513	4
E213	1077	1428	1	E531	963	4492	5
E214	997	1076	1	E532	1034	3974	4
E69	1009	3001	3	E533	982	3974	4
E316	1009	352	0,3	E534	1008	3767	4
E317	1078	1035	1	E535	963	2525	3

Pinus taeda

IDENTIFICAÇÃO	SEÇÃO [mm ²]	CARGA DE RUPTURA [N]	RESISTÊNCIA [MPa]	IDENTIFICAÇÃO	SEÇÃO [mm ²]	CARGA DE RUPTURA [N]	RESISTÊNCIA [MPa]
T11	999	3685	4	T419	1081	2318	2
T12	990	2981	3	T520	1060	2587	2
T13	1009	3208	3	T521	1047	2360	2
T14	1033	3250	3	T622	1042	3643	3
T15	1052	2981	3	T623	1072	3271	3
T16	1040	3229	3	T324	1066	2111	2
T27	994	2629	3	T525	1094	2132	2
T28	1025	2505	2	T126	1035	3188	3
T29	1024	2422	2	T527	1073	1656	2
T210	1031	2029	2	T528	1029	1263	1
T211	1038	1925	2	T529	1040	1925	2
T212	1056	1759	2	T530	1031	2070	2
T313	1081	1283	1	T631	1095	3374	3
T214	1022	1656	2	T632	968	2753	3
T315	1036	1759	2	T633	998	2939	3
T116	1020	3084	3	T634	1078	3208	3
T317	1028	1925	2	T635	1012	2857	3
T318	1032	1697	2	T636	1066	3001	3

III.5.2.5 - Tração paralela às fibras

III.5.2.5.1 - Procedimento de ensaio

A caracterização do *Pinus elliottii* e *Pinus taeda* em tração paralela às fibras da madeira é feita com a apresentação dos resultados dos modelos reduzidos definidos a partir da retirada de 18 corpos de prova por espécie, provenientes de peças, como mostrado na fig.III.03.

As dimensões de cada corpo de prova e a metodologia de ensaio para tração paralela às fibras, seguiram o previsto pela norma alemã DIN 52 188^[33]. Com um esquema de tração axial aplicado pelas garras de uma máquina de ensaios universais Wolpert Lestor-Amsler com escala de 20 KN, fixando as extremidades dos corpos de prova, o carregamento foi aplicado progressivamente até atingir a ruptura. A velocidade de aplicação da carga foi equivalente a um acréscimo de tensão de aproximadamente 5MPa/min.

Com a aquisição da carga de ruptura e a geometria da seção crítica se calcula a tensão de tração paralela às fibras pela seguinte expressão :

$$\bullet \text{ tensão de tração } \rightarrow \sigma_{tp} = \frac{P}{S_c}$$

P → carga aplicada | **S_c** → seção crítica

Equipamentos utilizados:

- máquina de ensaios universais
Wolpert Lestor-Amsler-
Werkstoffprüf maschinen D-6700

III.5.2.5.2 - Apresentação dos resultados

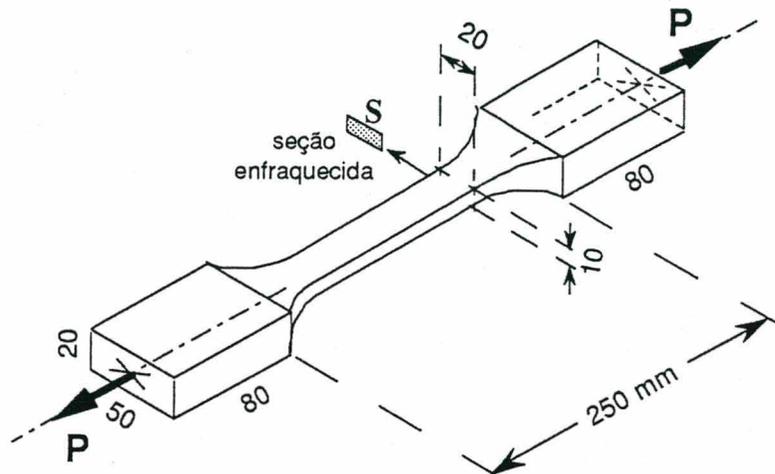
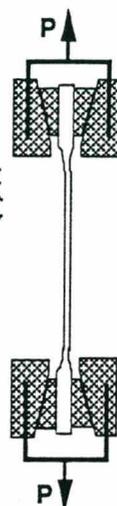
RESULTADO DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO PARALELA ÀS FIBRAS DO PINUS ELLIOTTII E DO PINUS TAEDA

CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DO CORPO DE PROVA

condições ambientais:

- temp. : 23°C

- umidade relat.: 67%



Pinus elliottii

IDENTIFI- CAÇÃO	SEÇÃO [mm ²]	CARGA DE RUPTURA [N]	RESISTÊNCIA [MPa]	IDENTIFI- CAÇÃO	SEÇÃO [mm ²]	CARGA DE RUPTURA [N]	RESISTÊNCIA [MPa]
E1	208,70	11700	56	E10	210,80	8100	38
E2	200,80	8900	44	E11	212,90	9700	46
E3	200,60	11800	59	E12	207,90	6300	30
E4	208,90	4800	23	E13	211,90	8300	39
E5	208,70	7200	34	E14	220,00	9900	45
E6	203,40	7400	36	E15	212,90	7900	37
E7	213,30	9000	42	E16	212,90	4500	21
E8	205,40	3300	16	E17	202,80	8200	40
E9	192,10	5800	30	E18	207,10	10100	49

Pinus taeda

IDENTIFI- CAÇÃO	SEÇÃO [mm ²]	CARGA DE RUPTURA [N]	RESISTÊNCIA [MPa]	IDENTIFI- CAÇÃO	SEÇÃO [mm ²]	CARGA DE RUPTURA [N]	RESISTÊNCIA [MPa]
T1	208,90	7800	37	T10	208,70	5500	26
T2	216,80	8500	39	T11	213,40	16100	75
T3	220,50	10800	49	T12	206,50	17400	84
T4	224,50	15300	68	T13	205,60	8700	42
T5	227,00	13000	57	T14	206,00	9200	45
T6	223,30	8800	39	T15	209,00	13100	63
T7	204,10	17300	85	T16	211,50	14400	68
T8	201,30	7700	38	T17	212,10	4700	22
T9	210,50	16400	78	T18	218,30	8200	38

III.6 - Caracterização mecânica do reforço de fibra de vidro

III.6.1 - Objetivo

Tendo em vista a conhecida eficiência das estruturas de MLC e a perfeita aderência da fibra de vidro com a cola resorcina-fenol-formol, é possível imaginar a combinação de lâminas de madeira (tábuas) com o tecido de fibra de vidro disposto no interior das juntas de cola. Esse compósito assim constituído, pode ter as suas características mecânicas perfeitamente determinadas a partir da realização de ensaios na direção do reforço. Necessita-se, então verificar o comportamento da aderência do tecido de fibra de vidro à cola de resorcina-fenol-formol, bem como o comprimento de ancoragem do tecido em relação a emenda.

III.6.2 - Procedimento de ensaio

Não foi encontrada na literatura consultada metodologia de ensaio normalizada para este tipo de ensaio. Inicialmente, se adotou a metodologia para ensaio de tração paralela às fibras da madeira da norma alemã DIN 52 188^[33], com adaptações para atingir o objetivo proposto inicialmente. Foi então, produzido um lote de (04) corpos de prova, dois por espécie, com uma região central enfraquecida, onde situa-se uma emenda simplesmente de topo, com reforço integral de tecido de fibra de vidro, ver fig.III.10.

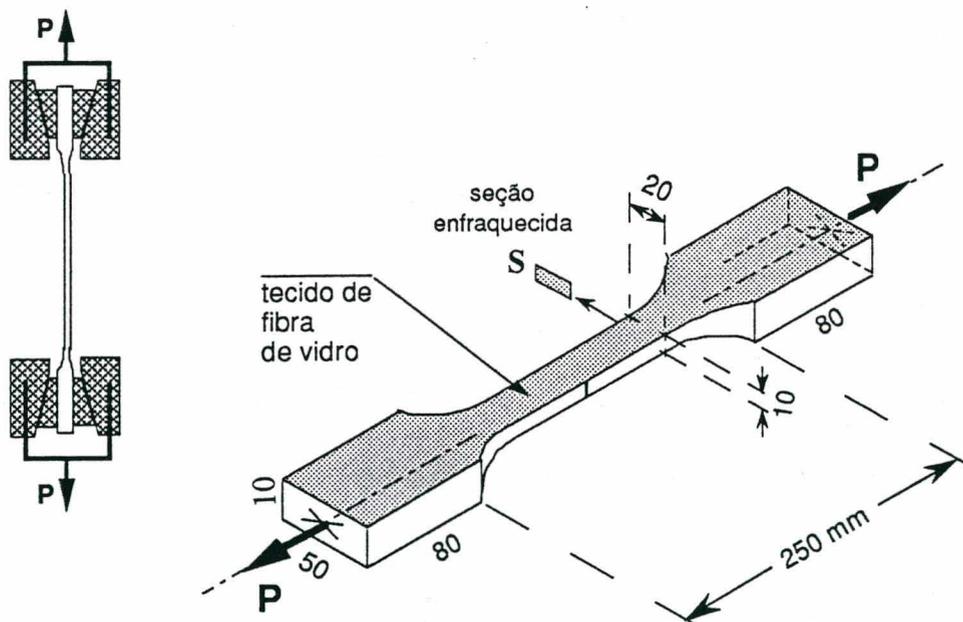


Fig.III.10 - Ilustração do corpo de prova inicial.

Este corpo de prova foi abandonado, pois ocorreu escorregamento das fibras de vidro, a medida que o carregamento avançava, o que provavelmente foi ocasionado pela seção reduzida na área da emenda, com isto não caracterizando a aderência do tecido de fibra de vidro com a cola resorcina-fenol-formol. Houve também dificuldades das garras da prensa fixarem-se no tecido de fibra de vidro. Adotou-se então, um novo modelo de corpo de prova, com geometria diferente do anterior, possuindo uma área de ancoragem e área de seção transversal maiores, foram confeccionados (24) corpos de prova, doze por espécie, ver fig.III.11.

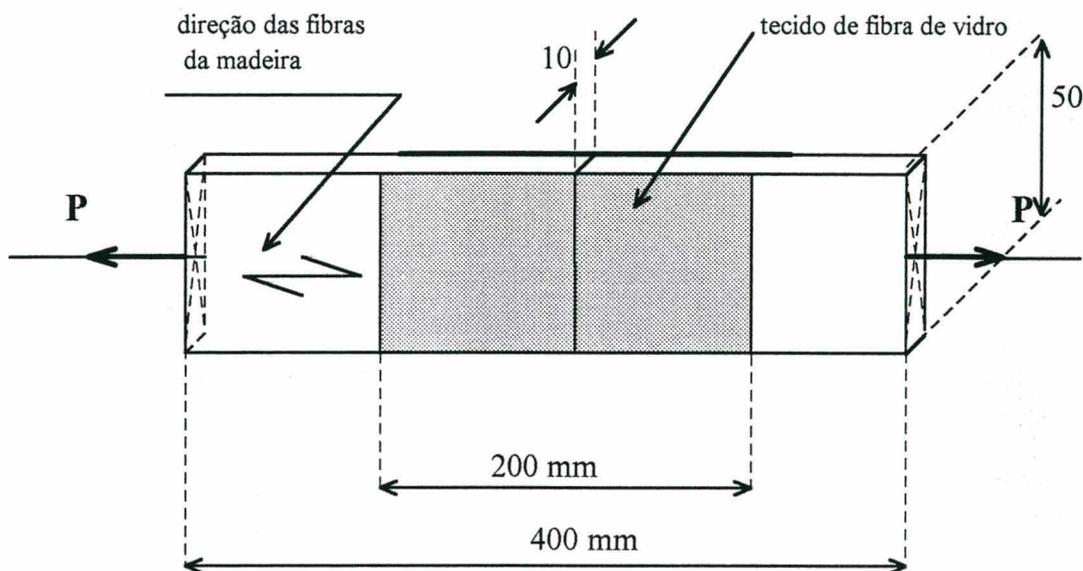


Fig.III.11 - Ilustração do corpo de prova intermediário.

Este corpo de prova também foi abandonado, pois ocorreu escorregamento das fibras de vidro, a medida que o carregamento avançava, o que provavelmente foi ocasionado por somente uma face do tecido de fibra de vidro estar colada a superfície da madeira, com isto não caracterizando a aderência do tecido de fibra de vidro com a cola resorcina-fenol-formol. Em muitos casos a madeira não resistiu ao início do carregamento rompendo sem ocorrer nada no tecido de fibra de vidro. Adotou-se então, um novo modelo de corpo de prova, com geometria diferente do anterior, possuindo uma área de ancoragem semelhante ao anterior, porém, com área de seção transversal maior, e o tecido de fibra de vidro ficou disposto entre duas lâminas de madeira (sanduíche). Foram confeccionados (36) corpos de prova, 18 (dezoito) por espécie, retirados de peças como mostrado na fig.III.05, sendo que destes, 13 (treze) confeccionados com tecido de fibra de vidro nacional (FN) e 05 (cinco) com tecido de fibra de vidro francês (FF), ver fig.III.12.

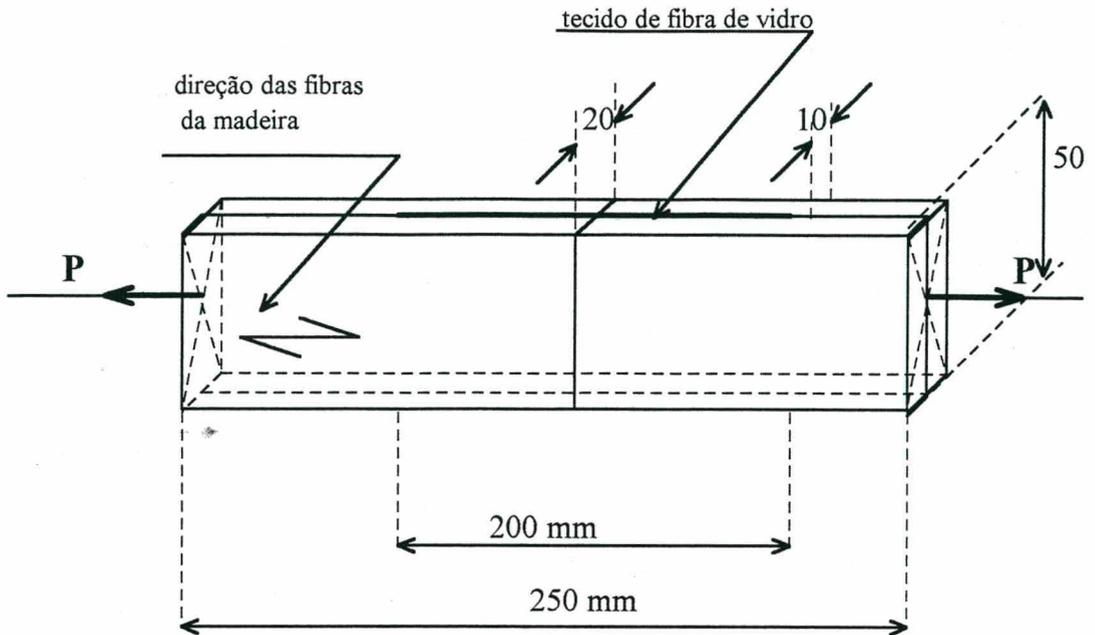


Fig.III.12 - Ilustração do corpo de prova definitivo.

O comportamento deste corpo de prova foi satisfatório, não ocorreu escorregamento do tecido de fibra de vidro, mas sim ruptura deste por tração, o que evidencia uma boa aderência do tecido de fibra de vidro e a cola de resorcina-fenol-formol. Com um esquema de tração axial aplicado pelas garras de uma máquina de ensaios universais Wolpert Lestor-Amsler com escala de 20 KN, fixando as extremidades dos corpos de prova, o carregamento foi aplicado progressivamente até atingir a ruptura. A velocidade de aplicação da carga foi de 12,5 mm/min., equivalente a um acréscimo de tensão de aproximadamente 5MPa/min.

Com a aquisição da carga de ruptura e as dimensões da seção crítica do tecido de fibra de vidro, se calcula a tensão de tração paralela às fibras pela seguinte expressão :

$$\bullet \text{ tensão de tração } \rightarrow \sigma_{tp+fv} = \frac{P}{S_c}$$

$P \rightarrow$ carga aplicada | $S_c \rightarrow$ seção crítica do tecido de fibra de vidro

Equipamentos utilizados:

- máquina de ensaios universais
Wolpert Lestor-Amsler-
Werkstoffprüf maschinen D-6700

III.6.3. - Apresentação dos resultados

IDENTIFI- CAÇÃO	SEÇÃO [mm ²]	CARGA DE RUPTURA [N]	RESISTÊNCIA [MPa]
<i>Pinus elliottii (fibra nacional)</i>			
EFN001	6.835	6000	878
EFN002	6.835	5700	834
EFN003	6.835	6400	936
EFN004	6.835	6000	878
EFN005	6.835	6500	951
EFN006	6.835	6200	907
EFN007	6.835	6000	878
EFN008	6.835	5700	834
EFN009	6.835	5700	834
EFN010	6.835	6450	944
EFN011	6.835	6450	944
EFN012	6.835	5900	863
EFN013	6.835	6750	988
<i>Pinus elliottii (fibra francesa)</i>			
EFF001	6.835	7900	1156
EFF002	6.835	8300	1214
EFF003	6.835	6800	995
EFF004	6.835	7700	1126
EFF005	6.835	6400	936

IDENTIFI- CAÇÃO	SEÇÃO [mm ²]	CARGA DE RUPTURA [N]	RESISTÊNCIA [MPa]
<i>Pinus taeda (fibra nacional)</i>			
TFN001	6.835	7300	1068
TFN002	6.835	6600	966
TFN003	6.835	5000	731
TFN004	6.835	6550	958
TFN005	6.835	5050	739
TFN006	6.835	8100	1185
TFN007	6.835	7400	1083
TFN008	6.835	6150	900
TFN009	6.835	6300	922
TFN010	6.835	8000	1170
TFN011	6.835	6550	958
TFN012	6.835	7400	1083
TFN013	6.835	6600	966
<i>Pinus taeda (fibra francesa)</i>			
TFF001	6.835	7900	1156
TFF002	6.835	9350	1368
TFF003	6.835	6700	980
TFF004	6.835	8600	1258
TFF005	6.835	7800	1141

III.7 - Análise do comportamento dos elementos estruturais (vigas)

III.7.1 - Objetivo

Tendo em vista a conhecida eficiência das estruturas de MLC e a perfeita aderência da fibra de vidro com a cola resorcina-fenol-formol, é possível imaginar a combinação de lâminas de madeira (tábuas) com o tecido de fibra de vidro disposto no interior das juntas de cola. Então faz-se necessário uma investigação do comportamento deste “compósito” em corpos de prova em tamanho natural ou pouco reduzido, no caso elementos estruturais “vigas”. Fez-se então, uma investigação do comportamento deste reforço com tecido de fibra de vidro em emendas simplesmente de topo, dispostas em três posições diferentes dentro da viga, preferencialmente na região mais solicitada, a saber, nas duas últimas linhas de colagem, na zona tracionada da peça. Isto, possibilita realizar um estudo comparativo da eficiência desta emenda de topo com este reforço de fibra de vidro em relação às tradicionais emendas por entalhes múltiplos e peças sem emendas. E finalmente, podemos proceder a uma análise da possibilidade da substituição das emendas por entalhes múltiplos pelas emendas simplesmente de topo reforçadas com tecido de fibra de vidro, que é o principal objetivo deste trabalho.

III.7.2 - Procedimento de ensaio

• Definição do carregamento

Foi adotado o esquema de carregamento das vigas em flexão a quatro pontos, previsto pela norma francesa NF B 51-008^[29], em virtude desta metodologia de ensaio possibilitar que seja ampliada a área onde ocorre momento fletor máximo, o que no ensaio a três pontos fica restrito a um ponto central, ver III.1.

• Concepção geométrica dos corpos de prova

Diante da mínima ação do esforço cortante na flecha e conseqüentemente no módulo de elasticidade, um estudo de deflexão é feito de modo genérico, visando estabelecer as relações entre as dimensões da viga e as condições de carregamento. Pois, na maioria das vezes a participação do esforço cortante é desprezada, considerando-se apenas a participação do momento fletor. Este estudo da participação do esforço cortante no módulo de elasticidade é feito a partir do princípio d'Alembert, ver II.2.4.1, com base nas dimensões da peça. Então obtém-se o módulo de elasticidade com todos os esforços que atuam nele, ou seja, momento fletor e esforço cortante, através da seguinte expressão:

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

Para saber-se o quanto representa somente o módulo de elasticidade devido ao momento fletor no total do módulo de elasticidade, obtém-se a seguinte expressão que representa somente o momento fletor, para isto basta retirar o valor "9,6" que representa a parcela devido a esforço cortante :

$$E_M = \frac{P \cdot a}{\delta \cdot b \cdot d} \left[\frac{3 \cdot L^2 - 4 \cdot a^2}{4 \cdot d^2} \right] \quad (\dots \text{II.02})$$

Então em face da razão (E_M/E) obtém-se :

$$\frac{E_M}{E} = \frac{3 \cdot \left(\frac{L}{d}\right)^2 - 4 \cdot \left(\frac{a}{d}\right)^2}{3 \cdot \left(\frac{L}{d}\right)^2 - 4 \cdot \left(\frac{a}{d}\right)^2 + 38,4}$$

Os valores "L", "a" e "d" referem-se às dimensões da peça. No caso, foram adotadas as dimensões nas quais são produzidas as vigas pela empresa Battistella Ind. e Com. de Lages/SC, ou seja $L = 2400\text{mm}$ e $d = 160\text{mm}$. A distância entre as cargas e estas em relação aos apoios foram igualmente distribuídas, ou seja : $a = L/3 \rightarrow a = 2400/3 = 800\text{mm}$. Isto, nos permite, traçar o gráfico mostrado na fig.III.13.

