

ROBERTO MOTTA BEZ

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DE VIGAS MACIÇAS DE
ANGELIM PEDRA E VIGAS DE EUCÁLIPTO
GRANDIS EM MLC MULTIDIRECIONAL:
UM ESTUDO COMPARATIVO**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Florianópolis

2001

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DE VIGAS MACIÇAS DE
ANGELIM PEDRA E VIGAS DE EUCALIPTO
GRANDIS EM MLC MULTIDIRECIONAL:
UM ESTUDO COMPARATIVO**

ROBERTO MOTTA BEZ

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Construção Civil

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Carolina Palermo Szücs

Florianópolis

2001

BEZ, Roberto Motta. Análise do desempenho de vigas maciças de angelim pedra e vigas de eucalipto grandis em MLC Multidirecional: um estudo comparativo. Florianópolis, 2001. 192 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientadora: Carolina Palermo Szücs

Defesa: Jun/2001

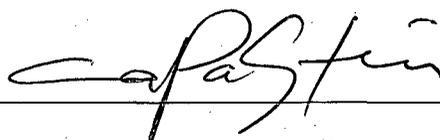
Resumo: No Brasil, a madeira desempenha um importante papel como material de construção civil. No entanto, a redução da disponibilidade de espécies de madeiras nativas e seus efeitos na economia, associada ao fortalecimento dos conceitos preservacionistas, criaram a necessidade do desenvolvimento de alternativas viáveis para a utilização racional da madeira proveniente de florestas plantadas. Neste contexto a técnica da Madeira Laminada Colada aparece como uma alternativa viável para o aproveitamento de todo o potencial deste material, permitindo a fabricação de componentes de qualidade, adequados às necessidades atuais e futuras. Este estudo traça um comparativo entre o desempenho e a viabilidade de fabricação dos modelos propostos em madeira de floresta plantada (*Eucalypto grandis* - *Eucalyptus grandis*), comparando os resultados com os de peças maciças de madeira nativa (Angelim pedra - *Hymenolobium petraeum*). O estudo contempla ainda a utilização da técnica de Madeira Lamina Colada Multidirecionada e o reforço das vigas, através da utilização de fibra de vidro nas linhas de cola.

Palavras Chave: Madeira Laminada Colada, *Eucalyptus grandis*, *Hymenolobium petraeum*

FOLHA DE APROVAÇÃO

Dissertação defendida e aprovada em ____ / ____ / ____ .

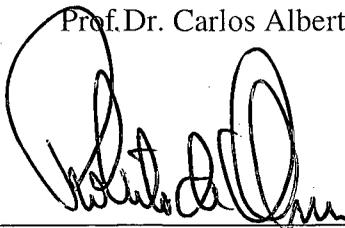
pela comissão examinadora



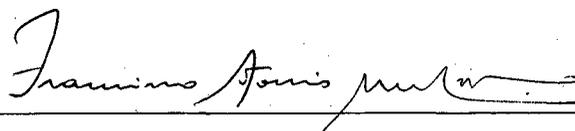
Prof.^a. Dr.^a. Carolina Palermo Szücs – Orientadora – Moderadora (UFSC)



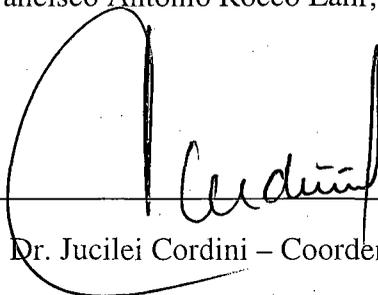
Prof. Dr. Carlos Alberto Szücs (UFSC)



Prof. Roberto de Oliveira, Ph.D. (UFSC)



Prof. Francisco Antonio Rocco Lahr, Ph.D. (EESC-USP)



Prof. Dr. Jucilei Cordini – Coordenador do CPGEC

Ao Grande Arquiteto e
A meus pais
pela dedicação e
incentivo.

AGRADECIMENTOS

À professora e mestre Carolina Palermo Szücs, por seu exemplo profissional e empenho na orientação deste trabalho.

Ao professor Carlos Alberto Szücs, supervisor do Laboratório de Experimentação em Estruturas (LEE) da UFSC, por sua inspiradora dedicação ao estudo da madeira.

A Mery Costa Neves de Souza pelo carinho e apoio em todos os momentos.

A todos os colegas e em especial ao Gustavo, Félix e Dion, que estiveram sempre dispostos a ajudar-me na superação dos obstáculos encontrados pelo caminho.

A professora Ângela do Valle, coordenadora de meu estágio docente, pela confiança e apoio.

A meu tio Luiz Gonzaga Motta pelo auxílio na preparação da madeira.

A Edy Assini pelo auxílio na montagem dos dispositivos de ensaio.

A Orlando, pela gentileza, bem como a todos os funcionários da empresa Battistella que, com disposição, auxiliaram-me na confecção das vigas.

A todas as outras empresas participantes por acreditarem e apoiarem a pesquisa científica.

SUMÁRIO

<u>AGRADECIMENTOS.....</u>	<u>VI</u>
-----------------------------------	------------------

<u>SUMÁRIO.....</u>	<u>VII</u>
----------------------------	-------------------

<u>LISTA DE FIGURAS E TABELAS.....</u>	<u>XI</u>
-----------------------------------------------	------------------

<u>RESUMO.....</u>	<u>XV</u>
---------------------------	------------------

<u>ABSTRACT.....</u>	<u>XVI</u>
-----------------------------	-------------------

<u>1 INTRODUÇÃO.....</u>	<u>1</u>
---------------------------------	-----------------

1.1 APRESENTAÇÃO	1
------------------------	---

1.2 JUSTIFICATIVA.....	3
------------------------	---

1.3 OBJETIVOS.....	4
--------------------	---

1.3.1 OBJETIVO GERAL.....	4
---------------------------	---

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
-----------------------------------	---

1.4 METODOLOGIA UTILIZADA	5
---------------------------------	---

<u>2 A MADEIRA E SUA UTILIZAÇÃO.....</u>	<u>6</u>
-------------------------------------------------	-----------------

2.1 INTRODUÇÃO	6
----------------------	---

2.1.1 O USO DA MADEIRA E A QUESTÃO AMBIENTAL.....	7
---------------------------------------------------	---

2.1.2 O USO DA MADEIRA NA CONSTRUÇÃO CIVIL.....	8
-------------------------------------------------	---

2.1.3 O USO RACIONAL DA MADEIRA	9
---------------------------------------	---

2.2	O COMÉRCIO MADEIREIRO NO BRASIL.....	10
2.2.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	10
2.2.2	ESPÉCIES DE MADEIRA COMERCIALIZADAS.....	11
2.2.3	PROVENIÊNCIA DAS MADEIRAS.....	12
2.2.4	DIMENSÕES DAS SEÇÕES COMERCIALIZADAS.....	13
2.2.5	QUALIDADE PERCEBIDA.....	14
2.3	FLORESTAS PLANTADAS EM SANTA CATARINA.....	14
2.4	ESPÉCIES UTILIZADAS NA PESQUISA.....	15
2.4.1	EUCALIPTO (<i>EUCALYPTUS GRANDIS</i>).....	15
2.4.2	ANGELIM PEDRA (<i>HYMENOLOBIUM SPP.</i>).....	19
2.5	A INDUSTRIALIZAÇÃO DA MADEIRA.....	21
2.5.1	TRANSFORMAÇÃO PRIMÁRIA.....	21
2.5.2	SECAGEM DA MADEIRA.....	22
2.5.3	TRATAMENTO PRESERVATIVO.....	25
2.5.4	MÉTODOS DE TRATAMENTO.....	26
2.6	A TÉCNICA DE MADEIRA-LAMINADA-COLADA (MLC).....	27
2.6.1	BREVE HISTÓRICO.....	27
2.6.2	DETENTORES DA TECNOLOGIA.....	29
2.6.3	DEFINIÇÃO.....	30
2.6.4	NOMENCLATURA.....	30
2.6.5	ESPÉCIES DE MADEIRA UTILIZADAS NA FABRICAÇÃO DE MLC.....	33
2.6.6	PROCESSO DE FABRICAÇÃO.....	35
2.6.7	VANTAGENS DA MADEIRA LAMINADA COLADA.....	37
2.6.8	POSSIBILIDADES DE UTILIZAÇÃO DA MLC.....	38
2.6.9	OUTRAS PESQUISAS SOBRE MLC.....	40
3	<u>CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES DA MADEIRA.....</u>	<u>46</u>
3.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	46
3.2	DETERMINAÇÃO DA UMIDADE E DENSIDADE DA MADEIRA.....	46
3.2.1	PROCEDIMENTOS ADOTADOS.....	47
3.2.2	DESCRIÇÃO DA AMOSTRA.....	48
3.2.3	RESULTADOS DOS ENSAIOS.....	48
3.2.4	EQUIPAMENTOS UTILIZADOS.....	50
3.3	DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA.....	51
3.3.1	DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA DA MADEIRA.....	51
3.3.2	DETERMINAÇÃO DA RIGIDEZ DA MADEIRA.....	60

3.3.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS A RESPEITO DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA	63
-------	--------------------------------------------------------------------------------	----

4 ENSAIOS DE FLEXÃO DAS VIGAS65

4.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	65
4.2	MADEIRA UTILIZADA.....	66
4.2.1	VIGAS MACIÇAS DE ANGELIM PEDRA	66
4.2.2	VIGAS DE EUCALIPTO EM MLC	68
4.2.3	PREPARAÇÃO DAS LÂMINAS	69
4.2.4	PRÉ-CLASSIFICAÇÃO DAS LÂMINAS.....	69
4.3	MODELOS ADOTADOS.....	75
4.3.1	DESCRIÇÃO.....	75
4.3.2	COMPOSIÇÃO RACIONAL DA SEÇÃO TRANSVERSAL.....	76
4.4	FABRICAÇÃO DAS VIGAS.....	80
4.4.1	COMPOSIÇÃO DAS VIGAS	80
4.4.2	FABRICAÇÃO DAS VIGAS.....	85
4.4.3	APLICAÇÃO DA FIBRA DE VIDRO.....	88
4.4.4	PRENSAGEM DAS VIGAS	90
4.4.5	ACABAMENTO DAS VIGAS.....	92
4.5	ENSAIO DAS VIGAS	93
4.5.1	PROCEDIMENTOS DE ENSAIO	93
4.5.2	ARRANJO UTILIZADO NOS ENSAIOS	94
4.5.3	PROCEDIMENTOS DE CÁLCULO	97
4.5.4	RESULTADOS DOS ENSAIOS.....	99
4.5.5	ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS.....	102
4.5.6	EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NOS ENSAIOS DE FLEXÃO	112

5 CONCLUSÃO.....113

5.1	INDICAÇÕES PARA FUTURAS PESQUISAS.....	116
-----	----------------------------------------	-----

ANEXO A - DADOS E MEMORIAIS DE CÁLCULO118

A.1	CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES DA MADEIRA (CAPÍTULO II).....	118
A.1.1	DETERMINAÇÃO DA UMIDADE E DENSIDADE DOS LOTES DE MADEIRA.....	118
A.1.2	DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA E RIGIDEZ À COMPRESSÃO PARALELA.....	122

A.2	ANÁLISE DO DESEMPENHO DAS VIGAS (CAPÍTULO III)	132
------------	-------------------------------------------------------------	------------

ANEXO B - TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS DADOS157

B.1	DADOS DOS ENSAIOS DE COMPRESSÃO PARALELA	157
------------	-------------------------------------------------------	------------

B.1.1	VERIFICAÇÃO DE ESPURIEDADE DOS DADOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO PARALELA	157
-------	---------------------------------------------------------------------------------	-----

B.1.2	VERIFICAÇÃO DE ESPURIEDADE DOS DADOS DE RIGIDEZ À COMPRESSÃO PARALELA	158
-------	-----------------------------------------------------------------------------	-----

B.1.3	VERIFICAÇÃO DA NORMALIDADE DOS DADOS DE RIGIDEZ À COMPRESSÃO PARALELA	160
-------	-----------------------------------------------------------------------------	-----

B.2	DADOS DOS ENSAIOS DE FLEXÃO DAS VIGAS	161
------------	----------------------------------------------------	------------

B.2.1	VERIFICAÇÃO DE ESPURIEDADE DOS VALORES DE RESISTÊNCIA À FLEXÃO	161
-------	----------------------------------------------------------------------	-----

B.2.2	VERIFICAÇÃO DE ESPURIEDADE DOS VALORES DE RIGIDEZ À FLEXÃO	162
-------	------------------------------------------------------------------	-----

B.2.3	VERIFICAÇÃO DA NORMALIDADE DOS DADOS DE RESISTÊNCIA À FLEXÃO	164
-------	--------------------------------------------------------------------	-----

B.2.4	VERIFICAÇÃO DA NORMALIDADE DOS DADOS DE RIGIDEZ À FLEXÃO	166
-------	----------------------------------------------------------------	-----

ANEXO C - RELAÇÃO DE EMPRESAS PARTICIPANTES DA PESQUISA168

BIBLIOGRAFIA169

LISTA DE FIGURAS E TABELAS

Tabela 1 - Produção em milhões de m ³ e fluxos de comercialização, em %, de madeira da Amazônia em 1997. (Fonte: SMERALDI e VERÍSSIMO, 1999).....	12
Tabela 2 - Propriedades físico-mecânicas do Eucalyptus grandis. (Fonte: MADEIRA TOTAL, 2000).	16
Tabela 3 - Propriedades físico-mecânicas do angelim pedra. (Fonte: MADEIRA TOTAL, 2000).	19
Figura 1 - Princípio de fabricação e de colagem , da viga "Hércules" em Madeira Laminada Multidirecional. (Fonte: SANDOZ, 1998).....	41
Figura 2 - Comparação das distribuições estatísticas da variável resistência à flexão para as vigas (dimensões 120x300x6000 mm) em MLC e para vigas "Hércules" em MLC "Multicolada". (Fonte: SANDOZ, 1998).....	42
Figura 3 - Vigas em MLC reforçada. (a) duas peças de PRF utilizadas na parte inferior, tracionada, da viga (b) duas peças de PRF utilizadas nas camadas mais afastadas da linha neutra, sob compressão e tração. (Fonte: HERNANDEZ, 1997)	45
Figura 4 - Esquema de posicionamento dos pregos.....	53
Figura 5 - Proporções do corpo de prova de compressão paralela.....	54
Figura 6 - Corpo de prova ensaiado, apresentando uma falha típica por ruptura à compressão paralela	55
Figura 7 - Prensa hidráulica utilizada na realização dos ensaios	58
Figura 8 - Aparato montado para os ensaios de compressão paralela	59
Figura 9 - Corpo de prova com o dispositivo de fixação dos relógios comparadores	60
Figura 10 - Exemplo de gráfico tensão x deformação obtido através dos ensaios de compressão paralela	61
Figura 11 - Esquema de ensaio para a pré-classificação das lâminas.....	70
Tabela 4 - Cálculo da rigidez das lâminas. Trecho da planilha de cálculo.	71

Figura 12 - Dispositivo utilizado p/ pré-classificação das lâminas.....	72
Figura 13 - Vista frontal do dispositivo	72
Tabela 5 - Dados rigidez das lâminas da Classe A.....	74
Tabela 6 - Dados rigidez das lâminas da Classe B	74
Figura 14 - Modelo da seção transversal das vigas laminadas horizontalmente.	75
Figura 15 - Modelo da seção transversal das vigas laminadas multidirecionalmente. ...	75
Figura 16 - Esquema de disposição das mechas de fibra de vidro.....	76
Figura 17 - Participação percentual das lâminas em relação a resistência total da seção.	78
Figura 18 - Participação percentual das lâminas em relação a resistência total da seção.	78
Figura 19 - Participação percentual das 4 lâminas externas (quartos inferior e superior da seção) em relação às 4 lâminas internas.....	79
Figura 20 – Composição das vigas dos Lotes II, III e IV	80
Figura 21 - Preparação da cola.....	86
Figura 22 – Encoladeira mecânica.....	87
Figura 23 – Aplicação da cola.....	88
Figura 24 - Fixação das mechas à extremidade da lâmina externa.....	89
Figura 25 - Lâminas preparadas para aplicação da cola	89
Figura 26 - Mechas posicionadas sobre as lâminas já com a cola aplicada.....	90
Figura 27 - Prensa já com algumas lâminas dispostas.....	91
Figura 28 - Preparação para a prensagem	92
Figura 29 - Plainagem da lateral das vigas	93
Figura 30 - Arranjo utilizado nos ensaios	95
Figura 31 - Esquema de carregamento dos ensaios	95
Figura 32 – Vista geral dos dispositivos de ensaio montados no LEE	96
Figura 33 – Ensaio de uma viga de <i>Eucalyptus grandis</i> em MLC	96
Figura 34 – Detalhe dos dispositivos de medição dos deslocamentos.....	96
Figura 35 – Ensaio de viga próxima da ruptura.....	97
Tabela 7 - Valores médios de resistência das vigas e média dos lotes	104

Tabela 8 - Quadro de ANOVA.....	104
Tabela 9 - Quadro comparativo entre lotes.....	104
Tabela 10 - Valores médios de rigidez das vigas e média dos lotes	105
Tabela 11 - Quadro de ANOVA.....	105
Tabela 12 - Quadro comparativo entre os lotes	106
Figura 36 - Ruptura de viga de angelim.....	107
Figura 37 - Ruptura por cisalhamento na linha neutra.....	108
Figura 38 - Ruptura total da viga por tração e cisalhamento	108
Figura 39 - Ruptura por tração e falha por compressão sob os atuadores	109
Figura 40 - Ruptura de uma das lâminas verticais.....	109
Figura 41 - - Ruptura por cisalhamento	110
Figura 42 - Após o descarregamento a viga retorna a posição inicial	110
Figura 43 – Gráfico do ensaio de compressão paralela do C.P. <i>A1</i>	123
Figura 44 – Gráfico do ensaio de compressão paralela do C.P. <i>A2</i>	123
Figura 45 – Gráfico do ensaio de compressão paralela do C.P. <i>A3</i>	124
Figura 46 – Gráfico do ensaio de compressão paralela do C.P. <i>A4</i>	124
Figura 47 – Gráfico do ensaio de compressão paralela do C.P. <i>A5</i>	125
Figura 48 – Gráfico do ensaio de compressão paralela do C.P. <i>A6</i>	125
Figura 49 – Gráfico do ensaio de compressão paralela do C.P. <i>A7</i>	126
Figura 50 – Gráfico do ensaio de compressão paralela do C.P. <i>A8</i>	126
Figura 51 – Gráfico do ensaio de compressão paralela do C.P. <i>E1</i>	127
Figura 52 – Gráfico do ensaio de compressão paralela do C.P. <i>E2</i>	127
Figura 53 – Gráfico do ensaio de compressão paralela do C.P. <i>E3</i>	128
Figura 54 – Gráfico do ensaio de compressão paralela do C.P. <i>E4</i>	129
Figura 55 – Gráfico do ensaio de compressão paralela do C.P. <i>E5</i>	129
Figura 56 – Gráfico do ensaio de compressão paralela do C.P. <i>E6</i>	130
Figura 57 – Gráfico do ensaio de compressão paralela do C.P. <i>E7</i>	130
Figura 58 – Gráfico do ensaio de compressão paralela do C.P. <i>E8</i>	131
Figura 59 – Gráfico do ensaio de compressão paralela do C.P. <i>E9</i>	131

Figura 60 – Gráfico do ensaio de compressão paralela do C.P. <i>E10</i>	132
Figura 61 – Gráfico do ensaio de compressão paralela do C.P. <i>E11</i>	132

RESUMO

BEZ, Roberto Motta Bez. Análise do desempenho de vigas maciças de angelim pedra e vigas de eucalipto *grandis* em MLC Multidirecional: um estudo comparativo. Florianópolis, 2001. 192 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina.

No Brasil a madeira desempenha um importante papel como material de construção civil. No entanto, a redução da disponibilidade de espécies de madeiras nativas e seus efeitos na economia, associada ao fortalecimento dos conceitos preservacionistas, criaram a necessidade do desenvolvimento de alternativas viáveis para a utilização racional da madeira proveniente de florestas plantadas. Neste contexto a técnica da Madeira Laminada Colada aparece como uma alternativa técnica e economicamente viável para o aproveitamento de todo o potencial deste material, permitindo a fabricação de componentes de qualidade, adequados às necessidades atuais e futuras. Este estudo traça um comparativo entre o desempenho e a viabilidade de fabricação dos modelos propostos em madeira de floresta plantada (*Eucalipto grandis* - *Eucalyptus grandis*), comparando os resultados com os de peças maciças de madeira nativa (Angelim pedra - *Hymenolobium petraeum*). O estudo contempla ainda a utilização da técnica de Madeira Lamina Colada Multidirecional e o reforço destas vigas, através da inserção de fibra de vidro nas linhas de cola.

Palavras Chave: Madeira, Madeira Laminada Colada, MLC, *Eucalyptus grandis*, *Hymenolobium petraeum*, Construção civil, Meio Ambiente

ABSTRACT

In Brazil, wood has great importance as construction material. The reduction of native wood species availability and their effects in economy, associated to the expansion of preservationist concepts, created the necessity to develop new and feasible alternatives to a rational use of wood from planted forests. In this context the technique of Glued Laminated Timber (GLT) appears to be a feasible alternative to the full potential use of this material allowing the production of quality components and appropriate to the present and future necessities. This study outlines a comparison between structural performance and manufacturing feasibility proposed for modelled beams made up of planted wood forest (*Eucalyptus grandis*) and of solid native wood (*Hymenolobium petraeum*). The study also approaches the use of Multioriented Glued Laminated Timber (MGLT) technique and the use of fiberglass as beam reinforcement inside the glueline.

Keywords: Wood; glued laminated timber; glulam; *Eucalyptus grandis*; *Hymenolobium petraeum*, civil construction, environment

1 INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO

O estudo da madeira é uma prática apaixonante. A madeira vem sendo utilizada há milênios, sendo que a cada dia surgem novas descobertas e formas de utilização para o material.

Sem sombra de dúvida a madeira ocupa um papel de destaque na construção civil. Em todo o mundo ela está presente como parte integrante das edificações, sendo muitas vezes insubstituível. Material natural, de fonte renovável, dotado de comportamento anisotrópico e particular, a madeira tem resistido a concorrência dos novos materiais. A madeira demonstra ser um material adequado à superação dos limites, dia após dia, desafiados pela ousadia humana.

Atualmente o uso da madeira exige bem mais que o conhecimento intuitivo do carpinteiro ou do, cada vez mais raro, prático. Não que se possa desprezar o *know-how* acumulado por aqueles, que através dos tempos, vivenciaram o uso da madeira. Na verdade é este conhecimento que serve de base para grande parte das pesquisas atuais. Torna-se então necessário, o refinamento e a sistematização destes conhecimentos, para que o uso da madeira possa se popularizar e não acabe restrito a alguns poucos iniciados.

Neste início de milênio o conservacionismo desponta como uma diretriz fundamental para o ser humano. O custo para a manutenção do padrão de vida instituído por nós mesmos é alto e exige novas soluções para novos problemas. Para alguns, ainda ignorantes sobre o tema, a utilização da madeira não seria uma alternativa ecologicamente correta. Porém com um planejamento adequado da extração da madeira, esta pode vir a tornar-se um recurso natural inesgotável. Além disso a criação de florestas plantadas, em especial em áreas degradadas, apresenta-se como uma forma eficaz de atender a alta demanda por matéria prima.

No Brasil, possuidor de uma vasta área coberta por florestas compostas por espécies nobres, a exploração das matas nativas se faz de forma primitiva. Iniciativas como a implantação de florestas plantadas e o manejo sustentável, ainda se apresentam de forma bastante tímida, certamente em função da enorme disponibilidade de madeira barata e de qualidade.

Ao que tudo indica esta situação deverá mudar em breve. As medidas no sentido de coibir o desmatamento têm atingido diretamente as empresas madeireiras, forçando-as a se adequarem, valorizando mais e mais cada metro cúbico de madeira extraída. A madeira proveniente de florestas plantadas, antes utilizada quase sempre como combustível, cresce em importância através de novas formas de utilização. Técnicas como a madeira laminada colada (MLC) a tornam técnica e economicamente mais interessante.

É dentro deste contexto que as pesquisas acadêmicas assumem fundamental importância como produtoras e propagadoras do conhecimento.

Nos assuntos ligados à arquitetura e à construção civil, a academia tem sido o elemento articulador entre os profissionais, o empresariado e a sociedade. As pesquisas desenvolvidas permitem o aperfeiçoamento destas relações e participam neste processo, produzindo tecnologia e formando novos profissionais.

O advento do cálculo, no século XVII, deu suporte ao surgimento da teoria dos materiais, desenvolvida a partir de uma incansável observação dos fenômenos estruturais. A análise de materiais e de seus processos de produção passou a permitir a modelização teórica e a verificação sistematizada da validade de novos conceitos e tecnologias. Neste contexto a prática experimental é provavelmente a mais rica fonte de informações sobre o comportamento dos diversos materiais empregados na construção civil.

A compreensão do comportamento mecânico da madeira assumiu fundamental importância no último século, com o surgimento de novos materiais e principalmente de novos desafios a serem vencidos. Até então, apesar de utilizada intensamente, a madeira não havia recebido a devida atenção dos meios científicos. Ela era apenas utilizada até que se encontrasse alguma limitação.

Mais do que nunca torna-se imprescindível a formulação de novas formas de utilização da madeira, tornando-a tecnicamente avançada e competitiva em relação a outros materiais.

1.2 JUSTIFICATIVA

Esta pesquisa pretende ser uma contribuição ao estudo da **utilização da madeira reflorestada sob a técnica da M.L.C.**. Assim sendo as justificativas para este estudo são muitas:

- O alto custo ambiental do extrativismo, hoje praticado de forma desordenada, que reforça a necessidade de atitudes de conscientização no mais breve período de tempo;
- A existência de grandes áreas de florestas plantadas no Brasil, sendo que a madeira proveniente destas tem sido subutilizada na construção civil. Esta madeira, em grande parte das vezes, tem se prestado apenas à produção de celulose e carvão;
- A certeza de que para tornar a técnica economicamente viável é necessário investir em desenvolvimento tecnológico, bem como divulgar a técnica junto aos detentores do poder decisório na construção civil;
- A divulgação de uma forma de agregar valor à madeira de reflorestamento que, enquanto em estado bruto, possui baixo valor;
- A possibilidade de participar da preparação de novos profissionais, para que estes possam ingressar no mercado de trabalho conhecendo as possibilidades de uso da madeira e da MLC;
- A participação na produção de conhecimento que auxilie o desenvolvimento de futuras indústrias de beneficiamento racional da madeira.

Como justificativas à opção pela **utilização do *Eucalyptus grandis*** podem ser citadas:

- A crescente aceitação da espécie em oposição ao preconceito quanto ao uso do pinus;
- A disponibilidade do material na região estudada;
- Sua alta resistência mecânica;
- Sua perfeita adequação aos processos de colagem;
- O fato de que se trata de um material natural e renovável;
- Seu crescimento rápido;

- Menor percentual de perdas por defeitos em comparação a outras espécies de eucalipto;
- Desenvolvimento de uma alternativa que permita minimizar os efeitos de sua maior quantidade de defeitos internos se comparado às espécies nativas.

Para justificar a **análise da laminação vertical** além da horizontal, podem ser citados:

- A quase inexistência de pesquisas específicas sobre o tema;
- A suspeita de que possam ser idealizados modelos de execução mais simples e com menor consumo energético até o produto final.

Justificando a inclusão da análise de **vigas reforçadas com fibra de vidro** neste estudo, cita-se:

- As pesquisas já realizadas, inclusive no LEE, utilizando a fibra de vidro como reforço em peças sob a técnica da MLC;
- A importância da busca por novas alternativas, capazes de aprimorar a técnica da MLC, aumentando o desempenho estrutural das peças.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo geral

Contribuir com o estudo de alternativas que viabilizem a utilização da madeira de reflorestamento como material para a construção civil, tornando-a uma opção interessante e competitiva para o mercado.

1.3.2 Objetivos específicos

- 1) Comprovar a existência de uma alternativa que permita a utilização do *Eucalyptus grandis* na produção de peças estruturais para uso na construção civil, garantindo a qualidade do produto final.

- 2) Analisar o desempenho mecânico de peças manufaturadas sob a técnica da MLC e MLC Multidirecional, comparando os resultados de resistência e rigidez média destas com os de vigas maciças de madeira nativa.
- 3) Verificar a ocorrência de alterações no comportamento mecânico de vigas laminadas coladas através da utilização de fibra de vidro reforçando à região tracionada.
- 4) Investigar a significância das diferenças existentes entre os processos de produção de peças de seções comerciais, em MLC, utilizando-se a laminação horizontal e a vertical.

1.4 METODOLOGIA UTILIZADA

O método de abordagem utilizado para dar seguimento ao estudo em questão foi o hipotético-dedutivo (LAKATOS e MARCONI, 1992). Os resultados buscados foram obtidos através de um estudo comparativo, associado a inferências estatísticas. A natureza do tema e o cunho científico do trabalho justificam o emprego destas metodologias, garantindo a confiabilidade dos resultados obtidos.

A técnica utilizada para a realização dos experimentos foi a de observação laboratorial intensiva. Os experimentos foram realizados com a utilização dos equipamentos disponibilizados pelo Laboratório de Experimentação de Estruturas – LEE.

2 A MADEIRA E SUA UTILIZAÇÃO

2.1 INTRODUÇÃO

O uso da madeira como matéria prima foi certamente um dos fatores determinantes na edificação da civilização atual. Desde a confecção de ferramentas de trabalho, passando pela construção das primeiras máquinas, até a sua utilização como material de construção, a madeira sempre se destacou por suas qualidades, propriedades mecânicas e trabalhabilidade. Segundo NATTERER *et al.* (1994) o mais antigo testemunho da utilização técnica da madeira pelo homem é uma ponta de lança, a qual estima-se que tenha sido produzida a 290.000 anos atrás.

A utilização da madeira como material de construção é antiquíssima, ao contrário do aço e do concreto armado, utilizados na construção civil apenas recentemente. Existe a possibilidade de que a madeira tenha sido o material escolhido e utilizado no momento em que os homens primitivos abandonaram as cavernas (ou as árvores?) e buscaram "construir" abrigos para viver. A partir daí praticamente todos os grupos humanos passaram a fazer uso do material.

Por ser um material naturalmente renovável e como a sua exploração na antigüidade se deu através de métodos rudimentares e pouco agressivos, as reservas de madeira foram sendo consumidas sem que isto suscitasse maiores preocupações ao longo dos séculos. Até a década de 50 ninguém havia ainda questionado a possibilidade de que, em algum momento, o ritmo de renovação das reservas florestais pudesse se dar de forma insuficiente para a manutenção da disponibilidade de madeira.

A partir do século XIX e principalmente durante o século XX, a mecanização e o crescimento desenfreado do extrativismo vegetal, tendo como fim a produção de toda a sorte de produtos, provocaram um enorme incremento no ritmo da exploração madeireira. Pela primeira vez atingiu-se um ritmo de desflorestamento superior à capacidade de recomposição das florestas.

2.1.1 O uso da madeira e a questão ambiental

Hoje em dia podemos observar, através da mídia e de nossas próprias relações com o ambiente, uma série de indicativos de que algo está abalando o equilíbrio dos ecossistemas florestais. Podem ser citados, como exemplo, alguns fatos:

- Uma série de mudanças climáticas têm sido observadas em todo planeta, sendo constantemente atribuídas à redução da cobertura vegetal do globo;
- Recentemente, várias empresas asiáticas têm centrado seus investimentos na compra de enormes reservas localizadas na bacia amazônica, prevendo o esgotamento de suas reservas nativas. Tais empresas são conhecidas internacionalmente como verdadeiras destruidoras de florestas, tendo atuado em diversos países de forma devastadora (BRASIL, 1998).