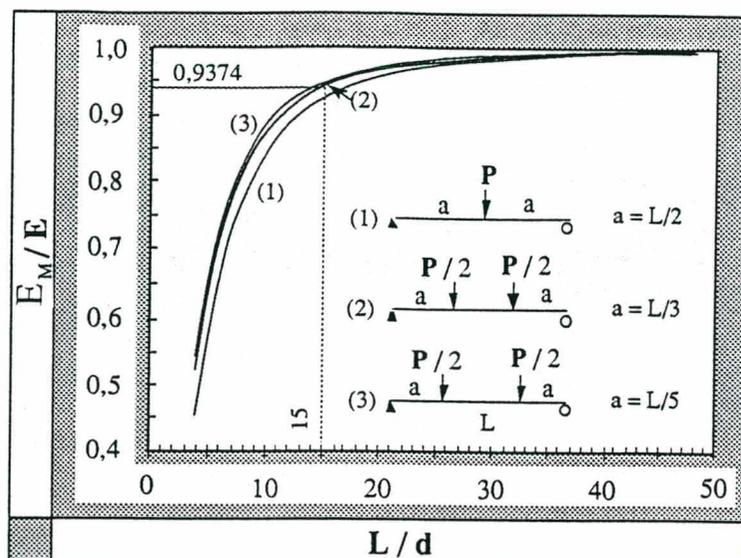


Fig. III.13 - Gráfico representativo do módulo de elasticidade devido ao momento fletor em relação ao módulo de elasticidade total, em função do comprimento pela altura da viga.

Aliado ao gráfico da fig.III.13, pode-se definir a altura da viga de modo que a razão (L/d), aconselhado para as dimensões da viga, nos indique uma quase integralidade da ação do momento fletor no módulo de elasticidade. Segundo estudos de ROCCO LAHR [1983]^[31], uma razão $L/d \geq 20$, ocasiona uma relação E_M/E superior a 95%, deste modo a contribuição do esforço cortante é muito pequena, podendo ser desprezada. Da mesma maneira, o afastamento “a”, posicionando as cargas ($P/2$) das extremidades dos apoios, a fim de que a parcela correspondente ao cisalhamento durante a fase de ensaio, seja a menor possível na contribuição da flecha, e por consequência no módulo de elasticidade.

Assim sendo, podemos tirar a interferência mínima do esforço cortante, tanto na flecha quanto no módulo de elasticidade. Permitindo também a análise da flexão a três 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”. Portanto, em sabendo que o vão livre dos corpos de prova será de 2400mm e uma altura de 160mm, obtem-se a razão $L/d = 15$. Isto faz que a participação do momento fletor seja de 93,74% no módulo de elasticidade e uma participação de esforço cortante de 6,26%, devendo portanto, ser considerada. Para largura da seção transversal, adotou-se uma dimensão de 100mm que permite a colocação de dispositivos de aplicação de carga para os ensaios. Finalmente, a composição dos corpos de prova feitos em madeira laminada-colada, compõe uma seção transversal com oito lâminas de 20 mm de espessura cada, não classificadas e todas da mesma madeira de *Pinus taeda*. É mostrada na fig.III.14 a concepção dos corpos de prova.

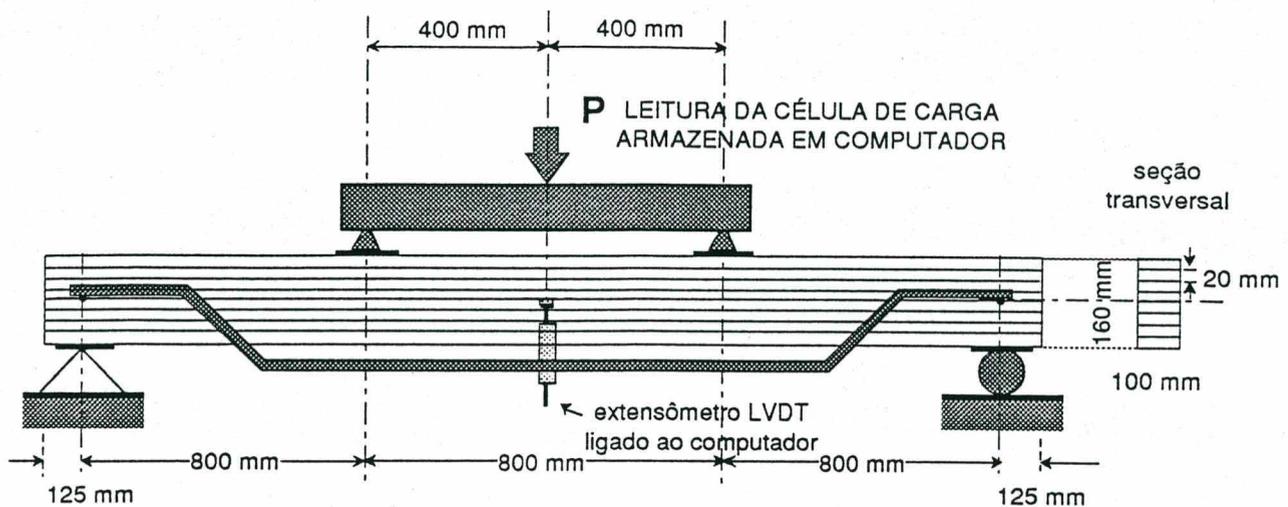


Fig. III.14 - Geometria e esquema de ensaio das vigas.

De acordo com os objetivos estabelecidos foram então confeccionadas 45 vigas. As composições das emendas de topo com e sem reforço do tecido de fibra de vidro, foram estabelecidas previamente. Dispostas em três composições diferentes dentro da viga, “A”, “B” e “C”, preferencialmente na região mais solicitada, a saber, nas duas últimas linhas de colagem, na zona tracionada da peça, conforme mostrado na fig.III.15, seguindo o espaçamento entre emendas indicado em II.2.3.3. As vigas com emendas de topo sem reforço de tecido de fibra de vidro, serviram apenas de referência. A identificação das vigas ficou então composta por seis dígitos alfanuméricos, sendo que os três primeiros identificam se a viga é reforçada com fibra de vidro ou não, e se possui emenda ou não, bem como, a posição da emenda, os três dígitos restantes indicam apenas a numeração de ordenação, então tem-se :

- **(06) vigas** para ensaio de flexão simples a quatro pontos de vigas com reforço de tecido de fibra de vidro e composição de emenda de topo tipo “A” (VCA)
- **(06) vigas** para ensaio de flexão simples a quatro pontos de vigas com reforço de tecido de fibra de vidro e composição de emenda de topo tipo “B” (VCB)
- **(06) vigas** para ensaio de flexão simples a quatro pontos de vigas com reforço de tecido de fibra de vidro e composição de emenda de topo tipo “C” (VCC)
- **(06) vigas** para ensaio de flexão simples a quatro pontos de vigas sem reforço de tecido de fibra de vidro e composição de emenda de topo tipo “A” (VSA)
- **(06) vigas** para ensaio de flexão simples a quatro pontos de vigas sem reforço de tecido de fibra de vidro e composição de emenda de topo tipo “B” (VSB)
- **(06) vigas** para ensaio de flexão simples a quatro pontos de vigas sem reforço de tecido de fibra de vidro e composição de emenda de topo tipo “C” (VSC)
- **(03) vigas** para ensaio de flexão simples a quatro pontos de vigas sem reforço de tecido de fibra de vidro e com emenda por entalhes múltiplos “finger-joints”, com geometria de entalhes aconselhada para grandes esforços solicitantes, conforme norma DIN 68 140^[16], (VFJ)
- **(06) vigas** para ensaio de flexão simples a quatro pontos de vigas sem reforço de tecido de fibra de vidro e sem emendas, (VSE)

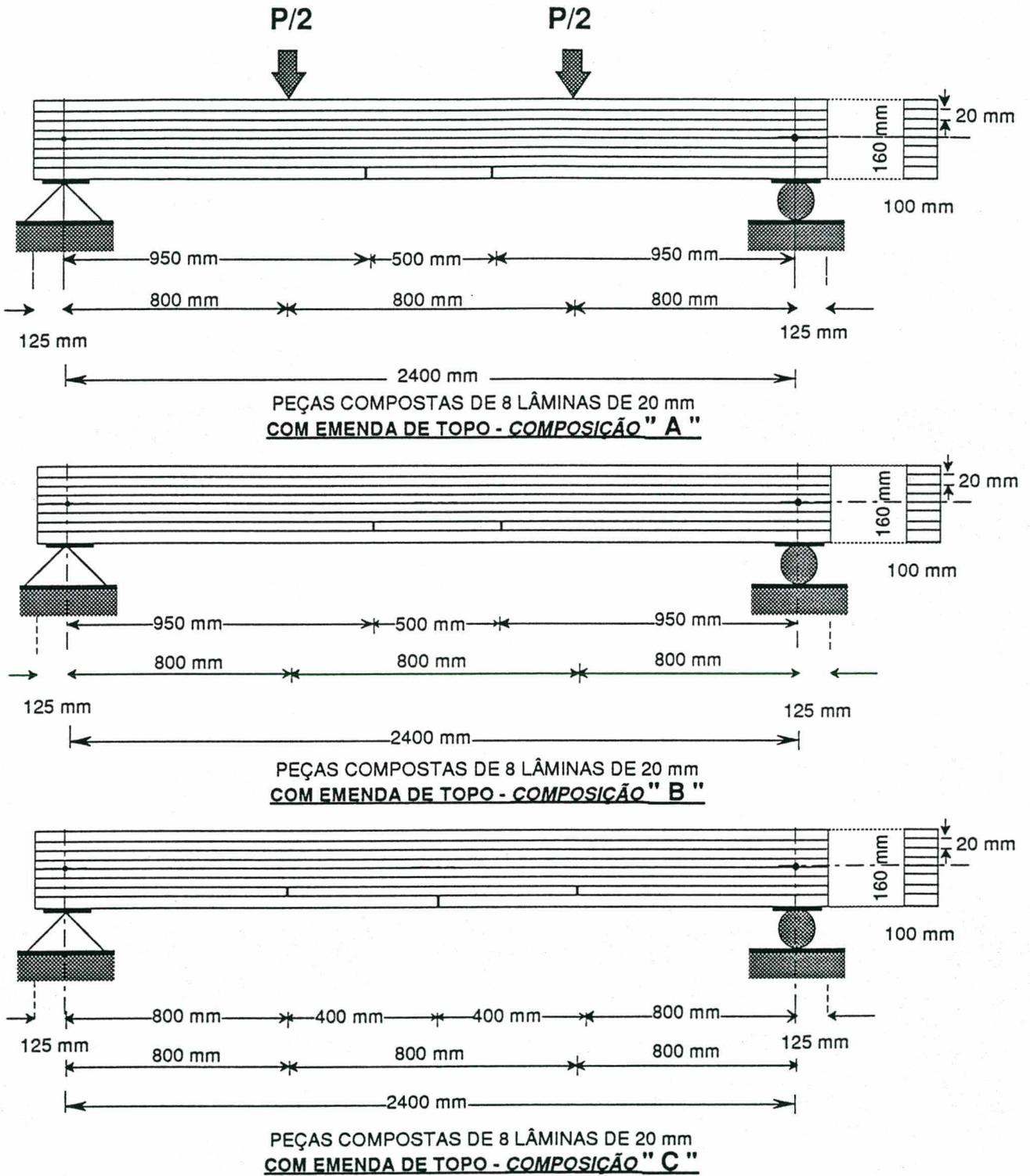


Fig. III.15 - Posicionamento das emendas de topo com e sem reforço de tecido de fibra de vidro.

Todas as vigas foram confeccionadas no próprio Laboratório de Experimentação em Estruturas (LEE) da UFSC, exceto as com dimensões 100 x 150 x 2400 mm, que foram confeccionadas na empresa Battistella Ind. e Com., fazendo parte de um estudo anterior de SZÜCS [1994]^[32]. Para confecção das demais vigas, no LEE, foi desenvolvido um dispositivo para a aplicação de pressão de colagem das lâminas justapostas em elementos estruturais de eixo reto, ver fotografia da fig.III.16. O dispositivo, no estágio atual, é composto de uma estrutura de madeira, dividida em quatro módulos de um metro de comprimento cada, e altura de aproximadamente 0,50 m com todo curso do macaco hidráulico aplicado. Cada módulo possui um macaco hidráulico de capacidade de 8 toneladas, que fornece uma pressão de colagem de aproximadamente 8Kg/cm^2 , que é o recomendado pela literatura, ver II.2.2.3. O sistema de aplicação de carga é manual, as recomendações e cuidados a serem observados na produção dos elementos estruturais estão descritos em II.2.3.3.

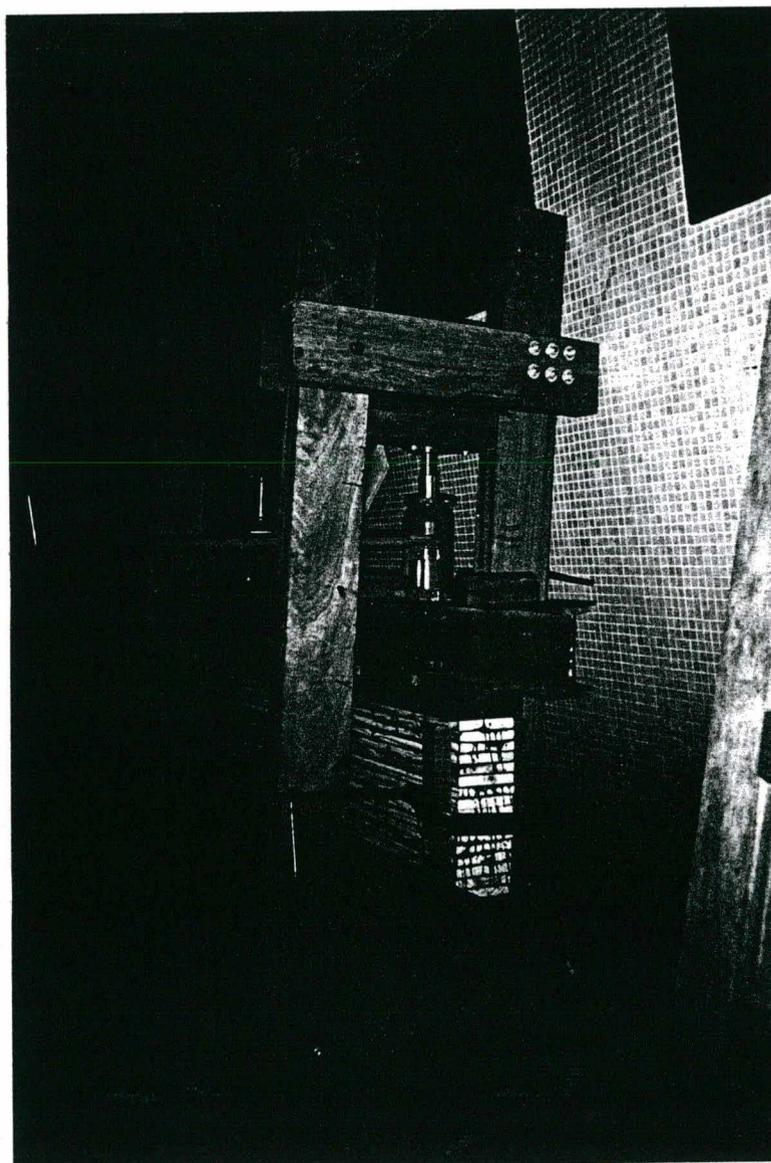


Fig. III.16 - Dispositivo de aplicação de pressão de colagem.

• Experimentação em laboratório

Inicialmente, a experimentação consiste basicamente em efetuar aplicação de carga por flexão à quatro pontos, com um dispositivo que consiste especificadamente na montagem de um sistema de aplicação de carga. Paralelamente, faz-se a leitura do deslocamento vertical (flecha) no meio do vão da viga.

A montagem do ensaio é composta pelos elementos indicados pela fotografia da fig.III.17, descritos como segue.

A aplicação do carregamento é feito com um esquema de compressão axial, aplicado por uma unidade de pressão hidráulica, através de um cilindro hidráulico com acréscimo constante de carga, foi executado o ensaio até a carga de ruptura.

Este conjunto foi montado sobre uma laje de reação do LEE/ECV, modulada de 40cm, com dimensões de 2m x 12m, onde cada ponto da modulação tem capacidade para 15 toneladas. O tempo de duração de cada ensaio foi da ordem de 10 minutos, o que resulta numa velocidade de aplicação da carga equivalente a um acréscimo de tensão de aproximadamente 2MPa/min.

A leitura da carga foi feita através de uma célula de carga de capacidade máxima de 50 toneladas e com sensibilidade de 10Kg, ligada a um sistema de aquisição de dados HP 3852 A.

A leitura da deformação (flecha) foi feita, no meio do vão, através de dois extensômetros LVDT com curso de 30mm e precisão de 0,01mm cada, fixados por meio de bases magnéticas à chapas metálicas dispostas longitudinalmente ao longo de cada lateral do elemento estrutural, ligados ao sistema de aquisição de dados.

Todo o sistema de aquisição de dados e célula de carga está ligado à um microcomputador compatível ao "IBM 386", a partir do qual um programa de informática permite efetuar a aquisição e registro da carga e do deslocamento de cada LVDT a cada 2 ou 3 segundos, como pode ser visto na fotografia da fig.III.18.

No entanto, a leitura dos deslocamentos verticais foi efetuada até atingir-se aproximadamente dois terços da carga de ruptura prevista, o que corresponde ao limite de proporcionalidade do material, segundo a norma brasileira NBR 7190^[30]. Isto foi feito para evitar possíveis danos aos LVDTs. Exceção é feita ao conjunto de vigas com emendas por entalhes múltiplos (finger-joints), cuja as leituras foram efetuadas até a ruptura, devido a estes resultados, terem origem em um estudo anterior a este trabalho, realizado por SZÜCS [1994]^[32].

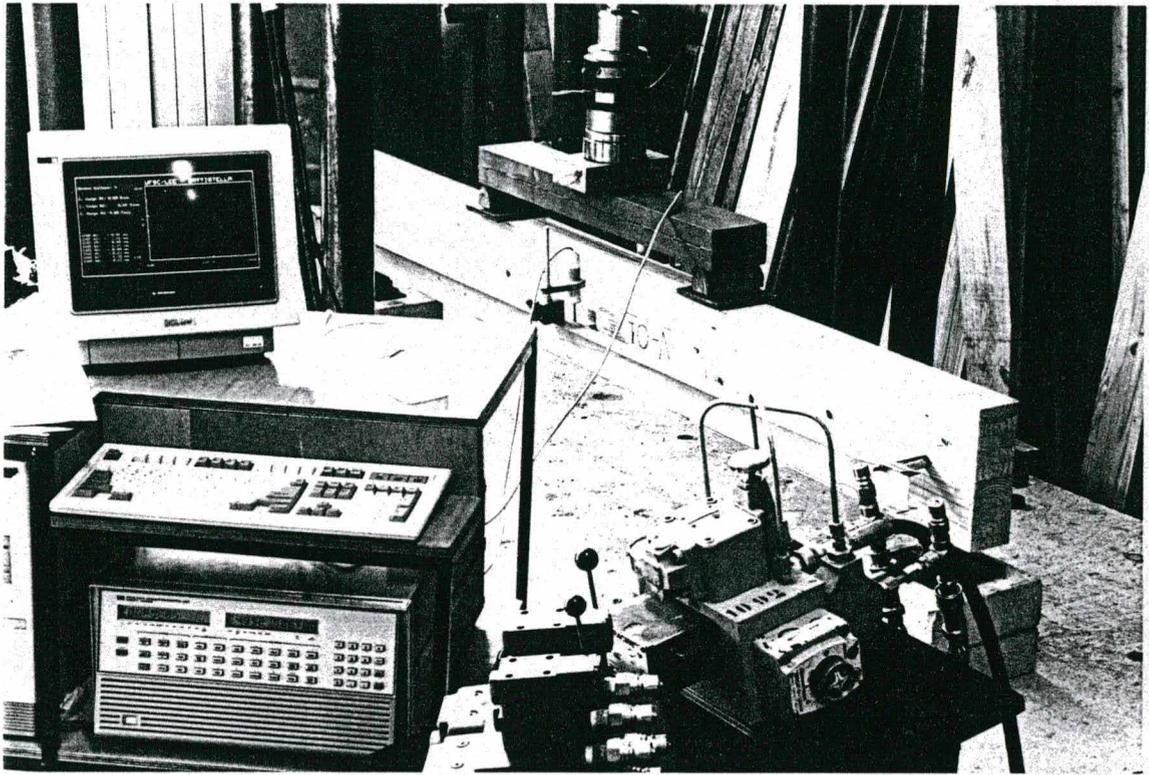


Fig. III.17 - Representação da montagem para flexão à quatro pontos.