Por estes, entre muitos outros motivos, a comunidade internacional se encontra hoje, mais do que nunca, voltada para a questão ambiental. Mesmo aqueles que não se consideram ativistas das causas ecológicas vêm, pouco a pouco, admitindo a necessidade do equilíbrio entre os diversos ecossistemas naturais para garantir a perfeita habitabilidade do planeta. Torna-se senso comum a importância do estudo das intervenções humanas que possam influenciar os ecossistemas sem que se possa definir com precisão as conseqüências destes atos. É preciso ressaltar que esta conscientização é fruto não apenas da razão, mas, principalmente, da infeliz constatação do quão danoso foi o extrativismo desenfreado e sem planejamento praticado em décadas passadas, em diversas partes do mundo, em nome da conquista do "progresso".

MERICO (1996) critica a visão econômica dominante que estabelece uma relação direta entre o desenvolvimento de um país e seu crescimento econômico. O autor afirma também que a economia precisa se manter numa dimensão que seja suportável à manutenção de seus ecossistemas.

“Ainda que muitos bens da natureza tenham preços observáveis no mercado, como os minerais, a madeira, etc., seus custos são de fato zero, para a contabilização econômica de um país. A diminuição de seus estoques não representa a diminuição da renda nacional.”

Por fim o autor coloca de forma negativa o modo capitalista e tradicional de medir a riqueza de um país:

“Crescimento econômico através do desperdício, abundância e consumismo podem ser interessantes para aqueles que desfrutam desses padrões

de consumo, mas são definitivamente contra a humanidade como um todo e contra as futuras gerações.”

2.1.2 O uso da madeira na construção civil

A prática histórica do uso da madeira como material da construção civil assim como as suas qualidades particulares demonstram que, para determinadas aplicações, a madeira é um material praticamente insuperável e sem substitutos à altura. Segundo NATTERER *et al.* (1994) a madeira é o material ideal para a materialização dos ordenamentos geométricos e princípios arquitetônicos observados desde a perfeição clássica incomparável do palácio de Katsura ¹ até habitações simples, destinadas a auto-construção.

CALIL *et al.* (2000) afirmam que a madeira compete com o concreto e o aço em aplicações estruturais, havendo, porém, preconceito em relação à sua durabilidade. Ainda segundo os autores, quando aplicada corretamente, fazendo opção pelo sistema estrutural e a espécie adequados, a madeira pode equiparar-se e até superar o concreto e o aço em suas aplicações.

A madeira tem uma série de características inerentes ao material, que lhe conferem um comportamento particular, tornando-a interessante como material para a construção civil. Entre estas, podem ser citadas:

- Resistência tanto à tração quanto à compressão;
- Baixo peso aliado a boa resistência mecânica;
- Fácil trabalhabilidade;
- Baixa condutibilidade térmica;
- Ausência de dilatação térmica;
- Apesar de combustível, a madeira quando utilizada em estruturas, apresenta um comportamento perfeitamente previsível quando submetida a incêndios;
- Alta resistência à abrasão química;
- Ausência de condutibilidade elétrica.

¹ O palácio imperial de Katsura está localizado na cidade de Kioto, Japão. Foi construído por volta de 1620 e é um belo exemplo de utilização da madeira na construção civil e de sua perenidade.

Tais propriedades justificariam o porquê de um uso mais intensivo da madeira como matéria prima na construção civil. Porém a alta demanda do material fez com que as reservas madeireiras fossem diminuindo e tornando-se insuficientes para atender às solicitações dos mercados consumidores, fato que fez com que se começasse a estudar alternativas para garantir a racionalização do uso da madeira.

2.1.3 O uso racional da madeira

O uso racional da madeira é prerrogativa básica para que o material receba o mérito que possui. Tal uso se traduz na correta utilização das florestas existentes, sejam elas naturais ou plantadas. Se traduz ainda em projetos caracterizados por um correto dimensionamento, bom detalhamento e especificações precisas. Por fim, mais recentemente observa-se a formação de várias frentes de pesquisa para o melhoramento genético das espécies comercialmente utilizadas, visando atender a necessidades específicas (KNAPP, 2000).

A importância do uso racional da madeira fica evidente quando analisamos a questão sob a ótica de uma abordagem ecológica, econômica e técnica.

Sobre a questão ecológica observa-se a necessidade de garantir a sustentabilidade da exploração madeireira, mesmo dentro do modelo econômico atual. Esta sustentabilidade pode ser obtida através de medidas que possibilitem a utilização dos recursos vegetais num ritmo inferior à capacidade de recomposição das regiões exploradas. Em termos de economia entende-se que, por tratar-se de um material de fonte renovável e extremamente abundante no Brasil, é necessário tratar a exploração madeireira como uma questão estratégica para o país. Em relação às questões técnicas observa-se que as solicitações projetuais vêm exigindo um conhecimento mais aprofundado sobre os materiais e sua utilização. A utilização da madeira na construção civil demanda a sua normatização de modo que facilite a atividade dos projetistas assim como norteie a atuação dos produtores madeireiros.

Por fim, cabe ressaltar o fato de que a utilização de florestas plantadas, como fonte de matéria prima para a construção civil, é uma das formas de reduzir o impacto sobre as matas nativas ainda existentes.

2.2 O COMÉRCIO MADEIREIRO NO BRASIL

2.2.1 Considerações iniciais

Até há bem pouco tempo atrás a qualidade e a abundância de madeiras nativas no Brasil permitiram que os estabelecimentos do setor madeireiro ampliassem seus negócios sem ter a necessidade de investir ou se aprofundar no estudo das características das espécies comercializadas. Desde o manejo, passando pelo beneficiamento até a comercialização pode-se observar a inexistência de conformidade com as normas e leis que estabelecem a forma como a madeira deveria ser extraída, processada, comercializada e utilizada.

O desconhecimento das técnicas para o uso da madeira faz com que, tanto os profissionais responsáveis pelos projetos quanto os consumidores e comerciantes, desconsiderem a importância dos cuidados que devem ser tomados em todas as etapas de produção. Segundo CUNHA e CÉSAR (1998), em pesquisa correlata, realizada na região de Salvador (BA), os centros de produção madeireira têm promovido a exploração negativa do potencial da madeira, com origem no desconhecimento e desprezo aos cuidados mínimos para com o material. Numa avaliação de campo, observou-se que a situação em muitos estabelecimentos da região da Grande Florianópolis não parece ser diferente.

Além disso, os problemas gerados a partir da falta de cuidado com a madeira comercializada acabam, de tão comuns, sendo considerados “normais”. Projetos de estruturas em madeira, quando realizados, se tornam mal sucedidos em razão da inconsistência dos dados disponibilizados pelos fornecedores ou pela falta de controle de qualidade do material.

VICENZI e PINTER (1999) afirmam que, há 150 anos, Santa Catarina apresentava cobertura vegetal com mata nativa em 85% de seu território, recurso natural que hoje, em função do extrativismo desordenado que se instalou nas terras catarinenses, está presente em apenas 34% da área total do Estado. Os autores afirmam ainda que apesar das restrições impostas pela legislação ambiental, a mata nativa continua sendo devastada, provocando estragos de ordem ambiental. Por fim, os autores relacionam algumas medidas governamentais através de programas de reflorestamento e

conscientização ambiental que tem sido implantados no estado de SC, pela Secretaria de Desenvolvimento Rural e da Agricultura (SDA).

Segundo BITTENCOURT (1995) os erros de especificação das espécies são freqüentes nos estabelecimentos comerciais.

2.2.2 Espécies de madeira comercializadas

No caso da região Sul do Brasil, nos últimos anos a falta de planejamento na extração das espécies nativas, fez com que desaparecessem do mercado algumas espécies antes facilmente encontradas. Um bom exemplo a ser citado é o da Araucária², outrora abundante e hoje quase extinta comercialmente. Através de visita ao *site* da Presidência da República Federativa do Brasil na Internet, consultou-se o código florestal vigente, instituído pela lei n.º 4.771, de 15 de setembro de 1965. O artigo 16 define algumas restrições a forma de exploração de determinadas áreas. Entre estas, o item c) do referido artigo, traz o seguinte texto:

“c) na região Sul as áreas atualmente revestidas de formações florestais em que ocorre o pinheiro brasileiro, "Araucaria angustifolia" (Bert - O. Ktze), não poderão ser desflorestadas de forma a provocar a eliminação permanente das florestas, tolerando-se, somente a exploração racional destas, observadas as prescrições ditadas pela técnica, com a garantia de permanência dos maciços em boas condições de desenvolvimento e produção;”

A lei citada exige que os interessados na exploração das matas nativas de araucárias adotem procedimentos ambientalmente corretos na exploração de suas reservas particulares.

Observa-se através de pesquisa de campo junto às madeireiras que as espécies comercializadas são predominantemente nativas e provenientes da floresta amazônica. Entre as espécies de madeiras comercializadas e atualmente mais utilizadas na construção civil, na região da Grande Florianópolis, pode-se citar entre outras o comumente chamado angelim pedra, o angelim vermelho, a peroba e a itaúba³.

Entre as espécies exóticas provenientes de florestas plantadas há o predomínio do *Eucalyptus grandis* e do *Pinus elliottii*. Tais espécies, devido ao baixo

² *Araucaria angustifolia* Bert. também conhecida como pinheiro do paraná ou pinheiro brasileiro.

³ Optou-se por omitir os nomes científicos das espécies citadas em razão da inexistência de informações precisas sobre a identificação das espécies citadas.

custo, são utilizadas, na maioria das vezes como estacas e pontaltes (eucalipto) ou sob forma de tábuas para execução de fôrmas de caixaria para o concreto (pinus).

2.2.3 Proveniência das madeiras

Com a diminuição da capacidade de produção de madeiras nativas nas regiões Sul e Sudeste, as madeiras nativas comercializadas têm sido trazidas em sua grande maioria da região Norte e de alguns estados da região Centro-oeste, assim como do exterior (Paraguai e Bolívia).

Estados Produtores	Acre	Amapá	Amazonas	Maranhão	Mato Grosso	Para	Rondônia	Roraima	Tocantins
Produção em milhões de m ³	0,3	0,2	0,7	0,7	9,8	11,9	3,9	0,2	0,1
Destino da produção em %									
Distrito Federal	-	-	-	1	1	2	1	-	-
Espírito Santo	-	-	-	-	1	2	3	-	-
Goiás	-	-	-	1	3	2	2	-	-
Mato Grosso do Sul	-	-	-	-	2	2	-	-	-
Minas Gerais	2	-	-	3	9	8	19	-	-
Paraná	6	-	2	-	12	5	19	-	-
Rio de Janeiro	7	-	-	3	8	5	11	-	-
Rio Grande do Sul	-	-	-	11	2	6	5	-	-
Santa Catarina	-	-	-	2	11	1	7	-	-
São Paulo	9	-	3	25	33	12	19	-	-
Nordeste	-	-	-	29	3	28	2	-	23
Exportação	7	-	77	1	9	19	6	40	-
Consumo Interno	69	100	18	24	6	8	6	60	77
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Tabela 1 - Produção em milhões de m³ e fluxos de comercialização, em %, de madeira da Amazônia em 1997. (Fonte: SMERALDI e VERÍSSIMO, 1999)

As espécies exóticas provenientes de florestas plantadas são na sua maioria extraídas das diversas regiões reflorestadas espalhadas pela região Sul e Sudeste. Atualmente existe um grande número de incentivos para o investimento em recomposição das áreas degradadas. Além disso a produção de madeira de espécies como o *Eucalyptus grandis*, o *Eucalyptus citriodora*, o *Pinus elliottii* ou o *Pinus taeda* tem se revelado uma atividade bastante rentável.

2.2.4 Dimensões das seções comercializadas

De acordo com consulta realizada junto à ABNT (2001), a NBR 7203/82 padroniza a nomenclatura de peças de madeira serrada e os padrões de dimensões (bitola) de madeira serrada e de madeira beneficiada, de acordo com o aproveitamento racional da matéria-prima.

MOLITERNO (1981) relaciona as bitolas comerciais de madeira serrada utilizando dois padrões: um deles em centímetros e outro em polegadas, o que, por si só, já demonstra a ausência de um padrão.

CALIL et al. (2000) apresentam uma tabela com dimensões das seções comerciais encontradas no Brasil.

Foi realizada pesquisa em publicações de circulação nacional, visitas às madeireiras da região e consulta à publicidade veiculada pelas mesmas, onde constavam as seções disponíveis para comercialização. Na prática os madeireiros não mantêm um padrão para os seus produtos e, na sua maioria, desconhecem a existência de normas. Existe também uma diferença entre as dimensões das seções nominal e real que, ao menos entre as madeireiras consultadas, não é considerada para fins de comercialização. Como não é feita distinção entre a madeira serrada plainada e a em estado bruto, o preço de venda ao consumidor acaba sendo o mesmo. A não observância de regras ou normas específicas tem ainda outras consequências diretas:

- cria a necessidade de majoração dos coeficientes de segurança utilizados para o cálculo de estruturas; e
- impossibilita a criação de padrões que simplifiquem a especificação e o cálculo por parte dos projetistas.

A falta de normatização fez com que na região da Grande Florianópolis as seções comerciais padrões de mercado tenham sido definidas historicamente. Tais padrões são tipicamente regionais explicando o fato de que determinadas seções bastante utilizadas na região Sul não sejam encontradas em outras regiões do Brasil e vice versa.

Observou-se que os autores citados não fazem referência a vigas com seção de 8 x 16 cm, utilizada nesta pesquisa e facilmente encontrada em Santa Catarina. Segundo estes autores as seções cujas dimensões mais se aproximam das utilizadas na pesquisa são as vigas de 6 x 16 cm e 3" x 6" (7,5 x 15,2 cm).

2.2.5 Qualidade percebida

No Brasil, a indústria madeireira peca pela falta de cuidados com a madeira comercializada. O mercado consumidor de madeira, ao contrário do que acontece em relação a outros materiais industrializados, parece ser conivente com a falta de controle de qualidade do material. Esta prática se encontra arraigada no Brasil, permitindo que a madeira comercializada apresente diversos tipos de defeitos, causados nas diversas etapas do beneficiamento do material.

Academicamente entende-se que a madeira não deve ser utilizada sem que esteja em absolutas condições de equilíbrio e estabilidade, ou seja, seca. Segundo GALVÃO (1985) o processamento da madeira deve ser feito apenas com teor de umidade inferior a 30%. Porém nos ensaios de caracterização dos lotes de madeira utilizados no presente estudo obteve-se valores de teor de umidade próximos a 60%⁴.

Através de consultas a fabricantes de produtos industrializados à base de madeira, como esquadrias e casas de madeira, observamos que grande parte dos problemas enfrentados por estes são relativos à falta de cuidados básicos no tratamento da matéria prima.

2.3 FLORESTAS PLANTADAS EM SANTA CATARINA

As florestas plantadas, tradicionalmente conhecidas como reflorestamentos, são uma opção para minimizar o impacto da exploração indevida das florestas nativas. A utilização de espécies de rápido crescimento faz com que as florestas plantadas sejam capazes de suprir a demanda por madeira reduzindo a pressão sobre as florestas nativas.

Segundo ROPER e ROBERTS (1999) a demanda mundial por polpa de madeira poderia ser suprida por cerca de 3% da área florestal global. Caso esta área fosse coberta por florestas plantadas que, inclusive, possuem uma produtividade maior que a de florestas nativas, poderia-se reservar quase todo o restante para preservação. Esta grande massa vegetal contribuiria também para a absorção de gás carbônico da atmosfera desacelerando o efeito estufa.

⁴ Barrotes de *Eucalyptus grandis* utilizados na confecção dos corpos de prova de compressão paralela.

Segundo RODRIGUES (2001) as florestas plantadas ocupam 532.400 hectares do território catarinense. Deste total 482.900 hectares são ocupados por pinus, 32.000 hectares por eucalipto e 17.400 hectares por araucárias. Estima-se que cerca de 50% do solo catarinense seja adequado para a silvicultura.

Santa Catarina é hoje um dos estados onde a implantação de florestas plantadas tem se processado de forma mais efetiva. Segundo o EPAGRI (2001) cerca de 70% das terras catarinenses são indicadas para o cultivo de florestas. Por este motivo desenvolve projeto para a profissionalização dos produtores na atividade florestal, incluindo ainda auxílio financeiro à implantação de viveiros e ao plantio.

ANDRADE (2001) apresenta diversos projetos, desenvolvidos pela Secretaria de Estado do Desenvolvimento Rural e da Agricultura de Santa Catarina, que visam promover a implantação de florestas plantadas. Tais projetos contemplam a preservação da cobertura vegetal nativa e a geração de trabalho e renda para cerca de 25% das famílias de pequenos produtores rurais do estado.

2.4 ESPÉCIES UTILIZADAS NA PESQUISA

A escolha das espécies utilizadas no presente estudo levou em conta a sua adequação aos propósitos da pesquisa. As espécies tinham de satisfazer as seguintes prerrogativas:

- a) Uma delas deveria ser proveniente de florestas nativas outra de florestas plantadas;
- b) As duas deveriam ser comercializadas e estar disponíveis na região da Grande Florianópolis;
- c) As espécies precisavam apresentar características físicas e mecânicas semelhantes.
- d) A espécie de floresta plantada deveria ser adequada à composição de componentes estruturais em MLC.

2.4.1 Eucalipto (*Eucalyptus grandis*)

CATHARINO (1999) afirma que o *Eucalyptus grandis* é uma espécie exótica, introduzida no Brasil em 1910 por Navarro de Andrade, então ministro da

agricultura, que difundiu o seu cultivo. Segundo o autor o primeiro código florestal brasileiro, criado em 1934, incentivava o plantio de matas homogêneas em detrimento das florestas nativas. As espécies exóticas teriam o único propósito de servir à exploração econômica da matéria prima produzida.

Segundo KNAPP (2000) o Brasil detém o título de campeão em produtividade com 21% do total de terras reflorestadas com eucalipto do planeta. No Brasil existem quase três milhões de hectares, dos quais se extraem entre 16 e 60 metros cúbicos por hectare por ano, dependendo da espécie. Nas grandes plantações brasileiras, basicamente da espécie *Eucalyptus grandis*, trabalha-se com uma faixa superior de produtividade que fica entre 40 e 45 m³/ha/ano. Há 30 anos, a produtividade brasileira era de 20 m³/ha/ano. Na África do Sul, o concorrente mais próximo, esta produtividade é da ordem de 20 a 22 m³/ha/ano. A explicação para tal desempenho decorre da latitude e clima brasileiros similares aos da Austrália de onde se origina a espécie. O solo e condições climáticas brasileiros mostraram-se adequados ao cultivo do eucalipto, principalmente na região que vai do sul do país até a Bahia.

2.4.1.1 Características

Segundo a revista *online* MADEIRA TOTAL (2000) a madeira do eucalipto *grandis* possui “...coloração castanha avermelhada clara, textura fina e grã direita, com gosto e cheiro indistintos.”. A tabela abaixo apresenta um resumo das propriedades físicas e mecânicas do *Eucalyptus grandis*:

Densidade de massa aparente (15%u)		710 Kg/m ³	0,71 g/cm ³
Retração	Radial	5,50%	-
	Tangencial	11,60%	-
Compressão Paralela às Fibras: Limite de resistência madeira (U%=15)		50 MPa	509 kgf/cm ²
Flexão estática	Limite de resistência madeira (U%=15)	106 MPa	1.085 kgf/cm ²
	Módulo de elasticidade - verde	6.463 MPa	125.800 kgf/cm ²
Dureza Janka - verde – Topo		5.688 N	580 Kg

Tabela 2 - Propriedades físico-mecânicas do *Eucalyptus grandis*. (Fonte: MADEIRA TOTAL, 2000).

RODRIGUES e FRANCO (2000) encontraram valores de densidade básica e aparente em lotes de *Eucalyptus grandis* nos seguintes intervalos:

Densidade básica [ρ_b]	0,561 a 0,596 [g/cm ³]
Densidade aparente (12% Umidade) [ρ_{ap}]	0,702 a 0,763 [g/cm ³]

Em relação ao processamento do *Eucalyptus grandis* pode-se considerá-lo como uma madeira de fácil aplainamento, furação, torneamento e lixamento. Além disso é uma madeira muito boa de serrar.

GORGE-FARIAS e WEINGAERTNER (2000) verificam a adequação do *Eucalyptus grandis* submetido à fresamento em alta velocidade. Tal pesquisa aponta bons resultados obtidos pela espécie, respaldando a sua utilização crescente na fabricação de móveis e utensílios.

2.4.1.2 Utilização na construção civil

OLIVEIRA (1997) conclui que a madeira de eucalipto⁵, proveniente de árvores de idade mais avançada, poderá substituir as espécies nativas tradicionais na construção civil. Poderão ainda satisfazer a necessidade de uma política sustentável a partir da exploração das espécies estudadas assim como de outras promissoras.

PETRAUSKI *et al.* (2000) avaliaram a viabilidade da utilização do *Eucalyptus grandis* na fabricação de tesouras para telhado com ligações exclusivamente coladas. Tal estudo revela que as estruturas para telhado confeccionados com a espécie apresentaram excelente desempenho quanto a resistência e rigidez.

Segundo MADEIRA TOTAL (2000) o *Eucalyptus grandis* pode ser utilizado desde a construção civil pesada externa até a leve interna. Pode ainda ser utilizada ainda na fabricação de mobiliário de utilidade geral, laminados, compensados, embalagens e paletes.

⁵ Foram analisados no trabalho citado *Eucalyptus citriodora*, *E. pilularis*, *E. cloeziana*, *E. urophylla*, e *E. grandis*.

Finalmente, REIS (1999) caracteriza o *Eucalyptus grandis* como “...madeira de serra, madeira nobre, de alta resistência mecânica e densidade apropriada, excelente para quase todos os fins.”

2.4.1.3 Denominações e procedência

O *Eucalyptus grandis* é uma espécie que no Brasil, em razão de ser exótica e plantada, não possui denominações regionais como é comum às espécies nativas.⁶

Em outros países a espécie recebe outras denominações como: *Rose Toobur*, *Flooded gum*, *Rose gum* (Austrália) e *Eucalipto grandis* (Costa Rica).

No Brasil existem plantações nos estados da Bahia, Espírito Santo, Minas Gerais, São Paulo, Goiás, Mato Grosso do Sul, Mato Grosso, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. A espécie é originária, com poucas exceções, da Austrália e da Tasmânia (ENCICLOPÉDIA BARSA, 1983). Segundo MADEIRA TOTAL (2000) o eucalipto ocorre também como madeira nativa na Nigéria, Zimbábue, Malavi, África do sul, Quênia, Congo, Zaire e Nova Zelândia.

2.4.1.4 Vantagens e desvantagens da utilização do *Eucalyptus grandis*

Na utilização de qualquer tipo de material há que se considerar a existência de pontos positivos e negativos. A utilização da madeira como alternativa a outros materiais requer uma análise cuidadosa das necessidades de projeto, porém é ainda necessário que a escolha sobre a espécie a ser utilizada seja criteriosa na mesma medida.

a) Vantagens

- crescente aceitação do material em oposição ao preconceito contra a madeira da espécie pinus;
- grande disponibilidade do material;
- alta resistência mecânica;
- bons resultados no processo de colagem;
- material ecológico e renovável;

⁶ O autor registra haver encontrado o *Eucalyptus grandis* em móveis comercializados como se fossem fabricados em “mogno australiano” ou “mogno paulista”; artifício utilizado pelo fabricante para contornar o preconceito do consumidor para com as espécies de florestas plantadas. É curioso o fato desta nomenclatura ter surgido apenas com o propósito de tapear o consumidor.

- crescimento rápido;
- menor percentual de perdas por defeitos decorrentes da secagem em comparação a outras espécies de eucalipto.

b) Desvantagens

- secagem exige cuidados especiais em função de tensões internas;
- maior quantidade de defeitos se comparado às espécies nativas comercializadas.

2.4.2 Angelim pedra (*Hymenolobium spp.*)

a) Características

Conforme SOUZA *et al.* (1997) o angelim pedra apresenta um cerne marrom-amarelado-claro e alborno com coloração marrom-pálido. Sua densidade média a 12% de umidade é de 710 kg/m³ para o *Hymenolobium petraeum*. Quando verde apresenta densidade de 1190 kg/m³. Sua secagem em estufa é obtida rapidamente. Apresenta boa trabalhabilidade mecânica. É uma madeira resistente a fungos e cupins de madeira seca.

Segundo a NBR-7190 (1997) a densidade aparente do angelim pedra a 12% de umidade é de 694 kg/m³.

Massa específica		g/cm ³	kg/m ³
Aparente (U%=15)		0,75	750
Básica		0,63	630

Retração Total	Radial	Tangencial	Volumétrica
(%)	4,4	7,1	10,2
Índice tangencial/radial =			1,61

Resistência Mecânica (kgf/cm ²)		Madeira Verde	A 15% de umidade
Compressão axial		615	750
Flexão estática		1.220	1.600
Tração normal		-	-

Tabela 3 - Propriedades físico-mecânicas do angelim pedra. (Fonte: MADEIRA TOTAL, 2000).

b) Utilização na construção civil

O angelim pedra é atualmente uma das espécies mais comercializadas para fins estruturais na construção civil. O mesmo pode ainda ser adequado a diversas outras aplicações.

NOGUEIRA *et al.* (2000) avaliam a adequação do angelim pedra em aplicações na construção civil leve e pesada, externa e interna, bem como em assoalhos. Destas, afirmam que, em razão de suas características físicas e mecânicas, o angelim é adequado a aplicações leves em interiores e exteriores. Estas categorias de utilização englobam a fabricação de peças para coberturas (vigas, caibros, ripas, etc.), esquadrias, tábuas, peças decorativas e de revestimento (lambris, painéis, forros, rodapés, etc.). Observa-se que apesar de desaconselhada pelos autores é comum a utilização do angelim pedra em tesouras, escadas, pontes, assoalhos, bem como em outras aplicações relacionadas pelos mesmos.

ZENID (2000) realiza uma avaliação semelhante, mas em seus resultados apresenta o angelim pedra atendendo a todos os critérios para a utilização pesada e interna.

c) Denominações e procedência

A diversidade de espécies de madeiras existentes no Brasil é enorme. Além disso como o Brasil é um país de dimensões continentais com a ocorrência de extensas áreas florestais observa-se uma imprecisão generalizada e, muitas vezes, regionalismos na denominação das espécies através de seus nomes vulgares. LORENZI (1998) faz referência ao angelim pedra como nome popular das seguintes espécies:

- *Andira anthelmia* (angelim-pedra, angelim-amargoso, angelim-do-campo ou angelim-de-morcego). É encontrado na Bahia e de Minas Gerais até o Paraná;
- *Dinizia excelsa Ducke* (angelim-pedra, angelim-vermelho, angelim-pedra-verdadeiro ou angelim-falso). É encontrada na região amazônica, principalmente no Acre, Rondônia, Amazonas, Pará e Roraima.

Em contrapartida SOUZA *et al.* (1997) relacionam o nome angelim pedra ainda a uma terceira espécie, a *Hymenolobium spp.*⁷, distinta das anteriormente citadas.

Os autores relacionam uma lista de outros nomes vulgares que seriam também regionalmente utilizados para designar o angelim pedra como: angelim (AM, PA), angelim-amarelo, angelim-da-mata, angelim-do-pará, angelim-macho, mirarema e murarena.

A NBR-7190 (1997) relaciona o angelim pedra apenas a espécie *Hymenolobium petraeum*. A norma cita ainda o angelim pedra verdadeiro cujo nome científico relacionado é *Dinizia excelsa*.

2.5 A INDUSTRIALIZAÇÃO DA MADEIRA

O processamento da madeira, desde o abate da árvore até a comercialização do produto acabado, exige cuidados em cada uma das fases para evitar o desperdício e a redução da qualidade final, é o que será tratado na seqüência.

2.5.1 Transformação primária

A transformação primária da madeira compreende as etapas que vão do abate da árvore ao desdobro da madeira em peças brutas que são então enviadas às madeireiras para a produção das diversas peças comercializadas. Considerando a necessidade da observância de um corte programado das lâminas, a análise do processo de desdobro é essencial.

As etapas relativas à transformação primária da madeira devem ser observadas pois podem determinar as possibilidades de um melhor aproveitamento da árvore.

⁷ São citadas as seguintes espécies: *Hymenolobium complicatum*, *H. elatum*, *H. excelsum*, *H. heterocarpum*, *H. modestum*, *H. nitidum*, *H. petraeum*, *H. pulcherrimum* e *H. sericeum*.

2.5.2 Secagem da madeira

A secagem da madeira é uma etapa importantíssima dentro de seu processo de produção havendo vários fatores que a justificam:

- confere maior estabilidade dimensional ao material;
- permite uma melhor atuação dos produtos utilizados sobre a madeira (preservativos, tintas, seladores, etc.);
- reduz a incidência de ataques de fungos. “*Abaixo de 20% de umidade espera-se que a madeira permaneça imune ao ataque dos fungos xilófagos.*” (GALVÃO, 1985);
- melhora a qualidade da colagem da madeira quando utilizada na composição de peças laminadas coladas;
- proporciona aumento da resistência mecânica da madeira. GALVÃO (1985) cita o exemplo da peroba⁸ que, com o teor de umidade a 30%, possui resistência à compressão de 620 kg/cm². Quando seu teor de umidade é reduzido a 0% a resistência da madeira passa a 1250 kg/cm², ou seja, o seu valor dobra.

Além destas vantagens deve-se observar que a secagem da madeira representa também redução do peso do material. Em geral a madeira é transportada através do transporte rodoviário. O custo do frete é significativo na formação do preço de venda do material e é diretamente proporcional ao peso da carga transportada. Desta forma a secagem da madeira contribui para a redução dos custos e do preço final da madeira.

- Fatores que interferem na secagem da madeira

MENDES (1996) relaciona três fatores cuja variação influencia a eficiência do processo de secagem:

- Circulação de ar (ventilação): encarrega-se de retirar a umidade decorrente da evaporação da superfície da madeira durante a secagem;

⁸ *Aspidosperma peroba*.

- Temperatura: auxilia a secagem acelerando a evaporação da água presente na madeira;
 - Umidade do ar: quanto mais seco o ar maior a sua capacidade de absorver a umidade da madeira.
- Técnicas de secagem

Segundo MENDES (1996) existem basicamente dois tipos de processos de secagem da madeira: a secagem ao ar livre (ou ao tempo) e a secagem artificial.

A secagem ao ar livre é o processo mais simples. Na prática o procedimento consiste em deixar a madeira abrigada das intempéries, durante um determinado período de tempo, até que o seu teor de umidade iguale-se ao teor de umidade do ar característico do local em questão. Quando isto ocorre dizemos que a madeira atingiu o teor de umidade de equilíbrio com o ar. A madeira se torna então dimensionalmente estável. Porém, sendo um material higroscópico, não se torna imune a variações na umidade do ar.

Entretanto a secagem ao ar livre não permite o controle das variáveis que interferem no processo de secagem. Desta forma as características do ambiente em que a madeira está sendo seca interferem diretamente no processo.

A principal vantagem da secagem ao tempo está em seu baixo custo. Além disso, como não exige equipamentos especiais, pode ser praticada por pequenos fabricantes desde que esses disponham de espaço físico e tempo disponível.

DE JESUS e RIOS (1992) afirmam que o processo de secagem ao ar livre é indicado para o angelim pedra obtendo equilíbrio com o ambiente em até 60 dias.

MENDES *et al.* (1998) avaliam o comportamento de 25 espécies de eucalipto submetidos a secagem ao ar livre na região de Lavras (MG). Entre estas espécies foi avaliado o *Eucalyptus grandis*, sendo considerada satisfatória a qualidade do material obtido.

Os processos artificiais de secagem da madeira se caracterizam principalmente pela utilização de equipamentos que permitam controlar os fatores que interferem no processo. Este controle permite a obtenção de lotes mais homogêneos e a redução da quantidade de defeitos oriundos da secagem. Além disso a utilização de

processos artificiais permite realizar a secagem da forma que se desejar e em qualquer época do ano.

Segundo GALVÃO (1985), os resultados obtidos através da secagem artificial propiciam uma série de vantagens. Em primeiro lugar reduz-se drasticamente o tempo necessário permitindo um giro mais rápido do capital investido. Conseguem-se atingir valores de teor de umidade mais baixos que aqueles obtidos através da secagem ao ar. Além disso, através de um programa de secagem adequado pode-se reduzir o aparecimento de defeitos de secagem e até mesmo destruir fungos e insetos presentes na madeira

Para permitir a eficiência do processo a secagem artificial é realizada em etapas bem definidas. A realização de cada uma destas etapas é necessária para garantir a qualidade final da secagem, ou seja obter madeira seca em menos tempo, gastando menos energia e reduzindo a incidência de defeitos de secagem. As etapas da secagem são: fase de aquecimento inicial, secagem propriamente dita e uniformização e condicionamento.

CARRASCO (1998) avalia a viabilidade da utilização de secagem artificial do *Eucalyptus grandis* seguindo programas de secagem convencional e a alta temperatura. Considerou-se a secagem convencional adequada, já a secagem a alta temperatura mostrou-se inviável em razão do alto percentual de perda da madeira (55%).

GONÇALVES *et al.* (1998) apresentam uma alternativa interessante analisando a secagem do *Eucalyptus grandis* através de ventilação forçada. Tal processo não provocou defeitos na madeira, reduzindo significativamente o tempo de secagem em relação a secagem ao ar livre.

- Crítica ao descaso em relação à secagem

Apesar das inúmeras razões que justificam o investimento na secagem da madeira, no Brasil, a grande maioria dos produtores madeireiros persistem resistindo à idéia de realizá-la. Aparentemente esta resistência é de caráter cultural. Em geral o argumento utilizado recai sobre a questão dos custos, desconsiderando os benefícios obtidos. Além disso não existe ainda conscientização por parte dos consumidores, da importância da aquisição de madeira comprovadamente seca. Aparentemente apesar de ser um material que passa necessariamente por processos industriais, a madeira não é

encarada desta forma. Por este motivo as exigências feitas em relação a outros produtos (como por exemplo: garantia de fabricação, conformidade com normas técnicas, controle de qualidade, caracterização do material, etc.) acabam não sendo aplicados.

Existe uma minoria entre os fabricantes que, em função de necessidades bastante específicas, investem em algum tipo de processo de secagem. Entre estes são poucos aqueles que se utilizam da secagem artificial, mais eficiente. Existem ainda aqueles que fazem uso da secagem ao ar, isto quando possuem espaço físico disponível. Entre estes estão, por exemplo, fabricantes de móveis e esquadrias que precisam oferecer garantia sobre seus produtos a seus clientes. Para estes fabricantes a utilização da madeira verde é problema na certa, pois o tempo e dinheiro dispendido na prestação de assistência técnica e substituição dos produtos acarreta prejuízos. Tal fato não costuma acontecer na construção civil.

2.5.3 Tratamento preservativo

A madeira enquanto material natural e orgânico está sujeita ao ataque de agentes capazes de atacar sua integridade. Estes agentes são responsáveis basicamente pela decomposição e desintegração do material.

Em cada situação específica de projeto deve-se analisar quais agentes nocivos poderão atuar e definir o tipo de tratamento adequado.

Em se tratando de madeira laminada colada⁹, na qual se utiliza quase que exclusivamente espécies de florestas plantadas, o tratamento preservativo torna-se imprescindível. Nestes casos costuma-se realizar a impregnação das lâminas por uma substância hidrossolúvel chamada arseniato de cobre cromatado (CCA). Tal substância é aplicada à madeira através de autoclavagem¹⁰, impregnando a madeira e tornando-a imune a ação dos agentes biodeterioradores com os quais possa entrar em contato. Existem ainda outras substâncias hidrossolúveis como o borato de cobre cromatado (CCB). Sua toxicidade é ainda um dos impedimentos ao seu uso já que na mesma medida que prolonga a durabilidade da madeira, impede seu descarte direto ao meio ambiente.

⁹ Ver item 2.6 que apresenta a técnica de madeira laminada colada, também conhecida como MLC.

¹⁰ Processo no qual se utiliza um equipamento chamado autoclave para submeter a madeira imersa em solução preservativa a altas pressões. O produto penetra na madeira impregnando-a e tornando-a imune.

Quando utilizada em outras situações a madeira pode também ser tratada com óleo creosoto que a torna, porém, inadequada para a fabricação de MLC.

O FEDERAL REGISTER (1995) classifica o creosoto e o CCA como substâncias altamente poluentes e determina medidas preventivas a serem seguidas pelos fabricantes de madeira tratada nos Estados Unidos. GREEN LANE (2001) afirma que a madeira tratada sobre pressão deve ser descartada em aterros sanitários especiais para lixo tóxico. Afirma ainda que a combustão de madeira tratada com creosoto ou CCA produz gases tóxicos contendo substâncias altamente poluentes.

STALNAKER e HARRIS (1997) reúnem informações sobre como minimizar a necessidade do uso de madeira tratada através de projetos adequados. Tais medidas podem reduzir a necessidade de altas concentrações dos preservativos e permitir o uso de preservativos menos tóxicos, mesmo que menos eficazes.

2.5.4 Métodos de tratamento

Os métodos para o tratamento da madeira se dividem em dois grupos.

a) Tratamento sem pressão:

- Tratamentos de superfície: pulverização ou pintura com soluções creosotadas ou oleosas. O tratamento se torna ineficaz quando a madeira é cortada expondo a parte interna das peças;
- Banhos de imersão: a peça toda é tratada. Eficaz em alguns tipos de componentes como esquadrias por exemplo;
- *Steeping*: Imersão por período prolongado;

b) Tratamentos com pressão:

- Processo de células-vazias: auto-clavagem, onde inicialmente se aplica pressão para expulsar a água das células da madeira. Depois aplica-se o preservativo por pressão em imersão. Por fim aplica-se vácuo para retirar o excedente do líquido preservativo;
- Processo de células-cheias: semelhante ao processo de células-vazias, porém inicialmente é aplicado o vácuo e ao final o líquido em excesso não é totalmente retirado.

2.6 A TÉCNICA DE MADEIRA-LAMINADA-COLADA (MLC)

2.6.1 Breve histórico

a) A evolução da técnica da MLC no mundo

A madeira laminada colada é o somatório de duas técnicas já conhecidas há bastante tempo: a laminação e a colagem.

A técnica de colagem remonta à época do Egito antigo. Daquela época, foram encontradas peças compostas por madeira colada com adesivos orgânicos, ainda em bom estado, o que demonstra a eficiência e durabilidade proporcionada pela técnica.

Já a técnica de laminação para fins de composição de elementos estruturais é algo que só passou a ser praticado a partir do século XIX. Nessa época, Otto Karl Freidrich Hetzer (1846-1911) passou a construir vigas solidarizando as lâminas de madeira com o emprego de ligações mecânicas de braçadeiras e parafusos. Existem registros de que, em Berlim, a partir de 1890, foram utilizadas vigas Hetzer com 10 m de vão livre em diversas construções (BONO, 1996). A partir daí este método foi difundido e passou a ser bastante empregado em toda a Europa, em especial na construção de obras que exigiam grandes vãos livres, como fábricas e pontes.

Mais tarde, por volta de 1906, com o surgimento da cola de caseína e sua utilização em substituição ao sistema de braçadeiras, a técnica pôde ser chamada pela primeira vez de Madeira Laminada Colada. Com a cola obtinha-se um sistema estrutural mais homogêneo e eficiente, evitando escorregamento entre as lâminas.

Em 1923, através de Max Hanisch, a MLC foi levada para os EUA, fato que despertou o interesse de diversas entidades da área da construção que passaram a desenvolver estudos para comprovar a viabilidade e confiabilidade da técnica.

Foi, porém, em 1940, com o surgimento das colas sintéticas, que a MLC teve seu maior impulso e passou a se desenvolver paralelamente à evolução tecnológica das colas. Porém, segundo MOODY (1970) *apud* ROCCO LAHR (1991), nos EUA, apenas após a publicação do boletim n.º 1069 do *Forest Products Laboratory*, redigido por Selbo e Freas em 1954, é que se desencadeou um processo de difusão da técnica que culminou com a criação do *American Institute of Timber Construction* (AITC), que objetivava o fornecimento de informações a respeito da fabricação de MLC. A partir daí, o AITC publicou uma série de manuais sobre o emprego de madeira maciça, assim

como de MLC, o que permitiu o surgimento dos primeiros fabricantes que seguiam as instruções normativas aprovadas nos testes e ensaios previamente realizados. A MLC começou então a demonstrar seu potencial, o que pode ser comprovado pela popularidade da técnica nos EUA e no Canadá.

Ao mesmo tempo, a aceitação e o desenvolvimento da técnica da MLC foram extremamente expressivos na França. O CTBA (*Centre Technique du Bois*) é uma das instituições que ajudaram a promover a divulgação da MLC com a publicação de uma série de cadernos sobre a técnica. Pode-se citar entre outras publicações: "*La Fabrication des Éléments de Structure en Bois Lamellé-Collé*" (1971), "*Les Structures en Bois Lamellé-Collé*" (1973) e "*Les Collage du Bois*" (1983).

A partir daí, com o aumento do número de pesquisas sobre a técnica, surgiu a necessidade de que se criassem publicações normativas, específicas sobre a MLC, que pudessem servir para auxiliar na elaboração de cálculos e projetos dos profissionais da construção civil. Existe uma série de publicações produzidas no exterior que podem ser citadas, como por exemplo: a ASTM-D3737 (1983) da *American Society for Testing Materials* - ASTM, a BS-5268 (1984) da *British Standards Institution* - BSI, o EUROCODE 5 (1987), a SABS 876-76 (1976) Norma Sul Africana e a CSA 0122-77 e CSA 0177 (1977) Norma Canadense.

Segundo BONO (1996) no Chile, em 1964, o instituto florestal chileno realizou a primeira experiência controlada com MLC, buscando novas formas de utilização da madeira no país. A partir de então, o Chile passou a produzir uma série de obras utilizando-se da técnica que ganhou destaque entre os projetistas. A aceitação por parte do mercado possibilitou o surgimento de empresas produtoras do material, o que conduziu o país à posição que ocupa atualmente de exportador de MLC.

b) A evolução da técnica da MLC no Brasil

No Brasil, houve a implantação de algumas empresas, fabricantes do material, que se instalaram no país a partir da década de 30.

A primeira empresa produtora de MLC implantada no país foi a ESMARA - Estruturas de Madeira Ltda., fundada em 1934 por imigrantes alemães. Os Srs. Bruno Noack e Fritz Hosch iniciaram a fabricação de estruturas em MLC em Curitiba, no

estado do Paraná. Mais tarde a sociedade se desfez, e a empresa foi transferida para Viamão no Rio Grande do Sul, onde ainda opera sob a direção do Sr. Hosch.

Em 1977, surgiu a PRÉMONTAL Estruturas de Madeira Ltda., localizada em Curitiba/PR, e, em 1981, a EMADEL Estruturas de Madeira Ltda., em Araucária, também no Paraná. Apesar dos meus esforços, não foi possível entrar em contato com a empresa PRÉMONTAL, que, segundo BONO, 1996, teve a maioria de seus projetos concebidos e executados nas décadas de 70 e 80. Já a EMADEL, apesar de ter apenas uma pequena quantidade de projetos realizados em MLC, continua atuando no mercado.

Além dessas, ainda na região Sul, em Lages, Santa Catarina, foi fundada a BATTISTELLA Indústria e Comércio Ltda., na década de 50. Esta é hoje a empresa que mais parece estar direcionando seus investimentos para a produção de estruturas em MLC. A empresa produz e comercializa uma linha de casas pré-fabricadas utilizando a técnica e planeja investir na implantação de uma fábrica de componentes de MLC na fronteira com a Argentina e o Uruguai.

A LAMINARCO Madeira Industrial Ltda., fundada na década de 60, em São Paulo/SP, foi a única empresa encontrada na região Sudeste. Após contatos, descobriu-se que a LAMINARCO se encontra extinta, o que não permitiu a coleta de maiores informações.

Até o momento, não existe ainda uma norma específica para a técnica de madeira laminada colada no Brasil. Contudo a NBR-7190 (Projeto de Estruturas de Madeira) traz recomendações sobre cálculo e projeto de peças estruturais em MLC que podem auxiliar os profissionais projetistas fornecendo-lhes informações técnicas mais confiáveis. Porém, tendo sido escrita para estruturas de madeira em geral, aborda a MLC de forma superficial, sendo necessária a elaboração de uma norma específica.

2.6.2 Detentores da tecnologia

Os principais detentores da tecnologia da MLC são hoje os Estados Unidos, o Canadá e a Comunidade Econômica Européia. Na América do Sul, pode-se citar o Chile, porém em proporções muito mais modestas. Estes países possuem equipamentos avançados, desenvolvem pesquisas tecnológicas de ponta na área e vêm promovendo estudos, de forma planejada, há pelo menos quarenta anos.

Alguns fatores favoreceram a projeção da MLC no continente europeu:

- A prática histórica do uso da madeira na construção civil;
- A existência de uma grande extensão de áreas de florestas plantadas;
- A atuação de diversos grupos de pesquisa que buscam alternativas para a utilização do potencial que destas reservas vegetais no futuro. Esta postura promove o desenvolvimento de novas tecnologias, o aperfeiçoamento técnico de métodos antigos, e faz com que a madeira laminada colada se destaque como tecnologia adequada para a utilização racional e econômica das reservas disponíveis.

Além dos fatores mencionados, considere-se que a pequena extensão territorial dos países europeus acabou determinando o rápido fim das reservas nativas destes países, forçando-os à busca de novas alternativas para a disponibilização de madeira.

Já o Canadá e os Estados Unidos são países que possuem grande extensão territorial e amplas reservas vegetais. Assim mesmo, devido à colonização inglesa e francesa, desenvolveram tradição no uso da madeira e buscaram desde a década de 40 alternativas para o seu uso racional. Os dois países, que ocupam uma posição econômica de destaque, tiveram a oportunidade de, há vários anos, observar que a MLC, mais que uma grande possibilidade, viria a se tornar um sucesso comercial.

2.6.3 Definição

Segundo SZÜCS (1991), a madeira laminada colada, ou MLC, pode ser definida como peças de madeira reconstituídas a partir de lâminas de madeira (tábuas), que são de dimensões relativamente reduzidas se comparadas às dimensões da seção transversal da peça final assim constituída. Essas lâminas, que são unidas por colagem, ficam dispostas de tal maneira que as suas fibras fiquem paralelas entre si.

2.6.4 Nomenclatura

São citadas aqui algumas definições referentes à morfologia da MLC, para facilitar a compreensão do material.

a) Lâminas ou tábuas

De madeira maciça, em geral sua espessura fica entre 2,5 e 5,0 cm, dependendo da forma (curvatura) e da altura das peças que se pretende reconstituir. Segundo PEREZ GALAZ (1979), principalmente por razões de economia, chegou-se à conclusão de que a espessura das lâminas deve estar sempre entre 3/4" e 2". A NBR 7190 (1997) determina que as lâminas utilizadas em peças de MLC não deverão ter espessura superior a 30,0 mm.

b) Emendas

São as ligações de continuidade das lâminas. Podem ser longitudinais ou transversais:

- as emendas longitudinais possibilitam a obtenção de peças do comprimento maior que o das lâminas componentes. Estas emendas podem ser de três tipos: de topo, biseladas ou dentadas, estas últimas podendo variar o sentido dos dentes tanto na vertical quanto na horizontal. Segundo SZÜCS (1992a) a eficiência dos elementos estruturais está relacionada a segurança da continuidade obtida pela utilização das emendas longitudinais;
- as emendas transversais são utilizadas para a constituição de peças de largura maior que a largura das lâminas componentes.

c) Linha adesiva ou linha de cola

A linha adesiva é composta por adesivos especiais levando em consideração o tipo de madeira e a finalidade das peças constituídas.

Deve-se considerar ainda que as lâminas podem ser dispostas com sua seção posicionada tanto na vertical quanto na horizontal, determinando assim duas possibilidades de laminação: horizontal ou vertical.

d) Adesivo

Desde a antigüidade as técnicas de construção civil criadas pelo homem vem exigindo o desenvolvimento de estruturas compostas por múltiplas ligações. Porém a utilização de colas para solidarização destas ligações só veio a desenvolver-se de

forma mais significativa a partir da descoberta dos primeiros tipos de colas sintéticas no início do século XX.

Segundo ELBEZ (1991), alguns dos tipos de colas adequados à composição de peças de MLC são:

Ureia-formol	Adequada para uso em interiores
Melâmicas (ureia-formol e fenol-formol)	Adequada para uso em interiores
Resorcínicas (formol e fenol-formol)	Adequada para uso em exteriores

RIBEIRO (1992) afirma que no Brasil estão disponíveis adesivos tipo uréia-formol, fenol-formol, resorcina-formol, acetato de polivinila e adesivos a base de policloropreno ¹¹.

PETRAUSKI (1998) analisa a resistência de juntas de cola em corpos de prova de *Eucalyptus grandis* ligados por resina resorcinol. A pesquisa revela os bons resultados de resistência das linhas de cola obtidas e relaciona o desempenho das mesmas como diretamente proporcional ao consumo de cola e pressão de colagem.

- Pesquisas sobre adesivos alternativos

No Brasil a demanda por estruturas em MLC ainda é muito pequena. Existe uma conjunção de fatores que tem dificultado a popularização da técnica apesar de suas qualidades. Um destes motivos é o preço da cola utilizada em sua fabricação, apontada pelos fabricantes como a grande responsável pelos preços elevados do material.

A busca por colas alternativas é uma tarefa que tem sido realizada pelo grupo de química analítica e tecnologia de polímeros (GQATP), do Instituto de Química de São Carlos e pelo laboratório de madeiras e de estruturas de madeiras (LaMEM), da Escola de Engenharia de São Carlos, ambos da Universidade de São Paulo (USP). Segundo DE JESUS *et al.* (2000) o adesivo poliuretano à base de mamona e desenvolvido em São Carlos, foi testado ao cisalhamento em peças de *Eucalyptus grandis* apresentando resultados compatíveis com a utilização em MLC.

¹¹ Apesar deste artigo ter sido publicado em 1992, o autor observa que não houve disponibilização de novos tipos de colas até o presente estudo.

SZÜCS *et al.* (1998a) afirmam que “... somente o adesivo chega a representar aproximadamente 40% de seu custo final de produção.”. Através deste estudo é analisada a influência da diluição do adesivo resorcina-formol na composição da madeira laminada colada reforçada com fibra de vidro.

SZÜCS *et al.* (1998b) analisam a influência da diluição do adesivo na composição de peças de madeira laminada colada. Neste estudo foi utilizado o *Eucalyptus grandis*

e) Tratamento preservativo

A fabricação de MLC pressupõe a utilização de madeira seca e tratada garantindo, ao longo dos anos, a integridade das estruturas concebidas. A utilização de substâncias preservativas foi um grande avanço na utilização da madeira tornando-a praticamente imune aos agentes deterioradores. A utilização de madeiras de florestas plantadas exige a utilização de preservativos pois, as espécies provenientes destas, são geralmente menos resistentes que as espécies de florestas nativas. Porém países que há anos vem utilizando a madeira preservada através de substâncias como o CCA tem enfrentado problemas quanto a forma de descarte do material. Pesquisas tem sido realizadas em busca de substâncias preservativas menos tóxicas, avanço que garantiria a adequabilidade da utilização das madeiras de florestas plantadas aos princípios da sustentabilidade ambiental.

2.6.5 Espécies de madeira utilizadas na fabricação de MLC

Existem várias espécies de madeira que podem ser utilizadas para a fabricação de peças em MLC, porém a escolha deve recair sobre as espécies reflorestadas (exóticas ou nativas). Isto se justifica já que a técnica serve como alternativa à utilização de madeiras nobres em peças maciças para fins estruturais, obtendo uma resistência satisfatória, mesmo utilizando como matéria-prima espécies de média ou até mesmo de baixa densidade. A menor densidade confere a madeira uma permeabilidade necessária para a penetração da cola na madeira, possibilitando a obtenção de bons resultados de colagem.

Segundo NATTERER *et al.* (1994) as espécies de madeira mais utilizadas para a composição de peças de MLC são a *épicéa*, a *douglas fir* e o *pin sylvestre*¹². Tais espécies, inexistentes no Brasil, apresentam características semelhantes às das espécies disponíveis no Brasil como baixa densidade e rápido crescimento.

Tecnicamente, pode-se afirmar que as espécies mais indicadas para a composição de peças de MLC são as das coníferas e das dicotiledôneas, com massa volumétrica entre 0,40 e 0,75 g/cm³. Além disso, devem ser evitadas as espécies altamente resinosas ou com alto teor de gordura e cuja anatomia não inclua poros obstruídos por hilos.

Existem diversas pesquisas sobre as espécies encontradas no Brasil e utilizadas na fabricação de MLC. Entre estas espécies, estão o pinheiro-do-paraná¹³, o *Pinus elliottii*, o *Eucalyptus citriodora* e o *Eucalyptus grandis*.

O *Pinus elliottii*, encontrado em grande quantidade e a baixo custo nos estados de São Paulo e Paraná, possui características semelhantes ao Pinho-do-Paraná. Sua popularização, inclusive em outras regiões do país, parece ter aberto um vasto campo de possibilidades na sua utilização para o fabrico de MLC.

O pinheiro-do-paraná é uma espécie que apresenta características físicas e mecânicas bastante semelhantes às das espécies utilizadas no exterior na fabricação de MLC. Porém a destruição das matas nativas, localizadas principalmente na região Sul do país, demonstra a necessidade de ações de reflorestamento utilizando a espécie para que se possa garantir sua disponibilidade no futuro.

Em visita realizada à empresa ESMARA - Estruturas de Madeira Ltda., no segundo semestre de 1998, obteve-se algumas informações junto a seu proprietário. Segundo o Sr. Fritz Hosch, a empresa, na época de sua instalação, fazia uso apenas do pinheiro-do-paraná. Com a escassez da espécie, a empresa passou a apostar na utilização do *Eucalypto citriodora*, que é hoje o único tipo de madeira utilizado pela empresa. O mesmo afirma ainda que, utilizando-se procedimentos de secagem e seleção

¹² *Picea abies*, *Pseudotsuga menziesii* e *Pinus sylvestris*. Observa-se que as espécies citadas são encontradas apenas na Europa e mais especificamente na região da França.

¹³ *Araucaria angustifolia*. Também conhecido como: pinheiro-brasileiro, pinheiro-caiova, pinheiro-das-missões, pinheiro-são-josé ou araucária.

da madeira, pode-se produzir peças de MLC constituídas com eucalipto com valores de resistência absolutamente satisfatórios.

ROCCO LAHR (1991) analisa a viabilidade da composição de vigas em MLC com a utilização de louro rosa (*Ocotea rubra*), ou, em combinação com o cedrilho (*Erismia spp.*). Desta forma verifica a possibilidade de utilização de espécies diferentes na composição de uma mesma peça em MLC.

É importante ressaltar a possibilidade do desenvolvimento de pesquisas para encontrar novas espécies adequadas à fabricação de MLC. Apesar da possibilidade de alterações na aparência final das peças (sua coloração, por exemplo), estão sendo realizados estudos com novas espécies, como a *Azadrachta indica*, de origem indiana, que possuem muitas características interessantes. Segundo MENDES (1998), em reportagem publicada pelo jornal "O Estado de São Paulo", esta espécie possui coloração e propriedades mecânicas semelhantes às do mogno, que está se tornando cada vez mais escasso no Brasil. A "*neen*", como é conhecida, se desenvolve totalmente em 8 anos, contra os 25 exigidos pelo mogno, e as primeiras experiências parecem demonstrar sua perfeita adaptabilidade ao clima brasileiro.

MACÊDO *et al.* (2000) analisam a viabilidade da utilização de algumas espécies tropicais da Amazônica na composição de peças de MLC. Tal estudo apresenta, inclusive, o angelim-pedra¹⁴ como viável para MLC.

2.6.6 Processo de fabricação

O processo de fabricação de peças de madeira-laminada-colada exige instalações preparadas especificamente para este fim. Em casos em que o número de peças não seja elevado e nos quais as dimensões das peças a serem produzidas não sejam muito grandes, existe, inclusive, a possibilidade de fabricação diretamente no canteiro de obras.

BONO (1996) relaciona três etapas distintas do processo de fabricação da MLC:

¹⁴ O autor se referencia ao angelim pedra como sendo a espécie *Dinizia excelsa*.

- Etapa 1- Preparo da madeira. Esta etapa compreende recepção, classificação, eliminação dos maiores defeitos, estocagem, secagem, desdobre e a união longitudinal ou transversal, se necessário;
- Etapa 2- Colagem, prensagem e cura das peças. Esta etapa compreende a aplicação da cola, a composição da peça sobre o berço ou gabarito, a aplicação da pressão de colagem e o tempo necessário para a secagem da peça;
- Etapa 3- Acabamento. Nesta etapa é realizada a plainagem das faces da peça, o corte das extremidades, a realização de recortes, furos ou detalhes previstos em projeto e a finalização com aplicação de conservantes, selador ou verniz.

A fabricação industrial da MLC pode ser feita tanto de forma semi-mecanizada quanto por um processo totalmente automatizado. A diferenciação entre os dois sistemas de produção se dá principalmente na Etapa 2, mencionada acima. A produção mecanizada

- processo semi-mecanizado: O transporte e manuseio das lâminas e das peças é feito de forma manual desde o início do processo de fabricação até a finalização do produto. Este processo possibilita a criação de empresas com uma infra-estrutura simplificada e com baixo custo de manutenção. O maquinário exigido para a fabricação de MLC no processo semi-mecanizado compreende equipamentos e máquinas baratos se comparado aos utilizados por outros ramos da indústria. A mão-de-obra para a fabricação de MLC precisa de treinamento específico, mas não exige um alto nível de especialização. Porém, no processo semi-mecanizado, não se consegue atingir alta produtividade, passando a exigir o aumento do espaço físico da fábrica e do número de funcionários se for necessário o incremento da produção.
- processo automatizado: Se dá com a utilização de máquinas capazes de produzir peças contínuas de forma totalmente automática. As dimensões das peças produzidas automaticamente são limitadas pelo tamanho da prensa da máquina utilizada. A utilização de máquinas automáticas permite também uma homogeneização da qualidade do produto final, assim como possibilita um controle mais simplificado. Hoje, este tipo de máquina é produzido exclusivamente no exterior, em países onde o grau de desenvolvimento da técnica se encontra mais elevado. As vantagens da fabricação automatizada se dão pelo aumento da capacidade e da velocidade de produção, pelo maior aproveitamento de peças de pequena seção e pela diminuição das perdas durante o processo de realização das

emendas. Pode-se, ainda, citar a possibilidade do aumento ou diminuição da produção de forma totalmente controlada e sem exigir um aumento da quantidade de operários ou das instalações da fábrica, desde que se respeitem os limites da capacidade produtiva do maquinário que tenha sido adquirido.

2.6.7 Vantagens da madeira laminada colada

Existe uma série de vantagens apresentadas pela MLC em relação a outros materiais, e até mesmo, em alguns aspectos, quando comparada com a própria madeira maciça. Além disso, é necessário lembrar que a MLC é, acima de tudo, "madeira" e, por este motivo, possui as características inerentes ao material além daquelas adquiridas através da adoção da técnica.

Entre outras vantagens, podem ser citadas as seguintes:

- Em relação à madeira maciça, a MLC permite que se utilizem peças com dimensões que não são limitadas pelas dimensões dos troncos das árvores;
- Possibilita a redução do número de ligações da estrutura, já que as peças permitem o alcance de grandes vãos;
- Permite a racionalização do uso da matéria prima. Nas peças de MLC, pode-se detectar e eliminar os defeitos naturais apresentados pelas lâminas, causadores de enfraquecimento nas peças maciças. Através de uma pré-classificação das lâminas, podem ser utilizadas as de maior resistência nos pontos mais solicitados da estrutura, garantindo dessa forma a integridade das peças;
- Os resultados estéticos obtidos com a versatilidade, plasticidade e beleza do material são pontos de destaque da técnica. Com a MLC podem-se conceber estruturas curvas, delgadas e com seções variáveis ao longo da peça;
- A maior homogeneidade proporcionada às peças pela utilização da técnica permite que se criem normas e padrões de cálculo com coeficientes mais precisos. Esta possibilidade garante uma margem de erro menor, o que dá mais segurança aos calculistas e permite a otimização do uso do material;
- A vantagem da pré-fabricação proporciona redução do tempo de conclusão da obra;
- Em comparação ao concreto, a MLC apresenta uma melhor relação entre peso e desempenho mecânico. A relação entre a baixa densidade e as excelentes

características mecânicas aproximam o comportamento do material ao de certas ligas leves;

- Não exige fôrmas ou que se aguarde a cura como no caso do concreto;
- A redução do peso próprio do material representa economia nas fundações da edificação;
- Possui comportamento previsível quando submetida ao fogo, permitindo prever a velocidade de combustão das estruturas. Além disso a madeira não perde sua resistência mecânica sob a ação de altas temperaturas. A associação destas características torna as estruturas em madeira mais seguras do que o aço e o concreto armado quando submetidas a incêndios;
- Ausência de dilatação térmica;
- Grande inércia química;
- Baixo consumo energético e mecânico durante a fase de produção, se comparado ao de outros materiais;
- É uma fonte renovável.

Além disso, para fins de uma comparação direta entre a madeira, o aço e o concreto, pode-se citar duas interessantes relações:

- Utilizando-se duas vigas que possuam o mesmo peso, uma de aço e a outra de MLC, a resistência das duas é praticamente a mesma;
- Utilizando-se duas vigas que possuam o mesmo volume, uma de concreto armado e a outra de MLC, as duas possuem os mesmos valores de resistência às solicitações mecânicas. Porém, neste caso, a viga de MLC é cerca de cinco vezes mais leve.

2.6.8 Possibilidades de utilização da MLC

São inúmeras as possibilidades de utilização arquitetônica para a madeira laminada colada. No entanto, suas características particulares têm feito com que, em grande parte das vezes, a MLC seja usada para a execução de projetos que exijam a capacidade de vencer grandes vãos.

BONO (1996) afirma que a MLC encontra-se consagrada no contexto internacional como excelente material para aplicação estrutural. Exatamente por esta característica, no Brasil, a MLC é conhecida basicamente pela sua utilização na

composição de arcos e pórticos. Em outros países, as obras executadas em MLC assumem as mais diversas tipologias arquitetônicas. Sua utilização na construção de edificações tem sido extremamente expressiva. Existe também a utilização em estruturas para o suporte de viadutos, passarelas para auto-estradas, cascas esbeltas para a cobertura de grandes vãos, shopping centers, arquibancadas, estádios e fábricas. Além disso, sua utilização na construção de projetos como igrejas e teatros é expressiva, na medida em que permite a elaboração de estruturas com formas estéticas complexas.

Relaciona-se aqui elementos e aplicações estruturais básicas nas quais a MLC costuma ser utilizada:

- **Vigas:** Objeto desta pesquisa, a utilização da MLC na composição de vigas é, sem dúvida, uma das possibilidades de aplicação mais interessantes para a técnica. Estruturas com vãos de até 30,0 m, podem ser concebidas utilizando-se vigas bi-apoiadas. Porém, para a otimização de uso e fabricação do material (questões de transporte, adequação às bitolas aceitas pelas máquinas, etc.), em geral, a utilização de vigas de MLC é feita considerando vãos de 15,0 metros e, no caso de serem utilizadas vigas contínuas ou do tipo "*Gerber*", vãos de até 20,0 metros;
- **Arcos:** A utilização de MLC na composição de arcos é uma possibilidade à qual a técnica está extremamente bem capacitada. Os arcos confeccionados em MLC podem atingir vãos de 100,0 metros ou até mais. Nestes casos podem-se utilizar arcos isostáticos tri-articulados ou bi-articulados. Uma possibilidade para viabilizar o transporte das peças fabricadas para a composição de uma estrutura capaz de vencer vãos de tal magnitude, é a composição do arco com a utilização de diversas vigas retas pequenas ligadas por meio de peças metálicas;
- **Estruturas em Balanço:** A utilização da técnica da madeira laminada colada para a confecção de estruturas em balanço é uma possibilidade atraente. Em razão das estruturas de madeira possuírem características estéticas muito bonitas, ao menos no exterior, a MLC tem sido muito utilizada na composição de coberturas para arquibancadas de estádios, assim como para espaços públicos de múltiplo uso como palcos ao ar livre, etc. Além disso sua resistência mecânica aliada ao baixo peso específico da madeira a torna uma excelente opção. No caso de estruturas em balanço, estas podem ser compostas com arcos simplesmente apoiados no chão ou vigas apoiadas sobre pilares de concreto, além de estruturar partes de uma edificação que estejam em balanço totalmente em MLC. Em tais casos é possível

atingir vãos de 15,0 a 20,0 metros em balanço com dimensões bastante semelhantes às de uma estrutura similar em concreto armado.