Com a medição da flecha, a aquisição da carga de ruptura e a geometria do corpo de prova se calcula a tensão de flexão e o módulo de elasticidade pelas seguintes expressões :

- módulo de elasticidade $\rightarrow E_{\text{long}} = \frac{P \cdot a}{4 \cdot \delta \cdot b \cdot d} \left[\frac{3 \cdot l^2 - 4 \cdot a^2}{d^2} + 9,6 \right]$

- tensão de flexão $\rightarrow \sigma_f = \frac{3 \cdot P \cdot a}{b \cdot h^2} \quad \dots \text{(III.01)}$

P → carga aplicada		δ → flecha total
a → distância da		h → altura da peça
carga aplicada		d → largura da peça
ao apoio		I → momento de inércia
l → comprimento total		b → altura da seção transversal

No caso, os valores “L”, “a” e “d” referem-se às dimensões da peça, ou seja L = 2400 mm e d = 160mm. A distância entre as cargas e destas em relação aos apoios foram igualmente distribuídas, ou seja : $a = L/3 \rightarrow a = 2400/3 = 800$ mm. Então, a expressão do módulo de elasticidade fica:

$$E = \frac{P}{\delta} \cdot 7,3075, \text{ e a tensão de flexão fica:}$$

$$\sigma_f = P \cdot 0,009375$$

De modo que, para esta seção submetida à esta condição crítica de solicitação da viga, utiliza-se a hipótese das leis clássicas da resistência dos materiais a partir da lei de Hooke (material elástico-linear), onde a deformação relativa no domínio elástico (trecho linear do diagrama tensão-deformação) é dada por:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \dots \text{(III.02)}$$

De posse das expressões ... (III.01) e ... (III.02) são traçados os diagramas "tensão-deformação", que são apresentadas em III.7.3.

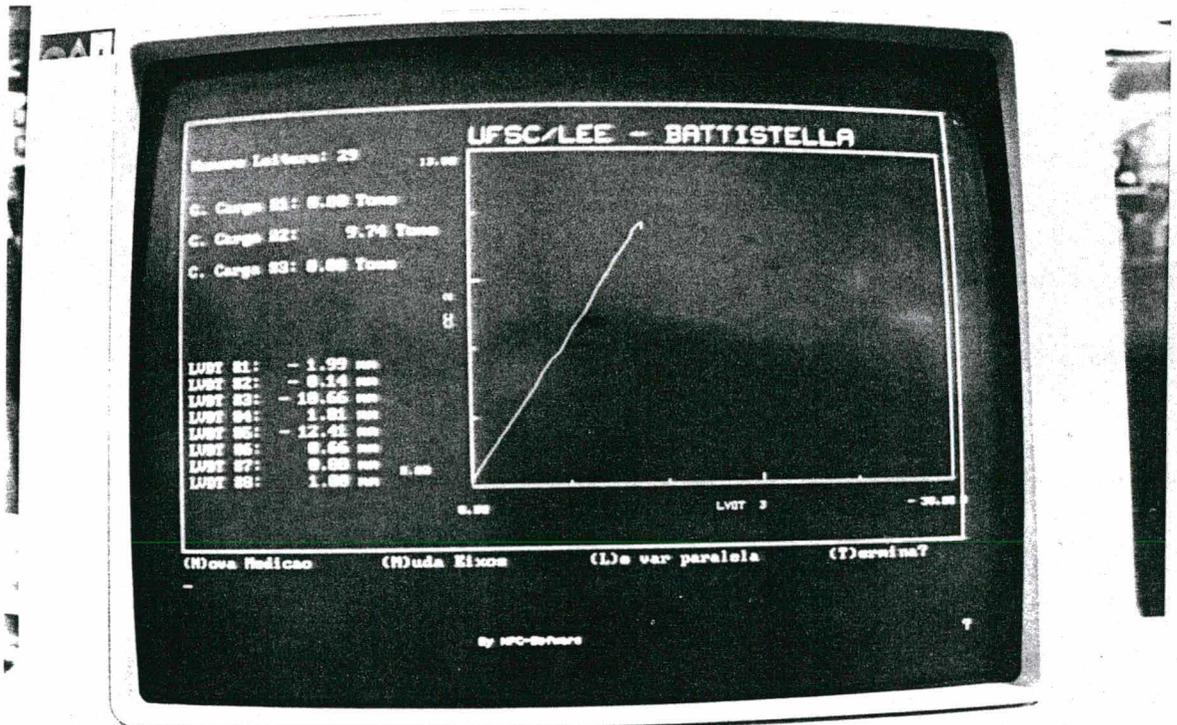


Fig. III.18 - Diagrama carga-deformação na tela do microcomputador.

Equipamentos utilizados:

- unidade de pressão hidráulica com capacidade de 140 bar.
- cilindro hidráulico W30 SHF NC SB Vickers com capacidade de 10 ton.
- célula de carga com capacidade de 50 ton. sensibilidade 10 Kg.
- dois extensômetros LVDT de curso 30mm e precisão 0,01mm..
- duas bases magnéticas Mitutoyo.
- rótula.
- sistema de aquisição de dados HP 3852 A .
- microcomputador compatível com IBM 386.

III.7.3 - Apresentação dos resultados

• (06) vigas para ensaio de flexão simples a quatro pontos de vigas com reforço de tecido de fibra de vidro e posição de emenda de topo tipo "A" (VCA)

IDENTIFICAÇÃO	RESISTÊNCIA [MPa]	SEÇÃO [mm ²]	MÓDULO DE ELASTICIDADE [MPa]
VCA001	20	100 x 160	7681
VCA002	22	100 x 160	7156
VCA003	15	100 x 160	8523
VCA004	21	100 x 160	8574
VCA005	15	100 x 160	6558
VCA006	24	100 x 160	8967

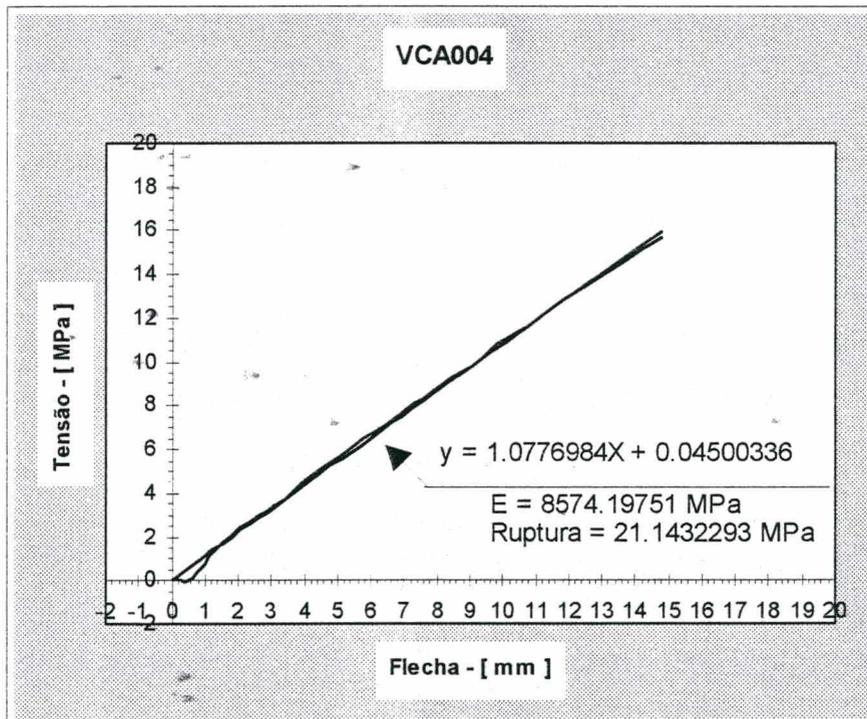


Fig. III.19 - Comportamento da viga VCA004 em flexão a 4 pontos.

- (06) vigas para ensaio de flexão simples a quatro pontos de vigas com reforço de tecido de fibra de vidro e posição de emenda de topo tipo "B" (VCB)

IDENTIFICAÇÃO	RESISTÊNCIA [MPa]	SEÇÃO [mm ²]	MÓDULO DE ELASTICIDADE [MPa]
VCB001	37	100 x 160	10176
VCB002	23	100 x 160	7678
VCB003	31	100 x 160	7442
VCB004	31	100 x 160	7577
VCB005	24	100 x 160	8950
VCB006	37	100 x 160	9304

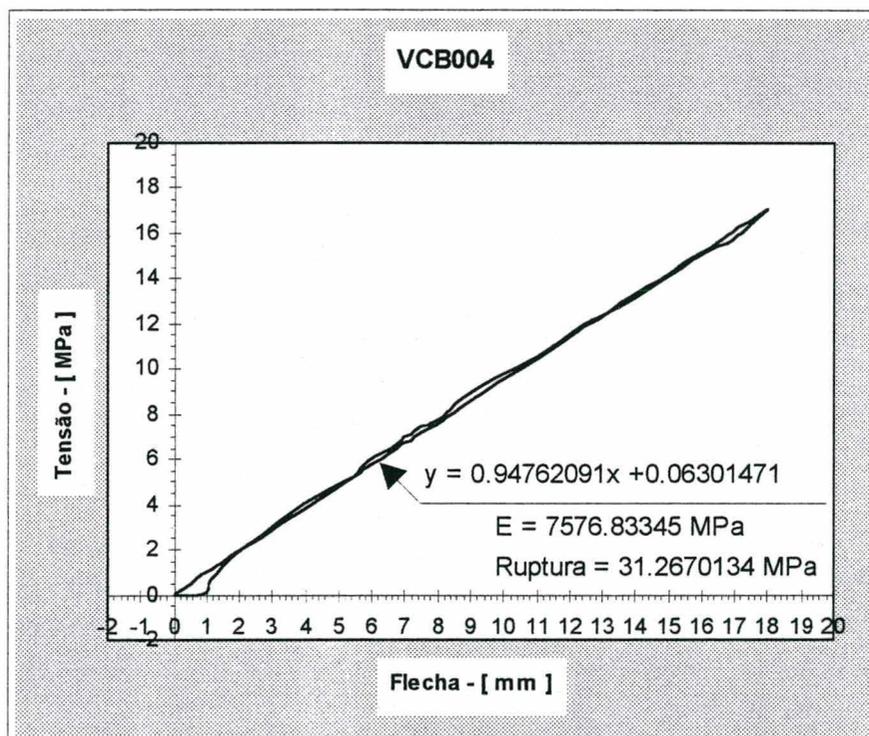


Fig. III.20 - Comportamento da viga VCB004 em flexão a 4 pontos.

• (06) vigas para ensaio de flexão simples a quatro pontos de vigas com reforço de tecido de fibra de vidro e posição de emenda de topo tipo "C" (VCC)

IDENTIFI- CAÇÃO	RESISTÊNCIA [MPa]	SEÇÃO [mm ²]	MÓDULO DE ELASTICI- DADE [MPa]
VCC001	16	100 x 160	7295
VCC002	19	100 x 160	8622
VCC003	26	100 x 160	8864
VCC004	22	100 x 160	8141
VCC005	22	100 x 160	7634
VCC006	13	100 x 160	5604

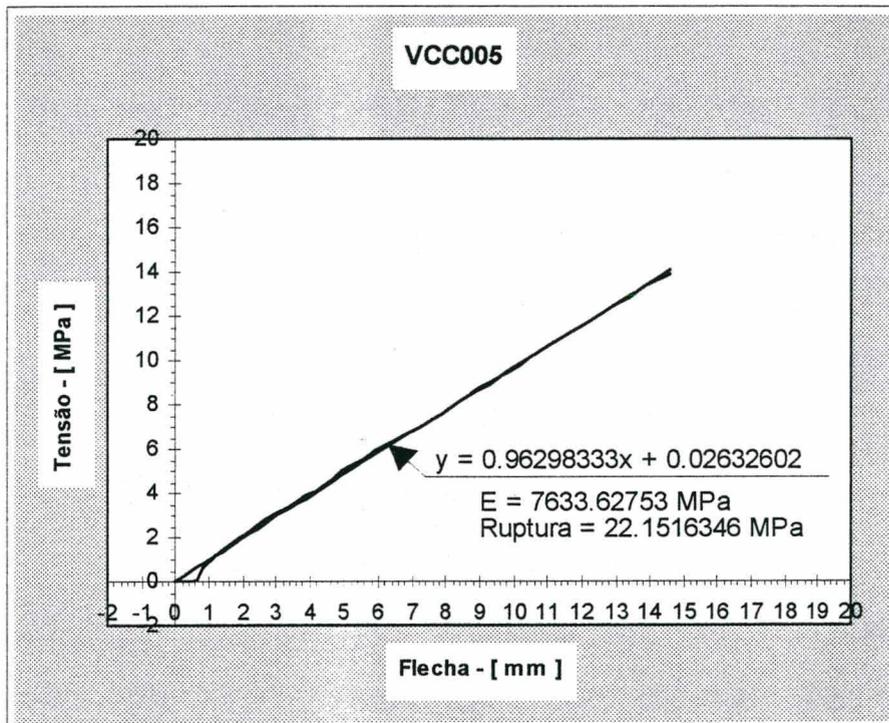


Fig. III.21 - Comportamento da viga VCC005 em flexão a 4 pontos.

- (06) vigas para ensaio de flexão simples a quatro pontos de vigas sem reforço de tecido de fibra de vidro e posição de emenda de topo tipo "A" (VSA)

IDENTIFI- CAÇÃO	RESISTÊNCIA [MPa]	SEÇÃO [mm ²]	MÓDULO DE ELASTICI- DADE [MPa]
VSA001	32	100 x 160	8835
VSA002	20	100 x 160	8549
VSA003	18	100 x 160	9153
VSA004	13	100 x 160	8276
VSA005	19	100 x 160	8016
VSA006	12	100 x 160	7435

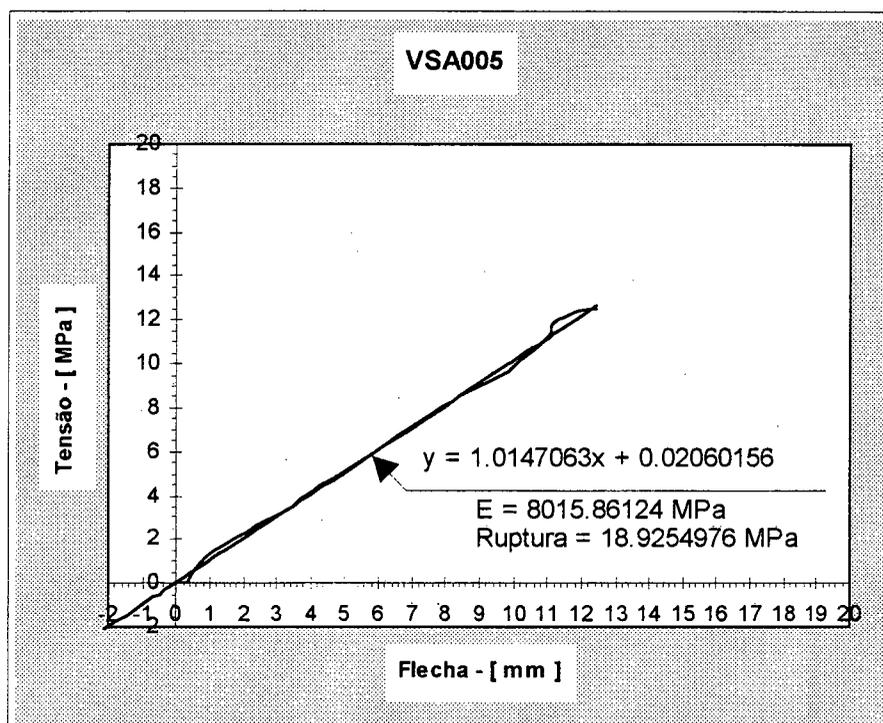


Fig. III.22 - Comportamento da viga VSA005 em flexão a 4 pontos.

• (06) vigas para ensaio de flexão simples a quatro pontos de vigas sem reforço de tecido de fibra de vidro e posição de emenda de topo tipo "B" (VSB)

IDENTIFI- CAÇÃO	RESISTÊNCIA [MPa]	SEÇÃO [mm ²]	MÓDULO DE ELASTICI- DADE [MPa]
VSB001	14	100 x 160	4292
VSB002	27	100 x 160	11052
VSB003	31	100 x 160	7969
VSB004	24	100 x 160	8461
VSB005	15	100 x 160	7067
VSB006	47	100 x 160	8708

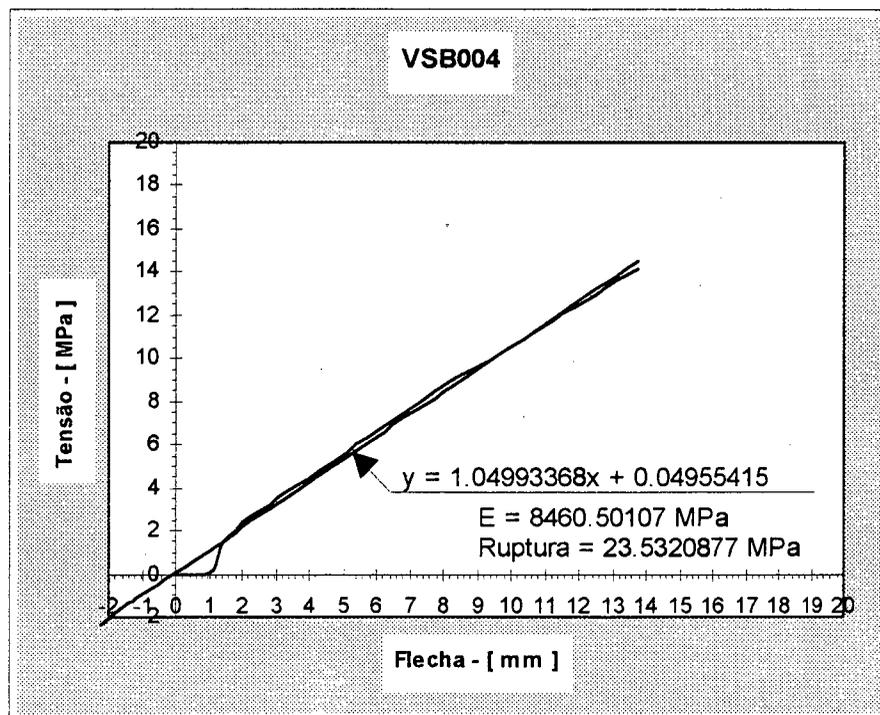


Fig. III.23 - Comportamento da viga VSB004 em flexão a 4 pontos.

- (06) vigas para ensaio de flexão simples a quatro pontos de vigas sem reforço de tecido de fibra de vidro e posição de emenda de topo tipo "C" (VSC)

IDENTIFI- CAÇÃO	RESISTÊNCIA [MPa]	SEÇÃO [mm ²]	MÓDULO DE ELASTICI- DADE [MPa]
VSC001	19	100 x 160	7280
VSC002	6	100 x 160	6842
VSC003	14	100 x 160	9827
VSC004	16	100 x 160	8574
VSC005	14	100 x 160	7480
VSC006	16	100 x 160	6536

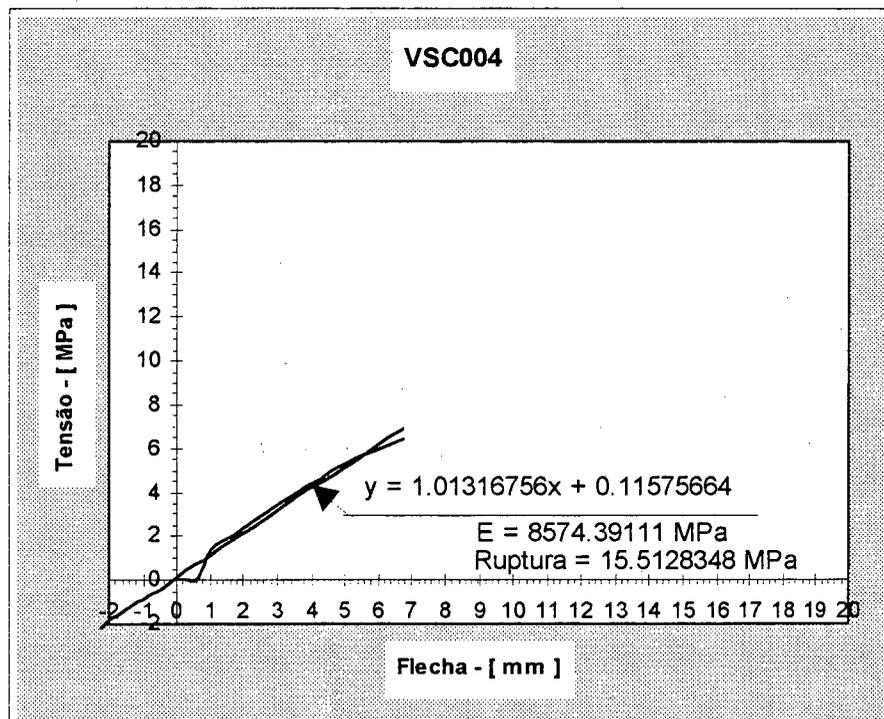


Fig. III.24 - Comportamento da viga VSC004 em flexão a 4 pontos.