- *Sheds*: Utilizado geralmente para criar a possibilidade de iluminação em estruturas de coberturas sobre grandes áreas, relata-se a utilização de *sheds*, em MLC, atingindo vãos de 8 a 12 metros. Nestes casos, é comum que a estrutura sob os *sheds* também sejam de MLC, em pórticos posicionados na mesma direção dos mesmos.

2.6.9 Outras pesquisas sobre MLC

Ao longo dos anos, o estudo do comportamento mecânico de estruturas em madeira laminada colada tem estimulado a pesquisa de alternativas para o aperfeiçoamento da técnica. Tais pesquisas, tem levado em consideração todas as etapas do projeto e do processo de fabricação das peças.

O presente estudo busca verificar a existência de tendências ou diferenças no comportamento de peças compostas com materiais ou projetos diferenciados. Muitas pesquisas tem sido desenvolvidas neste sentido. A composição de um modelo de seção com lâminas dispostas verticalmente é uma destas variações. A inclusão de fibra de vidro, combinada com a cola e a madeira, tem também sido objeto de muitos estudos com resultados positivos.

- Laminação vertical

BONO (1996) descreve a laminação vertical como sendo a situação na qual as lâminas são normais ao plano neutro de flexão.

SANDOZ (1998) mostra a importância do incremento da confiabilidade de peças em MLC. Tal efeito deve ser obtido a partir do aperfeiçoamento das normas e métodos de cálculo, assim como do processo de fabricação do material. Segundo o autor, esta confiabilidade precisa ser obtida juntamente com o incremento da performance mecânica das peças. Obter alta performance associada a confiabilidade é uma tarefa dificultada pela imprevisibilidade do comportamento das emendas longitudinais (*finger joints*). Para contornar este problema, Sandoz sugere a construção das vigas com seções “multicoladas”¹⁵ conhecidas como vigas “Hércules”¹⁶. As vigas

¹⁵ Nota do autor. Da tradução literal do termo francês “*bois lamellé-multicollé*” (BLMC) temos madeira laminada multicolada, o que não esclarece exatamente o que caracteriza o elemento assim concebido. Por

assim compostas passam a se chamar: Madeira Laminada Colada Multidirecional (MLCM). Este modelo permite que as vigas de MLC se comportem como um sistema em paralelo, ao invés do sistema serial, observado no modelo convencional. Basicamente isto significa que na camada mais solicitada da viga existem diversas lâminas responsáveis pela resistência, e não apenas uma, passível de falha, como no modelo tradicional horizontal.

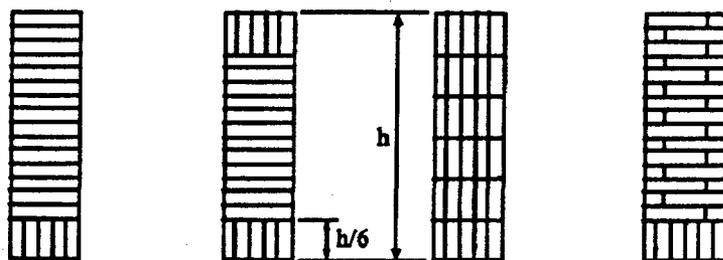


Figura 1 - Princípio de fabricação e de colagem , da viga "Hércules" em Madeira Laminada Multidirecional. (Fonte: SANDOZ, 1998)

As pesquisas de Sandoz demonstraram que a utilização do modelo de MLCM, associada à uma prévia classificação das lâminas para a composição racional da seção das vigas, permitiu a obtenção de melhores resultados em termos de performance e confiabilidade do material. Ao mesmo tempo, em que foi possível a obtenção de médias mais elevadas para os valores de resistência à flexão, obteve-se também uma menor dispersão dos resultados, ou seja, menor variabilidade que se traduz em maior confiabilidade do material.

esta razão optou-se pela utilização do termo *Madeira Lamina-Colada Multidirecional*, para designar vigas que apresentam seções laminadas, com lâminas orientadas em direções diferentes.

¹⁶ Em francês: "Herculle".

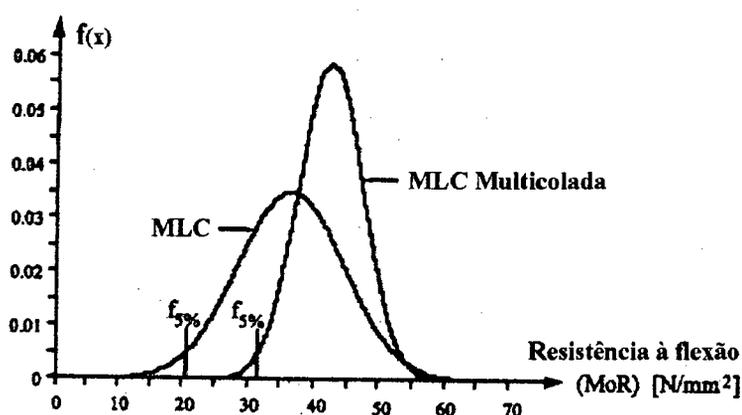


Figura 2 - Comparação das distribuições estatísticas da variável resistência à flexão para as vigas (dimensões 120x300x6000 mm) em MLC e para vigas "Hércules" em MLC "Multicolada". (Fonte: SANDOZ, 1998)

- Pré-classificação das lâminas e composição racional da seção

Numa viga em MLC, cada lâmina possui resistência distinta das demais. Este fato não permite uma perfeita adequação da teoria da resistência dos materiais, idealizada para materiais homogêneos. ROVERE (1998) utiliza um método de homogeneização de seção conhecido como método da seção transformada para permitir uma análise mais precisa de vigas em MLC. Tal método permite o cálculo teórico de flechas no regime elástico, levando-se em consideração também a deformação por cisalhamento.

GROHMANN (1998) analisa a resistência e a rigidez de vigas em MLC, de *Eucalyptus grandis*. Verifica ainda a validade da pré-classificação das lâminas para a composição racional das seções transversais. Sua pesquisa demonstra que a composição racional da seção é fator determinante. Demonstra ainda que um modelo de seção utilizando duas classes de rigidez para as lâminas foi mais adequado que um outro com três classes.

ROCCO LAHR (1991) verifica experimentalmente o comportamento mecânico de vigas de MLC, compostas por lâminas de madeira de uma única espécie ou, num segundo modelo, de espécies distintas. O autor compõe as seções das vigas dispondo as lâminas com menor rigidez na parte central da viga (próxima à linha neutra). Através deste procedimento obteve resultados positivos tanto nas peças

compostas com apenas uma espécie quanto naquelas compostas por duas espécies diferentes. Na prática, este procedimento permitiria uma economia de madeira de aproximadamente 16,5%. Para tanto sugere a utilização de espécies de menor valor comercial e propriedades mecânicas inferiores nas regiões menos solicitadas da seção das peças.

NEIVA (1992) afirma a partir de análise experimental que o posicionamento das lâminas deve ser compatível com as tensões internas atuantes na estrutura, com lâminas mais rígidas colocadas nas zonas submetidas a maiores tensões.

BODIG e JAYNE (1992) observam que através da composição racional da seção de vigas é possível obter uma rigidez efetiva da peça muito maior que a rigidez das lâminas menos rígidas e, ainda, bem pouco menor que aquelas colocadas nas regiões mais solicitadas.

FAGUNDES (1998), analisando a produção de MLC na empresa Battistella, relata a obtenção de bons resultados através da adoção de critérios visuais na pré-classificação das lâminas. Em sua pesquisa, confirma ainda a validade da adoção de apenas duas classes de resistência, ao invés de três, como uma forma prática e segura de otimizar a produção e aumentar o desempenho das peças produzidas. Segundo a autora:

“A pré-classificação das lâminas quanto ao módulo de elasticidade deve ser feita em apenas duas categorias, visando a simplificação de operações em uma linha de produção.”

- Utilização de reforço em fibra de vidro

Em palestra proferida como parte dos eventos promovidos pelo VII EBRAMEM, em São Carlos (SP), DAGHER (2000) apresentou estudos realizados pelo Centro Avançado de Engenharia de Compósitos de Madeira ¹⁷, pertencente à Universidade do Maine (EUA). Neste centro são desenvolvidas diversas pesquisas sobre tecnologia em madeira, entre as quais, destacam-se aquelas sobre a utilização de compósitos como reforço em estruturas em madeira laminada colada. As pesquisas, que vêm sendo realizadas há cerca de dez anos, abordam a utilização de polímeros reforçados com fibras ¹⁸ (PRF).

¹⁷ *Advanced Engineered Wood Composites (AEWC) Center.*

¹⁸ *Fiber-reinforced-polymer (FRP).*

A composição de peças estruturais através da união da madeira com o PRF permite a obtenção de um novo material, com características próprias. Este híbrido permite associar a alta performance e preço elevado do PRF à madeiras de baixa densidade e custo reduzido. O resultado desta combinação possui novas qualidades que se somam às qualidades já observadas na MLC. Este novo material híbrido, segundo o autor, deverá competir não apenas com produtos à base de madeira mas também com o aço e o concreto. O novo material deve permitir:

- aumentar a resistência e rigidez das peças;
- adicionar ductilidade ao material, criando um sistema mais seguro contra falhas;
- reduzir a variabilidade das propriedades mecânicas permitindo a adoção de coeficientes de segurança de menor valor;
- reduzir o volume e o peso próprio de vigas de alta resistência em MLC;
- a utilização de madeira de baixa densidade;
- reduzir custos.

Por fim, as pesquisas realizadas pela Universidade do Maine tem mostrado que a utilização de reforço com PRF, relativo a 3% do volume da viga, pode aumentar a resistência mecânica de vigas de madeira em mais de 10%.

Nos Estados Unidos, a existência de um grande número de pontes com estruturas em MLC, fez com que os pesquisadores norte-americanos buscassem alternativas para aumentar a rigidez e resistência destas estruturas. Deveriam, desta forma, permitir a construção de pontes, com estruturas mais esbeltas e maiores vãos sob as mesmas. HERNANDEZ (1997) realizou uma análise experimental de vigas de MLC reforçada com PRF, correspondendo a 3% do volume total das peças, e obteve um incremento de aproximadamente 18% nos valores de rigidez e 26% nos de resistência em relação aos da MLC convencional. O autor resalta também a facilidade de inserção do PRF no processo de fabricação das vigas convencionais. Por fim faz uma análise da ruptura das vigas ensaiadas. Segundo suas observações, em quase todos os ensaios, a ruptura se iniciou a partir de falha em uma das emendas longitudinais (*finger joints*) da zona tracionada da viga. Esta falha inicial, transfere os esforços de tração totalmente para o PRF que desagrega-se bruscamente, quando se dá a ruptura. Hernandez testou dois modelos de vigas com PRF:

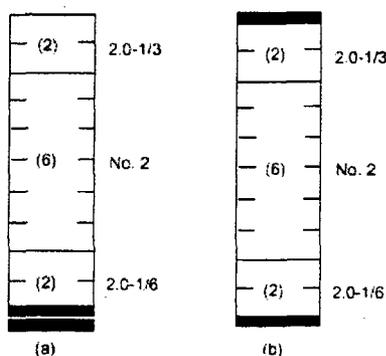


Figura 3 – Vigas em MLC reforçada. (a) duas peças de PRF utilizadas na parte inferior, tracionada, da viga (b) duas peças de PRF utilizadas nas camadas mais afastadas da linha neutra, sob compressão e tração. (Fonte: HERNANDEZ, 1997)

No Brasil, porém, como não há uma grande demanda por MLC, ainda não existe o desenvolvimento de produtos semelhantes ao PRF para uso específico com madeira. Mesmo assim tem sido notável o empenho com que alguns pesquisadores, por vezes aliados a outros estrangeiros, têm pesquisado as possibilidades da utilização da fibra de vidro no reforço de peças de madeira.

SZÜCS *et al.* (1992) verificaram a viabilidade da utilização de tecido de fibra de vidro, com fios orientados, para o reforço de ligações em peças de MLC. Este estudo demonstrou uma significativa melhora na confiabilidade de estruturas com ligações reforçadas com fibra de vidro.

SZÜCS (1992b) obteve excelentes resultados experimentais, no aumento da resistência da madeira a esforços transversais, através da aplicação de reforços com fibra de vidro. Salienta-se ainda o sucesso da ligação entre a fibra de vidro e a madeira, através de cola resorcina-fenol-formol.

SZÜCS e CHANG (1992) relacionam as diferentes possibilidades de utilização da fibra de vidro para reforçar estruturas de MLC. Entre estas citam a possibilidade de utilização de tecido de fibra de vidro, em vigas submetidas à flexão, nas juntas de cola mais afastadas da linha neutra. Tal procedimento, poderia aumentar a resistência e a rigidez das vigas. Observa-se que neste caso as fibras seriam dispostas longitudinalmente, acompanhando o sentido das fibras da madeira. Destaca-se ainda a utilização de fibra de vidro para reforço das ligações longitudinais, do tipo *finger joint*, utilizadas em estruturas de MLC.

3 CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES DA MADEIRA

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Quando pensamos na utilização da madeira como matéria prima para a confecção de componentes estruturais torna-se imprescindível conhecer as características do lote de madeira utilizado. Ao contrário de outros materiais industrializados a madeira apresenta uma alta variabilidade em razão dos inúmeros fatores que interferem no seu processo de constituição anatômica. Assim sendo mesmo tratando-se de uma mesma espécie podem ser encontradas madeiras com diferentes tipos de comportamento estrutural.

Os ensaios de caracterização física da madeira utilizada foram realizados para servir de suporte na medida em que os dados obtidos neste trabalho venham a ser utilizados comparativamente aos de outras pesquisas correlatas.

Deve-se considerar as seguintes propriedades da madeira a ser utilizada:

- Umidade
- Densidade
- Resistência
- Rigidez

3.2 DETERMINAÇÃO DA UMIDADE E DENSIDADE DA MADEIRA

Para a determinação das propriedades umidade e densidade da madeira foram utilizados os procedimentos dispostos pela NBR 7190 com algumas alterações expostas a seguir.

3.2.1 Procedimentos adotados

Foram confeccionados corpos de prova prismáticos com seção transversal retangular de 2 x 3 cm e comprimento no sentido longitudinal das fibras de 5 cm os quais tiveram sua massa e dimensões iniciais registrados.

Em seguida corpos de prova foram levados à estufa com uma temperatura de 103° C para que seque completamente. Durante este processo foram realizadas medições sistemáticas das dimensões e da massa dos corpos de prova, em intervalos não menores que 6 horas, até que entre o valor de uma medição e o da imediatamente anterior fosse registrada uma variação inferior 0,5%. Neste ponto obtém-se o valor definido como “massa seca”.

Conhecendo-se os valores de massa seca (m_s) e da massa inicial (m_i) determina-se o teor de umidade da madeira à base seca pela seguinte expressão:

$$U(\%) = \frac{m_i - m_s}{m_s} \times 100 \quad (3.1)$$

Concluído o processo de secagem os corpos de prova são imersos em água para atingir o ponto de saturação das fibras. Durante este processo de umidificação são também realizadas medições até que a madeira atinja o ponto de estabilidade ou de variação inferior a 0,5% entre duas medições simultâneas. Diz-se então que a madeira encontra-se saturada ou em ponto de saturação.

Neste ponto foram obtidos os valores necessários para a determinação da densidade da madeira que é expressa através de dois valores de massa específica em quilogramas por metro cúbico (kg/m^3):

- a densidade básica (ρ_{bas}) definida por:

$$\rho_{\text{bas}} = \frac{m_s}{V_{\text{sat}}} \quad (3.2)$$

onde: m_s = massa seca e V_{sat} = volume saturado

- a densidade aparente (ρ_{ap}) definida por:

$$\rho_{\text{ap}} = \frac{m_{12}}{V_{12}} \quad (3.3)$$

onde: m_{12} = massa a 12% e V_{12} = volume a 12%

3.2.2 Descrição da amostra

Para a análise de teor de umidade e densidade do *Eucalyptus grandis* e do *Hymenolobium petraeum* foram realizados três grupos de corpos de prova:

- Grupo 1: 6 corpos de prova em Eucalipto *grandis*, extraídos dos barrotes de seção 5x10 cm utilizados também na confecção dos corpos de prova de compressão paralela. Estas peças, apesar de terem a mesma procedência do Grupo 2, não passaram pelo processo de secagem ao qual foram submetidas as tábuas;
- Grupo 2: 7 corpos de prova em Eucalipto *grandis*, extraídos das tábuas utilizadas na composição das vigas de MLC ensaiadas à flexão; e
- Grupo 3: 10 corpos de prova em Angelim pedra, extraídos de parte das vigas ensaiadas à flexão.

3.2.3 Resultados dos ensaios

a) Umidade

A análise do teor médio de umidade revelou alguns pontos interessantes. Em primeiro lugar observou-se que o Grupo 1 possuía um teor médio de umidade bastante elevado, muito acima da umidade de equilíbrio da madeira esperado que não deveria exceder 25%.

O Grupo 2, no entanto, foi composto por corpos de prova retirados de madeira seca em estufa o que explica a baixa variabilidade da amostra assim como a umidade abaixo da esperada.

Já o Grupo 3 é proveniente de madeira escolhida em madeireira e que foi deixada secando “ao tempo”, ficando depois armazenada por cerca de dois meses no LEE em lugar abrigado e seco o que determinou a sua estabilidade e equilíbrio com a umidade ambiente.

Grupo	Qtde. C.P.	Espécie	Teor Médio de Umidade	Coef. de Variação	Desvio Padrão
1	6	<i>E. grandis</i>	57,68 %	25,66 %	14,80
2	7	<i>E. grandis</i>	9,89%	4,62 %	0,46
3	10	A. pedra	17,37%	5,78 %	1,00

b) Densidade

Segundo a norma brasileira, para a caracterização simplificada da madeira é necessário apresentar os valores referentes a densidade básica (ρ_{bas}) e a densidade aparente (ρ_{ap}). Porém não tendo sido possível determinar os valores de massa e volume a 12% de umidade, utilizou-se um artifício baseado nos dados conhecidos.¹⁹ Tal artifício pretende estimar os valores de massa e volume a 12% de umidade. Para tanto considerou-se que o valor do teor de umidade tende a zero após a estabilização volumétrica dos corpos de prova na secagem. Supôs-se ainda que os valores relativos à massa e ao volume inicial, subtraídos dos valores “secos”, permite estimar a massa e volume de água contidos inicialmente nos corpos de prova. Esta massa e volume de água correspondem a um determinado percentual de umidade conhecido. Através de uma regra de três pôde-se então calcular valores de massa e volume equivalentes a 12% de umidade, somando-os posteriormente aos valores “secos” da madeira. Os valores obtidos são uma aproximação dos valores necessários para o cálculo da densidade aparente. Segue um exemplo dos cálculos realizados:

- Dados

Corpo de Prova N°7 – Grupo 3 (Angelim)

Massa inicial (m_i) = 0,0249 kg

Volume inicial (v_i) = 0,00003361 m³

Massa seca (m_s) = 0,0211 kg

Volume seco (v_s) = 0,00003053

Teor de umidade obtido (U%) = 17,83%

- Cálculo da massa de água inicial ($m_{A,17,38\%}$)

$$m_{A,17,38\%} = m_{17,38\%} - m_s$$

$$m_{A,17,38\%} = 0,0026 \text{ kg}$$

- Cálculo do volume de água inicial ($v_{A,i}$)

$$v_{A,17,38\%} = v_{17,38\%} - v_s$$

$$v_{A,17,38\%} = 0,00000308 \text{ m}^3$$

¹⁹ Nota do autor. Mesmo reconhecendo que o procedimento adotado não possui comprovada eficiência e precisão, e, considerando a importância da apresentação dos valores de densidade aparente da madeira utilizada, optou-se pela utilização paleativa do procedimento aqui descrito.

- Cálculo da massa de água a 12% ($m_{A,12\%}$)

$$m_{A,12\%} = \frac{m_{A,17,38\%}}{17,38} \times 12 = 0,0236 \text{ kg}$$

- Cálculo do volume de água a 12% ($v_{A,12\%}$)

$$v_{A,12\%} = \frac{v_{A,17,38\%}}{17,38} \times 12 = 0,000002073 \text{ m}^3$$

- Cálculo da densidade aparente (ρ_{ap})

$$m_{12\%} = m_s + m_{A,12\%} = 0,236 \text{ kg}$$

$$v_{12\%} = v_s + v_{A,12\%} = 0,000032603 \text{ m}^3$$

$$\rho_{ap} = \frac{m_{12\%}}{v_{12\%}} = \frac{0,236}{0,000032603} = 723,86 \text{ kg/m}^3$$

- Densidade Básica (ρ_{bas})

Grupo	Qtde. C.P.	Espécie	ρ_{bas} média	Coef. de Variação	Desvio Padrão
1	6	<i>E. grandis</i>	Não Aferida	-	-
2	7	<i>E. grandis</i>	504 kg/m ³	9,91 %	50,01
3	10	A. pedra	617 kg/m ³	4,86 %	29,99

- Densidade Aparente Estimada (ρ_{ap})

Grupo	Qtde. C.P.	Espécie	ρ_{ap} média	Coef. de Variação	Desvio Padrão
1	6	<i>E. grandis</i>	Não Aferida	-	-
2	7	<i>E. grandis</i>	658 kg/m ³	12,44 %	81,79
3	10	A. pedra	769 kg/m ³	4,87 %	37,44

3.2.4 Equipamentos utilizados

Para a determinação dos valores de umidade e densidade da madeira foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Serra fita para a confecção dos corpos de prova;
- Paquímetro eletrônico de fabricação *Starrett* com precisão de 0,01mm e abertura máxima de 150,0 mm para a medição das dimensões dos corpos de prova;

- Balança de precisão Marte, modelo AM 5500 Automarte com precisão de 0,01 g e capacidade máxima de 5,0 kg, para a medição da massa dos corpos de prova;
- Estufa de fabricação Quimis com controle eletrônico de temperatura e temperatura máxima de 300°C.

3.3 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA

3.3.1 Determinação da resistência da madeira

3.3.1.1 Considerações iniciais

A NBR 7190 descreve três tipos de caracterização das propriedades da madeira: a caracterização completa, a caracterização mínima e a caracterização simplificada. Em um primeiro momento considerou-se a possibilidade de realização da caracterização mínima porém isto não foi possível em função da disponibilidade limitada de material para os ensaios. Optou-se então pela caracterização simplificada. Esta decisão justifica-se pelo fato de que o eucalipto *grandis* utilizado é proveniente da mesma floresta da qual já houvera sido obtido material para diversas outras pesquisas realizadas no LEE-UFSC. Assim sendo o angelim pedra foi submetido aos mesmos ensaios para permitir uma comparação direta.

Além disso a caracterização das espécies utilizadas serviu principalmente como dado referencial para análise dos dados finais obtidos nos ensaios de flexão das vigas, objeto deste estudo.

A caracterização simplificada da madeira é realizada a partir dos ensaios de compressão paralela. A partir destes resultados a norma brasileira permite que se adote relações entre estes valores e todos aqueles necessários para a caracterização do material. As relações constantes na norma são as seguintes:

$$f_{c0,k}/f_{t0,k} = 0,77$$

$$f_{tM,k}/f_{t0,k} = 1,0$$

$$f_{c90,k}/f_{c0,k} = 0,25$$

$$f_{e0,k}/f_{c0,k} = 1,0$$

$$f_{e90,k}/f_{c0,k} = 0,25$$

Para coníferas

$$f_{v0,k}/f_{c0,k} = 0,15$$

Onde:

$f_{c0,k}$ é a resistência à compressão paralela às fibras;

$f_{t0,k}$ é a resistência à tração paralela às fibras;

$f_{tM,k}$ é a resistência à tração na flexão às fibras;

$f_{c90,k}$ é a resistência à compressão normal às fibras;

$f_{e0,k}$ é a resistência de embutimento paralelo às fibras;

$f_{e90,k}$ é a resistência de embutimento normal às fibras; e

$f_{v0,k}$ é a resistência ao cisalhamento paralelo às fibras.

Observa-se que por tratar-se de um método baseado em aproximação há que se considerar um coeficiente de variação de 18% para a resistência aos esforços normais e de 28% para a resistência aos esforços tangenciais.

3.3.1.2 Procedimentos adotados

Foram confeccionados corpos de prova prismáticos com seção transversal quadrada de 4,5 x 4,5 cm e comprimento no sentido paralelo às fibras de 20 cm os quais tiveram suas dimensões registradas. Estas dimensões são um pouco diferentes daquelas definidas pela norma brasileira, porém, para estes ensaios, não se dispunha de peças que permitissem a confecção de corpos de prova com 5,0 x 5,0 cm como recomendado. Além disso os relógios comparadores utilizados para medir as deformações durante o ensaio exigiam uma altura do corpo de prova com dimensão um pouco superior à recomendada pela norma brasileira (15 cm).

Foi utilizado um esquadro de aço para a verificação da ortogonalidade das faces dos corpos de prova afim de evitar o surgimento de deformações causadas por influência de outros esforços além da compressão simples.

Em seguida os corpos de prova foram identificados e receberam cada um 8 pregos com 1 mm de espessura, os quais tiveram suas cabeças previamente cortadas. O posicionamento correto dos pregos nos corpos de prova foi garantido através da utilização de um gabarito, também de madeira, que juntamente com um calço especial facilitou bastante a etapa:

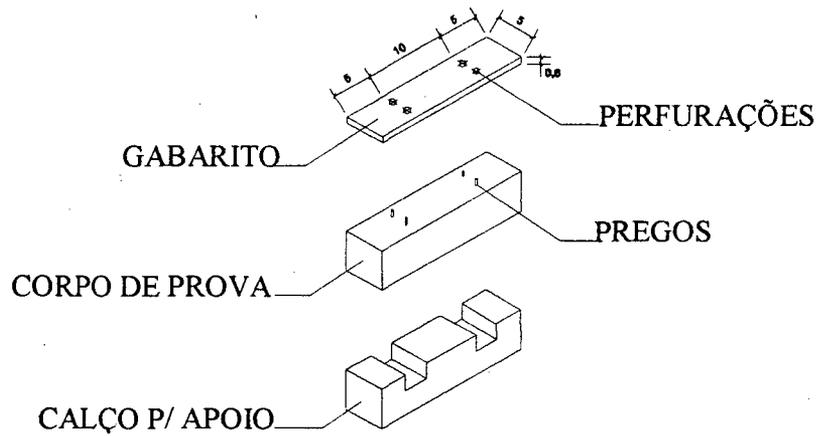


Figura 4 - Esquema de posicionamento dos pregos

A partir de então procedeu-se o ensaio de um corpo de prova piloto para determinação de um valor de referência, utilizado para definir os intervalos nos quais foram realizados as medições da deformação.

Cada corpo de prova recebeu o dispositivo de fixação dos relógios comparadores e foi então levado a prensa hidráulica.

Inicialmente foi aplicado um ciclo de carga e descarga para a perfeita acomodação do corpo de prova. Este ciclo iniciava-se aplicando a carga até 50% da carga estimada para a ruptura, mantinha-se este carregamento por cerca de 10 segundos e então retornava-se até a marca de 10%. Repetia-se uma vez mais o procedimento inicial. Finalizado o dois ciclos de carga e descarga aplicou-se um carregamento monótonico da ordem de 10 MPa/minuto até a ruptura.

Durante todo o procedimento de carga, descarga e de carregamento final foram registrados os valores de deformação em intervalos relativos a 10% da carga de ruptura registrada no corpo de prova piloto.

Os relógios comparadores foram mantidos para monitoração dos corpos de prova até uma carga equivalente a 70% da carga estimada de ruptura, sendo então retirados, por questões de segurança, sem que fosse necessária a remoção dos dispositivos de fixação.

Por fim atingindo-se a carga de ruptura registrou-se os valores para a determinação da tensão de ruptura.

- Considerações a respeito da altura adotada para os corpos de prova

Quando temos peças de madeira submetidas a esforços de compressão axiais devemos observar a relação entre a altura e as dimensões da seção transversal. Esta relação é empregada para definir as peças como peças: curtas, medianamente esbeltas ou esbeltas. Em se tratando de ensaios de compressão paralela é indispensável trabalhar com peças curtas. Isto é importante pois desta forma pode-se desconsiderar eventuais efeitos de esforços alheios aos de compressão simples.

Observou-se também o princípio de *Saint Venant* (BEER, 1995:154). Segundo este princípio, na medida em que nos afastamos da superfície de aplicação da carga há uma homogeneização na distribuição das tensões internas geradas. Eventuais irregularidades nas superfícies de aplicação da carga ou ainda o comportamento mecânico diferenciado dos anéis de crescimento da madeira podem provocar concentrações de tensão. É necessário que a região comprimida na qual se medem as deformações específicas seja submetida a tensões uniformes. Assim sendo optou-se por manter uma distância entre a superfície comprimida e o início da região monitorada igual a dimensão do lado da seção transversal dos corpos de prova:

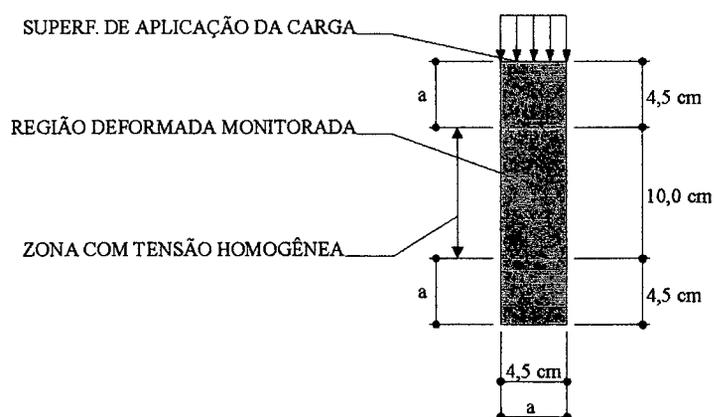


Figura 5 - Proporções do corpo de prova de compressão paralela

Além disso normas similares à brasileira, como a ASTM D 245-74 determinam a utilização de corpos de prova cuja a relação entre base e altura é de 1x4 (BODIG, 1982:419).

Cabe ainda ressaltar que mesmo utilizando corpos de prova com um comprimento maior que o determinado pela norma manteve-se inalterada a dimensão na qual foi registrada a deformação, ou seja, nos 10 cm centrais.

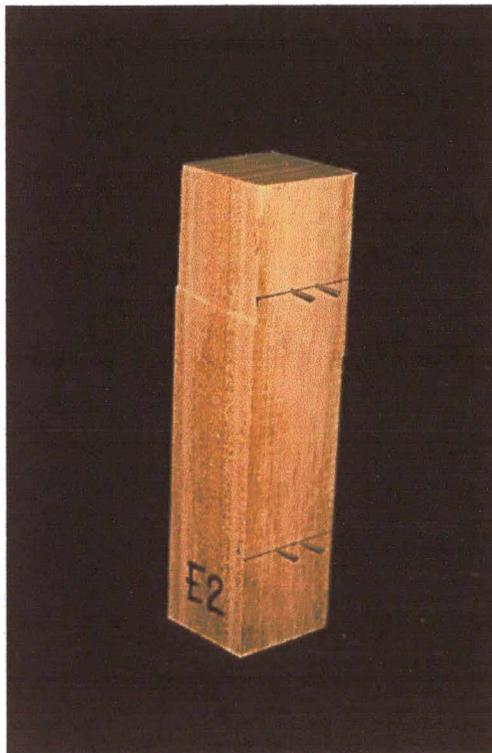


Figura 6 - Corpo de prova ensaiado, apresentando uma falha típica por ruptura à compressão paralela

3.3.1.3 Descrição da amostra

A amostra preparada para determinação das propriedades físicas da madeira utilizada foi composta por dois lotes:

- Eucalipto *grandis*: 11 corpos de prova extraídos dos barrotes de seção 5x10 cm; e
- Angelim pedra: 8 corpos de prova extraídos de parte das vigas ensaiadas à flexão.

3.3.1.4 Resultados dos ensaios

a) Análise numérica

Da norma temos que a resistência na compressão paralela é dada por:

$$f_{C,0} = \frac{F_{C,0,máx}}{A} \quad (3.4)$$

onde:

$f_{C,0}$ é a resistência à compressão paralela às fibras, em megapascais;

$F_{C,0,máx}$ é a máxima força de compressão aplicada ao corpo de prova durante o ensaio, em newtons; e

A é a área inicial da seção transversal comprimida, em metros quadrados.

Os dados obtidos nos ensaios passaram por cinco etapas de tratamento:

- Verificação da espuriedade dos dados: Foi realizada a análise da existência de valores extremos através do método descrito por NANNI, 1986;
- Verificação da normalidade dos dados da amostra obtido: Foi utilizada a prova de *Kolmogorov-Smirnov* (COSTA NETO, 1977) para um nível de 5% de significância (ou 95% de confiabilidade) de impossibilidade de rejeição da normalidade dos dados.
- Obtenção do valor característico de resistência do lote dado pela fórmula extraída da norma brasileira:

$$f_{C,0,K} = \left(2 \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_{\frac{n}{2}-1}}{\frac{n}{2} - 1} - x_{\frac{n}{2}} \right) 1,1 \quad (3.5)$$

onde:

$f_{C,0,K}$ é a resistência característica do lote testado;

x_1 a x_n são os valores de resistência encontrados nos ensaios, onde $x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_n$;

No caso de o número de dados ser ímpar despreza-se o maior valor. Não se adota para $f_{C,0,K}$ valor inferior a 0,7 do valor médio (x_m).

- Correção dos valores para a umidade padrão de 12%: Como os corpos de prova não possuíam umidade igual a 12% os valores tiveram de ser corrigidos através da seguinte fórmula da NBR 7190:

$$f_{12\%} = f_{U\%} \left[1 + \frac{3(U\% - 12)}{100} \right] \quad (3.6)$$

onde:

$f_{12\%}$ é a resistência da madeira a 12% de umidade;

$f_{U\%}$ é a resistência da madeira registrada nos ensaios; e

U% é o percentual de umidade obtido através dos ensaios para determinação de umidade.

Observa-se no item “3.2.3, a” que o lote utilizado para a caracterização do Eucalipto *grandis* possuía um teor de umidade elevado (57,68%). Segundo a norma brasileira a resistência e a rigidez da madeira sofrem apenas pequenas variações para umidades acima de 20%. Assim sendo, para validar a utilização da fórmula de correção, optou-se por corrigir os valores de resistência e rigidez do Eucalipto *grandis* adotando um teor de umidade da ordem de 20%.

b) Quadro de resultados

P/ U%= 12%, [MPa]	(a) Eucalipto <i>grandis</i>	(b) Angelim pedra
$F_{c0,k} =$	48,29	51,34
$F_{t0,k} =$	62,71	66,68
$F_{tM,k} =$	62,71	66,68
$f_{e90,k} =$	12,07	12,84
$F_{e0,k} =$	48,29	51,34
$F_{e90,k} =$	12,07	12,84
$f_{v0,k} =$	5,79	6,16

3.3.1.5 Equipamentos utilizados

Para a determinação dos valores de umidade e densidade da madeira foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Serra fita para a confecção dos corpos de prova;
- Esquadro de aço para a verificação da ortogonalidade das faces dos corpos de prova;

- Paquímetro eletrônico de fabricação *Starrett* com sensibilidade de 0,01mm e abertura máxima de 150 mm para a medição das dimensões dos corpos de prova;
- Prensa hidráulica de fabricação *Mohr & Federhaff AG* com capacidade de 20 t para a aplicação de carga;
- Rótula metálica com diâmetro de 15 cm;
- Relógios comparadores de fabricação *Digimess* com precisão de 0,001 mm e extensão máxima de 1,0 mm para a medição da deformação;
- Dispositivo para fixação dos relógios comparadores; e
- Planilha eletrônica *Microsoft Excel* para a análise dos dados, traçado dos gráficos e tratamento estatístico.



Figura 7 - Prensa hidráulica utilizada na realização dos ensaios



Figura 8 - Aparato montado para os ensaios de compressão paralela

- Descrição do dispositivo para fixação dos relógios comparadores

A norma brasileira descreve um arranjo de ensaio para compressão paralela no qual utiliza-se cantoneiras metálicas perfuradas para a fixação dos relógios comparadores. Todavia as experiências realizadas no LEE em pesquisas anteriores demonstraram que este sistema, aparentemente simples, dificultava a fixação dos relógios comparadores de forma segura. Depois de fixadas as cantoneiras em uma das faces tornava-se difícil a fixação das da face oposta devido a necessidade de apoiar o corpo de prova para pregar os pregos. Além disso o peso dos relógios comparadores associado ao movimento das fibras durante os ensaios por vezes provocava um “afrouxamento” dos pregos, causando erros de medição que se mostravam significativos devido a alta precisão necessária para medir as deformações.

A criação deste dispositivo buscou minimizar as interferências causadas pelas dificuldades de preparação do corpo de prova, agilizar a prática dos ensaios assim como permitir uma fácil remoção dos relógios antes da ruptura, evitando que estes pudessem ser danificados.

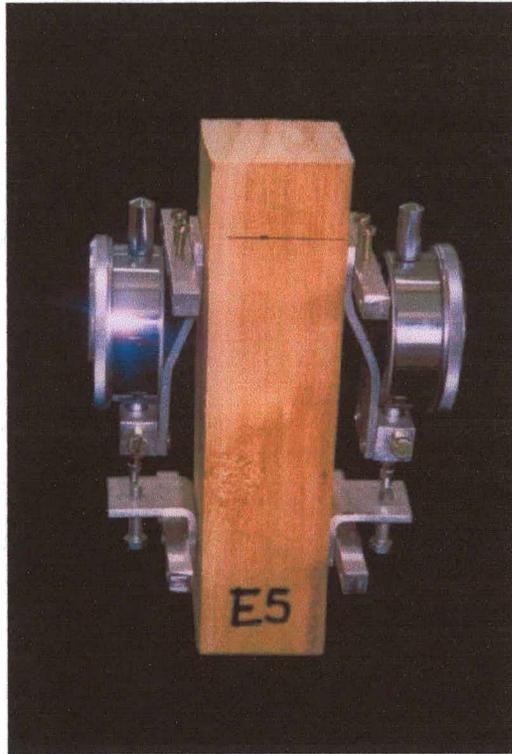


Figura 9 - Corpo de prova com o dispositivo de fixação dos relógios comparadores

3.3.2 Determinação da rigidez da madeira

3.3.2.1 Considerações iniciais

Segundo a NBR 7190:

“A rigidez dos materiais é medida pelo valor médio do módulo de elasticidade, determinado na fase de comportamento elástico-linear.”

Além disso, no caso da madeira, a rigidez é caracterizada pelos valores médios do módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras ($E_{c,0m}$) e do módulo de elasticidade na compressão normal às fibras ($E_{c,90m}$) obtidos através dos respectivos ensaios.

Como a caracterização foi realizada de forma simplificada devido a impossibilidade de se realizar os ensaios de compressão normal às fibras, adotou-se a seguinte relação para determinação do $E_{c,90m}$ a partir do valor médio de $E_{c,0m}$. Da NBR 7190 temos que:

$$E_{w90} = \frac{1}{20} E_{w0}$$

3.3.2.2 Procedimentos utilizados

a) Módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras ($E_{c,0m}$)

Os corpos de prova utilizados para a determinação de rigidez foram os mesmos utilizados para a determinação da resistência e descritos em 3.2.2.

Inicialmente foram realizados os ensaios dos corpos de prova pilotos sendo observada uma carga de ruptura próxima a 9,0 t. Em função deste valor definiu-se que as medidas de deformação seriam tomadas a cada incremento de carga de 900 kgf, ou seja 10% do valor estimado de ruptura.

Os ensaios foram monitorados para a coleta dos dados da deformação em dois lados opostos do corpo de prova. Para a tabulação dos dados utilizou-se então a média dos dois valores.

Através destes dados foi possível traçar gráficos tensão x deformação específica que auxiliaram na análise dos resultados, para cada um dos corpos de prova.

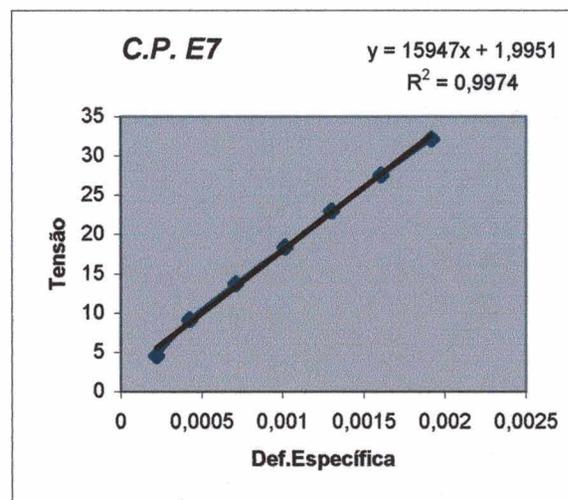


Figura 10 – Exemplo de gráfico tensão x deformação obtido através dos ensaios de compressão paralela

De posse dos dados utilizou-se a seguinte expressão para a determinação do módulo de elasticidade:

$$E_{C,0} = \frac{\sigma_{50\%} - \sigma_{10\%}}{\varepsilon_{50\%} - \varepsilon_{10\%}} \quad (3.7)$$

onde:

$E_{C,0}$ é o módulo de elasticidade na compressão paralela às fibras;

$\sigma_{10\%}$ e $\sigma_{50\%}$ são respectivamente as tensões de compressão correspondentes a 10% e a 50% da resistência $f_{C,0}$; e

$\varepsilon_{10\%}$ e $\varepsilon_{50\%}$ são respectivamente as deformações específicas medidas no corpo de prova, correspondentes às tensões de $\sigma_{10\%}$ e $\sigma_{50\%}$.

Os dados utilizados para determinação da rigidez passaram pelo mesmo tratamento dado aos valores de resistência. Assim sendo foram verificados a escuridade e normalidade dos dados, e por fim foi realizada a correção dos valores em razão da umidade. A principal diferença no tratamento dos dados está no critério utilizado para a definição dos valores de caracterização. A rigidez do lote é representada pelo valor médio dos módulos de elasticidade obtidos e não por um valor característico.

3.3.2.3 Módulo de elasticidade na compressão normal às fibras ($E_{c,90m}$)

A utilização da caracterização simplificada exigiu que a rigidez da madeira na compressão normal às fibras fosse apenas estimada a partir do módulo de compressão paralela obtido através dos ensaios.

3.3.2.4 Descrição da amostra

A amostra utilizada para determinação da rigidez foi a mesma utilizada para a determinação da resistência e descrita em 3.2.3.

3.3.2.5 Valores de rigidez da madeira empregada

P/ U%= 12%, [MPa]	(a) Eucalipto grandis	(b) Angelim pedra
$E_{C0,médio} =$	18132	19234
$E_{C90,médio} =$	907	962

3.3.2.6 Equipamentos utilizados

O aparato utilizado foi o mesmo dos ensaios de determinação da resistência à compressão paralela.

3.3.3 Considerações finais a respeito dos ensaios de caracterização da madeira

Inicialmente chegou-se a considerar a possibilidade de adotar os valores característicos de resistência para o *Eucalyptus grandis* e para o *Hymenolobium petraeum* comumente encontrados na bibliografia consultada.

Esta abordagem demonstrava ser plausível (ao menos no caso do Eucalipto *grandis*) levando-se em conta a existência de dados produzidos por pesquisas anteriores, realizadas no LEE, com madeira comprovadamente similar. Porém isto não apenas ia contra os critérios de rigidez necessários para legitimar um trabalho de cunho científico como também, numa análise mais aprofundada, revelava disparidades nos valores apresentados por fontes diversas. Estes fatos demonstram a correta adoção de altos coeficientes de variação a serem considerados para os valores de resistência obtidos através da caracterização simplificada.

Porém quando observa-se a relação entre os valores de resistência característicos de uma mesma espécie percebe-se que estes não obedecem uma única lista de relações entre os valores característicos como sugere a norma.

3.3.3.1 Análise dos resultados de caracterização

a) Comparação dos dados obtidos com os da NBR 7190

A NBR 7190 apresenta valores médios usuais para as propriedades mecânicas de algumas espécies nativas e de reflorestamento. Sem ter acesso aos memoriais de cálculo da norma, tornou-se impossível realizar uma comparação estatística entre estes dados e aqueles obtidos nos ensaios. Mesmo assim apresenta-se aqui uma simples comparação percentual entre estes valores, afim de ilustrar as diferenças encontradas entre as madeiras de procedências diversas.

- Angelim pedra (*Hymenolobium petraeum*)

	Valor NBR 7190	Valor Obtido	Diferença Percentual
ρ_{ap} (12%) [kg/m ³]	694	769	10,81%
$f_{c,0}$ [MPa]	59,8	51,34	-14,15%
$f_{t,0}$ [MPa]	75,5	66,68	-11,68%
f_v [MPa]	8,8	6,16	-30,00%
$E_{c,0}$ [MPa]	12912	19234	48,96%

- Eucalipto (*Eucalyptus grandis*)

	Valor NBR 7190	Valor Obtido	Diferença Percentual
ρ_{ap} (12%) [kg/m ³]	640	658	2,81%
$f_{c,0}$ [MPa]	40,3	48,29	19,83%
$f_{t,0}$ [MPa]	70,2	62,71	-10,67%
f_v [MPa]	7,0	5,79	-17,29%
$E_{c,0}$ [MPa]	12813	18132	41,51%

As diferenças entre os valores obtidos e os constantes na norma brasileira demonstram a interferência de outros fatores que influenciam nas propriedades físicas e mecânicas da madeira.

b) Comparação entre os dados dos lotes ensaiados

Tendo sido confirmada a validade dos dados obtidos, relata-se aqui a relação percentual entre os valores das propriedades físico-mecânicas das espécies estudadas.

	Angelim pedra	Eucalipto <i>grandis</i>	Diferença Percentual
ρ_{ap} (12%) [kg/m ³]	769	658	-14,43%
$f_{c,0}$ [MPa]	51,34	48,29	-5,94%
$f_{t,0}$ [MPa]	66,68	62,71	-5,95%
f_v [MPa]	6,16	5,79	-6,01%
$E_{c,0}$ [MPa]	19234	18132	-5,73%

As diferenças encontradas entre as propriedades físicas e mecânicas dos lotes analisados comprovam o acerto na escolha das espécies comparadas. As diferenças percentuais inferiores a 15% demonstram que os lotes, de espécies distintas, deverão apresentar desempenhos mecânicos semelhantes, permitindo a comparação direta entre os resultados obtidos nos ensaios.

4 ENSAIOS DE FLEXÃO DAS VIGAS

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O principal objetivo desta pesquisa é o de fazer um comparativo entre peças estruturais em madeira maciça de espécies nativas, e outras, em madeira laminada colada, proveniente de florestas plantadas.

A MLC pode ser utilizada para a composição dos mais diversos tipos de componentes para a construção civil. Observa-se entretanto que esta técnica é mais freqüentemente encontrada compondo estruturas para uso à flexão como vigas, por exemplo. Tal fato evidencia-se quando constatamos que a grande maioria dos fabricantes de MLC comercializa vigas nas mais diversas dimensões.

A MLC Multidirecional surgiu como uma alternativa para o aperfeiçoamento da técnica da MLC. SANDOZ (1998) começou a estudar a utilização desta variante da MLC convencional, como alternativa para aumentar, simultaneamente, o desempenho e a confiabilidade das peças compostas. O autor demonstra, através de seu estudo, que a adoção de um sistema no qual as maiores tensões na flexão são absorvidas não apenas por uma, mas por várias lâminas, permite atingir tais objetivos. Porém o efeito observado se daria em razão da distribuição das emendas longitudinais (*finger joints*) entre as lâminas dispostas paralelamente. O efeito estocástico²⁰ observado nas emendas longitudinais pode ser desastroso em estruturas convencionais caso a lâmina mais solicitada apresente um defeito. Na MLC Multidirecional, a ocorrência de um defeito em uma das lâminas pode ser compensado pela contribuição das lâminas adjacentes. O resultado desta combinação seria uma maior confiabilidade que permitiria a redução dos coeficientes de segurança aplicados aos cálculos de estruturas em MLC.

²⁰ Imprevisibilidade.

Porém é importante ressaltar que as vigas fabricadas para esta pesquisa não possuem emendas longitudinais. A inclusão da análise de vigas em MLC Multidirecional se deu com a intenção de verificar a influência do direcionamento das lâminas a despeito da existência, ou não, de emendas longitudinais. A análise destas vigas tem o propósito de investigar a existência de diferenças significativas entre o seu comportamento e o das vigas de MLC convencional.

Segundo BODIG e JAYNE (1992), a flexão introduz um complexo padrão tridimensional, envolvendo esforços de tração, compressão e cisalhamento, os quais analisados, permitem a caracterização mecânica do material. Esta caracterização, envolvendo diversos tipos de solicitações, aliada ao fato de que o ensaio de vigas à flexão já foi realizado diversas vezes no LEE justifica a opção pelo tipo de ensaio realizado. Além disso há que se considerar a importância da possibilidade de realização de testes com componentes em escala um para um (1:1), fornecendo dados mais próximos de uma situação de projeto real.

4.2 MADEIRA UTILIZADA

4.2.1 Vigas maciças de angelim pedra

a) Aquisição

As vigas de angelim foram adquiridas através de verba disponibilizada pelo programa de pós-graduação da engenharia civil (PPGEC) da UFSC. A madeira foi escolhida adotando-se o critério do menor preço aliado à melhor qualidade percebida. Para tanto procedeu-se da seguinte forma. A partir de pesquisa telefônica, foi escolhido um grupo de dez madeireiras da região da Grande Florianópolis, às quais foi solicitado um orçamento preliminar. De posse dos orçamentos, foram selecionadas as três madeireiras que apresentaram os menores preços. Através de visitas às madeireiras selecionadas, foi efetuada uma verificação *in loco* das condições de estocagem, dimensões e características visuais da madeira disponível. Pôde-se observar que todas as madeireiras visitadas faziam a estocagem ao ar livre, com empilhamento e entabamento correto das peças, porém, em duas delas, havia uma variação significativa nas dimensões da largura das vigas de um mesmo lote, enquanto na terceira

as larguras eram mais uniformes. Segundo explicação de um dos donos desta última, em geral, a madeira é desdobrada com a utilização de dois tipos diferentes de equipamento. As máquinas que utilizam serras do tipo “fita”, tendem a produzir peças com dimensões irregulares. Já aquelas que utilizam serras circulares paralelas (chamada pelo vendedor de “Induspan”) fornecem seções mais regulares apesar das marcas características (e indesejáveis, caso haja a intenção de deixar a madeira aparente) deixadas pelas lâminas nas faces laterais das peças.

Por fim a compra do angelim foi realizada na madeireira onde as peças possuíam dimensões mais uniformes. Observou-se que as irregularidades nas laterais das vigas seriam eliminadas posteriormente, através de uma plainagem para a uniformização de todas as peças (incluindo as de MLC). Observa-se ainda que a madeireira escolhida ofereceu, inclusive, o menor valor para venda do metro cúbico de angelim. Cotado a R\$ 500,00/m³, o lote de angelim foi adquirido por R\$ 192,00, em 17 de agosto de 2000 ²¹.

b) Procedência

Em todas as madeireiras consultadas, encontrou-se uma certa dificuldade na obtenção de informações precisas sobre a procedência da madeira. Felizmente a madeireira na qual foi adquirido o lote de angelim pedra utilizado na pesquisa, possuía nota de transporte, com dados precisos, comprovando que a madeira adquirida é proveniente do estado de Rondônia.

c) Quantidade e qualidade da madeira

Foram adquiridos 30,0 metros lineares, de peças brutas de madeira de angelim pedra, com seção transversal de 8,0 cm x 16,0 cm. A madeira disponível em peças de comprimento aproximado de 6,0 metros foi previamente cortada, ainda na madeireira, e entregue sob forma de 10 vigas com dimensões aproximadas de 8,0 cm x 16,0 cm x 300,0 cm. O comprimento das peças foi regularizado posteriormente, reduzindo-as à dimensão de 250,0 cm.

²¹ Em 17/08/2000 o dólar oficial estava cotado a R\$ 1,81. Isto resulta em US\$ 276,25/m³, sendo que o valor total da compra foi equivalente a US\$ 106,07.

Apesar de ter sido realizada uma cuidadosa inspeção visual em cada uma das peças adquiridas, durante o processo de numeração²² das vigas, encontrou-se uma rachadura na zona central de uma das peças. Esta rachadura pode ter sido causada por choques no instante da derrubada da árvore, durante o transporte ou ainda por tensões internas provenientes do processo de secagem quando estocada. Tal defeito inviabilizou a utilização desta peça nos ensaios e certamente teria inviabilizado o seu uso, para fins estruturais, em qualquer outra situação. Observa-se ainda que sob condições de controle menos rigorosas que as adotadas nesta pesquisa, outros defeitos, maiores inclusive, certamente poderiam ter passado despercebidos, ressaltando a necessidade de um maior controle de qualidade do produto desde o desdobro até a comercialização.

4.2.2 Vigas de eucalipto em MLC

a) Aquisição

As vigas de eucalipto foram produzidas sob a técnica da madeira laminada colada, exigindo a aquisição de lâminas segundo os critérios estipulados pela NBR7190/97. Em suma, era necessário um lote de *Eucalyptus grandis*, seco em estufa, em tábuas que permitissem a confecção de vigas de MLC com seção de 8,0 cm x 16,0 cm.

O material obtido através de doação, um lote com 150 tábuas com dimensões de aproximadamente 2,5 cm x 12,0 cm x 260,0 cm, totalizando 1,125 m³, foi levado à UFSC para pré-classificação.

b) Procedência

A madeira utilizada é proveniente de florestas plantadas particulares, localizadas no município de Telêmaco Borba (PR), pertencentes a uma empresa tradicional na produção de papel e celulose. Porém o lote de madeira foi seco e beneficiado por uma outra empresa, parceira da primeira, sendo então transportada ao LEE para o início dos experimentos.

²² As lâminas foram sendo numeradas, em ordem crescente, à medida em que eram retiradas da pilha.

4.2.3 Preparação das lâminas

As lâminas obtidas apresentavam superfícies ligeiramente ásperas e irregulares. Existia também a necessidade de padronizar a altura das lâminas para que se pudesse obter vigas com a altura rigorosamente controlada. Desta forma as lâminas, inicialmente com espessuras na faixa de 2,5 cm a 2,8 cm, tiveram suas espessuras reduzidas a aproximadamente 2,0 cm. Estes procedimentos foram realizados em uma plaina de mesa, de uma face, que permitiu a regularização das superfícies e homogeneização das dimensões das espessuras.

4.2.4 Pré-classificação das lâminas

a) Critério adotado

O critério utilizado para a pré-classificação das lâminas foi o da ordenação pelo valor médio do módulo de elasticidade, representativo da rigidez das lâminas. Além disso algumas lâminas foram eliminadas por apresentarem espessuras inferiores à necessária ou alguma espécie de dano significativo sofrido durante o processo de plainagem, que impediria a colagem.

Segundo a pesquisa desenvolvida por FAGUNDES (1998) a classificação visual pode contribuir para a melhoria da resistência mecânica das vigas, porém a autora coloca este procedimento como uma alternativa preliminar à determinação do módulo de elasticidade das lâminas.

b) Procedimentos utilizados

Após a plainagem, as lâminas foram pré-classificadas visualmente e através do método expedito, conhecido como ensaio de obra. Este ensaio foi realizado da seguinte forma:

- Foram utilizados dois cavaletes de apoio para as tábuas, colocados a uma distância fixa de 2,0 m. Para o apoio das tábuas foram utilizadas duas barras metálicas cilíndricas, com 25,0 mm de diâmetro, permitindo o giro livre no ponto de apoio
- As lâminas foram numeradas, registrando-se as dimensões da seção transversal aferidas em seu ponto central;

- Através de um dispositivo simples de medição dos deslocamentos (flecha) era realizada a medição inicial. Este dispositivo era constituído por uma régua metálica com graduação milimétrica e um sistema de roldanas pelas quais corria um fio de nylon, cuja extremidade, dotada de um pequeno gancho ²³, era presa à lâmina. As roldanas transmitiam o deslocamento provocado pela aplicação de carga, através do fio, suspendendo a régua e permitindo a leitura;

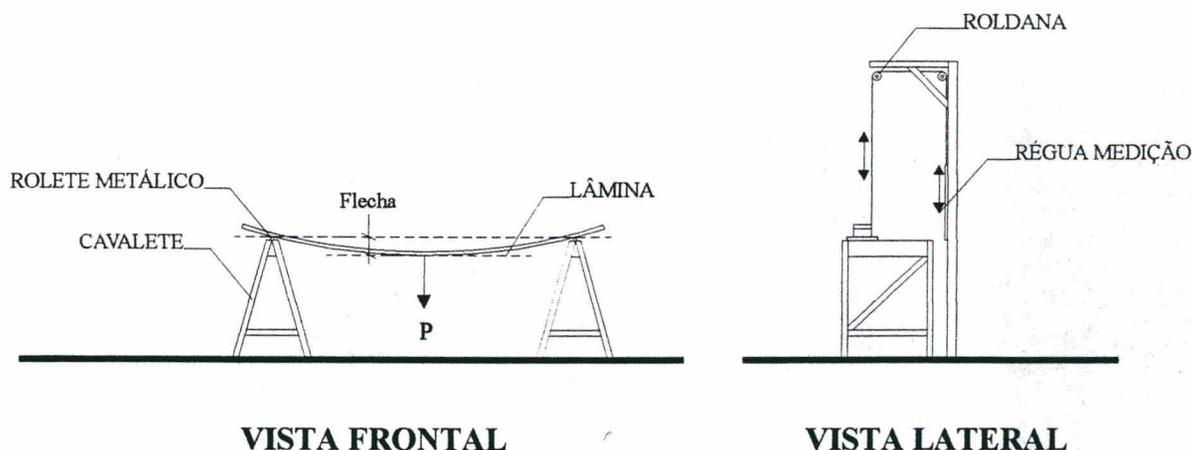


Figura 11 - Esquema de ensaio para a pré-classificação das lâminas

- Conforme a Figura 11, pendurava-se um bloco metálico, de peso conhecido (P) no centro da tábua, produzindo um carregamento pontual no centro do vão. Realizada a medição da flecha, apoiava-se o segundo bloco sobre o primeiro, dobrando a carga inicialmente aplicada, e novamente registrava-se o deslocamento;
- peso dos blocos metálicos foi previamente calculado, de forma a garantir que as cargas aplicadas e seus respectivos valores de deslocamento não ultrapassassem o limite de proporcionalidade na flexão das lâminas. Desta forma, através dos valores de deslocamento, foi possível estimar os módulos de elasticidade das mesmas;
- Realizados os cálculos preliminares, obteve-se junto ao laboratório de análise de solos da UFSC, dois blocos metálicos, originalmente utilizados como contrapeso. Utilizados para a aplicação de carga, os blocos possuíam 15,965 kg e 16,029 kg,

²³ Foi utilizado um anzol comum de pesca.

respectivamente, permitindo a aplicação de carregamentos de 159,65 N e 319,94²⁴ N;

- Esta seqüência de procedimentos era então repetida para o outro lado da lâmina;
- O valor de rigidez das lâminas foi calculado através da fórmula:

$$E_{\text{lâm}} = \frac{P L^3}{48 f I} \quad (4.1)$$

Onde:

$E_{\text{lâm}}$ = módulo de elasticidade da lâmina

P = peso aplicado no centro do vão [N];

L = vão [mm];

f = flecha no centro do vão [mm];

I = inércia da seção da lâmina [mm⁴].

- Os dados obtidos foram analisados e processados com o auxílio de um software do tipo planilha eletrônica. Pôde-se então gerar quatro valores de módulo de elasticidade (dois para cada lado), para cada uma das lâminas. O valor utilizado para a caracterização da rigidez de cada uma das lâminas foi a média dos quatro obtidos nos ensaios;

<i>Lâmina</i>	<i>1° Lado</i>		<i>2° Lado</i>		<i>Média 1° Lado</i>	<i>Média 2° Lado</i>	<i>Média Final</i>
	<i>E1</i>	<i>E2</i>	<i>E1</i>	<i>E2</i>			
1	17546	20063	17985	15701	18804	16843	17824
	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓

Tabela 4 – Cálculo da rigidez das lâminas. Trecho da planilha de cálculo.

- Considerando a rudimentariedade do dispositivo utilizado, estima-se que os dados obtidos tenham apenas valor relativo, ou seja, permitem a ordenação das lâminas.

²⁴ Somatório dos dois pesos.

Por outro lado, não apresenta a confiabilidade necessária para a caracterização do lote, ou seja, para a obtenção de valores característicos absolutos.

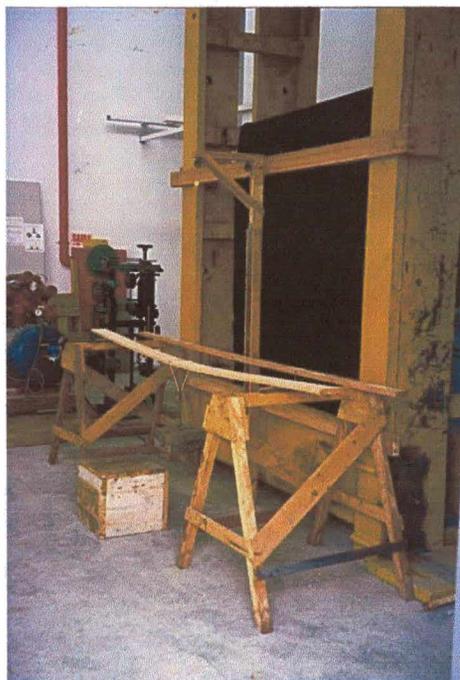


Figura 12 - Dispositivo utilizado p/ pré-classificação das lâminas



Figura 13 - Vista frontal do dispositivo

c) Classificação das lâminas

A utilização de classes de resistência para a caracterização de lotes de madeira de uma determinada espécie é adotada internacionalmente. No Brasil, apesar de normatizada, a classificação da madeira só é praticada em casos muito raros e

específicos. A produção de MLC exige a pré-classificação da madeira que, pela sistemática adotada pela indústria, deve ser ao mesmo tempo prática, rápida e eficiente.

Mesmo tratando-se de um trabalho acadêmico, buscou-se adotar procedimentos que aproximassem a pesquisa à realidade das linhas de produção. O ensaio de obra, aqui utilizado, não é adequado à indústria em razão da baixa produtividade. Para a realização da pré-classificação em escala industrial é necessária a utilização de equipamentos específicos. Entre estes destacam-se as classificadoras eletromecânicas, bastante raras no Brasil em razão de seu elevado custo. Este tipo de equipamento permite testar as lâminas em alta velocidade e com um excelente grau de acuidade. Por este motivo as empresas brasileiras tem adotado formas alternativas de pré-classificação da madeira, baseando-se nas características visuais ou na pesagem das peças.

Como nesta pesquisa foi necessária a utilização de todas as lâminas disponíveis, optou-se por separá-las em apenas duas classes, em função de sua rigidez, seguindo as recomendações de FAGUNDES (1998). Isto resultou na divisão das lâminas em dois grupos, com os maiores e os menores valores de rigidez, sem qualquer outro tipo de ordenação dentro dos grupos.

d) Classificação visual

A quantidade de lâminas disponíveis estava bastante próxima do mínimo necessário para a produção de uma quantidade de vigas que permitisse a análise estatística dos resultados. Além disso ocorreram alguns problemas durante o transporte e plainagem que inutilizaram algumas das lâminas. Por este motivo todas as lâminas foram pré-classificadas para que pudessem ser utilizadas.