- (06) vigas para ensaio de flexão simples a quatro pontos de vigas sem reforço de tecido de fibra de vidro e sem emendas (VSE)

IDENTIFI- CAÇÃO	RESISTÊNCIA [MPa]	SEÇÃO [mm ²]	MÓDULO DE ELASTICI- DADE [MPa]
VSE001	25	100 x 160	6443
VSE002	27	100 x 160	8412
VSE003	32	100 x 160	7626
VSE004	21	100 x 160	7277
VSE005	31	100 x 160	7270
VSE006	30	100 x 160	7189

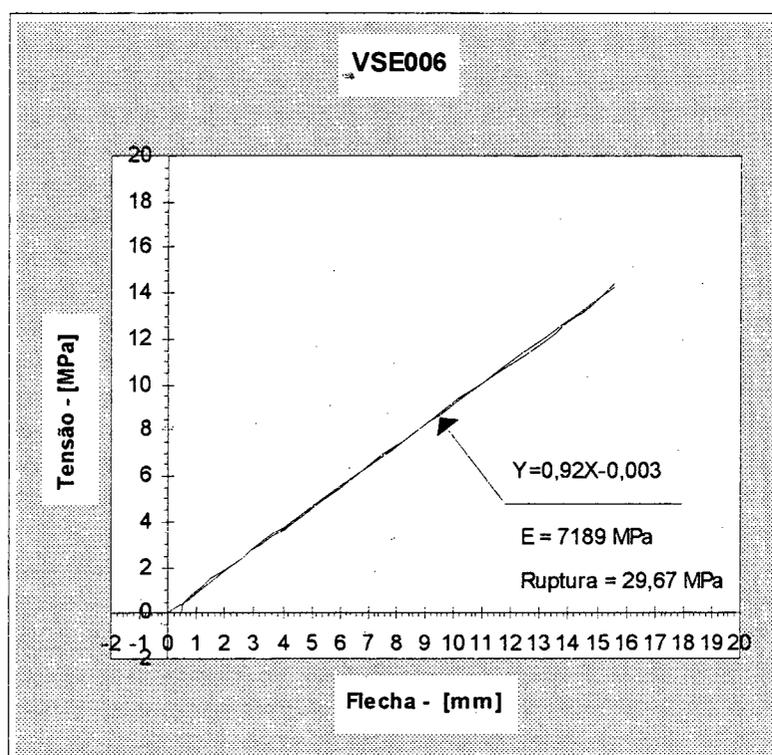


Fig. III.25 - Comportamento da viga VSE006 em flexão a 4 pontos.

• (06) vigas para ensaio de flexão simples a quatro pontos de vigas sem reforço de tecido de fibra de vidro e emenda por entalhes múltiplos (finger-joints), com geometria de entalhes múltiplos aconselhada para grandes esforços solicitantes conforme norma DIN 68 140^[16], ver fig.III.26, (VFJ)

IDENTIFI- CAÇÃO	RESISTÊNCIA [MPa]	SEÇÃO [mm ²]	MÓDULO DE ELASTICI- DADE [MPa]
VFJ001	35	100 x 150	7382
VFJ002	24	100 x 150	7241
VFJ003	25	100 x 150	7585

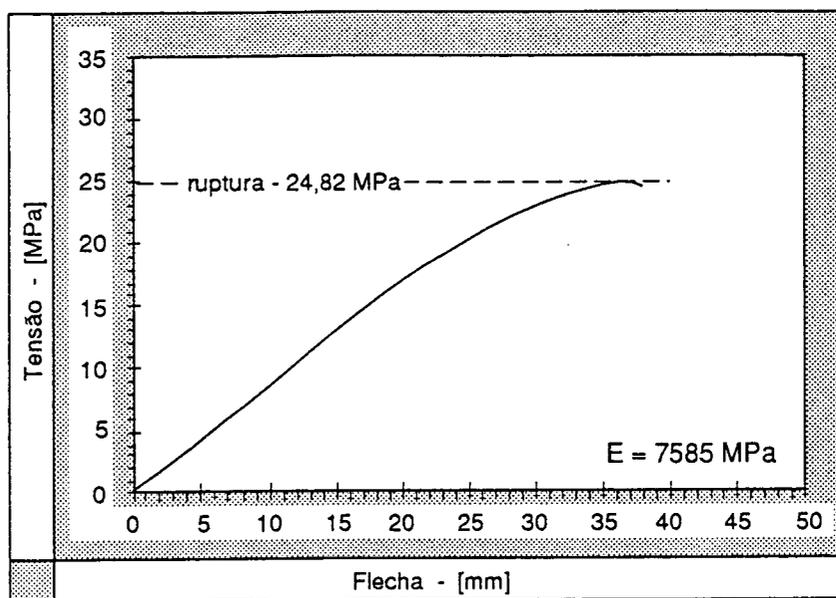


Fig. III.26 - Comportamento da viga VFJ003 em flexão a 4 pontos.

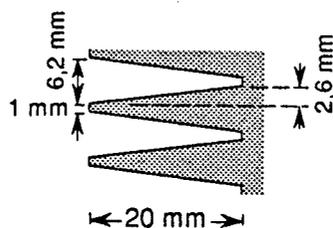


Fig. III.27 - Geometria dos entalhes múltiplos (finger-joints)

Em resumo os resultados dos ensaios das vigas foram os seguintes:

VIGA	RESISTÊNCIA [MPa]	M. DE ELASTICIDADE [MPa]
VCA001	20	7681
VCA002	22	7156
VCA003	25	8523
VCA004	21	8574
VCA005	15	6558
VCA006	24	8967
VCB001	37	10176
VCB002	23	7678
VCB003	31	7442
VCB004	31	7577
VCB005	24	8950
VCB006	37	9304
VCC001	16	7295
VCC002	19	8622
VCC003	26	8864
VCC004	22	8141
VCC005	22	7634
VCC006	13	5604
VSA001	32	8835
VSA002	20	8549
VSA003	18	9153
VSA004	13	8276
VSA005	19	8016
VSA006	12	7435
VSB001	14	4292
VSB002	27	11052
VSB003	31	7969
VSB004	24	8461
VSB005	15	7067
VSB006	47	8708
VSC001	19	7280
VSC002	6	6842
VSC003	14	9827
VSC004	16	8574
VSC005	14	7480
VSC006	16	6536
VSE001	25	6443
VSE002	27	8412
VSE003	32	7626
VSE004	21	7277
VSE005	31	7270
VSE006	30	7189
VFJ001	35	7382
VFJ002	24	7241
VFJ003	25	7585

Tabela III.01 - Resultados dos ensaios de flexão a quatro pontos das vigas. □

CAPÍTULO IV

**ANÁLISE ESTATÍSTICA
DOS RESULTADOS**

IV . ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS.

É feita uma análise preliminar dos dados obtidos em um experimento onde faz-se necessário encontrar os valores de certos parâmetros básicos que medem a variabilidade das observações; preparar resumos gráficos das frequências; analisar os resíduos para localizar possíveis valores espúrios falsos e comprovar estatisticamente se a distribuição é do tipo normal ou Gauss, suposição que é normalmente feita e muitas vezes não testada, na interpretação dos resultados de um experimento com dados aleatórios.

A partir disso, faz-se então a análise das distribuições dos parâmetros amostrais; provas de hipóteses; comparação de "K" grupos e comparação múltipla de médias, toda esta análise no caso em que não se conhece o desvio padrão da população (σ), ver anexos.

-Ensaio físicos e mecânicos de caracterização das madeiras *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*.

Para estes ensaios foi realizada somente uma análise preliminar dos dados obtidos, onde encontra-se os valores dos parâmetros básicos que medem a variabilidade das observações, tais como média, desvio padrão, etc... Pois, este estudo não é o objeto principal deste trabalho, mas serve somente para caracterizar o material madeira utilizado. São apresentadas a seguir as características numéricas destes ensaios.

- Ensaio físicos

- Teor de umidade e massa volumétrica (*Pinus elliottii* e *Pinus taeda*)

■ CARACTERÍSTICAS NUMÉRICAS :

ESPÉCIE	Pinus elliottii		Pinus taeda	
	Valores	Massa volumétrica M_v [g/cm ³]	Teor de umidade H [%]	Massa volumétrica M_v [g/cm ³]
menor valor	0,41	9,78	0,37	10,79
valor médio	0,48	13,93	0,44	11,77
valores corrigidos (*)	0,53	15	0,48	15
	0,59	35	0,54	35
maior valor	0,59	16,56	0,56	12,68
desvio padrão	0,04	1,61	0,05	0,44
coef. de variação	8,76	11,41	11,50	3,71

(*) massa volumétrica: valor corrigido pela tabela de massa volumétrica com teor de umidade corrigido de KOLLMANN e CÔTÉ [1984]^[21], para os teores de umidade de 15% e 35% respectivamente.

Tabela IV.01 - Valores dos resultados do ensaio

- Ensaio mecânicos

- Cisalhamento paralelo às fibras da madeira (*Pinus elliottii* e *Pinus taeda*)

■ CARACTERÍSTICAS NUMÉRICAS:

ESPÉCIE	<i>Pinus elliottii</i>	<i>Pinus taeda</i>
Valores	Resistência [MPa]	Resistência [MPa]
menor valor	3,67	3,62
valor médio	5,29	5,52
maior valor	10,19	8,85
desvio padrão	1,33	1,22
coef. de variação	25,18	22,02

Tabela IV.02 - Valores dos resultados do ensaio

- Compressão paralela às fibras da madeira (*Pinus elliottii* e *Pinus taeda*)

■ CARACTERÍSTICAS NUMÉRICAS:

ESPÉCIE	<i>Pinus elliottii</i>	<i>Pinus taeda</i>
Valores	Resistência [MPa]	Resistência [MPa]
menor valor	21,33	22,34
valor médio	28,93	28,96
maior valor	47,78	42,05
desvio padrão	7,06	4,94
coef. de variação	24,39	17,06

Tabela IV.03 - Valores dos resultados do ensaio

- Flexão simples a quatro pontos (ASTM D 143-52 e *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*)

■ CARACTERÍSTICAS NUMÉRICAS:

ESPÉCIE	Pinus elliottii		Pinus taeda		
	Valores	Resistência (MPa)	Em (MPa)	Resistência (MPa)	Em (MPa)
menor valor		18,31	3539,22	32,68	6045,32
valor médio		31,89	5178,35	55,65	10036,31
maior valor		45,20	7146,80	93,07	17529,14
desvio padrão		6,58	1092,74	16,46	2963,65
coef. de variação		20,63	21,10	29,59	29,53

Tabela IV.04 - Valores dos resultados do ensaio

- Tração normal às fibras da madeira (*Pinus elliottii* e *Pinus taeda*)

■ CARACTERÍSTICAS NUMÉRICAS:

ESPÉCIE	Pinus elliottii	Pinus taeda
Valores	Resistência (MPa)	Resistência (MPa)
menor valor	0,35	1,19
valor médio	2,62	2,43
maior valor	5,02	3,69
desvio padrão	1,44	0,67
coef. de variação	54,97	27,40

Tabela IV.05 - Valores dos resultados do ensaio

- Tração paralela às fibras da madeira (*Pinus elliottii* e *Pinus taeda*)

■ CARACTERÍSTICAS NUMÉRICAS:

ESPÉCIE	<i>Pinus elliottii</i>	<i>Pinus taeda</i>
Valores	Resistência (MPa)	Resistência (MPa)
menor valor	16,07	22,16
valor médio	38,19	53,04
maior valor	58,82	84,76
desvio padrão	11,31	19,73
coef. de variação	29,61	37,19

Tabela IV.06 - Valores dos resultados do ensaio

Quadro resumo dos ensaios de caracterização física e mecânica das madeiras de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*:

Neste quadro são apresentados os valores médios obtidos dos ensaios de caracterização física e mecânica das duas madeiras, a saber, *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*, bem como resultados obtidos na literatura para servir de comparativo. Constata-se que os resultados obtidos no LEE são aproximados dos colhidos no IPT e também próximos dos colhidos nos EUA, KUBLER [1980]^[7]. Também constata-se que a madeira de *Pinus taeda* teve comportamento superior no conjunto de ensaios ao da madeira de *Pinus elliottii*, apesar de sua massa volumétrica ser menor.

CARACTERÍSTICAS	LEE		IPT ^[22]		KUBLER ^[7]
	<i>Pinus elliottii</i>	<i>Pinus taeda</i>	<i>Pinus elliottii</i>	<i>Pinus taeda</i>	<i>Pinus taeda</i>
H [%]	13,93	11,76	15	15	12
M _v [g/cm ³]	0,48	0,44	0,48	0,40	0,51
E _{long} [MPa]	5178	10036	6590	4900	12351
σ _f ^(*) [MPa]	-	-	49	37	-
σ _f ^(**) [MPa]	32	56	-	-	-
σ _f ^(***) [Mpa]	-	-	-	-	88
σ _{cd} [MPa]	29	29	19	15	49
σ _{lp} [MPa]	38	53	49	37	-
σ _{tn} [MPa]	3	2	3	3	3
τ _{pf} [MPa]	5	6	6	6	10

(*) - ensaio de flexão a três pontos seguindo NBR-6230(MB-26)^[12]

(**) - ensaio de flexão a quatro pontos com corpo de prova seguindo ASTM D 143-52^[18]

(***) - ensaio de flexão seguindo ASTM D 143-52^[18]

Tabela IV.07 - Apresentação comparativa dos resultados

- Caracterização mecânica de reforço de fibra de vidro.

Para esta etapa de ensaios foi realizado um tratamento estatístico mais elaborado, pois, os resultados destes ensaios estão diretamente relacionados com o objetivo principal deste trabalho, servindo como caracterização do material e do sistema de emenda testados. Para tal, foram elaborados resumos gráficos das frequências, análise de resíduos para localizar possíveis valores espúrios visando comprovar a normalidade da distribuição dos dados.

- Corpos de prova de tração paralela com reforço de fibra de vidro nacional (FN) e madeira de *Pinus elliotti*.

■ CARACTERÍSTICAS NUMÉRICAS:

Fibra nacional	
Média (MPa)	897.4830
$(X_i - \bar{X})$	-7.95808E
$(X_i - \bar{X})^2$	31288.72
$(X_i - \bar{X})^3$	303729.6
$(X_i - \bar{X})^4$	13606964
Desvio padrão	51.06264
C.V.	5.689538
Curtosis	0.009218
Assimetria	0.003777
Intervalo	153.61
Mínimo (MPa)	833.9
Máximo (MPa)	987.51
Soma	11667.28
Contagem	13

Tabela IV.08 - Valores dos resultados dos resultados

■ DESCRIÇÃO GRÁFICA DAS VARIÁVEIS CONTÍNUAS - CLASSES DE FREQUÊNCIA

<i>Intervalos (MPa)</i>	<i>Média do intervalo</i>	<i>Frequência (f)</i>	<i>Frequência acumulada (F)</i>	<i>Frequência relativa % (p)</i>	<i>Frequência relativa acumulada % (P)</i>
833.9 - 859.6	846.75	3	3	23.08	23.08
859.6 - 885.3	872.45	4	7	30.77	53.85
885.3 - 911	898.15	1	8	7.69	61.54
911 - 936.7	923.85	1	9	7.69	69.23
936.7 - 962.4	949.55	3	12	23.08	92.31
962.4 - 988.1	975.25	1	13	7.69	100
mais					

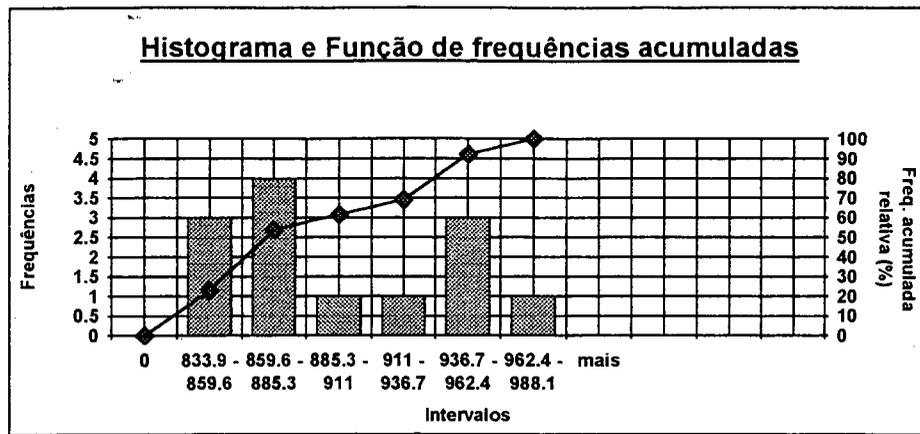


Fig. IV.01 - Tabela de classe de frequências e gráfico do histograma e das frequências acumuladas.

■ PROVAS DE NORMALIDADE

- Método analítico usando a prova de Kolmogorov-Smirnov (K - S);

maior $| \text{Dif.} | < D\alpha \Leftrightarrow$ A hipótese de normalidade não pode ser descartada a um nível de confiabilidade de 95%.

- Análise de Resíduos, valores espúrios;

Como valor de $r = 1,7630683 < T(13/0,05\%) \text{ tab.} = 2,33$, não existe valor espúrio.

■ CARACTERÍSTICAS DA DISTRIBUIÇÃO

- Erro relativo da estimativa da média da população (Er);

$$Er = \sqrt{4,748041 \times ((32,370843) \div 13)} = 3,4384488\%$$

- Determinação do tamanho da amostra ;

$$n = (4,748041 \times 32,370843) \div (10)^2 = 1,5369809 \cong 2 \text{ amostras}$$

- Intervalo de confiança para a média da população ;

$$866,62357 \leq \mu \leq 928,34257$$

com nível de confiabilidade de 95%.

- Corpos de prova de tração paralela com reforço de fibra de vidro francesa (FF) e madeira de *Pinus elliotti*.

■ CARACTERÍSTICAS NUMÉRICAS

Fibra francesa	
Média (MPa)	1085.534
$(X_i - \bar{X})$	-5.68434E
$(X_i - \bar{X})^2$	53677.87
$(X_i - \bar{X})^3$	-1520512.9
$(X_i - \bar{X})^4$	865342993.6
Desvio padrão	115.8424
C.V.	10.67147
Curtosis	0.041712
Assimetria	-0.018601
Intervalo	277.96
Mínimo (MPa)	936.31
Máximo (MPa)	1214.27
Soma	5427.67
Contagem	5

Tabela IV.09 - Valores dos resultados do ensaio

■ PROVAS DE NORMALIDADE

- Método analítico usando a prova de Kolmogorov-Smirnov (K - S);

maior | Dif. | < D α \Rightarrow A hipótese de normalidade não pode ser descartada a um nível de confiabilidade de 95%.

- Análise de Resíduos, valores espúrios;

Como valor de $r = 1,2881636 < T(5/0,05\%) \text{ tab.} = 1,67$, não existe valor espúrio.

■ CARACTERÍSTICAS DA DISTRIBUIÇÃO

- Erro relativo da estimativa da média da população (Er);

$$Er = \sqrt{7,706176 \times ((113,88027) \div 5)} = 13,248256 \%$$

- Determinação do tamanho da amostra;

$$n = (7,706176 \times 113,88027) \div (10)^2 = 8,775814 \cong 9 \text{ amostras}$$

- Intervalo de confiança para a média da população;

$$941,71968 \leq \mu \leq 1229,3483$$

com nível de confiabilidade de 95%.

- Corpos de prova de tração paralela com reforço de fibra de vidro nacional e francesa (FN-FF) e madeira de *Pinus elliotti*.

■ CARACTERÍSTICAS NUMÉRICAS

Fibra nacional-francesa	
Média (MPa)	949.7194
$(X_i - \bar{X})$	-1.13687E
$(X_i - \bar{X})^2$	212666.8
$(X_i - \bar{X})^3$	26423657.2
$(X_i - \bar{X})^4$	83628849
Desvio padrão	111.8472
C.V.	11.77687
Curtosis	0.009219
Assimetria	0.013802
Intervalo	380.37
Mínimo (MPa)	833.9
Máximo (MPa)	1214.27
Soma	17094.95
Contagem	18

Tabela IV.10 - Valores dos resultados do ensaio

■ DESCRIÇÃO GRÁFICA DAS VARIÁVEIS CONTÍNUAS - CLASSES DE FREQUÊNCIA

<i>Intervalos (MPa)</i>	<i>Média do intervalo</i>	<i>Frequência (f)</i>	<i>Frequência acumulada (F)</i>	<i>Frequência relativa % (p)</i>	<i>Frequência relativa acumulada % (P)</i>
833.9 - 897.4	865.65	7	7	38.89	38.89
897.4 - 960.9	929.15	6	13	33.33	72.22
960.9 - 1024.4	992.65	2	15	11.11	83.33
1024.4 - 1087.9	1056.15	0	15	0	83.33
1087.9 - 1151.4	1119.65	1	16	5.56	88.89
1151.4 - 1214.9	1183.15	2	18	11.11	100
mais					

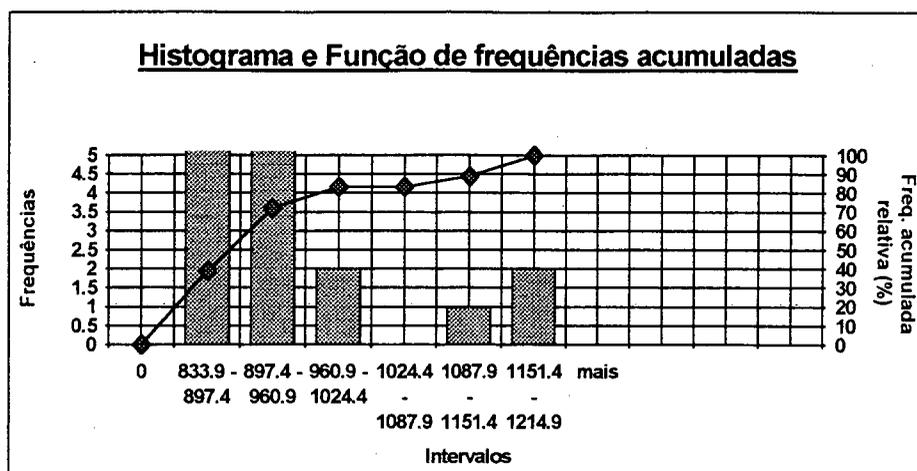


Fig. IV.02 - Tabela de classe de frequências e gráfico do histograma e das frequências acumuladas.

■ PROVAS DE NORMALIDADE

- Método analítico usando a prova de Kolmogorov-Smirnov (K - S);

maior $| \text{Dif.} | > D\alpha \Rightarrow$ A hipótese de normalidade pode ser descartada a um nível de confiabilidade de 95%.

- Análise de Resíduos, valores espúrios;

Como valor de $r = 2,3652838 < T(18/0,05\%) \text{ tab.} = 2,50$, não existe valor espúrio.

■ CARACTERÍSTICAS DA DISTRIBUIÇÃO

- Erro relativo da estimativa da média da população (Er);

$$Er = \sqrt{4,4521 \times ((138,69467) \div 18)} = 5,8570117\%$$

- Determinação do tamanho da amostra;

$$n = (4,4521 \times 138,69467) \div (10)^2 = 6,1748254 \cong 6 \text{ amostras}$$

- Intervalo de confiança para a média da população;

$$894,09423 \leq \mu \leq 1005,3446$$

com nível de confiabilidade de 95%.

- **Corpos de prova de tração paralela com reforço de fibra de vidro nacional (FN) e madeira de *Pinus taeda*.**

■ CARACTERÍSTICAS NUMÉRICAS

Fibra nacional	
Média (MPa)	979.0723
$(X_i - \bar{X})$	-2.04636E
$(X_i - \bar{X})^2$	238197.4
$(X_i - \bar{X})^3$	-11098803.7
$(X_i - \bar{X})^4$	10570949
Desvio padrão	140.8892
C.V.	14.39007
Curtosis	2.422049
Assimetria	-0.344224
Intervalo	453.52
Mínimo (MPa)	731.49
Máximo (MPa)	1185.01
Soma	12727.94
Contagem	13

Tabela IV.11 - Valores dos resultados do ensaio

■ DESCRIÇÃO GRÁFICA DAS VARIÁVEIS CONTÍNUAS - CLASSES DE FREQUÊNCIA

Intervalos (MPa)	Média do intervalo	Frequência (f)	Frequência acumulada (F)	Frequência relativa % (p)	Frequência relativa acumulada % (P)
731.4 - 807.4	769.4	2	2	15.38	15.38
807.4 - 883.4	845.4	0	2	0	15.38
883.4 - 959.4	921.4	4	6	30.77	46.15
959.4 - 1035.4	997.4	2	8	15.38	61.54
1035.4 - 1111.4	1073.4	3	11	23.08	84.62
1111.4 - 1187.4	1149.4	2	13	15.38	100
mais					

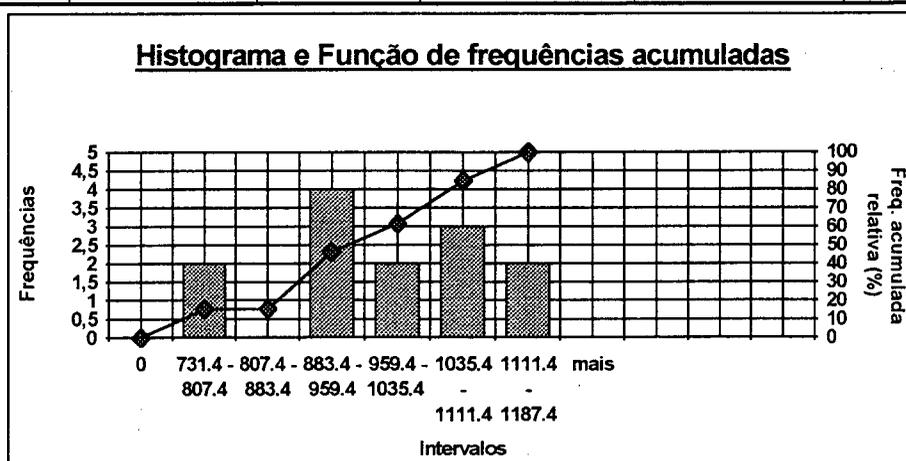


Fig. IV.03 - Tabela de classe de frequências e gráfico do histograma e das frequências acumuladas.

■ PROVAS DE NORMALIDADE

- Método analítico usando a prova de Kolmogorov-Smirnov (K - S);

maior | Dif. | < $D\alpha \Rightarrow$ A hipótese de normalidade não pode ser descartada a um nível de confiabilidade de 95%.

- Análise de Resíduos, valores espúrios;

Como valor de $r = 1,7572829 < \bar{T}(13/0,05\%) \text{ tab.} = 2,33$, não existe valor espúrio.

■ CARACTERÍSTICAS DA DISTRIBUIÇÃO

- Erro relativo da estimativa da média da população (Er);

$$Er = \sqrt{4,748041x((207,07437) \div 13)} = 8,6965846\%$$

- Determinação do tamanho da amostra ;

$$n = (4,748041 \times 207,07437) \div (10)^2 = 9,831976 \cong 10 \text{ amostras}$$

- Intervalo de confiança para a média da população ;

$$893,92645 \leq \mu \leq 1064,2181$$

com nível de confiabilidade de 95%.

- **Corpos de prova de tração paralela com reforço de fibra de vidro francesa (FF) e madeira de *Pinus taeda*.**

■ CARACTERÍSTICAS NUMÉRICAS

Fibra francesa	
Média (MPa)	1180.628
$(X_i - \bar{X})$	-4.54747E
$(X_i - \bar{X})^2$	83428.16
$(X_i - \bar{X})^3$	-1095680.9
$(X_i - \bar{X})^4$	28823894
Desvio padrão	144.4196
C.V.	12.23244
Curtosis	2.070605
Assimetria	-0.101671
Intervalo	387.69
Mínimo (MPa)	980.2
Máximo(MPa)	1367.89
Soma	5903.14
Contagem	5

Tabela IV.12 - Valores dos resultados do ensaio

■ PROVAS DE NORMALIDADE

- Método analítico usando a prova de Kolmogorov-Smirnov (K - S);

maior | Dif. | < $D\alpha \Rightarrow$ A hipótese de normalidade não pode ser descartada a um nível de confiabilidade de 95%.

- Análise de Resíduos, valores espúrios;

Como valor de $r = 1,3878166 < T(5/0,05\%) \text{ tab.} = 1,67$, não existe valor espúrio.

■ CARACTERÍSTICAS DA DISTRIBUIÇÃO

- Erro relativo da estimativa da média da população (Er);

$$Er = \sqrt{7,706176 \times ((149,63269) \div 5)} = 15,186151\%$$

- Determinação do tamanho da amostra ;

$$n = (7,706176 \times 149,63269) \div (10)^2 = 11,530958 \cong 12 \text{ amostras}$$

- Intervalo de confiança para a média da população ;

$$1001,3361 \leq \mu \leq 1359,92$$

com nível de confiabilidade de 95%.

- **Corpos de prova de tração paralela com reforço de fibra de vidro nacional e francesa (FN-FF) e madeira de *Pinus taeda*.**

■ CARACTERÍSTICAS NUMÉRICAS

Fibra nacional-francesa	
Média (MPa)	1035.06
$(X_i - \bar{X})$	1.25056E
$(X_i - \bar{X})^2$	468325.9
$(X_i - \bar{X})^3$	-2627995.3
$(X_i - \bar{X})^4$	32760797
Desvio padrão	165.9776
C.V.	16.03555
Curtosis	2.688627
Assimetria	-0.034788
Intervalo	636.4
Mínimo (MPa)	731.49
Máximo (MPa)	1367.89
Soma	18631.08
Contagem	18

Tabela IV.13 - Valores dos resultados do ensaio

■ DESCRIÇÃO GRÁFICA DAS VARIÁVEIS CONTÍNUAS - CLASSES DE FREQUÊNCIA

Intervalos (MPa)	Média do intervalo	Frequência (f)	Frequência acumulada (F)	Frequência relativa % (p)	Frequência relativa acumulada % (P)
731 - 838	784.5	2	2	11.11	11.11
838 - 945	891.5	2	4	11.11	22.22
945 - 1052	998.5	5	9	27.78	50
1052 - 1159	1105.5	5	14	27.78	77.78
1159 - 1266	1212.5	3	17	16.67	94.44
1266 - 1373	1319.5	1	18	5.56	100
mais					

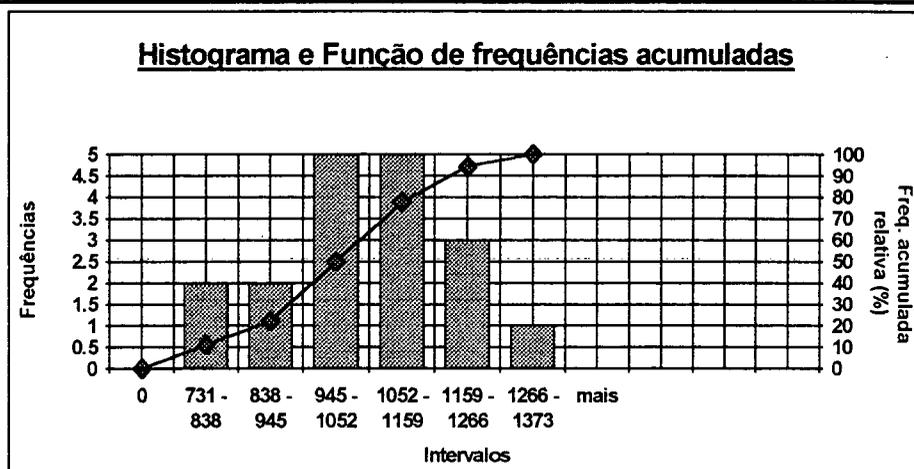


Fig. IV.04- Tabela de classe de frequências e gráfico do histograma e das frequências acumuladas.

■ PROVAS DE NORMALIDADE

- Método analítico usando a prova de Kolmogorov-Smirnov (K - S);

maior | Dif. | > D α \Rightarrow A hipótese de normalidade pode ser descartada a um nível de confiabilidade de 95%.

- Análise de Resíduos, valores espúrios;

Como valor de $r = 2,0052699 < T(18/0,05\%) \text{ tab.} = 2,50$, não existe valor espúrio.

■ CARACTERÍSTICAS DA DISTRIBUIÇÃO

- Erro relativo da estimativa da média da população (Er);

$$Er = \sqrt{4,4521 \times ((257,13915) \div 18)} = 7,9749929\%$$

- Determinação do tamanho da amostra;

$$n = (4,4521 \times 257,13915) \div (10)^2 = 11,448092 \cong 11 \text{ amostras}$$

- Intervalo de confiança para a média da população ;

$$952,51404 \leq \mu \leq 1117,606$$

com nível de confiabilidade de 95%.

Quadro resumo dos ensaios de tração paralela de caracterização do reforço de tecido de fibra de vidro:

Este quadro apresenta os resultados médios de resistência à tensão de ruptura do tecido de fibra de fibra de vidro nacional e francês composto com as madeiras de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*, quando submetidos à tração paralela às fibras. Constata-se um acréscimo no resultado quando o tecido de fibra de vidro utilizado foi o de fabricação francesa, talvez devido a este possuir maior quantidade de fibras que o de fabricação nacional. No entanto, o acréscimo foi pouco acentuado, podendo-se considerar os resultados semelhantes. E finalmente, constata-se que a madeira de *Pinus taeda* apresentou uma melhor aderência nesta composição, isso verificado pelos resultados levemente superiores aos da composição com a madeira de *Pinus elliottii*.

Resistência à tração paralela as fibras da madeira σ_{tp+fv} - [MPa]		
Variações	<i>Pinus elliottii</i>	<i>Pinus taeda</i>
com tecido de fibra de vidro nacional (FN)	897	979
com tecido de fibra de vidro francês (FF)	1086	1181
média (FN-FF)	950	1035

Tabela IV.14 - Valores dos resultados do ensaio

- Análise do comportamento dos elementos estruturais (vigas).

Esta etapa de ensaios nos fornece os dados da aplicação prática desta pesquisa, ou seja, são resultados de situações que simulam o uso do material, através de peças em tamanho real. Devido a importância na análise dos resultados, foi realizado um tratamento estatístico mais apurado, desde a análise preliminar dos parâmetros básicos até comparações dos vários grupos de vigas ensaiadas, bem como, dos sistemas de emendas empregados. Através da análise das comparações das médias dos resultados feita entre todos os conjuntos de vigas e após separadamente dois a dois, constata-se a possibilidade da substituição de um sistema pelo outro, ou seja o objetivo final deste trabalho.

- Vigas com reforço de tecido de fibra de vidro, tipo A (VCA).

■ CARACTERÍSTICAS NUMÉRICAS

Resistência (MPa)	
Média	19,64342
$(X_i - \bar{X})$	0
$(X_i - \bar{X})^2$	73,03929
$(X_i - \bar{X})^3$	-85,84454
$(X_i - \bar{X})^4$	1383,429
Desvio padrão	3,822022
C.V.	19,45700
Curtosis	1,555947
Assimetria	-0,336863
Intervalo	9,200047
Mínimo	14,90088
Máximo	24,10093
Soma	117,8605
Contagem	6

Mód.elastic. (MPa)	
Média	7909,937
$(X_i - \bar{X})$	9,09495E
$(X_i - \bar{X})^2$	4384777,
$(X_i - \bar{X})^3$	-12076414
$(X_i - \bar{X})^4$	5,25E+13
Desvio padrão	936,4590
C.V.	11,83901
Curtosis	1,640428
Assimetria	-0,322175
Intervalo	2409,746
Mínimo	6557,606
Máximo	8967,353
Soma	47459,62
Contagem	6

Tabela IV.15 - Valores dos resultados do ensaio

■ PROVAS DE NORMALIDADE

- Método analítico usando a prova de Kolmogorov-Smirnov (K - S);

• Resistência:

maior | Dif. | < $D\alpha \Rightarrow$ A hipótese de normalidade não pode ser descartada a um nível de confiabilidade de 95%.

• Módulo de elasticidade:

maior | Dif. | < $D\alpha \Rightarrow$ A hipótese de normalidade não pode ser descartada a um nível de confiabilidade de 95%.

- Análise de Resíduos, valores espúrios;

• Resistência:

Como valor de $r = 1,2408445 < T(6/0,05\%) \text{ tab.} = 1,82$, não existe valor espúrio.

• Módulo de elasticidade:

Como valor de $r = 1,4440899 < T(6/0,05\%) \text{ tab.} = 1,82$, não existe valor espúrio.

■ CARACTERÍSTICAS DA DISTRIBUIÇÃO

- Erro relativo da estimativa da média da população (Er);

$$Er = \sqrt{6,61 \times ((378,57516) \div 6)} = 20,422136\%$$

- Determinação do tamanho da amostra :

$$n = (6,61 \times 378,57516) \div (10)^2 = 25,023818 \cong 25 \text{ amostras}$$

- Intervalo de confiança para a média da população :

$$15,631801 \leq \mu \leq 23,655039$$

com nível de confiabilidade de 95%.

- **Vigas com reforço de tecido de fibra de vidro, tipo B (VCB).**

■ CARACTERÍSTICAS NUMÉRICAS

Resistência (MPa)	
Média	30,56235
$(X_i - \bar{X})$	-7,10543E
$(X_i - \bar{X})^2$	169,1577
$(X_i - \bar{X})^3$	-190,2587
$(X_i - \bar{X})^4$	7301,945
Desvio padrão	5,816488
C.V.	19,03154
Curtosis	1,531109
Assimetria	-0,211827
Intervalo	13,54268
Mínimo	23,13458
Máximo	36,67726
Soma	183,3741
Contagem	6

Mód.elastic. (MPa)	
Média	8521,103
$(X_i - \bar{X})$	-2,72848E
$(X_i - \bar{X})^2$	6303141,
$(X_i - \bar{X})^3$	23901961
$(X_i - \bar{X})^4$	1,05E+14
Desvio padrão	1122,777
C.V.	13,17642
Curtosis	1,595340
Assimetria	0,369976
Intervalo	2734,099
Mínimo	7441,601
Máximo	10175,70
Soma	51126,62
Contagem	6

Tabela IV.16 - Valores dos resultados do ensaio

■ PROVAS DE NORMALIDADE

- Método analítico usando a prova de Kolmogorov-Smirnov (K - S);

• Resistência:

maior | Dif. | < D α \Rightarrow A hipótese de normalidade não pode ser descartada a um nível de confiabilidade de 95%.

• Módulo de elasticidade:

maior | Dif. | < D α \Rightarrow A hipótese de normalidade não pode ser descartada a um nível de confiabilidade de 95%.

- Análise de Resíduos, valores espúrios;

• Resistência:

Como valor de $r = 1,2770196 < T(6/0,05\%) \text{ tab.} = 1,82$, não existe valor espúrio.

• Módulo de elasticidade:

Como valor de $r = 1,473664 < T(6/0,05\%) \text{ tab.} = 1,82$, não existe valor espúrio.

■ CARACTERÍSTICAS DA DISTRIBUIÇÃO

- Erro relativo da estimativa da média da população (Er);

$$Er = \sqrt{6,61 \times ((362,19978) \div 6)} = 19,975571\%$$

- Determinação do tamanho da amostra ;

$$n = (6,61 \times 362,19978) \div (10)^2 = 23,941406 \cong 24 \text{ amostras}$$

- Intervalo de confiança para a média da população ;

$$24,457327 \leq \mu \leq 36,667373$$

com nível de confiabilidade de 95%.

- **Vigas com reforço de tecido de fibra de vidro, tipo C (VCC).**

■ CARACTERÍSTICAS NUMÉRICAS

Resistência(MPa)	
Média	19,72765
$(X_i - \bar{X})$	-5,32907E
$(X_i - \bar{X})^2$	101,5363
$(X_i - \bar{X})^3$	-82,47867
$(X_i - \bar{X})^4$	3416,981
Desvio padrão	4,506358
C.V.	22,84285
Curtosis	1,988615
Assimetria	-0,197462
Intervalo	12,64894
Mínimo	13,13352
Máximo	25,78247
Soma	118,3659
Contagem	6

Mód.elastic. (MPa)	
Média	7693,341
$(X_i - \bar{X})$	5,45697E
$(X_i - \bar{X})^2$	6961115,
$(X_i - \bar{X})^3$	-66847568
$(X_i - \bar{X})^4$	2,17E+14
Desvio padrão	1179,925
C.V.	15,33696
Curtosis	2,691443
Assimetria	-0,891544
Intervalo	3260,171
Mínimo	5604,249
Máximo	8864,421
Soma	46160,05
Contagem	6

Tabela IV.17 - Valores dos resultados do ensaio

■ PROVAS DE NORMALIDADE

- Método analítico usando a prova de Kolmogorov-Smirnov (K - S);

• Resistência:

maior | Dif. | < D α \Rightarrow A hipótese de normalidade não pode ser descartada a um nível de confiabilidade de 95%.

• Módulo de elasticidade:

maior | Dif. | < D α \Rightarrow A hipótese de normalidade não pode ser descartada a um nível de confiabilidade de 95%.

- Análise de Resíduos, valores espúrios;

• Resistência:

Como valor de $r = 1,4632947 < T(6/0,05\%) \text{ tab.} = 1,82$, não existe valor espúrio.

• Módulo de elasticidade:

Como valor de $r = 1,7705295 < T(6/0,05\%) \text{ tab.} = 1,82$, não existe valor espúrio.

■ CARACTERÍSTICAS DA DISTRIBUIÇÃO

- Erro relativo da estimativa da média da população (Er);

$$Er = \sqrt{6,61 \times ((521,7958) \div 6)} = 23,975926\%$$

- Determinação do tamanho da amostra ;

$$n = (6,61 \times 521,7958) \div (10)^2 = 34,490702 \cong 34 \text{ amostras}$$

- Intervalo de confiança para a média da população ;

$$14,997748 \leq \mu \leq 24,457552$$

com nível de confiabilidade de 95%.

- **Vigas sem reforço de tecido de fibra de vidro, tipo A (VSA).**

■ PROVAS DE NORMALIDADE

- Análise de Resíduos, valores espúrios;

• Resistência:

Como valor de $r = 1,8323795 > T(6/0,05\%) \text{ tab.} = 1,82$, existe valor espúrio. O valor da viga VSA001 foi abandonado,

■ CARACTERÍSTICAS NUMÉRICAS (SEM VALOR ESPÚRIO - viga VSA001).

Resistência (MPa)	
Média	16,19138
$(X_i - \bar{X})$	0
$(X_i - \bar{X})^2$	53,08280
$(X_i - \bar{X})^3$	-60,28457
$(X_i - \bar{X})^4$	718,2999
Desvio padrão	3,642897
C.V.	22,49898
Curtosis	1,274582
Assimetria	-0,348546
Intervalo	7,859071
Mínimo	11,76627
Máximo	19,62534
Soma	80,95693
Contagem	5

Mód.elastic. (MPa)	
Média	8285,832
$(X_i - \bar{X})$	4,54747E
$(X_i - \bar{X})^2$	1617222,
$(X_i - \bar{X})^3$	35153018
$(X_i - \bar{X})^4$	1,09E+13
Desvio padrão	635,8502
C.V.	7,673945
Curtosis	2,099845
Assimetria	0,038220
Intervalo	1717,505
Mínimo	7435,357
Máximo	9152,863
Soma	41429,16
Contagem	5

Tabela IV.18 - Valores dos resultados do ensaio

■ PROVAS DE NORMALIDADE

- Método analítico usando a prova de Kolmogorov-Smirnov (K - S);

• Resistência:

maior | Dif. | < $D\alpha \Rightarrow$ A hipótese de normalidade não pode ser descartada a um nível de confiabilidade de 95%.

• Módulo de elasticidade:

maior | Dif. | < $D\alpha \Rightarrow$ A hipótese de normalidade não pode ser descartada a um nível de confiabilidade de 95%.

- Análise de Resíduos, valores espúrios;

• Resistência:

Como valor de $r = 1,2147228 < T(5/0,05\%) \text{ tab.} = 1,67$, não existe valor espúrio.

• Módulo de elasticidade:

Como valor de $r = 1,363577 < T(5/0,05\%) \text{ tab.} = 1,67$, não existe valor espúrio.