Já através da primeira avaliação visual foi possível fazer algumas observações:

- Entre as 150 lâminas disponíveis, 5 delas tiveram que ser descartadas por terem espessura inferior a necessária ou grandes falhas de superfície;
- Entre as 145 utilizáveis, 76 não apresentavam falhas (52%). As 69 restantes apresentavam, basicamente, três tipos de defeitos: rachaduras longitudinais, nós ou curvaturas acentuadas. As rachaduras longitudinais concentravam-se quase sempre nas extremidades das lâminas, não impedindo a utilização das mesmas. As curvaturas observadas, desde que não fossem muito acentuadas, também não

exigiam o descarte das peças. Porém os nós²⁵ (alguns deles transpassantes) certamente criariam pontos de fragilidade interferindo nos resultados dos ensaios;

- Ainda quanto às 69 lâminas com algum defeito, descobriu-se que 31 destas apresentavam problemas que impediam o seu uso horizontal. Mesmo assim, algumas destas lâminas apresentavam os nós ou rachaduras muito próximos às bordas. Estas lâminas, com aproximadamente 10,0 cm de largura poderiam ser reduzidas (até cerca de 6,0 cm) para a composição da porção vertical das vigas dos lotes III e IV, desde que possuíssem a rigidez adequada.

Cabe aqui lembrar que nesta pesquisa não foram utilizadas emendas longitudinais nas vigas. Tal decisão, foi tomada por questões operacionais e no intuito de evitar a inclusão de mais uma variável na análise dos resultados. As emendas longitudinais permitem não apenas a obtenção de lâminas de comprimentos diversos mas também a eliminação de defeitos, como os nós, por exemplo. Conclui-se então que as falhas apresentadas pelas lâminas poderiam ser facilmente eliminadas em condições industriais.

e) Rigidez das lâminas

Como seria necessária a utilização de todas as lâminas disponíveis, optou-se por dividi-las em dois grupos: o dos maiores e o dos menores valores de rigidez na flexão. O marco divisor entre as duas classes acabou sendo a quantidade de lâminas necessárias para a montagem das vigas segundo o arranjo proposto. As classes determinadas a partir dos valores obtidos foram as seguintes:

- **Classe A** – Lâminas com os maiores valores de rigidez [MPa]

> Valor	< Valor	Valor Médio	N.º de Lâminas
23292	17223	19360	79

Tabela 5 - Dados rigidez das lâminas da Classe A

- **Classe B** – Lâminas com os menores valores de rigidez [MPa]

> Valor	< Valor	Valor Médio	N.º de Lâminas
17205	13139	15699	66

Tabela 6 - Dados rigidez das lâminas da Classe B

²⁵ Quando localizados na parte central das lâminas.

4.3 MODELOS ADOTADOS

4.3.1 Descrição

As vigas foram agrupadas em quatro lotes, descritos a seguir:

- **Lote I:** Composto por nove vigas maciças de angelim pedra;
- **Lote II:** Seis vigas em madeira laminada colada de eucalipto, possuindo seção convencional, com lâminas dispostas horizontalmente, uma sobre a outra. As dimensões finais da seção transversal das vigas são 8,0 cm x 16,0 cm;

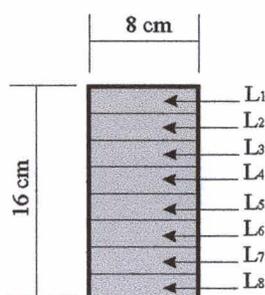


Figura 14 - Modelo da seção transversal das vigas laminadas horizontalmente.

- **Lote III:** Seis vigas em madeira laminada colada multidirecional de eucalipto, possuindo seção composta por lâminas dispostas em duas direções, horizontal e vertical. As lâminas dispostas verticalmente encontram-se no quarto inferior da seção, como mostrado na figura;

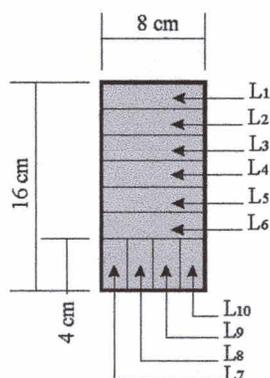


Figura 15 - Modelo da seção transversal das vigas laminadas multidirecionalmente.

- **Lote IV:** Três vigas em madeira laminada colada multidirecional de eucalipto, reforçada com fibra de vidro. As vigas deste lote possuem seção e composição idêntica às do Lote III, porém foram introduzidas mechas de fibra de vidro dispostas dentro da linha de cola, entre as lâminas verticais. A forma de colocação das fibras está detalhada no item 4.4.3;

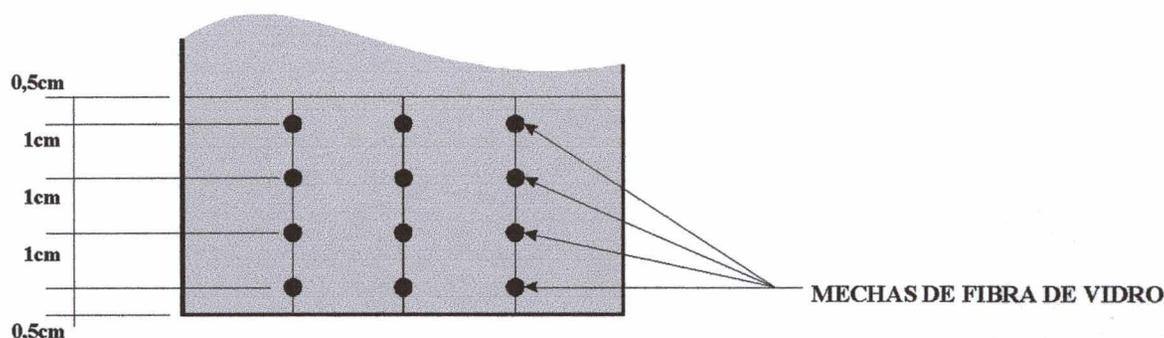


Figura 16 - Esquema de disposição das mechas de fibra de vidro.

4.3.2 Composição racional da seção transversal

A composição racional da seção transversal de vigas em MLC é um fator decisivo na maximização do potencial apresentado pela técnica. Ela consiste basicamente na montagem das vigas, dispondo-se as lâminas de maior rigidez nas regiões mais solicitadas da seção. Tal procedimento permite a obtenção de vigas com rigidez maior do que a rigidez média das lâminas que as compõe.

a) Contribuição das lâminas para a inércia total da seção

Já existe um grande número de pesquisas que tratam da contribuição individual das lâminas para a inércia total da seção transversal de uma viga em MLC. O método descrito a seguir aparece em algumas destas pesquisas, apresentando resultados confiáveis:

- Calcula-se a inércia individual de cada uma das lâminas através de :

$$I_i = I_0 + A_i \cdot (d_i^2) \quad (4.2)$$

onde:

I_i é o momento de inércia da lâmina “i” em relação à linha neutra da viga;

I_0 é o momento de inércia da lâmina “i” em relação a seu próprio eixo;

A_i é a área da seção transversal da lâmina “i”; e

d_i é a distância do centro geométrico da lâmina e a linha neutra da viga.

- A partir dos dados das lâminas obtém-se o valor da inércia total da viga através da expressão:

$$I_{\text{total}} = \sum_{i=1}^n (I_i) \quad (4.3)$$

onde

I_{total} é a inércia total da seção transversal da viga;

I_i é a inércia de cada uma das lâminas “i”; e

n é o número de lâminas por viga.

Considerando o número de lâminas, a geometria e as dimensões das vigas ensaiadas neste trabalho, obtém-se os seguintes valores percentuais de participação da inércia de cada lâmina em relação à inércia total:

- **Lote II**

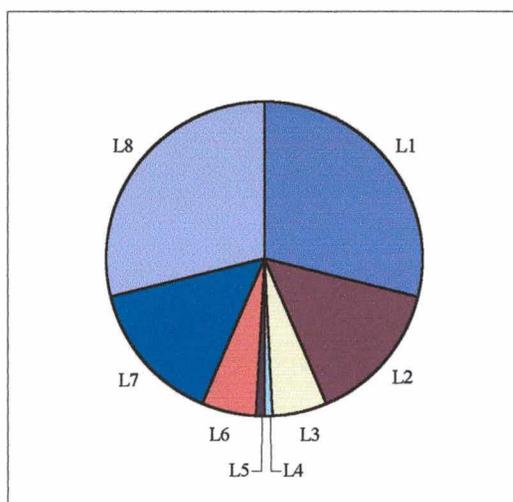


Figura 17 - Participação percentual das lâminas em relação a inércia total da seção.

Onde:

$$I_{L1}=I_{L8}=28,91\%$$

$$I_{L1}=I_{L7}=14,84\%$$

$$I_{L3}=I_{L6}=5,47\%$$

$$I_{L4}=I_{L5}=0,78\%$$

- **Lote III**

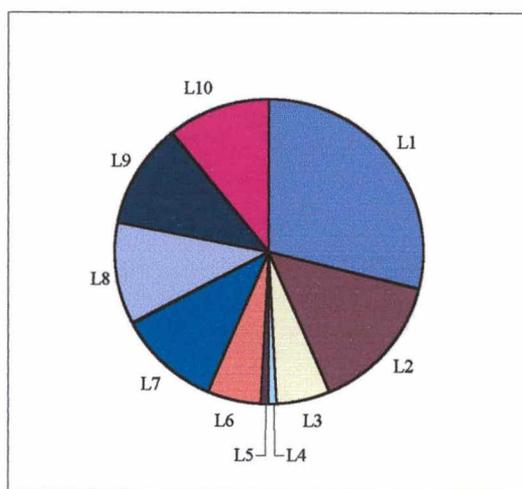


Figura 18 - Participação percentual das lâminas em relação a inércia total da seção.

Onde:

$$I_{L1}=28,91\%$$

$$I_{L2}=14,84\%$$

$$I_{L3}=I_{L6}=5,47\%$$

$$I_{L4}=I_{L5}=0,78\%$$

$$I_{L7}=I_{L8}=I_{L9}=I_{L10}=10,94\%$$

Seja através dos gráficos, seja através dos dados numéricos, pode-se observar que as lâminas mais afastadas da linha neutra são responsáveis pela maior parte da inércia total da viga (87,5%). Isto é ilustrado pelo gráfico a seguir:

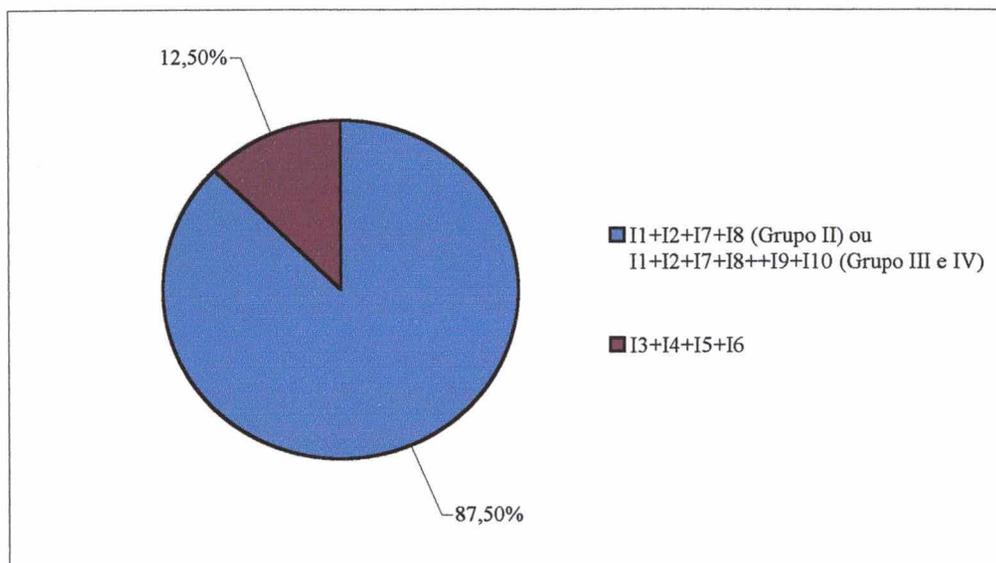


Figura 19 - Participação percentual das 4 lâminas externas (quartos inferior e superior da seção) em relação às 4 lâminas internas.

Desta forma fica evidenciada a importância da utilização das lâminas de maior rigidez e resistência nas regiões mais solicitadas, ou seja, nos quartos inferior e superior da seção transversal. Isto é o que chama-se de composição racional da seção transversal de vigas em MLC. Em outras palavras, ela consiste em utilizar a madeira de melhor qualidade onde é mecanicamente mais necessária. Obtém-se desta forma peças com seções idênticas às de madeira maciça porém com um desempenho mecânico superior.

b) Utilização das classes na composição das seções

Considerando a participação percentual de cada lâmina na resistência da seção total e a divisão das lâminas em duas classes de rigidez, dispôs-se as lâminas dos lotes II, III e IV da seguinte forma:

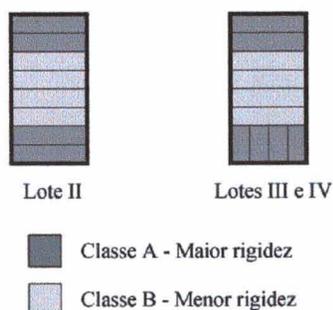


Figura 20 – Composição das vigas dos Lotes II, III e IV

4.4 FABRICAÇÃO DAS VIGAS

Como as vigas de angelim foram adquiridas nas dimensões finais para os ensaios este item ficará restrito à descrição da fabricação das vigas de MLC em eucalipto *grandis*.

A fabricação de vigas em MLC exige a utilização de equipamentos e instalações apropriadas. Para a realização desta pesquisa obteve-se o apoio da empresa Battistella, instalada em Lajes (SC), que gentilmente disponibilizou os equipamentos necessários à fabricação das vigas.

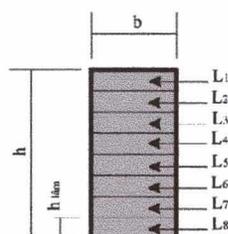
4.4.1 Composição das vigas

As lâminas pré-classificadas foram separadas de acordo com a classe a que pertenciam.

As lâminas foram levadas à empresa Battistella tendo sido previamente ordenadas e agrupadas conforme o critério estipulado no item 4.3.2. Isto significa que os arranjos levaram em conta apenas a classe na qual cada lâmina havia sido enquadrada, não havendo interferência de outros fatores. Houve apenas um porém. Foi necessário separar um pequeno grupo de lâminas pertencentes à Classe A e que possuíam defeitos próximos a borda limitando a sua largura efetiva. Estas lâminas foram utilizadas exclusivamente na composição das porções verticais das vigas dos lotes III e IV, como descrito no item 4.3.1. Há que se mencionar que algumas lâminas, na mesma situação, foram descartadas por pertencerem à Classe B.

Os arranjos realizados e os módulos de elasticidade teóricos estão descritos a seguir:

- **Lote II** – MLC convencional



CÓDIGO	b	h	h lâm	Li	Núm./ Classe	Ei	E teórico da viga
	[mm]					[N/mm ²]	

V1 H	77	157	19,625	L1	096 / A	18720	18205
				L2	088 / A	18382	
				L3	012 / B	15796	
				L4	003 / B	14006	
				L5	013 / B	15737	
				L6	004 / B	14899	
				L7	092 / A	18811	
				L8	087 / A	18550	

V2 H	77	157	19,625	L1	097 / A	23292	20909
				L2	002 / A	22544	
				L3	100 / B	16963	
				L4	011 / B	15979	
				L5	027 / B	15148	
				L6	098 / B	16129	
				L7	080 / A	20030	
				L8	041 / A	20078	

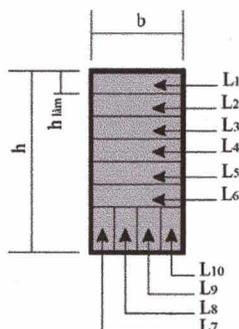
V3 H	77	158	19,75	L1	001 / A	17824	17657
				L2	042 / A	18242	
				L3	010 / B	14255	
				L4	108 / B	15241	
				L5	106 / B	16180	
				L6	030 / B	14057	
				L7	047 / A	18503	
				L8	046 / A	18187	

V4 H	77	158	19,75	L1	006 / A	17911	19209
				L2	102 / A	18742	
				L3	009 / B	16187	
				L4	034 / B	16611	
				L5	110 / B	16415	
				L6	031 / B	15228	
				L7	007 / A	22412	
				L8	045 / A	20572	

V5 H	77	156	19,5	L1	101 / A	18163	20016
				L2	049 / A	21910	
				L3	112 / B	17024	
				L4	039 / B	15549	
				L5	033 / B	15063	
				L6	037 / B	15236	
				L7	044 / A	19828	
				L8	005 / A	22716	

V6 H	77	157	19,625	L1	105 / A	18858	19165
				L2	104 / A	23118	
				L3	043 / B	15818	
				L4	114 / B	16248	
				L5	115 / B	16532	
				L6	008 / B	15070	
				L7	051 / A	18721	
				L8	018 / A	19228	

• **Lote III – MLC Multidirecional**



CÓDIGO	b	h	h lâm	Li	Núm./ Classe	Ei	E teórico da viga
							[N/mm ²]

V1 V	77	158	19,75	L1	017 / A	17300	18486
				L2	016 / A	20508	
		b lâm.vert		L3	019 / B	16605	
		19,25		L4	120 / B	15257	
				L5	048 / B	16051	
				L6	118 / B	16895	
				L7	014 / A	21723	
				L8	052 / A	19377	
				L9	095 / A	16620	
				L10	141 / A	18757	

V2 V	77	158	19,75	L1	107 / A	18712	18327
				L2	058 / A	17704	
			b läm.vert	L3	055 / B	16843	
			19,25	L4	124 / B	15224	
				L5	127 / B	15612	
				L6	015 / B	18751	
				L7	082 / A	19048	
				L8	076 / A	19272	
				L9	071 / A	17802	
				L10	073 / A	17963	

V3 V	77	158	19,75	L1	109 / A	18169	19069
				L2	057 / A	21028	
			b läm.vert	L3	061 / B	14707	
			19,25	L4	064 / B	15057	
				L5	059 / B	16404	
				L6	060 / B	16102	
				L7	079 / A	20654	
				L8	084 / A	18667	
				L9	078 / A	20703	
				L10	085 / A	20109	

V4 V	77	158	19,75	L1	062 / A	19665	18882
				L2	056 / A	17688	
			b läm.vert	L3	129 / B	16034	
			19,25	L4	021 / B	15623	
				L5	126 / B	15891	
				L6	050 / B	15970	
				L7	032 / A	17959	
				L8	028 / A	21146	
				L9	029 / A	18087	
				L10	026 / A	21213	

V5 V	77	158	19,75	L1	117 / A	17223	18163
				L2	066 / A	19788	
			b läm.vert	L3	067 / B	16675	
			19,25	L4	074 / B	16568	
				L5	068 / B	15987	
				L6	063 / B	16242	
				L7	035 / A	18317	
				L8	140 / A	18049	
				L9	036 / A	18376	
				L10	022 / A	20167	

V6 V	77	158	19,75	L1	123 / A	18362	18952	
				L2	072 / A	18629		
			b lâm.vert	L3	083 / B	14428		
			19,25	L4	025 / B	15210		
				L5	131 / B	14592		
				L6	130 / B	17205		
				L7	040 / A	18463		
				L8	103 / A	22484		
				L9	111 / A	19250		
				L10	053 / A	21316		

• Lote IV – MLC Multidirecional Reforçada com fibra de vidro ²⁶

CÓDIGO	b	h	h lâm	Li	Núm./ Classe	Ei	E teórico da viga
	[mm]					[N/mm ²]	

V7 VR	77	158	19,75	L1	122 / A	18057	18283	
				L2	125 / A	17949		
			b lâm.vert	L3	135 / B	13139		
			19,25	L4	091 / B	14886		
				L5	133 / B	13871		
				L6	086 / B	17063		
				L7	115 / A	16532		
				L8	099 / A	21825		
				L9	116 / A	20415		
				L10	070 / A	19147		

V8 VR ²⁷	77	154	19,75	L1	020 / A	19298	19704	
				L2	128 / A	17489		
			b lâm.vert	L3	143 / B	15645		
			19,25	L4	090 / B	16966		
				L5	137 / B	14506		
				L6	138 / B	15844		
				L7	038 / A	17228		
				L8	038 / A	17228		
				L9	077 / A	19813		
				L10	077 / A	19813		

²⁶ Considerou-se apenas a madeira, sem levar em conta a participação da fibra de vidro.

²⁷ Observa-se que as lâminas 38 e 77 aparecem repetidas na composição da porção vertical da viga. Isto ocorre porque estas possuíam largura suficiente para serem divididas longitudinalmente, gerando duas peças cada.

V9 VR	77	158	19,75	L1	134 / A	19776	18921
				L2	023 / A	17387	
			b lâm.vert	L3	139 / B	16945	
			19,25	L4	075 / B	15509	
				L5	089 / B	15855	
				L6	142 / B	14188	
				L7	149 / A	19047	
				L8	148 / A	21395	
				L9	145 / A	21522	
				L10	081 / A	17364	

4.4.2 Fabricação das vigas

A fabricação das vigas se deu segundo as especificações constantes na bibliografia especializada. Porém como as vigas foram prensadas numa empresa fabricante de MLC foi levado-se em consideração a sua metodologia de trabalho que, em alguns pontos, diferia do recomendado. Tais diferenças serão apontadas através do texto.

a) Preparação e aplicação da cola

A cola Cascophen RS-216-M, do tipo resorcinol-formol, fabricada pela Alba Química, foi preparada seguindo as recomendações do fabricante. Foram utilizados 180,0 g de cola por metro quadrado de superfície de linha de cola. Esta quantidade mostrou-se adequada tanto para a aplicação através da encoladeira mecânica quanto para a manual. A cola é fornecida em duas partes, a cola e o preparado endurecedor (FM-60-M), que devem ser misturadas até a sua homogeneização, na proporção de cinco partes de cola para uma parte de endurecedor. A partir deste momento a cola está pronta para o uso exigindo que a colagem seja realizada em até 15 minutos²⁸. Por este motivo era necessário dispor as lâminas maneira que a cola pudesse ser aplicada o mais rápido possível. Para auxiliar neste processo foi utilizada uma máquina encoladeira que permite a aplicação de cola em uma das faces, para as lâminas superior e inferior, ou em ambas as faces para as demais lâminas.

A aplicação de cola nas lâminas das vigas dos Lotes II e III transcorreu sem que houvessem quaisquer problemas. Porém as vigas do Lote IV exigiam a utilização de

²⁸ À temperatura ambiente de 20° C.

uma encoladeira manual em função da necessidade da colocação das mechas de fibra de vidro, dentro da linha de cola. Este processo exigiu um pouco de esforço por parte da equipe já que a aplicação da cola de forma manual é bastante mais demorada.

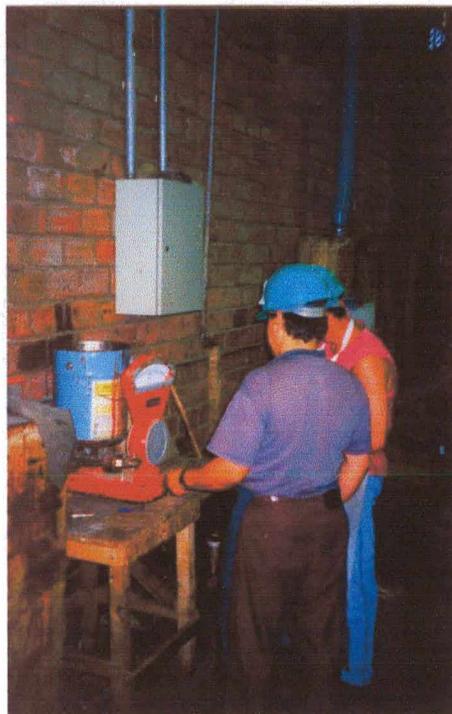


Figura 21 - Preparação da cola

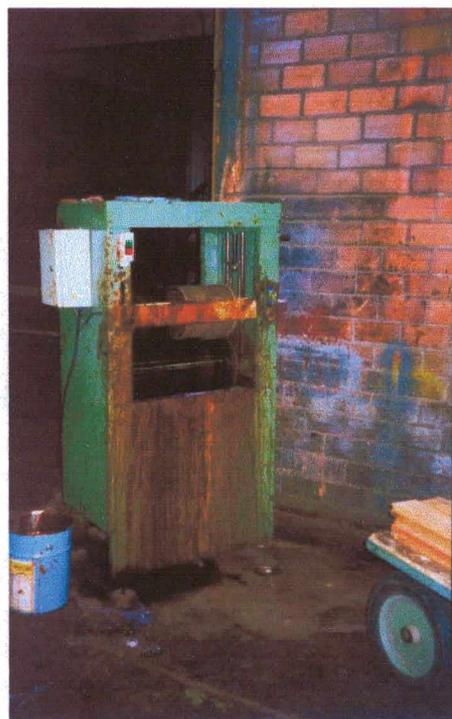


Figura 22 – Encoladeira mecânica



Figura 23 – Aplicação da cola

4.4.3 Aplicação da fibra de vidro

A idéia de utilização da fibra de vidro vem da sua resistência a tração superior à da madeira. A colocação da fibra de vidro prensada na linha de cola entre as lâminas tracionadas, faz com que os diferentes materiais trabalhem em conjunto, como um novo material. Nesta pesquisa espera-se que a utilização das fibras contribua para o aumento da resistência das vigas. Porém, para tanto, adotou-se realizar esta análise apenas empiricamente, verificando a existência de alterações no comportamento mecânico das vigas do Lote IV. Por este motivo este lote apresenta apenas três vigas, número mínimo de repetições para uma verificação simplificada.

A fibra de vidro utilizada foi gentilmente cedida pela empresa Owens Corning do Brasil, sob forma de mechas, sem que se pudesse obter dados técnicos mais apurados sobre o material. Foram utilizados nove mechas por viga dispostas como na fig. 16.

Através de diversas outras pesquisas realizadas no LEE – UFSC, observou-se que a utilização de fibra de vidro, seja sob forma de fios ou tecido, resulta numa perfeita solidarização entre a madeira, a cola e a própria fibra.

Contudo, neste experimento, a fibra de vidro deveria ser disposta longitudinalmente à viga exigindo um posicionamento exato para garantir o funcionamento do sistema. Além disso as mechas deveriam ser perfeitamente esticadas para que não restasse nenhuma “folga”, que permitisse à madeira alongar-se antes da fibra de vidro. Seria ainda desejável protensionar a fibra imediatamente antes da aplicação final da pressão de colagem, porém não havia espaço suficiente para realizar a protensão na prensa utilizada. Por este motivo as mechas foram dispostas manualmente, de forma contínua, após a fixação de suas pontas na extremidade de uma das lâminas externas.

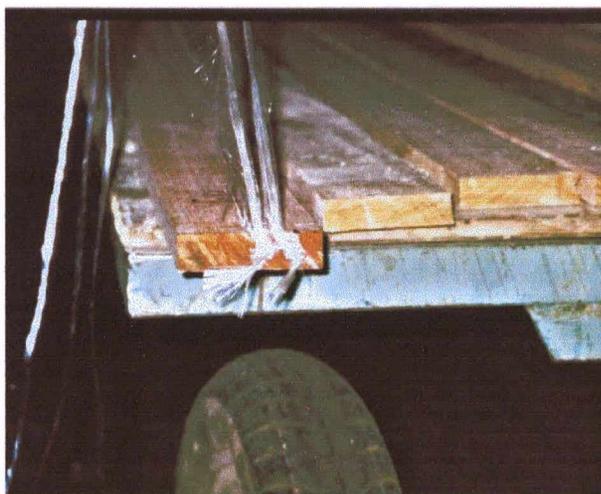


Figura 24 - Fixação das mechas à extremidade da lâmina externa



Figura 25 - Lâminas preparadas para aplicação da cola



Figura 26 - Mechas posicionadas sobre as lâminas já com a cola aplicada

Posteriormente a colocação das mechas os conjuntos de lâminas foram conduzidos à prensa seguindo os mesmos procedimentos adotados para as demais peças.

Foram verificados alguns problemas em razão do procedimento manual adotado na colocação das mechas. Em primeiro lugar observou-se uma grande dificuldade na disposição das mechas de forma absolutamente regular e precisa. Tal dificuldade, associada a utilização da encoladeira manual, fez com que o tempo de preparação das peças para a prensagem se estendesse, aproximando-se do máximo admissível. Tal fato demonstrou a necessidade de aperfeiçoamento do procedimento para viabilizar sua utilização em escala industrial.

4.4.4 Prensagem das vigas

A prensagem das vigas foi realizada em uma prensa projetada e manufaturada especialmente para a fabricação de vigas de madeira laminada colada. O dispositivo é composto por:

- um berço, onde são colocadas as lâminas;

- um conjunto de sapatas de aplicação de pressão. A pressão é aplicada manualmente através de um torquímetro²⁹, pela ação de parafusos;
- um dispositivo de aplicação de pressão lateral, para garantir a perfeita justaposição das lâminas. Sistema dotado de uma trave lateral para aplicação de pressão lateral nas vigas.



Figura 27 - Prensa já com algumas lâminas dispostas

Antes da prensagem das vigas realizou-se a aferição da pressão de colagem com o auxílio de um anel dinamométrico. Registrou-se o valor apresentado pelo torquímetro e a respectiva medição de deformação do anel. Concluiu-se que seria necessária a aplicação de um torque de 30 kgf.m no parafuso, para a obtenção uma força de cinco toneladas (5,0 t) em cada sapata. Como cada sapata possuía uma área de 50, 0 cm² atingiria-se uma pressão de 10,0 kg/cm², pressão ideal para a colagem. Porém segundo um técnico da empresa, nesta prensa, o torque utilizado deve girar em torno de 70 kg/cm², sendo que valores inferiores provocariam falhas de colagem. Por questões metodológicas adotou-se o critério sugerido pela empresa, certificando-se de que a bibliografia faz referência a uma pressão mínima e não a uma máxima.

Por questões operacionais decidiu-se realizar a prensagem das vigas em duas etapas. Na primeira etapa foram prensadas as vigas do *Lote II* e as partes superiores e inferiores dos *Lotes III e IV*, separadamente. Após a retirada da prensa as

²⁹ Marca Gedore, modelo RL 600 e escala de até 80,0 kgf.m.

partes laminadas verticalmente exigiram uma plainagem preliminar, para garantir o paralelismo entre suas superfícies e as das partes laminadas horizontalmente. Na segunda etapa realizou-se a solidarização das partes das vigas dos lotes III e IV.

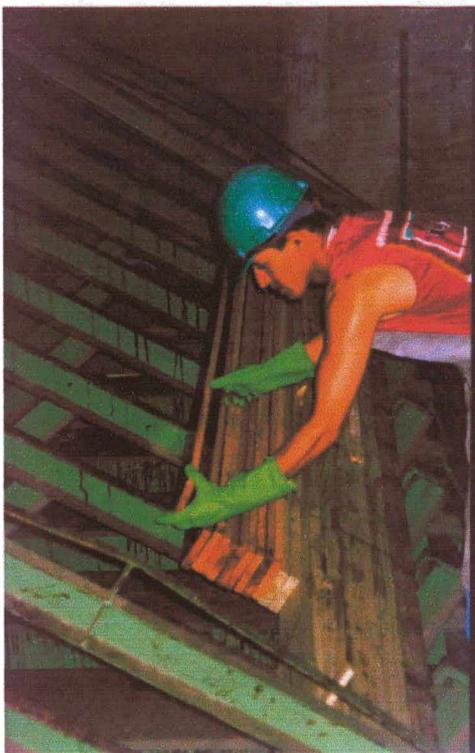


Figura 28 - Preparação para a prensagem

O intervalo entre a prensagem e a retirada das vigas da prensa foi de 12 horas, tempo que, segundo o fabricante da cola, permite atingir níveis adequados de resistência de colagem.

4.4.5 Acabamento das vigas

A fase final da fabricação das vigas foi a plainagem de suas laterais, garantindo a regularização da geometria da seção e o bom acabamento estético das peças.

Para tanto foi utilizada uma plaina de mesa, de uma face, que permitiu a redução da largura das peças e a regularização das superfícies laterais.

As vigas maciças de angelim (Lote I) também tiveram suas laterais aplainadas, o que definiu uma largura padrão para todas as vigas ensaiadas.

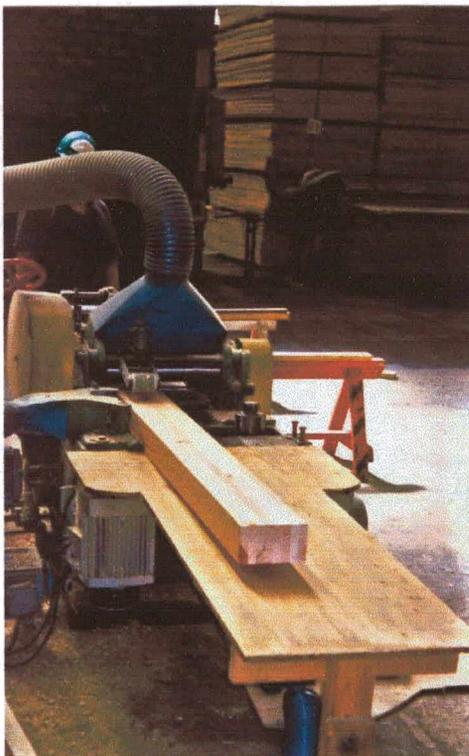


Figura 29 - Plainagem da lateral das vigas

Por fim com a utilização de uma serra destopadeira reduziu-se o comprimento das vigas para 2,50 m. Apenas a viga *V9 VR* foi reduzida a 2,35 m, dimensão diferente das demais, por ter sido composta com algumas lâminas mais curtas que as demais.

4.5 ENSAIO DAS VIGAS

Os ensaios das vigas foram realizados no Laboratório de Experimentação de Estruturas da UFSC.

4.5.1 Procedimentos de ensaio

Diversos ensaios de flexão de vigas de madeira já foram realizados no LEE com os mesmos equipamentos utilizados nesta pesquisa. Isto facilitou em muito a realização dos ensaios em razão do *know how* adquirido.

Os passos seguidos na preparação dos ensaios foram os seguintes:

- As vigas tiveram o seu centro, linha neutra e a posição dos atuadores e apoios previamente marcados para facilitar o posicionamento das vigas;
- Foram realizadas duas perfurações na linha neutra das vigas, alinhadas com a posição dos apoios, para a passagem de uma barra metálica com rosca. Nesta foram acopladas roldanas que serviram de apoio às réguas metálicas para fixação dos extensômetros;
- As vigas eram então conduzidas ao carrinho de ensaio onde era feita a montagem completa dos sistemas de medição de deslocamento. Depois disso o carrinho era posicionado para a realização dos últimos ajustes;
- Após terem sido realizadas todas as conexões do sistema de aquisição de dados iniciava-se o ensaio.

O ensaio era constituído de duas etapas. Na primeira realizava-se a aplicação de carga até 2,0 t para permitir a acomodação do sistema, retirando o carregamento logo em seguida. A segunda etapa consistia no carregamento da viga até a ruptura. O carregamento foi de forma lenta e isotônica. O registro dos dados de carga e deslocamento foi realizado de forma automática, através de uma fonte digital de aquisição de dados conectada à célula de carga e aos dois extensômetros. Por questões de segurança as réguas e os extensômetros eram retirados quando atingia-se a carga de 4,0 t³⁰, tendo sido já registrados os dados necessários à determinação da rigidez das vigas.

Finalizado o ensaio, as vigas eram retiradas da prensa para que se fizesse uma avaliação da forma como ocorreu a ruptura.

4.5.2 Arranjo utilizado nos ensaios

O arranjo utilizado deveria permitir a determinação da resistência e rigidez das vigas. Optou-se pelo ensaio de flexão à quatro pontos, tradicionalmente sugerido para o ensaio de vigas de madeira. Esta configuração permite a simulação de flexão pura no trecho localizado entre os atuadores. Neste trecho observa-se a ocorrência do momento fletor máximo e constante.

³⁰ Cerca de 60 % da carga estimada para a ruptura.

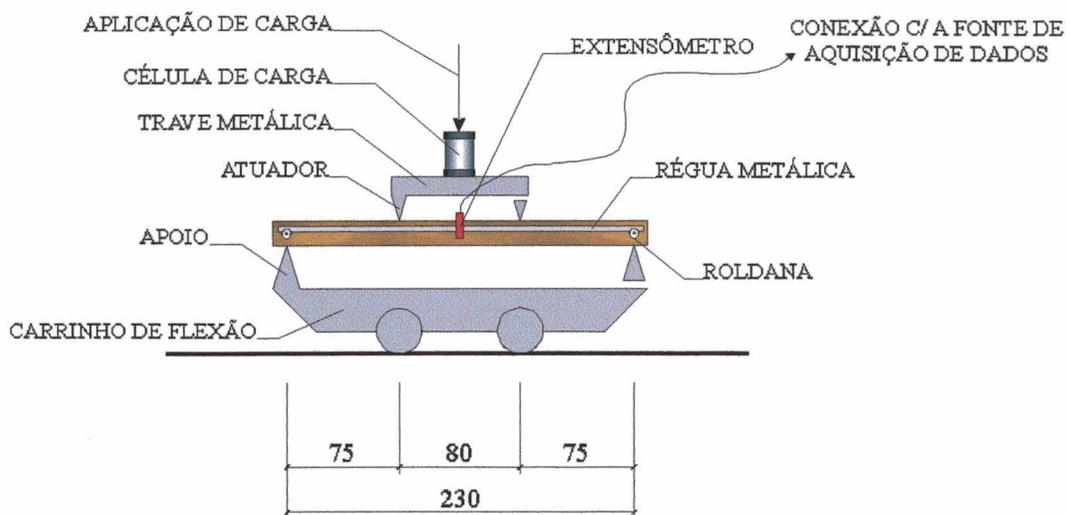


Figura 30 - Arranjo utilizado nos ensaios

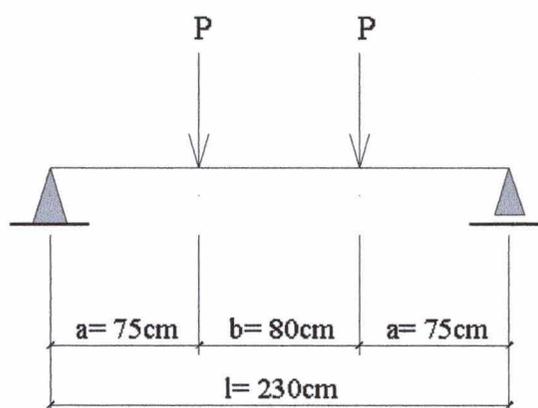


Figura 31 - Esquema de carregamento dos ensaios

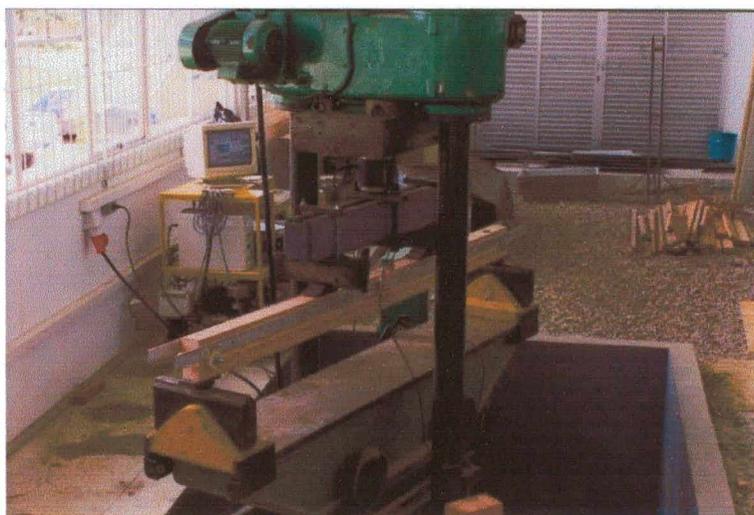


Figura 32 – Vista geral dos dispositivos de ensaio montados no LEE

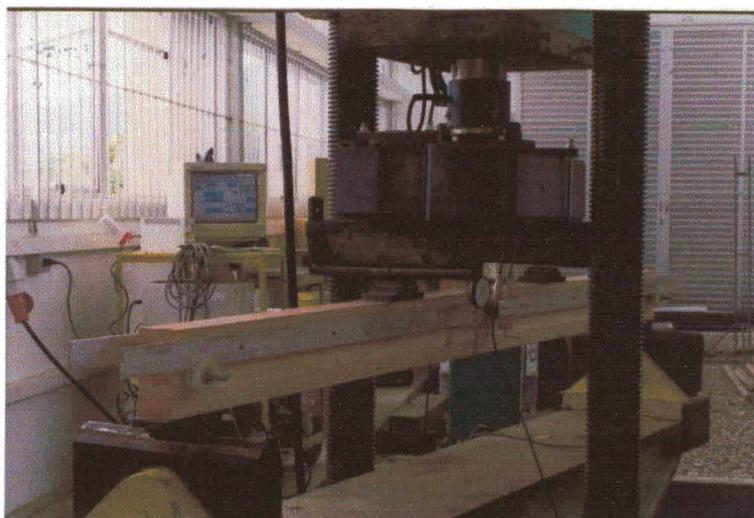


Figura 33 – Ensaio de uma viga de *Eucalyptus grandis* em MLC

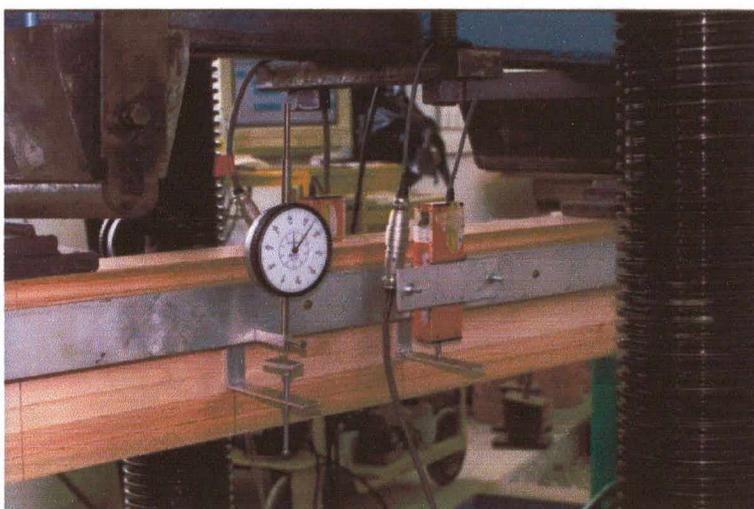


Figura 34 – Detalhe dos dispositivos de medição dos deslocamentos

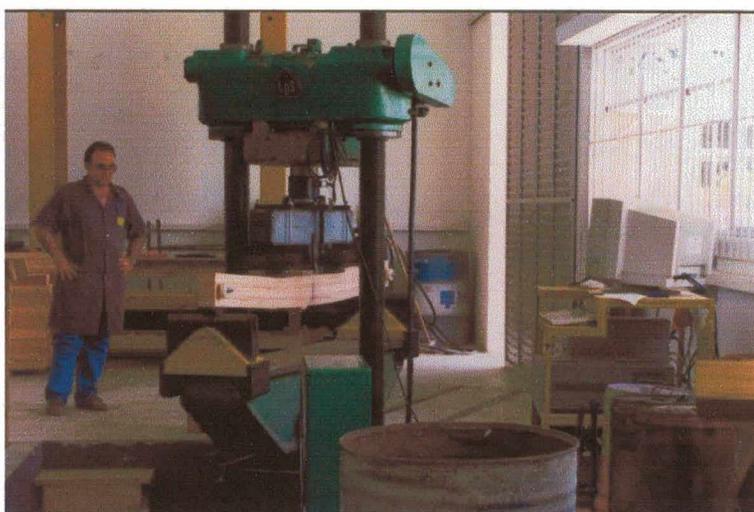


Figura 35 – Ensaio de viga próxima da ruptura

4.5.3 Procedimentos de cálculo

Como já foi mencionado o registro dos dados foi feito de forma automática através de uma fonte de aquisição de dados. Este dispositivo transmitia os dados ao microcomputador gerando um arquivo, para cada viga, nos quais eram registrados o número de ordem da medição, a carga aplicada à viga e o deslocamento medido pelos dois extensômetros. Estes arquivos eram então importados por um software do tipo planilha eletrônica, onde foram realizados os cálculos e gráficos necessários à análise.

Segundo BODIG e JAYNE (1992), a flexão introduz um complexo padrão tridimensional, envolvendo esforços de tração, compressão e cisalhamento, os quais analisados, permitem a caracterização mecânica do material.

a) Cálculo da resistência

A resistência à flexão é um valor relativo a máxima tensão que pode atuar em uma viga, submetida a esforços de flexão simples. Considerando-a como material elástico o valor de resistência é dado pela fórmula:

$$f_M = \frac{M_{\text{máx}}}{W_e} \quad (4.4)$$

onde:

- f_M é a resistência convencional das vigas à flexão, em [N/mm² ou MPa];
- $M_{\text{máx}}$ é momento máximo aplicado a viga em [N.mm];
- W_e é o módulo de resistência elástico dado por $W_e = \frac{b \cdot h^2}{6}$ (4.5)³¹, em [mm³].

De posse dos dados referentes a resistência de cada viga realizou-se uma análise estatística para verificar a existência da espuriedade e a normalidade dos dados.

A resistência à flexão das vigas de cada um dos lote é representada pelo valor característico de resistência calculado através da seguinte fórmula:

$$f_{M,K} = \left(2 \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_{\frac{n}{2}-1} - x_{\frac{n}{2}}}{\frac{n}{2} - 1} \right) 1,1 \quad (4.6)$$

³¹ “b” e “h” correspondem respectivamente à base e à altura da seção transversal da viga em [mm].

onde:

- $f_{M,K}$ é a resistência característica das vigas à flexão;
- x_1 a x_n são os valores de resistência encontrados nos ensaios, onde $x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_n$;
- n é o número de vigas do lote.

No caso de o número de dados ser ímpar despreza-se o maior valor. Não se adota para $f_{M,K}$ valor inferior a 70 % do valor médio (x_m).

b) Cálculo da rigidez

A rigidez na flexão é representada pelo módulo de elasticidade transversal obtido nos ensaios. A idéia de rigidez diz respeito à relação entre a capacidade do material em receber esforços e a sua deformação. No caso da madeira tal conceito se torna ainda mais significativo ao observarmos que, no dimensionamento de vigas à flexão, o limite imposto pelo cálculo da flecha máxima admissível é o fator restritivo em grande parte dos casos. Isto nos revela a importância da busca por alternativas que sejam capazes de aumentar a rigidez de peças de madeira submetidas a flexão.

A rigidez da madeira à flexão é caracterizada pelo módulo de elasticidade determinado dentro do limite de proporcionalidade do material. Porém, segundo a bibliografia consultada, nos casos em que a relação entre o vão entre apoios e a altura da viga é menor que 18, é necessário considerar a dos esforços cisalhantes na composição da flecha total para obter o módulo de elasticidade real. Nestes casos a flecha total é, na realidade, um somatório da flecha devida ao momento fletor e aquela devida ao cisalhamento. Desconsiderando-se o cisalhamento obteria-se, no cálculo da rigidez, um módulo de elasticidade apenas aparente. Para este estudo temos:

- Vão= 230,0 cm
- $h_{\text{vigas}} = 16,0$ cm
- $\text{Vão} \div h_{\text{vigas}} = 14,375$, que é < 18 , portanto é necessário considerar os esforços de cisalhamento.

A fórmula para o cálculo da flecha, no ensaio à quatro pontos, considerando a parcela relativa ao cisalhamento é:

$$f = \frac{P a}{24 E_{M,0} I} (3l^2 - 4a^2) + \frac{\eta P a}{G A} \quad (4.7)$$

Considerando que o módulo de elasticidade transversal (G) é equivalente a 1/20 do longitudinal (E) e isolando-se a variável do módulo de elasticidade longitudinal, obtém-se a seguinte equação:

$$E_{M,0} = \frac{P a}{f} \left(\frac{3l^2 - 4a^2}{24I} + \frac{20 \eta}{A} \right) \quad (4.8)$$

Onde:

- “ $E_{M,0}$ ” é o módulo de elasticidade longitudinal da viga;
- “ f ” é o valor da flecha correspondente a carga atuante;
- “ P ” é uma das forças atuantes na viga, equivalente à metade da carga imprimida pela prensa;
- “ a ” é a distância entre os apoios e os atuadores;
- “ l ” é o vão entre os apoios;
- “ η ” é o coeficiente de forma da seção transversal das vigas. Adotou-se $\eta = 1,2$ para a seção retangular das vigas (TIMOSHENKO e GERE, 1999);
- “ A ” e “ I ” são a área e o momento de inércia da seção transversal da viga.

Optou-se por utilizar os valores de carga e flecha relativos a 50 % da carga total, desta forma garante-se que valores adotados se encontram dentro da fase elástica do material. Os valores das flechas foram calculados através da equação de regressão, aplicada aos dados registrados. A utilização das equações de regressão se mostrou absolutamente viável pois em todos os ensaios observou-se um excelente ajuste das linhas de tendência às curvas carga \times deformação.

Do mesmo modo que os valores de resistência os valores dos módulos de elasticidade das vigas passaram por uma análise estatística para verificar a existência da escuriedade e a normalidade dos dados. Para a caracterização da rigidez dos lotes foi utilizado o valor médio dos módulos de elasticidade das vigas.

4.5.4 Resultados dos ensaios

a) Resistência das vigas

Lote I – Angelim pedra – Vigas maciças

Código Viga	Tensão de Ruptura	Valor Característico
	[MPa]	$f_{M,K,I} = 55,54$ [MPa]
V1-M	53,61	
V2-M	63,11	
V3-M	61,71	Valor Médio
V4-M	65,09	$f_{M,m,I} = 62,00$ [MPa]
V5-M	65,55	
V6-M	69,09	
V7-M	57,91	Desvio Padrão
V8-M	65,16	4,9767
V9-M	56,78	

- Lote II – Eucalipto *grandis* – Laminação convencional**

Código Viga	Tensão de Ruptura	Valor Característico
	[MPa]	$F_{M,K,II} = 66,63$ [MPa]
V1-H	66,52	
V2-H	83,55	
V3-H	80,43	Valor Médio
V4-H	67,34	$F_{M,m,II} = 74,52$ [MPa]
V5-H	73,28	
V6-H	76,01	
		Desvio Padrão
		6,8681

- Lote III – Eucalipto *grandis* – Laminação vertical**

Código Viga	Tensão de Ruptura	Valor Característico
	[MPa]	$f_{M,K,III} = 64,97$ [MPa]
V1-V	72,82	
V2-V	68,91	
V3-V	64,13	Valor Médio
V4-V	67,34	$f_{M,m,III} = 67,09$ [MPa]
V5-V	67,19	
V6-V	62,12	
		Desvio Padrão
		6,8681

- **Lote IV** – Eucalipto *grandis* – Laminação vertical com reforço em fibra de vidro

Código Viga	Tensão de Ruptura	Valor Característico
	[MPa]	$f_{M,K,IV} = 58,50$ [MPa]
V7-VR	76,48	
V8-VR	71,77	Valor Característico
V9-VR	95,07	$f_{M,m,IV} = 81,11$ [MPa]
		Desvio Padrão
		12,3169

b) Rigidez das vigas

- **Lote I** – Angelim pedra – Vigas maciças

Código Viga	$E_{M,0}$	Valor Médio
	[MPa]	$E_{M,m,I} = 11796$ [MPa]
V1-M	11379	
V2-M	12322	
V3-M	11564	Desvio Padrão
V4-M	11605	642
V5-M	12929	
V6-M	12261	
V7-M	11069	
V8-M	14573 *	
V9-M	11234	

* Valor espúrio

- **Lote II** – Eucalipto *grandis* – Laminação convencional

Código Viga	$E_{M,0}$	Valor Médio
	[MPa]	$E_{M,m,II} = 19678$ [MPa]
V1-H	20631	
V2-H	23620 *	
V3-H	18527	Desvio Padrão
V4-H	19883	759
V5-H	19547	
V6-H	19800	

* Valor espúrio

- **Lote III** – Eucalipto *grandis* – Laminação vertical

Código Viga	$E_{M,0}$	Valor Médio
	[MPa]	$E_{M,m,III} = 19209$ [MPa]
V1-V	18907	
V2-V	17993	
V3-V	18661	Desvio Padrão
V4-V	19883	812
V5-V	19884	
V6-V	19928	

- **Lote IV** – Eucalipto *grandis* – Laminação vertical com reforço em fibra de vidro

Código Viga	$E_{M,0}$	Valor Médio
	[MPa]	$E_{M,m,IV} = 18897$ [MPa]
V7-VR	19819	
V8-VR	17142	
V9-VR	19728	Desvio Padrão
		1520

4.5.5 Análise comparativa dos resultados

O principal propósito desta pesquisa é analisar comparativamente os resultados de resistência e rigidez das vigas dos diferentes lotes. A determinação e posterior comparação destes valores é uma forma adequada de avaliar o desempenho das peças para fins estruturais.

Foram comparados, entre si, os lotes I, II e III. O lote IV foi ensaiado com o objetivo de verificar tendências e alterações, no comportamento da MLC, com a introdução da fibra de vidro. Além disso o reduzido número de vigas do lote IV tornou inadequada a utilização dos métodos estatísticos para fins de comparação.

A estatística foi uma ferramenta imprescindível na comparação dos resultados obtidos nos ensaios. Para tanto foi utilizado o método de análise da variância, ou ANOVA. Através deste método é possível analisar a existência, ou não, de diferenças significativas entre as médias dos diferentes grupos de dados, provenientes

de distribuições independentes e normais. Segundo este método, os ensaios realizados classificam-se como do tipo “a níveis fixos”, já que, a comparação se dá entre vigas de “x” tipos diferentes e provenientes de “y” sistemas de produção.

Porém enquanto a rigidez das vigas é caracterizada pela utilização das médias dos grupos, a resistência é representada por valores característicos. Segundo a NBR-7190 (1997) os valores característicos inferiores (utilizados nesta pesquisa), são representativos por determinar valores que tem apenas 5 % de probabilidade de não ser atingido em um dado lote de material. A utilização dos valores característicos é necessária em favor da segurança pois estabelece um valor mínimo e característico do material. Além disso os valores característicos inferiores são sempre inferiores às médias de qualquer amostra estudada. Contudo a comparação de materiais ou tratamentos diferenciados pelo método ANOVA, exige a comparação de valores médios. Por este motivo a comparação entre os valores de resistência dos lotes é realizada entre os valores médios e não os característicos.

Os dados numéricos aqui apresentados são a síntese de todos os procedimentos de cálculo realizados. O memorial de cálculo da análise estatística encontra-se em anexo.

a) Comparação da resistência

A ANOVA foi utilizada para verificar a validade das seguintes hipóteses:

- $H_0: \mu_{fI} = \mu_{fII} = \mu_{fIII}$
- $H_1: \mu_{fI}, \mu_{fII}, \mu_{fIII}$ diferem entre si.

Sendo μ_{fI} , μ_{fII} , μ_{fIII} as médias de resistência das vigas dos Lotes I, II e III.

Lote I	Lote II	Lote III
53,61	66,52	72,82
63,11	83,55	68,91
61,71	80,43	64,13
65,09	67,34	67,34
65,55	73,28	67,19
69,09	76,01	62,12
57,91		
65,16		
56,78		
μ_I	μ_{II}	μ_{III}
62,00	74,52	67,09

Tabela 7 - Valores médios de resistência das vigas e média dos lotes

FONTE	SQ	GDL	MQ	F
<i>Entre Grupos</i>	564	2	282,08	10,08
<i>Residual</i>	504	18	27,98	
<i>Total</i>	1068	20		

Tabela 8 - Quadro de ANOVA ³²

Como $F = 10,08 > F_{(2,18)} = 3,55$, então H_0 deve ser rejeitada. Isto significa que existe uma diferença significativa entre as médias.

Para verificar a média, ou médias, que diferem significativamente entre si foi utilizado o método de *Duncan* (“*studentized range*”). Através deste método pode-se afirmar com 95% de confiabilidade ($\alpha = 0,05$) que:

$\mu_{f_{II}} - \mu_{f_I} = 12,52$	$R_3 = 7,35$	Diferem Significativamente
$\mu_{f_{II}} - \mu_{f_{III}} = 7,43$	$R_2 = 6,05$	Diferem Significativamente
$\mu_{f_{III}} - \mu_{f_I} = 5,08$	$R_2 = 6,05$	Não Diferem Significativamente

Tabela 9 - Quadro comparativo entre lotes

Ou seja:

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

b) Comparação da rigidez

A ANOVA foi utilizada para verificar a validade das seguintes hipóteses:

- $H_0: \mu_{E_I} = \mu_{E_{II}} = \mu_{E_{III}}$
- $H_1: \mu_{E_I}, \mu_{E_{II}}, \mu_{E_{III}}$ diferem entre si.

Sendo $\mu_{E_I}, \mu_{E_{II}}, \mu_{E_{III}}$ as médias dos valores de rigidez das vigas dos Lotes I, II e III.

Lote I	Lote II	Lote III
11379	20631	18907
12322	18527	17993
11564	19883	18661
11605	19547	19883
12929	19800	19884
12261		19928
11069		
11234		
μ_I	μ_{II}	μ_{III}
11796	19678	19209

Tabela 10 - Valores médios de rigidez das vigas e média dos lotes

FONTE	SQ	GDL	MQ	F
<i>Entre Grupos</i>	270005970	2	135002985,01	254,43
<i>Residual</i>	8489483	16	530592,67	
<i>Total</i>	278495453	18		

Tabela 11 - Quadro de ANOVA

³² SQ= Soma dos Quadrados, GDL= Graus De Liberdade, MQ= Médias Quadradas e F= Distribuição F.

Como $F = 254,43 > F_{(2,16)} = 3,63$, então H_0 deve ser rejeitada. Isto significa que existe uma diferença significativa entre as médias.

Como na comparação dos valores médios de resistência foi utilizado o método de *Duncan* para a verificação final. Por fim pode-se afirmar com 95% de confiabilidade ($\alpha = 0,05$) que:

$\mu_{E_{II}} - \mu_{E_I} = 7882$	$R_3 = 1076$	Diferem Significativamente
$\mu_{E_{II}} - \mu_{E_{III}} = 468$	$R_2 = 885$	Não Diferem Significativamente
$\mu_{E_{III}} - \mu_{E_I} = 7414$	$R_2 = 885$	Diferem Significativamente

Tabela 12 - Quadro comparativo entre os lotes

Ou seja:

A rigidez média das vigas dos Lote I é menor que a das vigas dos Lotes II e III. Porém a rigidez média dos Lotes II e III não diferem significativamente entre si.

c) Observações sobre os tipos de ruptura observados

A análise da forma como ocorre a ruptura de estruturas é um fator importante na compreensão do comportamento de um determinado material. Por ser um material anisotrópico e natural, o comportamento da madeira é influenciado por diversos fatores. A avaliação da ruptura das vigas ensaiadas pode acrescentar novos elementos que auxiliem na análise dos resultados numéricos, assim como sugerir alternativas para melhorar o desempenho das peças.

É sabido que a madeira possui uma resistência a esforços axiais menor à compressão que à tração. Porém a ruptura de peças de madeira submetidas à flexão é caracterizada pela ruptura à tração, situação na qual a estrutura entra em colapso de forma frágil. Isto se deve ao fato de que as falhas à compressão provocam uma espécie de “amassamento” das fibras, mas não impedem que a estrutura continue a suportar o carregamento.

Tal comportamento foi nitidamente observado através dos ensaios. Todas as vigas ensaiadas apresentaram falhas de ruptura à compressão antes de atingirem seu

limite à tração. Além disso pôde-se registrar algumas particularidades no modo de ruptura das vigas dos quatro lotes ensaiados:

- *Lote I* – As vigas de angelim pedra possuíam fibras bastante inclinadas e até mesmo retorcidas em relação ao seu eixo longitudinal. Tal particularidade provocou falhas evidentemente influenciadas pelo sentido das fibras. A viga V4-M rompeu completamente, de forma abrupta, separando-se em dois pedaços. A resistência e rigidez das vigas foi compatível com as expectativas, porém a forma brusca como ocorreram os colapsos revela um comportamento mais “frágil” que o das vigas dos outros lotes. Tal comportamento sugere um comprimento de fibras menor que as do eucalipto, conhecidamente longas. Durante o processo de carregamento era bastante comum a ocorrência de estalos, provavelmente decorrentes da acomodação do material;

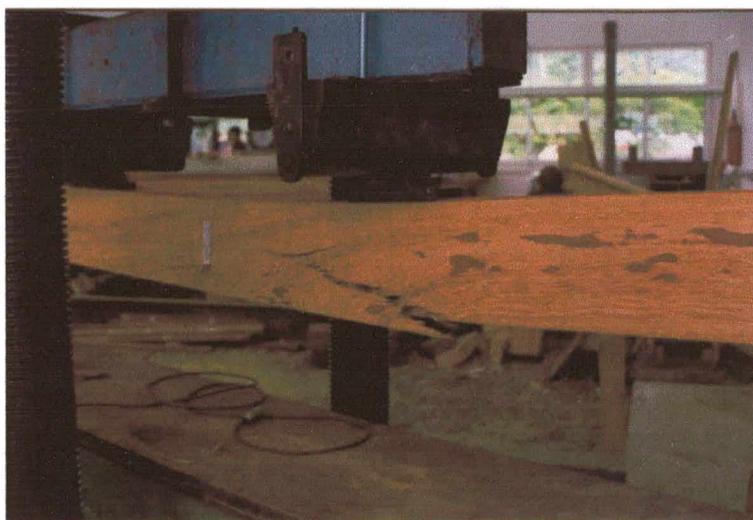


Figura 36 - Ruptura de viga de angelim

Lote II – As vigas de eucalipto em MLC apresentaram basicamente dois tipos de ruptura: por cisalhamento (próximo a linha neutra) e por tração, nitidamente onde as fibras eram mais solicitadas. Em nenhum dos momentos observou-se ruptura das linhas de cola. As vigas apresentaram comportamento bastante regular;



Figura 37 - Ruptura por cisalhamento na linha neutra

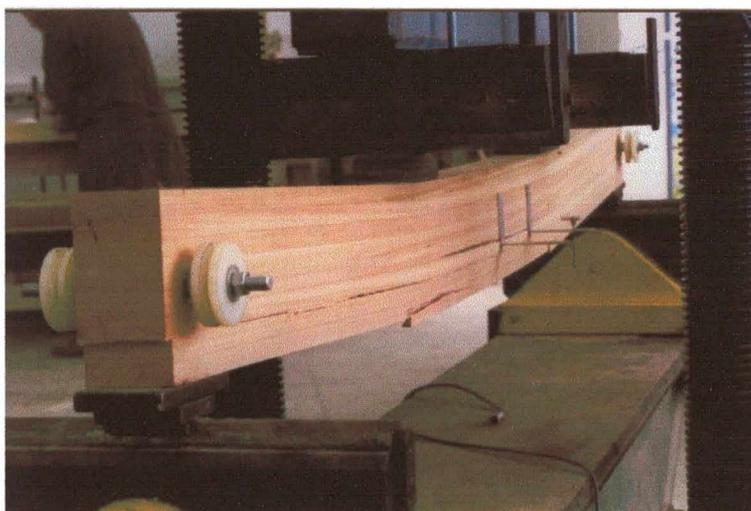


Figura 38 - Ruptura total da viga por tração e cisalhamento

- *Lote III* – As vigas de eucalipto em MLC Multidirecional apresentaram uma particularidade bastante interessante. Três entre as seis vigas ensaiadas apresentaram a ruptura de apenas uma das lâminas verticais antes do colapso total. Uma outra apresentou comportamento semelhante porém com o rompimento de duas das quatro lâminas verticais;



Figura 39 - Ruptura por tração e falha por compressão sob os atuadores



Figura 40 - Ruptura de uma das lâminas verticais

- *Lote IV* – A utilização do reforço de fibra de vidro alterou o comportamento da ruptura das vigas. Observou-se que mesmo não tendo incrementado a rigidez a fibra de vidro parece ter adicionado um componente de ductilidade ao material. Como ocorrido no Lote III, as lâminas verticais falharam individualmente antes do colapso total da viga. Contudo ocorreu um fato inesperado. Mesmo apresentando múltiplas falhas a viga recusava-se a romper totalmente. Certamente deveria-se considerar a primeira falha como determinante da ruptura da viga, porém deve-se considerar que a inclusão da fibra de vidro tornou o comportamento das vigas mais previsível, evidenciando a proximidade do momento em que se daria a ruptura. Além disso, cessado o

carregamento, as vigas dos Lotes III e IV aparentemente retornaram com maior propriedade à posição inicial (Figura 42).