■ CARACTERÍSTICAS DA DISTRIBUIÇÃO

- Erro relativo da estimativa da média da população (Er);

$$Er = \sqrt{7,650756 \times ((506,2041) \div 5)} = 27,831076 \%$$

- Determinação do tamanho da amostra ;

$$n = (7,650756 \times 506,2041) \div (10)^2 = 38,728441 \cong 39 \text{ amostras}$$

- Intervalo de confiança para a média da população ;

$$11,685143 \leq \mu \leq 20,697617$$

com nível de confiabilidade de 95%.

- **Vigas sem reforço de tecido de fibra de vidro, tipo B (VSB).**

■ **CARACTERÍSTICAS NUMÉRICAS:**

Resistência (MPa)	
Média	26,13403
$(X_i - \bar{X})$	-7,10543E
$(X_i - \bar{X})^2$	758,4318
$(X_i - \bar{X})^3$	6285,180
$(X_i - \bar{X})^4$	242791,8
Desvio padrão	12,31610
C.V.	47,12668
Curtosis	2,532516
Assimetria	0,737086
Intervalo	33,42662
Mínimo	13,92524
Máximo	47,35186
Soma	156,8041
Contagem	6

Mód.elastic. (MPa)	
Média	7924,617
$(X_i - \bar{X})$	-2,72848E
$(X_i - \bar{X})^2$	24615440
$(X_i - \bar{X})^3$	-17372339
$(X_i - \bar{X})^4$	2,70E+15
Desvio padrão	2218,803
C.V.	27,99887
Curtosis	2,681821
Assimetria	-0,348435
Intervalo	6760,057
Mínimo	4291,557
Máximo	11051,61
Soma	47547,70
Contagem	6

Tabela IV.19 - Valores dos resultados do ensaio

■ **PROVAS DE NORMALIDADE**

- Método analítico usando a prova de Kolmogorov-Smirnov (K - S);

• Resistência:

maior | Dif. | < D α \Rightarrow A hipótese de normalidade não pode ser descartada a um nível de confiabilidade de 95%.

• Módulo de elasticidade:

maior | Dif. | < D α \Rightarrow A hipótese de normalidade não pode ser descartada a um nível de confiabilidade de 95%.

- Análise de Resíduos, valores espúrios;

- Resistência:

Como valor de $r = 1,7227722 < T(6/0,05\%) \text{ tab.} = 1,82$, não existe valor espúrio.

- Módulo de elasticidade:

Como valor de $r = 1,6373961 < T(6/0,05\%) \text{ tab.} = 1,82$, não existe valor espúrio.

■ CARACTERÍSTICAS DA DISTRIBUIÇÃO

- Erro relativo da estimativa da média da população (Er);

$$Er = \sqrt{6,61 \times ((2220,9243) \div 6)} = 49,464314\%$$

- Determinação do tamanho da amostra ;

$$n = (6,61 \times 2220,9243) \div (10)^2 = 146,8031 \cong 147 \text{ amostras}$$

- Intervalo de confiança para a média da população ;

$$13,206972 \leq \mu \leq 39,061088$$

com nível de confiabilidade de 95%.

- **Vigas sem reforço de tecido de fibra de vidro, tipo C (VSC).**

■ PROVAS DE NORMALIDADE

- Análise de Resíduos, valores espúrios;

- Resistência:

Como valor de $r = 1,8487632 > T(6/0,05\%) \text{ tab.} = 1,82$, existe valor espúrio. O valor da viga VSC002 foi abandonado,

■ (SEM VALOR ESPÚRIO - viga VSC002).

Como valor de $r = 1,6840576 > T(5/0,05\%) \text{ tab.} = 1,67$, existe valor espúrio. O valor da viga VSC001 também foi abandonado,

■ CARACTERÍSTICAS NUMÉRICAS (SEM VALOR ESPÚRIO - vigas VSC001/002).

Resistência (MPa)	
Média	15,00162
$(X_i - \bar{X})$	-30,00324
$(X_i - \bar{X})^2$	451,9539
$(X_i - \bar{X})^3$	-6752,181
$(X_i - \bar{X})^4$	101294,7
Desvio padrão	0,786706
C.V.	5,244146
Curtosis	117531,0
Assimetria	-5337,689
Intervalo	1,629731
Mínimo	14,18967
Máximo	15,81941
Soma	60,00648
Contagem	4

Mód.elastic. (MPa)	
Média	8104,280
$(X_i - \bar{X})$	-16208,56
$(X_i - \bar{X})^2$	13739612
$(X_i - \bar{X})^3$	-1,06E+13
$(X_i - \bar{X})^4$	8,64E+16
Desvio padrão	1418,613
C.V.	17,50449
Curtosis	948,4322
Assimetria	-143,3755
Intervalo	3290,860
Mínimo	6535,898
Máximo	9826,759
Soma	32417,12
Contagem	4

Tabela IV.20 - Valores dos resultados do ensaio.

■ PROVAS DE NORMALIDADE

- Método analítico usando a prova de Kolmogorov-Smirnov (K - S);

• Resistência:

maior | Dif. | < $D\alpha \Rightarrow$ A hipótese de normalidade não pode ser descartada a um nível de confiabilidade de 95%.

• Módulo de elasticidade:

maior | Dif. | < $D\alpha \Rightarrow$ A hipótese de normalidade não pode ser descartada a um nível de confiabilidade de 95%.

- Análise de Resíduos, valores espúrios;

• Resistência:

Como valor de $r = 1,0395117 < T(4/0,05\%) \text{ tab.} = 1,46$, não existe valor espúrio.

• Módulo de elasticidade:

Como valor de $r = 1,2141987 < T(4/0,05\%) \text{ tab.} = 1,46$, não existe valor espúrio.

■ CARACTERÍSTICAS DA DISTRIBUIÇÃO

- Erro relativo da estimativa da média da população (Er);

$$Er = \sqrt{10,125124 \times ((27,501067) \div 4)} = 8,434362\%$$

- Determinação do tamanho da amostra;

$$n = (10,125124 \times 27,501067) \div (10)^2 = 2,7845171 \cong 3 \text{ amostras}$$

- Intervalo de confiança para a média da população;

$$13,749969 \leq \mu \leq 16,253271$$

com nível de confiabilidade de 95%.

- **Vigas sem emendas (referência).**

■ CARACTERÍSTICAS NUMÉRICAS

Resistência (MPa)	
Média	27,47833
$(X_i - \bar{X})$	-1,42109E
$(X_i - \bar{X})^2$	84,84748
$(X_i - \bar{X})^3$	-153,9383
$(X_i - \bar{X})^4$	2356,811
Desvio padrão	4,119404
C.V.	14,99146
Curtosis	1,964256
Assimetria	-0,482463
Intervalo	10,99
Mínimo	20,99
Máximo	31,98
Soma	164,87
Contagem	6

Mód.elastic. (MPa)	
Média	7369,5
$(X_i - \bar{X})$	0
$(X_i - \bar{X})^2$	2062037,
$(X_i - \bar{X})^3$	34690428
$(X_i - \bar{X})^4$	1,92E+13
Desvio padrão	642,1896
C.V.	8,714154
Curtosis	2,714342
Assimetria	0,286972
Intervalo	1969
Mínimo	6443
Máximo	8412
Soma	44217
Contagem	6

Tabela IV.21 - Valores dos resultados do ensaio

■ PROVAS DE NORMALIDADE

- Método analítico usando a prova de Kolmogorov-Smirnov (K - S);

• Resistência:

maior | Dif. | < D α \Rightarrow A hipótese de normalidade não pode ser descartada a um nível de confiabilidade de 95%.

• Módulo de elasticidade:

maior | Dif. | < D α \Rightarrow A hipótese de normalidade não pode ser descartada a um nível de confiabilidade de 95%.

- Análise de Resíduos, valores espúrios;

• Resistência:

Como valor de $r = 1,5750657 < T(6/0,05\%) \text{ tab.} = 1,82$, não existe valor espúrio.

• Módulo de elasticidade:

Como valor de $r = 1,6233523 < T(6/0,05\%) \text{ tab.} = 1,82$, não existe valor espúrio.

■ CARACTERÍSTICAS DA DISTRIBUIÇÃO

- Erro relativo da estimativa da média da população (Er):

$$Er = \sqrt{6,61 \times ((224,74402) \div 6)} = 15,735088\%$$

- Determinação do tamanho da amostra;

$$n = (6,61 \times 224,74402) \div (10)^2 = 14,85558 \cong 15 \text{ amostras}$$

- Intervalo de confiança para a média da população;

$$23,15458 \leq \mu \leq 31,802087$$

com nível de confiabilidade de 95%.

- Vigas com emendas por entalhes múltiplos - finger joints (referência).

■ CARACTERÍSTICAS NUMÉRICAS

Resistência (MPa)	
Média	28,02
$(X_i - \bar{X})$	3,55271E
$(X_i - \bar{X})^2$	70,6952
$(X_i - \bar{X})^3$	241,0329
$(X_i - \bar{X})^4$	2498,905
Desvio padrão	5,945384
C.V.	21,21836
Curtosis	1,5
Assimetria	0,702347
Intervalo	10,52
Mínimo	24,36
Máximo	34,88
Soma	84,06
Contagem	3

Mód. elast. (MPa)	
Média	7402,666
$(X_i - \bar{X})$	-9,09495E
$(X_i - \bar{X})^2$	59808,66
$(X_i - \bar{X})^3$	1827587,
$(X_i - \bar{X})^4$	17885383
Desvio padrão	172,9286
C.V.	2,336032
Curtosis	1,5
Assimetria	0,216417
Intervalo	344
Mínimo	7241
Máximo	7585
Soma	22208
Contagem	3

Tabela.IV.22 - Valores do ensaio

■ PROVAS DE NORMALIDADE

- Análise de Resíduos, valores espúrios;

• Resistência:

Como valor de $r = 1,1538362 \cong T(3/0,05\%) \text{ tab.} = 1,15$, não existe valor espúrio.

• Módulo de elasticidade:

Como valor de $r = 1,0543849 < T(3/0,05\%) \text{ tab.} = 1,15$, não existe valor espúrio.

■ CARACTERÍSTICAS DA DISTRIBUIÇÃO

- Erro relativo da estimativa da média da população (Er);

$$Er = \sqrt{18,515809 \times ((450,21884) \div 3)} = 52,713585\%$$

- Determinação do tamanho da amostra ;

$$n = (18,515809 \times 450,21884) \div (10)^2 = 83,36166 \cong 84 \text{ amostras}$$

- Intervalo de confiança para a média da população ;

$$13,249654 \leq \mu \leq 42,790346$$

com nível de confiabilidade de 95%.

Quadro resumo dos ensaios de flexão a quatro pontos realizados nos conjuntos de vigas:

Este quadro apresenta os resultados médios da resistência à tensão de ruptura e do módulo de elasticidade dos oito grupos de vigas submetidas à flexão a quatro pontos. Constata-se facilmente que em relação a tensão de ruptura o grupo de vigas (VCB) ou seja com emenda de topo na posição “B” e reforço de tecido de fibra de vidro, apresentou os **melhores resultados, mesmo se comparados às vigas sem emendas e com emendas por entalhes múltiplos**. Constata-se também facilmente alguns fatos interessantes tais como:

- comparando a média dos resultados dos ensaios de flexão das vigas do conjunto VCA (com fibra de vidro) com seus pares sem reforço de fibra de vidro VSA, verifica-se que o reforço de **tecido de fibra de vidro aumenta em 20% a resistência das vigas**, ou seja a introdução do tecido de fibra de vidro nas duas últimas linhas de colagem, além de reforçar a emenda, ainda melhoram a eficiência da viga..

- comparando a média dos resultados dos ensaios de flexão das vigas do conjunto VCB (com fibra de vidro) com seus pares sem reforço de fibra de vidro VSB, verifica-se que o **reforço de tecido de fibra de vidro aumenta em 16% a resistência das vigas**.

- comparando a média dos resultados dos ensaios de flexão das vigas do conjunto VCC (com fibra de vidro) com seus pares sem reforço de fibra de vidro VSC, verifica-se que o **reforço de tecido de fibra de vidro aumenta em 25% a resistência das vigas**.

- comparando a média dos resultados dos ensaios de flexão das vigas do conjunto VCA (com fibra de vidro) com o conjunto de vigas VCC também com reforço de fibra de vidro, e ambos os conjuntos com emendas de topo na última camada de lâminas, verifica-se que os resultados são semelhantes ou seja como era de se esperar **apresentaram um comportamento semelhante**. O mesmo constata-se comparando os conjuntos de vigas sem reforço de fibra de vidro (VSA e VSC), ambos com emendas de topo na última camada de lâminas.

- comparando a média dos resultados dos ensaios de flexão das vigas contendo emendas por entalhes múltiplos (finger-joints) VFJ e as vigas sem emendas VSE, verifica-se que ambos **apresentam resultados semelhantes, o que vem comprovar que às vezes um nó localizado na região tracionada da viga pode ser mais prejudicial que uma emenda por entalhes múltiplos (emenda com geometria de entalhes aconselhada para grandes esforços solicitantes conforme norma DIN 68 140^[16]).**

- comparando a média dos resultados dos ensaios de flexão das vigas do conjunto VSB (sem fibra de vidro, mas com última camada de lâminas composta por lâmina contínua) com as vigas sem emendas VSE, constata-se que os resultados são semelhantes, ou seja, **a última camada de lâminas composta por lâmina contínua (sem emendas) influencia os resultados, melhorando a eficiência das vigas.**

No entanto, faz-se necessária uma análise estatística mais apurada que será apresentada a seguir. Serão feitas comparações para verificar a possibilidade de se afirmar com 95% de significância a hipótese dos resultados médios serem considerados iguais, caso ocorram diferenças saber quais diferem. Com esta análise pode-se constatar a possibilidade ou não de substituir um sistema de emenda pelo outro.

TIPOS DE VIGAS	Resistência [MPa]	E _{long} [MPa]
VCA	20	7910
VCB	31	8521
VCC	20	7693
VSA	16	8286
VSF	26	7925
VSC	15	8104
VFJ	28	7403
VSE	27	7370

Tabela IV.23 - Valores dos resultados do ensaio

■ COMPARAÇÃO DE "K" GRUPOS PELA ANÁLISE DE VARIÂNCIA ANOVA COM NÍVEIS FIXOS

• Resistência:

Hipóteses a testar: $H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = \mu_5 = \mu_6 = \mu_7 = \mu_8$

$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3 \neq \mu_4 \neq \mu_5 \neq \mu_6 \neq \mu_7 \neq \mu_8$

Fonte	Soma dos quadrados (SQ)	Graus de liberdade (GDL)	Médias quadráticas (MQ)	F
Entre grupos	1217,532	K - 1 = 7	173,9331	4,505191
Dentro dos grupos	1312,647	N - K = 34	38,60727	
Total	2530,179	N - 1 =		

Tabela IV.24 - Tabela ANOVA dos resultados do ensaio

Como o valor de $F = 4,505191 > F_{0,05}(7,34) = 2,298$, a hipótese H_0 é rejeitada.

■ MÉTODO DE DUNCAN ("STUDENTIZED RANGE")

OBS. : **D.S** \Rightarrow diferem significativamente à um nível de 95%.

N.D.S \Rightarrow não diferem significativamente à um nível de 95%.

COMPARAÇÕES	$\bar{X}(j)$		R_k	
VFJ - VSE=	0,54167	<	8,038788	N.D.S
VFJ - VCA=	8,37658	<	11,40178	N.D.S
VFJ - VCB=	-2,54235	<	8,038788	N.D.S
VFJ - VCC=	8,29235	<	10,66996	N.D.S
VFJ - VSA=	11,82862	<	11,93248	N.D.S
VFJ - VSB=	1,88597	<	9,675595	N.D.S
VFJ - VSC=	13,01838	>	12,37939	D.S
VSE - VCA=	7,83491	<	10,66996	N.D.S
VSE - VCB=	-3,08402	<	9,675595	N.D.S
VSE - VCC=	7,75068	<	9,675595	N.D.S
VSE - VSA=	11,28695	<	11,40178	N.D.S
VSE - VSB=	1,3443	<	8,038788	N.D.S
VSE - VSC=	12,47671	>	11,93248	D.S
VCA - VCB=	-10,91893	<	11,93248	N.D.S
VCA - VCC=	-0,08423	<	8,038788	N.D.S
VCA - VSA=	3,45204	<	8,038788	N.D.S
VCA - VSB=	-6,49061	<	9,675595	N.D.S
VCA - VSC=	4,6418	<	9,675595	N.D.S
VCB - VCC=	10,8347	<	11,40178	N.D.S
VCB - VSA=	14,37097	>	12,37939	D.S
VCB - VSB=	4,42832	<	10,66996	N.D.S
VCB - VSC=	15,56073	>	12,75927	D.S
VCC - VSA=	3,53627	<	9,675595	N.D.S
VCC - VSB=	-6,40638	<	8,038788	N.D.S
VCC - VSC=	4,72603	<	10,66996	N.D.S
VSA - VSB=	-9,94265	<	10,66996	N.D.S
VSA - VSC=	1,18976	<	8,038788	N.D.S
VSb - VSC=	11,13241	<	11,40178	N.D.S

Tabela IV.25 - Tabela das diferenças entre as médias ordenadas

• Módulo de elasticidade:

■ COMPARAÇÃO DE "K" GRUPOS PELA ANÁLISE DE VARIÂNCIA ANOVA COM NÍVEIS FIXOS

Hipóteses a testar:

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = \mu_5 = \mu_6 = \mu_7 = \mu_8$$

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3 \neq \mu_4 \neq \mu_5 \neq \mu_6 \neq \mu_7 \neq \mu_8$$

Fonte	Soma dos quadrados (SQ)	Graus de liberdade (GDL)	Médias quadráticas (MQ)	F
Entre grupos	5903005,	K - 1 = 7	843286,4	0,550946
Dentro dos grupos	52040912	N - K = 34	1530615,	
Total	57943917	N - 1 = 41		

Tabela IV.26 - Tabela ANOVA dos resultados do ensaio

Como o valor de $F = 0,550946 < F_{0,05}(7,34) = 2,298$, a hipótese H_0 não pode ser rejeitada.

■ MÉTODO DE DUNCAN (“STUDENTIZED RANGE”)

COMPARAÇÕES	$\bar{X}(j)$		R_k	
VFJ - VSE=	33,166	<	1600,622	N.D.S
VFJ - VCA=	-507,271	<	2270,237	N.D.S
VFJ - VCB=	-1118,437	<	1600,622	N.D.S
VFJ - VCC=	-290,675	<	2124,523	N.D.S
VFJ - VSA=	-883,166	<	2375,907	N.D.S
VFJ - VSB=	-521,951	<	1926,531	N.D.S
VFJ - VSC=	-701,614	<	2464,892	N.D.S
VSE - VCA=	-540,437	<	2124,523	N.D.S
VSE - VCB=	-1151,603	<	1926,531	N.D.S
VSE - VCC=	-323,841	<	1926,531	N.D.S
VSE - VSA=	-916,332	<	2270,237	N.D.S
VSE - VSB=	-555,117	<	1600,622	N.D.S
VSE - VSC=	-734,78	<	2375,907	N.D.S
VCA - VCB=	-611,166	<	2375,907	N.D.S
VCA - VCC=	216,596	<	1600,622	N.D.S
VCA - VSA=	-375,895	<	1600,622	N.D.S
VCA - VSB=	-14,68	<	1926,531	N.D.S
VCA - VSC=	-194,343	<	1926,531	N.D.S
VCB - VCC=	827,762	<	2270,237	N.D.S
VCB - VSA=	235,271	<	2464,892	N.D.S
VCB - VSB=	596,486	<	2124,523	N.D.S
VCB - VSC=	416,823	<	2540,530	N.D.S
VCC - VSA=	-592,491	<	1926,531	N.D.S
VCC - VSB=	-231,276	<	1600,622	N.D.S
VCC - VSC=	-410,939	<	2124,523	N.D.S
VSA - VSB=	361,215	<	2124,523	N.D.S
VSA - VSC=	181,552	<	1600,622	N.D.S
VSB - VSC=	-179,663	<	2270,237	N.D.S

Tabela IV.27 - Tabela das diferenças entre as médias ordenadas

■ PROVA DE HIPÓTESES COM RESPEITO A DUAS MÉDIAS COM DESVIOS-PADRÃO DESCONHECIDOS

• Resistência:

Hipóteses a testar: $H_0 : \mu_X = \mu_Y$

$H_1 : \mu_X \neq \mu_Y$

COMPARAÇÕES	t		t _{0,05 tab.}	HIPÓTESE ACEITA A 95% DE SIGNIFICÂNCIA
VFJ - VSE=	0,142487	<	2,365	H ₀
VFJ - VCA=	2,311798	<	2,365	H ₀
VFJ - VCB=	0,520101	<	2,365	H ₀
VFJ - VCC=	2,052616	<	2,365	H ₀
VFJ - VSA=	3,150946	>	2,447	H ₁
VFJ - VSB=	0,198916	<	2,365	H ₀
VFJ - VSC=	3,078732	<	4,303	H ₀
VSE - VCA=	3,117677	>	2,228	H ₁
VSE - VCB=	0,967533	<	2,228	H ₀
VSE - VCC=	2,838610	>	2,228	H ₁
VSE - VSA=	4,289745	>	2,262	H ₁
VSE - VSB=	0,231462	<	2,447	H ₀
VSE - VSC=	6,575620	>	2,447	H ₁
VCA - VCB=	3,508049	>	2,228	H ₁
VCA - VCC=	0,031874	<	2,228	H ₀
VCA - VSA=	1,373620	<	2,262	H ₀
VCA - VSB=	1,125465	<	2,447	H ₀
VCA - VSC=	2,624592	>	2,447	H ₁
VCB - VCC=	3,292665	>	2,228	H ₁
VCB - VSA=	4,282904	>	2,262	H ₁
VCB - VSB=	0,726994	<	2,228	H ₀
VCB - VSC=	5,892944	>	2,571	H ₁
VCC - VSA=	1,267715	<	2,262	H ₀
VCC - VSB=	1,092299	<	2,447	H ₀
VCC - VSC=	2,287687	<	2,571	H ₀
VSA - VSB=	1,713869	<	2,447	H ₀
VSA - VSC=	0,633786	<	2,776	H ₀
VSB - VSC=	2,014323	<	2,571	H ₀

Tabela.IV.28 - Tabela da prova de hipóteses com respeito a duas médias com "σ" desconhecido

■ PROVA DE HIPÓTESES COM RESPEITO A DUAS MÉDIAS COM DESVIOS-PADRÃO DESCONHECIDOS

• Módulo de elasticidade:

Hipóteses a testar:

$$H_0 : \mu_X = \mu_Y$$

$$H_1 : \mu_X \neq \mu_Y$$

COMPARAÇÕES	t		t _{0,05} tab.	HIPÓTESE ACEITA A 95% DE SIGNIFICÂNCIA
VFJ - VSE=	0,085192	<	2,365	H ₀
VFJ - VCA=	1,283809	<	2,447	H ₀
VFJ - VCB=	1,904503	<	2,571	H ₀
VFJ - VCC=	0,478185	<	2,571	H ₀
VFJ - VSA=	2,287431	<	2,447	H ₀
VFJ - VSB=	0,572749	<	2,571	H ₀
VFJ - VSC=	0,979499	<	3,182	H ₀
VSE - VCA=	1,165824	<	2,228	H ₀
VSE - VCB=	2,180850	<	2,228	H ₀
VSE - VCC=	0,590491	<	2,228	H ₀
VSE - VSA=	2,366781	>	2,262	H ₁
VSE - VSB=	0,588671	<	2,447	H ₀
VSE - VSC=	1,131307	<	2,306	H ₀
VCA - VCB=	1,023937	<	2,228	H ₀
VCA - VCC=	0,352201	<	2,228	H ₀
VCA - VSA=	0,760158	<	2,262	H ₀
VCA - VSB=	0,014930	<	2,365	H ₀
VCA - VSC=	0,263779	<	2,306	H ₀
VCB - VCC=	1,244871	<	2,228	H ₀
VCB - VSA=	0,414172	<	2,262	H ₀
VCB - VSB=	0,587558	<	2,228	H ₀
VCB - VSC=	0,519918	<	2,306	H ₀
VCC - VSA=	1,002226	<	2,262	H ₀
VCC - VSB=	0,225428	<	2,228	H ₀
VCC - VSC=	0,499437	<	2,306	H ₀
VSA - VSB=	0,380463	<	2,447	H ₀
VSA - VSC=	0,258810	<	2,365	H ₀
VSB - VSC=	0,142191	<	2,306	H ₀

Tabela.IV.29 - Tabela da prova de hipóteses com respeito a duas médias com “ σ ” desconhecido. □

CAPÍTULO V
CONSIDERAÇÕES FINAIS E
POSSIBILIDADES PARA NOVAS PESQUISAS

V . CONSIDERAÇÕES FINAIS E POSSIBILIDADES PARA NOVAS PESQUISAS.

V.1 - Considerações finais

Referente à caracterização física e mecânica da madeira utilizada, a saber, *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*. Diante dos resultados obtidos e observações realizadas durante os ensaios, constatou-se, que apesar da madeira de *Pinus taeda* apresentar massa específica menor que a madeira de *Pinus elliottii*, a sua resistência mecânica foi superior.

No referente a composição da madeira de *Pinus* com o adesivo resorcina- fenol-formol e um tecido de fibra de vidro - objetivo 1, ver I.5.2, foi constatado o seguinte:

- esta composição apresentou um acréscimo na resistência mecânica, apresentando aparentemente uma melhor aderência, quando a madeira utilizada era a de *Pinus taeda*. No entanto, a resistência oferecida pela madeira e o adesivo pode ser considerada desprezível diante da resistência da fibra de vidro, que é de 20 vezes a resistência da madeira.

- o tecido de fibra de vidro de fabricação francesa apresentou resultados superiores de resistência à tração paralela em relação ao tecido de fabricação nacional, que pode ser explicado pelo fato do tecido francês possuir maior quantidade de fibras. No entanto, como o acréscimo nos resultados foi pequeno, considera-se os resultados semelhantes, não havendo portanto problemas em se adotar um ou outro na composição estudada.

- esta composição apresentou resultados de resistência mecânica satisfatória somente quando a fibra de vidro estava disposta entre duas lâminas de madeira, ou seja, apresentava ambas faces coladas, pois neste caso, o adesivo penetrava totalmente por entre as fibras do tecido, ocasionando assim uma melhor aderência entre os materiais. O adesivo age como um aglomerante das lâminas, realizando entre dois planos de fibras, uma ligação mecânica o mais próximo possível da ligação existente naturalmente entre as fibras do material de origem, ver I.4.

- esta composição apresentou resultados de resistência mecânica satisfatória somente quando o comprimento de ancoragem do tecido de fibra de vidro foi igual ou superior à 100mm, para cada lado da emenda, com comprimentos inferiores, constatou-se escorregamento das fibras, atendendo o objetivo 2, ver I.5.2.

Quanto aos resultados dos elementos estruturais (vigas), submetidos aos ensaios de flexão a quatro pontos - objetivo 3, ver I.5.2, constata-se o que segue :

- procedendo-se a comparação dos resultados de resistência mecânica dos conjuntos de vigas com emenda de topo em relação ao conjunto de vigas com emendas por entalhes múltiplos (finger-joints) e o conjunto de vigas sem emendas, observa-se que, a resistência à tensão de ruptura das vigas com emenda de topo na posição "B", ver fig.III.15 e com reforço de tecido de fibra de vidro, foi em média de 30,56 MPa, ou seja, 8,32% superior as vigas com emendas por entalhes múltiplos (finger-joints - 28,02 MPa) e 10,09% superior as vigas sem emendas (27,48 MPa). Ou seja, foram tão ou mais eficientes na resistência mecânica à flexão do que os entalhes múltiplos e mesmo à madeira maciça (sem emendas), embora a diferença seja desprezível devido a variabilidade do material madeira.

- o conjunto de vigas com emendas de topo na composição “B”, ver fig.III.15 e reforço de tecido de fibra de vidro (VCB), possuía duas emendas de topo na penúltima camada de lâminas, sendo que a última camada era contínua, sem emendas, ou seja, o reforço de fibra de vidro ficava disposto entre a última e a penúltima linha de colagem, tipo sanduíche; o que vem salientar o bom desempenho apresentado pelo corpo de prova aprovado nos ensaios da composição da madeira com o adesivo de resorcina-fenol-formol e o tecido de fibra de vidro.

- no entanto, uma viga que não pertencia ao conjunto (VCB), ver fig. III.15 a VSB006 (sem reforço de tecido de fibra de vidro e emenda de topo na posição “B”) apresentou resultado de tensão de ruptura igual a 47,35 MPa, ou seja, 35,46% superior ao desempenho médio das vigas do conjunto VCB que foi de 30,56 MPa e foi o conjunto com os resultados mais elevados.

Este foi um caso excepcional, pois as lâminas utilizadas na sua confecção, apesar da aleatoriedade na escolha destas, apresentavam-se quase com isenção total de defeitos naturais, tais como nós, medulas, etc... E em especial a última lâmina da zona tracionada, apresentava características ótimas, ou seja, sem defeitos e com predominância de anéis de crescimento de outono-inverno, o que confere um bom desempenho, devido esta região da madeira ser mais densa.

Isto salienta a importância de uma *classificação das lâminas*, que podem melhorar muito o desempenho mecânico das peças estruturais elaboradas pela técnica do laminado-colado. Pode-se pensar então no caso de usar emendas de topo reforçadas com tecido de fibra de vidro, em colocar na região tracionada da viga uma lâmina contínua que seja classificada, possuindo módulo de elasticidade elevado, pois como foi visto em II.4.4.1, uma lâmina nesta posição para esta geometria e dimensões contribui com 28,91% da rigidez da peça.

No entanto, quando procedemos a análise estatística dos resultados de resistência mecânica dos conjuntos de vigas, constatou-se o que segue :

- procedendo-se a comparação dos resultados de resistência mecânica dos oito conjuntos de vigas, pode-se afirmar com 95% de significância que referente a resistência, eles diferem significativamente.

- procedendo-se a comparação dos resultados do módulo de elasticidade dos oito conjuntos de vigas, pode-se afirmar com 95% de significância que referente ao módulo de elasticidade, eles não diferem significativamente.

- quanto aos conjuntos de vigas que diferem significativamente, pode-se afirmar com 95% de significância que referente a resistência, os grupos que diferem são os seguintes :

- os grupos de vigas com emendas por entalhes múltiplos e viga com emenda de topo na última e penúltima camadas de lâmina e sem reforço de tecido de fibra de vidro (VFJ-VSC), ver fig.III.15.

- os grupos de vigas sem emendas e vigas com emenda de topo na última e penúltima camadas de lâminas e sem reforço de tecido de fibra de vidro (VSE-VSC) , ver fig.III.15.

- os grupos de vigas com emendas de topo na penúltima camada de lâminas e com reforço de tecido de fibra de vidro e as vigas com emenda de topo na última camada de lâminas e sem reforço de tecido de fibra de vidro (VCB-VSA), ver fig.III.15.

- os grupos de vigas com emendas de topo na penúltima camada de lâminas e com reforço de tecido de fibra de vidro e as vigas com emenda de topo na última e penúltima camadas de lâminas e sem reforço de tecido de fibra de vidro (VCB-VSC), ver fig.III.15.

O que foi constatado acima, se deve ao fato das emendas de topo situadas na última camada de lâminas sem reforço de tecido de fibra de vidro, enfraquecerem consideravelmente a resistência mecânica da peça neste região que é a mais solicitada. Quanto aos grupos que não diferem significativamente em relação às médias de resistência constata-se o que segue :

- comparando os conjuntos com emendas de topo e reforço de fibra de vidro com seus pares sem o reforço (VCA-VSA, VCB-VSB e VCC-VSC), ver fig.III.15, ***o tecido de fibra de vidro aumenta em média 20% a resistência das vigas, ou seja a introdução do tecido de fibra de vidro nas duas últimas linhas de colagem, além de reforçar a emenda, ainda melhoram a eficiência das vigas.***

- comparando os conjuntos de vigas com emendas de topo na última camada de lâminas com e sem reforço de tecido de fibra de vidro (VCA-VCC e VSA-VSC), ver fig.III.15 os resultados como era de se esperar foram semelhantes devido ao comportamento semelhante.

- ***comparando os resultados das vigas com emendas por entalhes múltiplos aconselhados para grandes esforços solicitantes pela norma DIN 68 140^[16] com as vigas sem emendas, os resultados foram semelhantes, o que vem a comprovar que um defeito natural como um nó na região mais solicitada da peça pode vir a ser mais prejudicial que uma emenda situada nesta região.***

- as vigas que tinham na última camada de lâminas, lâminas contínuas (sem emendas e sem reforço de fibra de vidro, VSB-VSE), ver fig.III.15, apresentaram resultados semelhantes, o que comprova a importância da última camada de lâminas ser contínua.

Ainda verificando a hipótese com respeito a duas médias, constatou-se o que segue :

- comparando-se as vigas com emendas por entalhes múltiplos (finger-joints) e as vigas com emendas de topo na penúltima camada de lâminas e possuindo reforço de tecido de fibra de vidro na posição "B", ver fig.III.15, aceita-se com 95% de significância a hipótese que as médias sejam ***consideradas iguais***. Ou seja, pode-se utilizar tanto um sistema de emendas como o outro que o resultado será considerado estatisticamente igual à um nível de significância de 95%, ver tab.IV.29.

- comparando-se as vigas sem emendas e as vigas com emendas de topo na penúltima camada de lâminas e possuindo reforço de tecido de fibra de vidro na posição "B", ver fig.III.15, aceita-se com 95% de significância a hipótese que as médias sejam ***consideradas iguais***, ver tab.IV.29.

Resumindo, as vigas com emenda simplesmente de topo localizadas na penúltima camada de lâminas ou seja posição "B", ver fig.V.1, e com reforço de tecido de fibra de vidro com comprimento de ancoragem não inferior a 100mm a partir da emenda, conferiram excelente comportamento mecânico às vigas ; o que mostra que a partir do eixo neutro até a penúltima camada de lâminas (última linha de colagem) da peça, podem ser dispensadas as emendas por entalhes múltiplos, pois basta envolver as emendas simplesmente de topo com o tecido de fibra de vidro.

No entanto, na última camada de lâminas é sempre aconselhável, tanto por efeito estético como de comportamento mecânico utilizar uma lâmina sem emendas ou com emendas por entalhes múltiplos (finger-joints), com geometria aconselhada para grandes esforços solicitantes pela norma DIN 68 140^[16]. Isto é confirmado pela análise estatística da média dos resultados dos grupos, onde com 95% de significância pode-se afirmar que os grupos não diferem significativamente.

O fato de não ter sido observado nenhum tipo de desintegração entre os materiais utilizados, deixa claro também que existe uma perfeita ligação entre eles, proporcionada pelo adesivo de resorcina-fenol-formol. Os resultados de ensaio mostram ainda, que o comportamento mecânico revela uma perfeita unidade do conjunto até o momento da ruptura, característica básica do comportamento dos compósitos.

Então, pode-se aconselhar a substituição do sistema de emendas por entalhes múltiplos (finger-joints) pelo sistema de emendas simplesmente de topo, reforçadas em ambos os lados (superior e inferior) pelos tecidos de fibra de vidro utilizados neste trabalho, desde que o comprimento de ancoragem em ambos os lados da emenda não seja inferior a 100mm, como já mencionado, e que o reforço esteja situado entre duas camadas de lâminas (sanduíche), ou seja, nas linhas de colagem internas, posição esta que se mostrou mais favorável. Nas faces externas aconselha-se utilizar lâminas contínuas, ou seja, sem emendas e classificadas pelo módulo de elasticidade mais elevado.

V.2 - Possibilidades para novas pesquisas

Como um primeiro estudo, faz-se necessária uma pesquisa mais avançada, dando continuidade nesta possibilidade de substituir os entalhes múltiplos, para tal, verificar novos posicionamentos das emendas na constituição da peça, estudos que investiguem uma aproximação mais precisa do comprimento ideal de ancoragem do tecido de fibra de vidro, necessitando para tal o ensaio de um número maior de modelos experimentais, aumentando assim a margem de confiabilidade dos resultados. Bem como, fazer um estudo da viabilidade econômica desta substituição, para isto, procedendo um levantamento de custos desde os materiais envolvidos até as alterações na linha de produção.

Com a evidente possibilidade de realização do reforço da madeira com a utilização do tecido de fibra de vidro, vemos que para a continuação dessa pesquisa sobre os compósitos de madeira é preciso pensar também na investigação do reforço que podem proporcionar as fibras vegetais do tipo sisal, ráfia, juta e outras. Assim como, a utilização de outros tipos de adesivos tais como epóxi, etc...

Como a madeira é um material de resistência mecânica muito baixa na direção transversal às suas fibras, é oportuno aprofundar os estudos iniciados por Szücs [1993]^[8] compondo-a com um material fibroso cruzado com as fibras da madeira, que venha a conferir uma maior resistência mecânica nessa direção, agindo como um reforço.

Verificar a possibilidade do laminado vertical.

Verificação de composição para vigas laminadas em pequena seção.

Deve-se pesquisar também a racionalização no uso dos materiais constituintes, verificando a melhor composição destes materiais, e conseqüentemente diminuição dos custos.

Para isso, verificar até que diluição do adesivo se poderia trabalhar nesta técnica, por exemplo, verificar a possibilidade de novas constituições do tecido de fibra de vidro ou o caso de reforço com fibras aleatoriamente aplicadas.

Estudos a respeito de uma melhor distribuição das lâminas na constituição dos elementos estruturais, através de uma classificação mecânica das lâminas, posicionando assim as lâminas com maior módulo de elasticidade nas regiões mais solicitadas e as de menor módulo de elasticidade nas regiões menos solicitadas.

Estudos verificando um lay-out mais adequado a ser implantado no processo de fabricação sob esta técnica, nas indústrias do setor, visando diminuir os custos.

Iniciar estudos de caracterização das madeiras que melhor possam se adequar a essa forma de emprego, em virtude de possuímos no Brasil, uma enorme reserva de madeiras nativas e exóticas.

Finalmente, conhecendo-se o comportamento mecânico do material, estudar exemplos de aplicação estrutural, observando sobretudo a possibilidade de se conseguir um expressivo aumento da segurança e confiabilidade da estrutura.

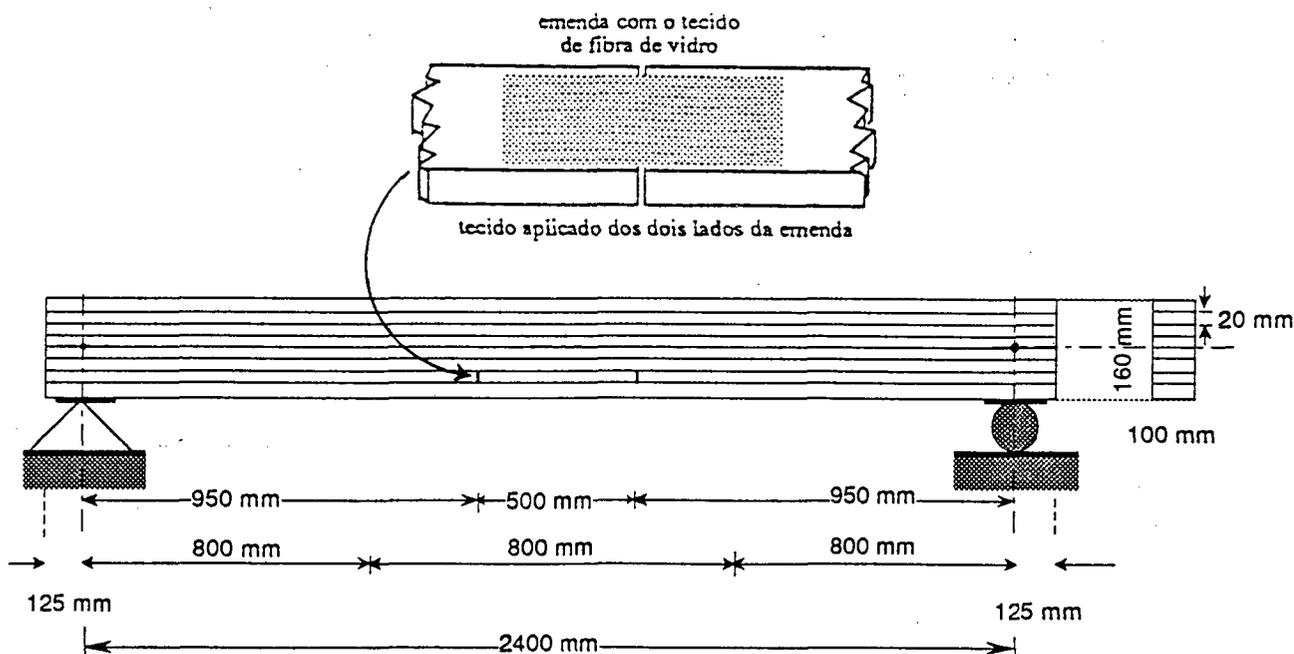


Fig. V.01 - Viga com emendas de topo na posição "B" e com reforço de tecido de fibra de vidro.



ANEXOS

A.1 - Análise estatística dos resultados

A.1.1 - Análise estatística preliminar

❖ CARACTERÍSTICAS NUMÉRICAS

■ Medidas de tendência central

• Média aritmética simples (\bar{X})

constitui uma estimativa da média da população, desta forma temos:

$$\bar{X} = \frac{X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_n}{n} \quad \text{onde: } x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n \Rightarrow \text{valores ordenados}$$

$n \Rightarrow$ tamanho da amostra

a soma $x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n$ pode ser representada por $\sum_{i=1}^n x_i$, (somatório de " x_i ", onde " i " varia de "1" a " n ").

$$\text{Assim: } \bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}$$

■ Medidas de variação

• Desvio padrão (s) da amostra e (σ) da população

o qual se define como raiz quadrada da média da soma dos quadrados dos desvios: $x_i - \bar{X}$. Note-se que esta média se obtém pela divisão por " $n - 1$ " pois existe, na verdade, somente " $n - 1$ " quadrados de desvios que são independentes devido a que a média " \bar{X} " impõe uma restrição linear às " n " observações independentes da amostra. Usa-se " s " para amostras com $n < 25$, do contrário usa-se " σ ", onde o denominador passa a ser " n ".

$$\text{Assim: } s = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{X})^2}{(n-1)}}$$

• Coeficiente de variação de uma amostra (CV)

o valor do CV dá a percentagem de variação dos dados de uma amostra. É uma medida útil quando se quer comparar as variabilidades de várias amostras com médias de diferente

ordem de magnitude. Para que uma amostra seja aceitável o valor do CV não deve ser grande ou seja $CV \leq 25\%$.

$$\text{Assim : } CV = \frac{S}{\bar{x}} \cdot 100$$

■ Medida de assimetria (g_1)

o coeficiente de assimetria é definido pela relação entre a média aritmética dos cubos dos desvios e o cubo do desvio padrão “s”. Usando o fator :

$$\frac{(n-1)^{1/2}}{n}$$

para relacionar o valor de “s” a um tamanho “n” da amostra, tem-se:

$$g_1 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^3 / n}{\left[\frac{(n-1)^{1/2}}{n} \cdot S \right]^3}$$

se o valor de “ g_1 ” é significativamente positivo, a distribuição é assimétrica a direita e se é significativamente negativo, ela é assimétrica a esquerda, para distribuição normal, $g_1 \cong 0$. a significância de “ g_1 ” deve ser testada usando valores tabulados da distribuição de $\gamma_{1,\alpha}(n)$, para um nível de probabilidade “ α ” e o tamanho da amostra “n”.

■ Medida de achatamento ou curtose (g_2)

o coeficiente de curtose é definido pela relação entre a média aritmética das quartas potências dos desvios e a quarta potência do desvio padrão “s”. Usando o fator :

$$\frac{(n-1)^{1/2}}{n}$$

para relacionar o valor de s a um tamanho n da amostra, tem-se:

$$g_2 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^4 / n}{\left[\frac{(n-1)^{1/2}}{n} \cdot S \right]^4}$$

se o valor de “ g_2 ” é significativamente maior que 3, a distribuição é acentuada no meio e se é significativamente menor que 3, ela é aplainada no meio, para distribuição normal, $g_2 \cong 3$. a significância de “ g_2 ” deve ser testada usando valores tabulados da distribuição de $\gamma_{2,\alpha}(n)$, para um nível de probabilidade “ α ” e o tamanho da amostra “ n ”.

❖ DESCRIÇÃO GRÁFICA DAS VARIÁVEIS CONTÍNUAS - CLASSES DE FREQUÊNCIAS

os dados são geralmente agrupados em um histograma usando um número conveniente de intervalos. Para cada intervalo dá-se seu limite inferior e superior, seu ponto médio, o número de dados ou frequência “ f ” em cada intervalo, a frequência acumulada “ F ” até o limite superior do intervalo e, opcionalmente, a frequência acumulada relativa “ F' ”. O tamanho dos intervalos deve ser escolhido de tal forma que o número deles esteja na faixa de 5 a 15, este número é dado pela fórmula:

$$K = 1 + 3,3 \log_{10} n$$

dá uma idéia do número de intervalos. O limite inferior do primeiro intervalo “ x_{1i} ” deve ser, naturalmente, menor que o valor mínimo de “ x ” e, geralmente, é um valor “fácil” de usar (múltiplo de 2 ou 5). Com base nos valores de “ f ” e “ F ” se preparam os gráficos do histograma e das frequências acumuladas, respectivamente.

❖ PROVAS DE NORMALIDADE

■ 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. Para cada índice “ i ”: “1”, “ N ”, se determina:

- a frequência acumulada observada para o valor ordenado $x(i)$, a qual é dada por

$$S_N (x (i)) = \frac{i}{n} \cdot 100$$

- a frequência acumulada teórica usando a tabela de distribuição normal, correspondente

a

$$Z_{(i)} = \frac{x_{(i)} - \bar{x}}{S} \quad \text{isto é, } \phi (x (i)) = P_r (Z < Z_{(i)})$$

- o máximo das diferenças entre $S_N (x (i))$ e $\phi (x (i))$, isto é:

$$DM = \text{Max}_i | S_N (x (i)) - \phi (x (i))$$

finalmente, compara-se o valor de DM com o valor $D_\alpha (n)$, dado por uma tabela que depende do nível de probabilidade “ α ” e do tamanho da amostra. Se $DM \leq D_\alpha (n)$, a hipótese de normalidade não é rejeitada.

■ Análise de Resíduos, valores espúrios

os resíduos estão definidos por :

$$r_i = x_i - \bar{X}$$

onde “ x_i ” é o valor de “ x ” para a observação “ i ”, \bar{X} sendo a média dos valores de “ x_i ”. os resíduos padronizados estão definidos por :

$$R_i = \frac{r_i}{S}$$

onde “ s ” é o desvio padrão dos valores de “ x ”. Se os valores de “ x ” estão distribuídos normalmente, então usando as propriedades da distribuição normal, para a população dos valores de “ x ”, isto é, para amostras grandes de “ x ”, $-3 < R_i < 3$, com uma probabilidade de 0,997 e $-2 < R_i < 2$, com uma probabilidade de 0,955. Mais ainda, os valores de “ R_i ” devem estar distribuídos simetricamente com respeito ao valor $R_i = 0$. A existência de um valor extremo de “ x ”, “ $x_{(1)}$ ” ou “ $x_{(n)}$ ”, pode ser testada usando a estatística “ $T_1 = (\bar{X} - x_{(1)})/s$ ” ou “ $T_n = (x_{(n)} - \bar{X})/s$ ” e a tabela de valores de “ T ” para uma distribuição normal. Se os valores de “ T_1 ” ou “ T_n ” são maiores que os valores tabulados, “ $x_{(1)}$ ” ou “ $x_{(n)}$ ” podem ser considerados valores extremos.

A.1.2 - Provas de hipóteses e o problema da estimação quando não se conhece “ σ ”

❖ CARACTERÍSTICAS DA DISTRIBUIÇÃO

■ Tamanho da amostra quando não se conhece “ σ ” (n)

se pode encontrar um valor aproximado de “ n ” usando

$$n = Z^2_{\alpha/2} \frac{\sigma^2}{E_r^2} \text{ ou } n = Z^2_{\alpha/2} \frac{C.V.^2}{E_r^2} \Leftrightarrow n = t^2_{\alpha/2}(n-1) \frac{C.V.^2}{E_r^2}$$

com os valores de “ z ” e uma estimativa de “ σ ” que pode ser retirada da média dos valores de “ s ” da amostra e, se “ n ” resultar menor que 30, esse valor seria ajustado sucessivamente, usando a tabela de “ t ”.

■ Erro relativo da estimativa da média da população (E_r), quando não se conhece “ σ ”

a expressão para determinar o tamanho da amostra nos diz que para um certo valor de “ $\alpha/2$ ”, “ n ” é diretamente proporcional à variância de “ x ” e inversamente proporcional ao quadrado de erro “ E ”. Poderíamos usar então tal expressão para estimar “ E ”, da seguinte forma.

$$E_r^2 = t_{\alpha/2}^2(n-1) \cdot \frac{C.V.^2}{n}$$

■ Estimativa de “ μ ” por meio de um intervalo de confiança quando não se conhece “ σ ”

pode-se dizer que “ μ ” é estimado por “ \bar{X} ”, isto é, “ $\mu^{\wedge} = \bar{X}$ ”. Sem dúvida, este tipo de estimativa não fornece indicação do erro estatístico que existe quando se toma uma amostra aleatória, o erro nas medições individuais de “ \bar{X} ”, etc. Por isto é sempre necessário estimar um parâmetro por meio de um intervalo. Pode-se escrever então o intervalo.

$$\bar{X} - t_{\alpha/2}(n-1) \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} < \mu < \bar{X} + t_{\alpha/2}(n-1) \cdot \frac{s}{\sqrt{n}}$$

se chama intervalo de confiança de “ μ ”. Sua interpretação é de que com uma probabilidade de “ $1 - \alpha$ ”, o intervalo “ $\bar{X} \pm t_{\alpha/2}(n-1) \cdot s/\sqrt{n}$ ” cobre o verdadeiro valor da média.

❖ PROVA DE HIPÓTESES COM RESPEITO A DUAS MÉDIAS QUANDO “ σ ” É DESCONHECIDO

supomos que “ x ” e “ y ” são variáveis independentes. A hipótese a testar é:

$$H_0 : \mu_x = \mu_y \text{ com alternativa :}$$

$$H_1 : \mu_x \neq \mu_y$$

se “ n_x ” e “ n_y ” são pequenos tem-se duas possibilidades: “ $\sigma_x = \sigma_y$ ” e “ $\sigma_x \neq \sigma_y$ ”. Se, usando o teste “ $F = s_x^2/s_y^2 < F_{0,05}(n_x - 1, n_y - 1)$ ”, a hipótese $\sigma_x = \sigma_y$ não é rejeitada, então tem-se :

$$\sigma_w = \sigma \sqrt{\frac{1}{n_x} + \frac{1}{n_y}} \text{ como “}\sigma\text{” não é conhecido, usa-se a média ponderada de “}s_x^2\text{” e}$$

“ s_y^2 ”, definida por:

$$s_p^2 = \frac{(n_x - 1) s_x^2 + (n_y - 1) s_y^2}{n_x + n_y - 2} \text{ e, a hipótese } H_0 : \mu_x = \mu_y \text{ é rejeitada se :}$$

$$|t| = |\bar{X} - \bar{y}| / s_p \sqrt{\frac{1}{n_x} + \frac{1}{n_y}} > t_{\alpha/2} (n_x + n_y - 2)$$

procedimentos para o caso em que $H_1 : \mu_1 > \mu_2$ é similar ao caso em que se usa o valor de “t” definido, o qual deve ser maior que “ $t_{\alpha} (n_x + n_y - 2)$ ” para rejeitar “ H_0 ”. Se a hipótese “ $\sigma_x = \sigma_y$ ” é rejeitada, então usa-se uma modificação da distribuição de Student-t, chamada a distribuição “t’”, calculando-se

$$t' = \bar{X} - \bar{y} / \sqrt{\frac{Sx^2}{n_x} - \frac{Sy^2}{n_y}}$$

a qual tem uma distribuição de Student-t com os graus de liberdade dados por

$$v = (s_1^2/n_1 + s_2^2/n_2) / [(s_1^2/n_1)^2/(n_1-1)] + [(s_2^2/n_2)^2/(n_2-1)]$$

e a hipótese $\mu_x = \mu_y$ é rejeitada se : $t' > t_{\alpha}(v)$

como “v” geralmente não é um número inteiro, é arredondado para o próximo número inteiro.

A.1.3 - Comparação de “K” grupos

❖ COMPARAÇÃO DE “K” GRUPOS PELA ANÁLISE DE VARIÂNCIA ANOVA COM NÍVEIS FIXOS

■ Análise de grupos com níveis fixos (modelo 2 da ANOVA de um fator).

o problema de testar a existência de uma diferença significativa entre duas médias, ou duas variâncias, pode ser generalizado para o caso de “K” grupos. Para a análise de “K” médias, poderíamos descrever os “K” grupos como “K” amostras de distribuições, independentes cada uma proveniente de uma distribuição normal com o mesmo “ σ ”, com as seguintes hipóteses a testar :

$$H_0 : \mu_x = \mu_y = \dots \mu_k \text{ com alternativa :}$$

$$H_1 : \mu_x \neq \mu_y$$

para se fazer uma análise global, compara a variabilidade entre colunas e entre as linhas de cada grupo, verificando se ocorre variabilidade entre grupos e dentro de grupos, verificando

em relação a população se pertencem a mesma população ou cada grupo pertence a uma população específica. Usa-se o modelo aditivo;

$$X_{ij} = \mu_j + \varepsilon_{ij} \text{ ou } X_{ij} = \mu + \alpha_j + \varepsilon_{ij}$$

onde “ α_j ” é o efeito do grupo “j” na média geral “ μ ” e “ ε_{ij} ” é um erro aleatório. Modelo 2 da ANOVA, níveis fixos, onde os efeitos “ α_j ” são fixos, positivos ou negativos, tais que:

$$\sum_{j=1}^k \alpha_j = 0$$

com uso da análise de variância na comparação de “K” grupos está baseado na relação da variabilidade das médias entre os grupos e da variabilidade das observações dentro dos grupos. Os resíduos das observações com respeito a média total podem-se escrever como a soma dos resíduos das observações com respeito às médias de cada grupo e os resíduos das médias com respeito a média total. Tem-se:

$$SQT = SQR + SQG$$

onde SQT é a soma dos quadrados dos resíduos com respeito à média total, SQR é a soma dos quadrados dos resíduos com respeito à média de cada grupo (também chamada SQD, a soma dos quadrados dentro dos grupos) e SQG é a soma dos quadrados dos resíduos das médias de cada grupo com respeito à média total (também chamada SQE, a soma dos quadrados entre os grupos), e os graus de liberdade são respectivamente:

$$N - 1 = (N - K) + (K - 1)$$

as médias quadráticas (MQ), das somas de quadrados (SQ), são

$$MQT = SQT/(N-1)$$

$$MQR = SQR/(N-K)$$

$$MQG = SQG/(K-1)$$

então, para testar “ H_0 ” calcula-se “ $F = MQG/MQR$ ”, e se “ $F > F_{\alpha}(K-1, N-K)$ ”, H_0 é rejeitada”.

quando o valor de “F” indica a existência de uma diferença significativa entre as médias é necessário fazer uma análise posterior para determinar a média, ou médias, que diferem significativamente das outras. Uma das maneiras de fazê-lo é através do:

■ Método de Duncan (“studentized range”)

escreve-se as médias em ordem crescente, determina-se o desvio padrão das médias ($s\bar{X}$) onde $s = \sqrt{MQR}$, como “n” depende das colunas, usa-se um valor aproximado, “ n_h ”, a média harmônica dada pela expressão:

$$1/n_h = \frac{\sum 1/n_i}{k} \text{ então: } s_{\bar{X}} = s/\sqrt{n_h}$$

usando a tabela de “Studentized range”, “n”, determina-se os valores de “ r_k ” que depende do número de grupos “k”, dos graus de liberdade de “s” e do nível de significância. Determina-se um valor que chamado $R_k = s_{\bar{X}} \cdot r_k$. Compara-se as diferenças entre as médias ordenadas, com os valores de “ R_k ” da seguinte maneira:

$\bar{X}_{(\text{maior média})} - \bar{X}_{(\text{menor média})}$ se a diferença entre as médias é maior que o correspondente valor de “ R_k ”, a diferença é declarada significativa, (DS), em caso contrário, é declarada não significativa, (NDS).

A.1.4 - Regressão

❖ REGRESSÃO LINEAR SIMPLES

quando se deseja estudar determinada variável em função de outra, ou outras variáveis, faz-se uma análise de regressão. Quando estudadas as relações entre apenas duas variáveis, a regressão é denominada simples. A variável de maior interesse, sobre a qual se deseja fazer uma estimativa, é denominada variável dependente e as demais, independentes. O problema desta análise de regressão consiste em definir a forma de relação existente entre as variáveis. Entre duas variáveis, “x” e “y” por exemplo, a relação pode ser :

$$y = ax + b$$

uma vez especificada a forma de relação entre as variáveis, deve-se estimar os parâmetros da função, obtendo a equação de regressão. Para todos os pontos possíveis de “x” e “y”, existe uma reta de regressão, o problema consiste em estimar os parâmetros a e b da equação de regressão. O parâmetro “a” é denominado angular (ou coeficiente angular) e é igual à tangente trigonométrica do ângulo de inclinação da reta de regressão. Se “ $a > 0$ ”, então a reta tem uma inclinação menor que “ 90° ”; se “ $a < 0$ ”, a reta tem inclinação entre “ 90 e 180° “. O parâmetro “b” é chamado linear e corresponde ao valor da ordenada interceptada pela reta de regressão. Um dos métodos mais simples para o cálculo das estimativas dos parâmetros “a” e “b” é o dos mínimos quadrados, entretanto, no presente trabalho foi utilizado o pacote computacional estatístico *Microsoft Excel v. 5.*, para análise de regressão.

□

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 01 - COMUNICAÇÃO TÉCNICA Nº 220. São Paulo: IPT, 1984 - .
- 02 - CASTRO, J., et alli. **Utilização do Pinus na construção civil no sul do Brasil.** Paris, FR 1986. 183p (Programa Interministerial REXCOOP-PROMOTECH), 1986.
- 03 - SZÜCS, Carlos Alberto. **MLC - Madeira Laminada-Colada Aplicação Estrutural da Madeira sob a técnica do laminado-colado.** Florianópolis: UFSC, 1992.
- 04 - SZÜCS, Carlos Alberto. **MLC - Utilização de Ligações Químicas na composição das estruturas de madeira.** Florianópolis: UFSC, 1993.
- 05 - COMUNICAÇÃO TÉCNICA Nº 1724. São Paulo: IPT, 1986 - .
- 06 - SZÜCS, Carlos Alberto. **Étude d'un assemblage par pièce de coin en bois lamellé-collé, renforcé par fibres de verre.** Metz: Université de Metz (França), 1991. 199p T de doutorado(Doutorado em Ciências da Madeira) - Programa de Doutorado Ciências da Madeira, Université de Metz, 1991.
- 07 - KUBLER, Hans. **Wood as Building and Hobby Material.** New York, NY,USA: A Wiley-Interscience Publication, 1980.
- 08 - SZÜCS, Carlos Alberto. **A madeira no mundo dos compósitos.** Florianópolis: UFSC, 1993.
- 09 - BODIG, Jozsef, JAYNE, Benjamin A. **Mechanics of wood and wood composites - Characteristics of wood composites.** New York, NY, USA: Van Nostrand Reinhold Company, 1982.
- 10 - JOHNSON, Hugh. **La maderas.** Barcelona, ESP.: Editorial Blume, 1986.
- 11 - FARIA, Obede Borges. **Influência da umidade no módulo de elasticidade longitudinal da madeira.** São Carlos: USP/EESC, 1993. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1993.
- 12 - NBR 6230/MB-26 (Norma Brasileira - Método Brasileiro de Ensaio Físicos e Mecânicos de Madeiras). Rio de Janeiro: ABNT, 1940 - .
- 13 - ZANDER, Júlio Ricardo Torres. **Cálculo e execução de estruturas de madeira laminada colada.** São Carlos: USP/EESC, 1979. 166p Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1979.
- 14 - CHUGG, W.A. **The theory and practice of the manufactured of glued laminated timber structures.** London, GB: Ernest Benn Limited, 1964.

- 15 - CAHIER DU CENTRE TECHNIQUE DU BOIS N° 114. Paris, FR: CTBA, 1979 - .
- 16 - DIN 68 140 (Keilzinkenverbindung von Holz). Berlin, Alemanha: DIN, 1971 - .
- 17 - DIN 68 141 (Prüfung von leimen und Leimverbindungen für tragende Holzbauteile). Berlin, Alemanha: DIN, 1969 - .
- 18 - ASTM D 143-52 (Standard Methods of Testing Small Clear Specimens of Timber). Philadelphia, Pa, USA: ASTM, 1978 - .
- 19 - CIPRIANI, Frank. **Desenvolvimento de compósitos de aglomerantes hidráulicos e fibras de vidro**. Florianópolis: UFSC, 1992
- 20 - LARSEN, H., GUSTAFSSON, P. Glass Fibre Reinforced Perpendicular to Grain. In: PACIFIC TIMBER ENGINEERING CONFERENCE, 1994, Gold Coast Austrália, **Anais**. Gold Coast Austrália, 1994., p. 500-509.
- 21 - F.P.KOLLMANN, Franz, A.JR.CÔTÉ, Wilfred. **Principles of wood Science and Technology/ Solid Wood**. New York,NY,USA: Springer-Verlag, 1984. V.1. p. 1-27.
- 22 - SZÜCS, Carlos Alberto. **A Madeira nas Estruturas**. Florianópolis: UFSC, 1995.
- 23 - FERREIRA, Christiane Areias Trindade, FUSCO, Péricles Brasiliense. Considerações a respeito da determinação da resistência ao cisalhamento paralelo às fibras da madeira. In: I ENCONTRO REGIONAL EM MADEIRAS E ESTRUTURAS DE MADEIRA, 1993, São Paulo. **Anais**. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1993. v.1, p. 31-42.
- 24 - RELATÓRIO TÉCNICO BAT-03. Florianópolis: UFSC/ECV/LEE, 1994 - .
- 25 - ZAMPERETTI, Kleber Luiz. **Biologia Geral**. Porto Alegre, RS: Pallotti, 1982. p. 216-217.
- 26- RELATÓRIO TÉCNICO- 45 SÉRIE TÉCNICA N° 5.Brasília:PNDU/FAO/IBDF/BRA, 1976 - .
- 27 - DIN 52 182 (Pruefung von Holz; Bestimmung der Rohdichte). Berlin, Alemanha: DIN, 1976 - .
- 28 - NF B 5-32 (Essai de cisaillement). Paris, França: AFNOR, 1942 - .
- 29 - NF B 51-008 (Essai de flexion statique). Paris, França: AFNOR,
- 30 - NBR 7190/NB-11 (Norma Brasileira - Cálculo e Execução de Estruturas de Madeira). Rio de Janeiro: ABNT, 1951 - .

- 31 - ROCCO LAHR, F. Antônio. Verificação do módulo de elasticidade longitudinal aparente com a relação vão-livre - altura de peças de madeira. In : I Encontro Brasileiro de Madeiras e em Estruturas de Madeira - EBRAMEM, São Carlos, 1983. Anais. São Paulo. EESC-USP. 1983. v.1, 16 p.
- 32 - RELATÓRIO TÉCNICO BAT-02. Florianópolis: UFSC/ECV/LEE, 1994 - .
- 33 - DIN 52 188 (Prüfung von Holz). Berlin, Alemanha: DIN, 1952 - .
- 34 - MARTINS, Cristiane. **Estudo da Substituição dos Entalhes Múltiplos por um Reforço com Fibra de Vidro na Composição das Vigas de Madeira Laminada-Colada.** Florianópolis: UFSC, 1994.
- 35 - GÖTZ, Karl-Heinz & HOOR, Dieter & MÖHLER, Karl & NATTERER, Julius - **Construire en bois / Choisir, concevoir et réaliser.** Lausanne (Suisse), Presses Polytechnique Romandes. 1987.
- 36 - GERALDO, Flávio C. **Biodeterioração e Preservação de Madeira.** São Paulo, SP: Apostila técnica da Montana Química, 1995. p.48.
- 37 - CAHIER DU CÉNTRE TECHNIQUE DU BOIS N° 92. Paris, FR: CTBA, 1973 -