Figura 41 - - Ruptura por cisalhamento



Figura 42 - Após o descarregamento a viga retorna a posição inicial

d) Comparação entre os valores de rigidez teóricos e os experimentais

Entre outras vantagens proporcionadas pela pré-classificação das lâminas está a possibilidade de estimar previamente os módulos de elasticidade das vigas que serão fabricadas. Tal artifício permite a fabricação de lotes com valores pré-determinados de rigidez.

A validade deste método tem sido confirmada por um grande número de pesquisas. Porém, como já foi comentado, o método utilizado na pré-classificação não é totalmente confiável na determinação dos valores absolutos de rigidez das lâminas. Além disso, não é o principal objetivo desta pesquisa, verificar se os valores teóricos de rigidez ajustam-se perfeitamente aos valores experimentais. Mesmo assim decidiu-se comparar percentualmente os valores teóricos e práticos, ilustrando desta forma a proximidade observada entre os mesmos.

Vigas	Valores Teóricos	Valores Experimentais	Varição Percentual
V1-H	18205	20631	13,32 %
V2-H *	20909	23620	12,97 %
V3-H	17657	18527	4,93 %
V4-H	19209	19883	3,51 %
V5-H	20016	19547	-2,34 %
V6-H	19165	19800	3,31 %
V1-V	18486	18907	2,28 %
V2-V *	18327	17993	-1,83 %
V3-V	19069	18661	-2,14 %
V4-V	18882	19883	5,30 %
V5-V	18163	19884	9,47 %
V6-V	18952	19928	5,15 %
V7-VR	18283	19819	8,40 %
V8-VR	19311	17142	-11,23 %
V9-VR	18921	19728	4,26 %

• *Valores espúrios*

Os valores teóricos e experimentais parecem ajustar-se bem, já que a variação percentual apresentada está situada dentro do limites de variabilidade da madeira³³. Além disso tais diferenças podem certamente ser atenuadas, com a adoção de procedimentos mais acurados na pré-classificação das lâminas e com a sistematização e controle do processo de fabricação das vigas.

³³ A madeira apresenta alta variabilidade de suas propriedades físico-mecânicas. Segundo alguns autores um índice de variabilidade de até 20% é considerado comum.

4.5.6 Equipamentos utilizados nos ensaios de flexão

- Anel dinamométrico *Wykeham-Farrance*, com carga máxima de 5,0 t. Acoplado a um relógio comparador da marca *Mitutoyo*, curso de 10,0 mm e precisão de 0,01 mm. Foi utilizado exclusivamente na aferição da pressão de colagem das vigas;
- Prensa hidráulica da marca *Losenhausenwerk*, de fabricação alemã, com capacidade de aplicação de carga de 300 t e três escalas, tendo sido utilizada a menor até 60,0 t. Esta prensa é dotada de um carrinho com apoios destinado a realização de ensaios à flexão. Estes apoios, assim como os atuadores, são um rotulado e outro não. Além disso através de cilindros, permitem o movimento longitudinal durante o ensaio;
- Trave metálica e atuadores ³⁴ para a aplicação da carga;
- Chapas metálicas para distribuição da carga no ponto de aplicação, evitando o amassamento da madeira;
- Célula de carga da marca *Kratos*, com capacidade de 20,0 t;
- Conjunto de réguas metálicas para a fixação dos medidores de deslocamento;
- Extensômetros da marca *Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd.*, de fabricação japonesa, modelo SDP-50C e precisão de 100×10^{-6} /mm, com curso de 5,0 cm e saída lógica de dados;
- Fonte de aquisição de dados *Hewlett Packard*, modelo HP 75000, Series B;
- Microcomputador *Pentium* 133 MHz possuindo os *softwares* próprios à aquisição de dados;

Nota: Os relógios comparadores que aparecem nas fotos foram utilizados na obtenção de dados para uma outra pesquisa realizada pelo LEE.

³⁴ Pertencentes à prensa, foram adaptados para fixação à trave, já que o sistema original permitia um distanciamento (entre os atuadores) inferior a distância necessária.

5 CONCLUSÃO

Esta pesquisa teve por objetivo analisar o comportamento de peças estruturais de madeira nativa, comparando-o com o de peças de madeira reflorestada, sob a técnica da madeira laminada colada. Foi também avaliada a adoção de novas configurações para a seção transversal das peças em MLC (MLC Multidirecional) e a inclusão de fibra de vidro como reforço às regiões tracionadas das seções das vigas.

A opção pela análise de vigas demonstra ter sido correta, já que a madeira é tipicamente utilizada à flexão. Para a caracterização completa de vigas submetidas à flexão foi necessário considerar os esforços de tração e compressão, bem como aqueles decorrentes da tensão de cisalhamento na região da linha neutra das vigas.

As vigas ensaiadas pertenciam a quatro lotes distintos:

- **Lote I:** vigas maciças de angelim pedra;
- **Lote II:** vigas em MLC de eucalipto *grandis*;
- **Lote III:** vigas em MLC Multidirecional de eucalipto *grandis*; e
- **Lote IV:** vigas em MLC Multidirecional de eucalipto *grandis*, reforçadas com fibra de vidro.

Os dados obtidos através dos ensaios permitiram atingir os objetivos aos quais se propunha. Neste capítulo estão relacionadas as conclusões, tendências observadas e sugestões para novas temáticas de estudo a partir desta pesquisa.

I. Análise comparativa do desempenho mecânico das vigas dos *Lotes I, II e III*:

Conclui-se que:

- **Quanto à resistência:** *pode-se afirmar com 95% de confiabilidade, que a resistência média das vigas do Lote II é maior que a das vigas dos Lotes I e III. Porém a resistência média dos Lotes I e III não diferem significativamente entre si.*

- ***Quanto à rigidez: pode-se afirmar com 95% de confiabilidade que a rigidez média das vigas dos Lote I é menor que a das vigas dos Lotes II e III. Porém a rigidez média dos Lotes II e III não diferem significativamente entre si.***

Tais afirmações, elaboradas sob critérios estatísticos, demonstra a superioridade da técnica da MLC sobre a utilização da madeira maciça em termos de rigidez.

A caracterização das espécies, assim como os dados constantes em bibliografia, não apresentou diferenças significativas entre os valores de resistência e rigidez das duas espécies. Porém através da utilização da técnica da MLC, com a composição racional da seção transversal e a eliminação de defeitos, obteve-se um incremento do desempenho mecânico das peças. Desta forma as vigas de eucalipto, compostas em MLC, passaram a apresentar um desempenho superior àquele apresentado pelo lote de madeira considerado em sua totalidade.

Contudo através da análise estatística constatou-se que as vigas do *Lote III* apresentaram desempenho superior ao das vigas de angelim apenas em termos de rigidez. A resistência média das vigas compostas em MLC Multidirecional não foi superior à das vigas maciças. Tal fato se deu em razão da forma progressiva como ocorreu a ruptura nas vigas em MLC Multidirecional.

A ruptura de parte das vigas do *Lote III* se deu em etapas. Em diversas vigas, como relatado no Cap. III, a ruptura se deu inicialmente e de forma sutil, em apenas uma ou duas das lâminas que compunham a porção vertical das seções. Nestes casos foi possível constatar que a viga não entrava em colapso imediatamente, não perdendo a capacidade de suportar carga até o rompimento total da peça. Este comportamento é interessante em termos de segurança, já que a viga “avisava” quando se aproximava do estado de ruptura.

Além disso o fator determinante no dimensionamento de vigas de madeira costuma ser a flecha máxima admissível, a qual é determinada pela rigidez à flexão, aspecto no qual os lotes de vigas em MLC e MLCM demonstraram ser mais eficientes.

II. Comparação entre as vigas dos *Lotes II e III*:

Pode-se afirmar com 95% de confiabilidade que os valores médios de rigidez das vigas em MLC e MLCM não diferiram significativamente. Porém a resistência média das vigas em MLC convencional foram superiores.

Tal fato pode ser atribuído a dois fatores:

- Como já mencionado, as vigas em MLC Multidirecional romperam de forma gradativa, gerando valores de ruptura mais baixos;
- Originalmente a MLC Multidirecional surgiu como forma de reduzir o efeito estocástico das emendas longitudinais submetidas à tração. Como neste estudo, nenhuma das vigas possuía emendas longitudinais tal resultado não pôde ser analisado.

Conclui-se que a laminação vertical não conferiu às vigas um desempenho superior àquele apresentado pela MLC convencional, ao menos em condições nas quais inexistiam emendas longitudinais. Além disso neste estudo registrou-se uma resistência média inferior das vigas em MLC Multidirecional.

III. Análise do desempenho das vigas do *Lote IV*

Uma análise estatística experimental exige uma amostra numericamente significativa, principalmente na análise de materiais com alto índice de variabilidade como a madeira. O número de vigas em MLCM reforçadas com fibra de vidro foi insuficiente para tornar possível uma análise estatística confiável dos resultados. Por este motivo os ensaios das vigas do *Lote IV* serviram para que se fizesse uma verificação empírica do comportamento mecânico das mesmas.

Verificou-se a eficiência da ligação mecânica entre a fibra, a cola e a madeira, produzindo um material perfeitamente solidarizado. Lamentavelmente, apesar dos excelentes resultados de resistência e rigidez, os dados coletados apresentaram grande variabilidade, impedindo a utilização dos mesmos para efeito de caracterização das peças.

A principal particularidade nos ensaios das vigas reforçadas em MLCM foi a verificação de ductilidade no comportamento mecânico das peças. Tal característica, incomum à madeira, se apresenta associada a ocorrência de valores de resistência que aparentam ser bastante superiores aos das vigas sem reforço.

IV. Observações relativas à produção das vigas

Sob a ótica do modelo econômico atual, é evidente que os custos e a complexidade da produção da MLC aparentam ser maiores que os da produção de madeira maciça. Contudo esta situação pode ser modificada se pensarmos no uso da madeira a longo prazo e como alternativa para garantir a sustentabilidade e preservação dos recursos naturais.

A fabricação da MLC Multidirecional acrescenta ainda um pouco mais de complexidade ao processo de fabricação. Porém, esta pode vir a tornar-se uma alternativa valiosa na fabricação de estruturas que requeiram alto desempenho aliado à confiabilidade.

Neste estudo o posicionamento da fibra de vidro na linha de cola das vigas foi realizado de forma totalmente artesanal. A utilização da fibra vidro como reforço é promissora, exigindo ainda o aperfeiçoamento do sistema de produção.

5.1 INDICAÇÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

A cada dia a madeira ganha mais espaço na arquitetura e na construção civil. Mesmo sendo um material tradicional ainda há muito o que fazer para contribuir no estudo do comportamento da madeira e no aperfeiçoamento das técnicas para sua utilização.

A partir desta pesquisa surgem algumas interessantes possibilidades de desenvolvimento de novas pesquisas. Entre elas pode-se citar:

- Análise econômico-financeira dos processos de produção da MLC

A relação custo-benefício surge sempre como um fator determinante na popularização de técnicas e materiais. A análise econômico-financeira dos processos de produção assumem um papel fundamental tanto na viabilização da comparação da MLC com outros materiais, quanto no provimento de informações mais abrangentes e esclarecedoras à indústria e aos profissionais construtores;

- Avaliação da técnica de MLC Multidirecional

Diante dos resultados observados evidencia-se a importância da realização de novos e mais completos estudos sobre as possibilidades e a potencialidade apresentada pela técnica. A comparação do desempenho e do comportamento da MLCM com os da MLC convencional, em peças dotadas de emendas longitudinais, é um tema bastante promissor para o desenvolvimento de novas pesquisas;

- Estudo da utilização da fibra de vidro como reforço em vigas laminadas coladas

A fibra de vidro vem sendo utilizada com sucesso em um grande número de processos que geram incremento das propriedades mecânicas da madeira. Disponível em diversos formatos, a fibra de vidro desponta como uma grande possibilidade no aperfeiçoamento das técnicas de laminação e colagem da madeira.

Os processos de produção devem ser analisados afim de garantir a obtenção de resultados técnicos e operacionais vantajosos.

ANEXO A - DADOS E MEMORIAIS DE CÁLCULO

A.1 CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES DA MADEIRA (CAPÍTULO II)

A.1.1 Determinação da umidade e densidade dos lotes de madeira

a) Angelim (*Hymenolobium petraeum*)

- Umidade do lote

Grupo 3

C.P.	UMIDADE
1	16,08%
2	17,06%
3	16,59%
4	17,05%
5	18,20%
6	15,77%
7	17,83%
8	18,58%
9	17,95%
10	18,53%

Grupo 3 - Percentual Médio de Umidade = 17,37%

Desvio Padrão = 1,00

Coefficiente de Variação= 5,78 %

- Densidade do lote

Grupo 3

Densidade Básica

C.P.	DENSIDADE
1	624 kg/m ³
2	576 kg/m ³
3	632 kg/m ³
4	596 kg/m ³
5	684 kg/m ³
6	630 kg/m ³
7	617 kg/m ³
8	597 kg/m ³
9	593 kg/m ³
10	618 kg/m ³

Densidade Aparente

C.P.	DENSIDADE
1	776 kg/m ³
2	712 kg/m ³
3	788 kg/m ³
4	739 kg/m ³
5	850 kg/m ³
6	789 kg/m ³
7	773 kg/m ³
8	745 kg/m ³
9	749 kg/m ³
10	770 kg/m ³

Grupo 3 - Densidade Básica Média = 617 kg/m³

Desvio Padrão = 29,99

Coefficiente de Variação = 4,86 %

Grupo 3 - Densidade Aparente Média = 769 kg/m³

Desvio Padrão = 37,44

Coefficiente de Variação = 4,87 %

b) Eucalipto (*Eucalyptus grandis*)

- Umidade do lote

Grupo 1

C.P.	DENSIDADE
1A	62,52%
2A	50,46%
3A	50,00%
4A	81,96%
5A	62,21%
6A	38,95%

Grupo 2

C.P.	DENSIDADE
1	9,72%
2	10,48%
3	10,49%
4	9,95%
5	9,32%
6	9,47%
7	9,81%

Grupo 1 - Percentual Médio de Umidade do = 57,68 %

Desvio Padrão = 14,80

Coefficiente de Variação = 25,66 %

Grupo 2 - Percentual Médio de Umidade do Grupo 2 = 9,89%

Desvio Padrão = 0,46

Coefficiente de Variação = 4,62 %

- Densidade do lote

A densidade do *Grupo 1* não foi determinada por ter a mesma procedência do *Grupo 2*.

Grupo 2

Densidade Básica

C.P.	DENSIDADE
1	412 kg/m ³
2	515 kg/m ³
3	550 kg/m ³
4	460 kg/m ³
5	541 kg/m ³
6	526 kg/m ³
7	527 kg/m ³

Densidade Aparente

C.P.	DENSIDADE
1	519 kg/m ³
2	710 kg/m ³
3	726 kg/m ³
4	597 kg/m ³
5	708 kg/m ³
6	685 kg/m ³
7	715 kg/m ³

Grupo 2 - Densidade Básica Média = 504 kg/m³

Desvio Padrão = 50,01

Coefficiente de Variação = 9,91 %

Grupo 2 - Densidade Aparente Média = 658 kg/m³

Desvio Padrão = 81,79

Coefficiente de Variação = 12,44 %

A.1.2 Determinação da resistência e rigidez à compressão paralela

As tabelas com os dados completos de carga e deformação, registrados durante os ensaios, serão apresentadas apenas para o primeiro corpo de prova de angelim e para o primeiro de eucalipto.

a) Angelim (*Hymenolobium petraeum*)

• C.P. A1

Dim. seção transversal		Área	F_{rup}	σ_{rup}	E_{A1}
a	b	[mm ²]	[kgf]	[MPa]	[MPa]
44,9	44,9	2016,01	9450	46,9	13897

F [kgf]	σ [MPa]	M1	M2	Média	ϵ
900	4,464	61	68	64,5	0,000645
1800	8,929	92	75	83,5	0,000835
2700	13,393	133	106	119,5	0,001195
3600	17,857	172	135	153,5	0,001535
4500	22,321	217	169	193	0,00193
3600	17,857	189	158	173,5	0,001735
2700	13,393	148	138	143	0,00143
1800	8,929	106	105	105,5	0,001055
900	4,464	64	68	66	0,00066
1800	8,929	94	77	85,5	0,000855
2700	13,393	135	104	119,5	0,001195
3600	17,857	176	137	156,5	0,001565
4500	22,321	219	170	194,5	0,001945
5400	26,786	265	215	240	0,0024
6300	31,250	316	156	236	0,00236

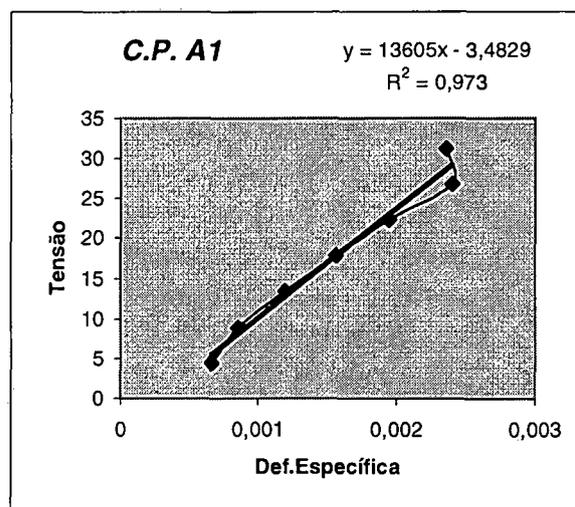


Figura 43 – Gráfico do ensaio de compressão paralela do C.P. A1

• C.P. A2

Dim. seção transversal		Área	F_{rup}	σ_{rup}	E_{A1}
A	B	[mm ²]	[kgf]	[MPa]	[MPa]
46,0	45,2	2079,2	8700	41,8	21917

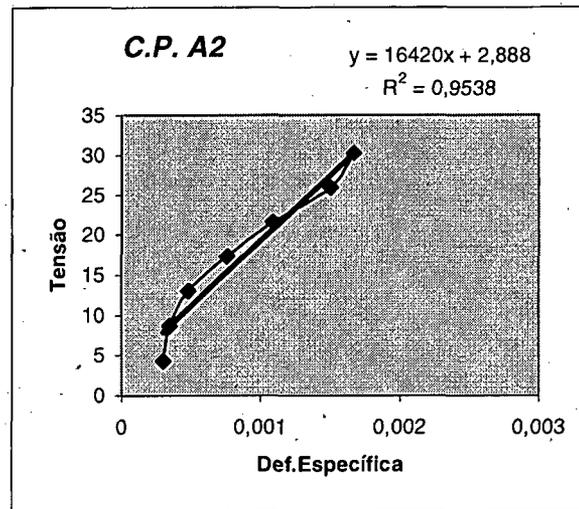


Figura 44 – Gráfico do ensaio de compressão paralela do C.P. A2

• C.P. A3

Dim. seção transversal		Área	F_{rup}	σ_{rup}	E_{A1}
a	B	[mm ²]	[kgf]	[MPa]	[MPa]
45,6	45,9	2093,04	9850	47,1	21772

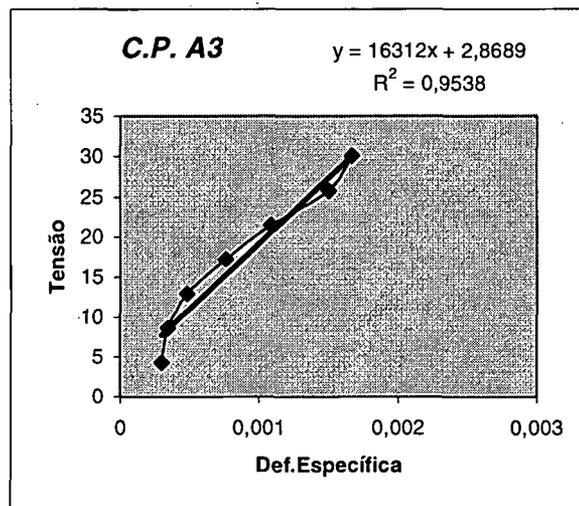


Figura 45 – Gráfico do ensaio de compressão paralela do C.P. A3

• C.P. A4

Dim. seção transversal		Área	F_{rup}	σ_{rup}	E_{A1}
a	b	[mm ²]	[kgf]	[MPa]	[MPa]
45,4	45,1	2047,54	8750	42,7	17322

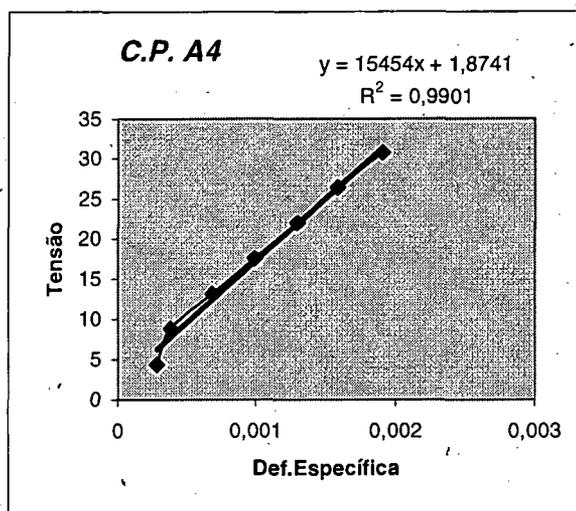


Figura 46 – Gráfico do ensaio de compressão paralela do C.P. A4

• C.P. A5

Dim. seção transversal		Área	F_{rup}	σ_{rup}	E_{A1}
a	b	[mm ²]	[kgf]	[MPa]	[MPa]
46,3	46,1	2134,43	8600	40,3	18233

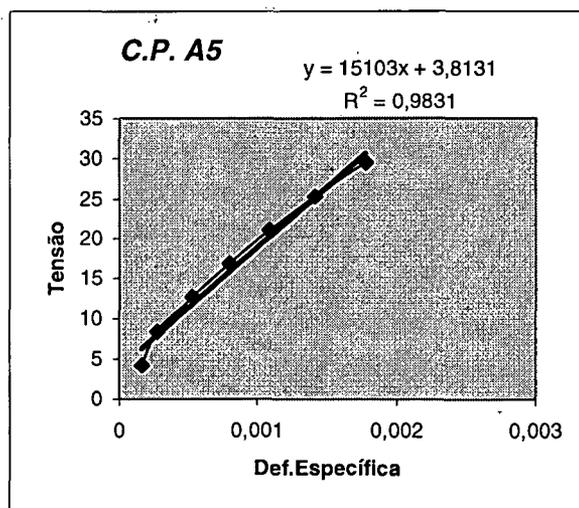


Figura 47 – Gráfico do ensaio de compressão paralela do C.P. A5

• C.P. A6

Dim. seção transversal		Área	F_{rup}	σ_{rup}	E_{A1}
a	B	[mm ²]	[kgf]	[MPa]	[MPa]
45,9	45,8	2102,22	9050	43,0	18614

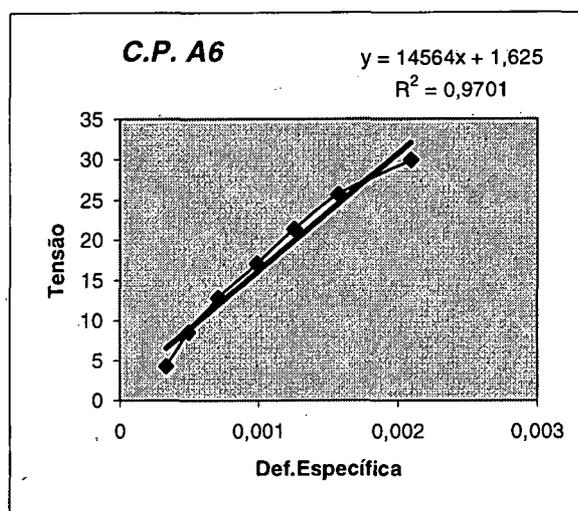


Figura 48 – Gráfico do ensaio de compressão paralela do C.P. A6

• C.P. A7

Dim. seção transversal		Área	F_{rup}	σ_{rup}	E_{A1}
a	b	[mm ²]	[kgf]	[MPa]	[MPa]
45,4	46	2088,4	9100	43,6	12269

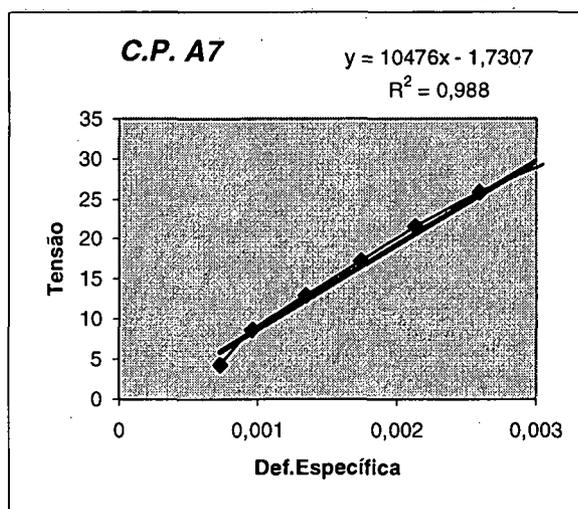


Figura 49 – Gráfico do ensaio de compressão paralela do C.P. A7

• C.P. A8

Dim. seção transversal		Área	F_{rup}	σ_{rup}	E_{A1}
a	b	[mm ²]	[kgf]	[MPa]	[MPa]
46,1	45,1	2079,11	10050	48,3	14927

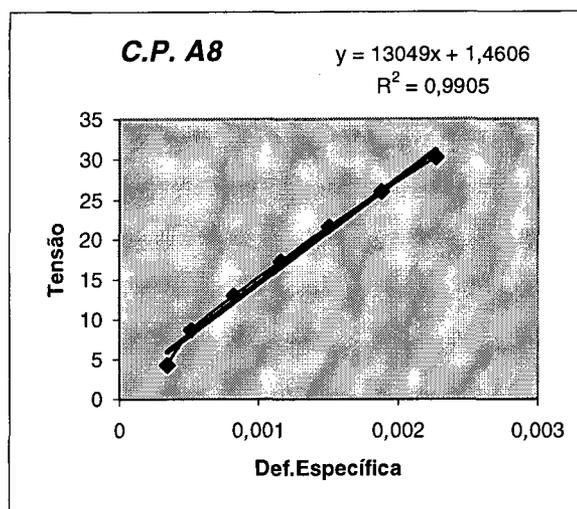


Figura 50 – Gráfico do ensaio de compressão paralela do C.P. A8

b) Eucalipto (*Eucalyptus grandis*)

• C.P. EI

Dim. seção transversal		Área	F_{rup}	σ_{rup}	E_{A1}
a	b	[mm ²]	[kgf]	[MPa]	[MPa]
44,0	43,6	1918,4	9250	48,2	19548

F [kgf]	σ [MPa]	M1	M2	Média	ϵ
900	4,691	39	7	23	0,00023
1800	9,383	72	7	39,5	0,000395
2700	14,074	107	19	63	0,00063
3600	18,766	139	45	92	0,00092
4500	23,457	169	71	120	0,0012
3600	18,766	139	71	105	0,00105
2700	14,074	106	52	79	0,00079
1800	9,383	74	22	48	0,00048
900	4,691	39	7	23	0,00023
1800	9,383	72	7	39,5	0,000395
2700	14,074	106	15	60,5	0,000605
3600	18,766	138	41	89,5	0,000895
4500	23,457	168	70	119	0,00119
5400	28,148	202	74	138	0,00138
6300	32,840	241	74	157,5	0,001575

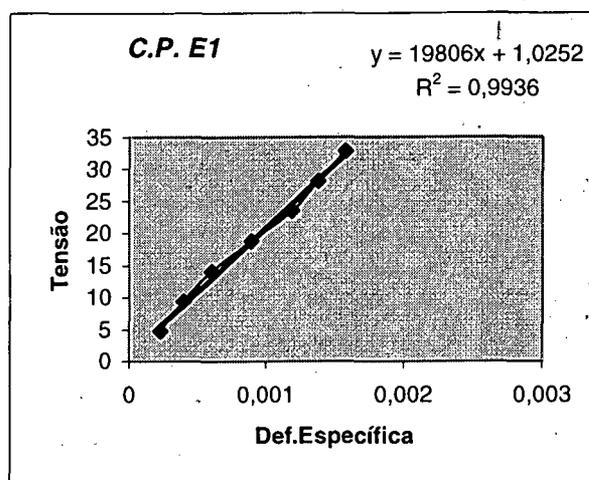


Figura 51 – Gráfico do ensaio de compressão paralela do C.P. E1

• C.P. E2

Dim. seção transversal		Área	F_{rup}	σ_{rup}	E_{A1}
a	b	[mm ²]	[kgf]	[MPa]	[MPa]
43,8	43,9	1922,82	11250	58,5	42551

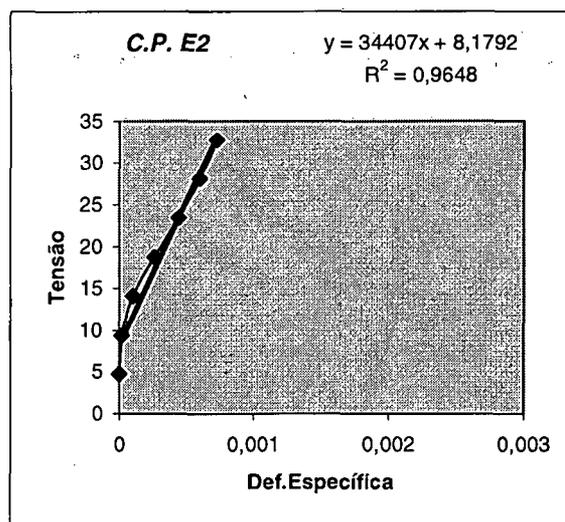


Figura 52 – Gráfico do ensaio de compressão paralela do C.P. E2

• C.P. E3

Dim. seção transversal		Área	F_{rup}	σ_{rup}	E_{AI}
a	b	[mm ²]	[kgf]	[MPa]	[MPa]
43,8	42,5	1861,5	8650	46,5	14707

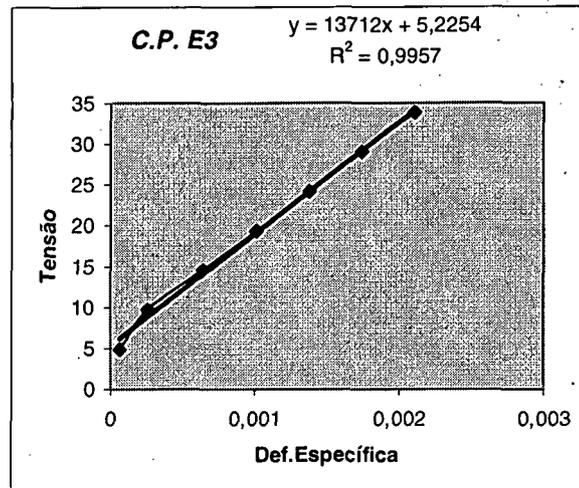


Figura 53 – Gráfico do ensaio de compressão paralela do C.P. E3

• C.P. E4

Dim. seção transversal		Área	F_{rup}	σ_{rup}	E_{AI}
a	b	[mm ²]	[kgf]	[MPa]	[MPa]
44,6	44,8	1998,08	11400	57,1	28828

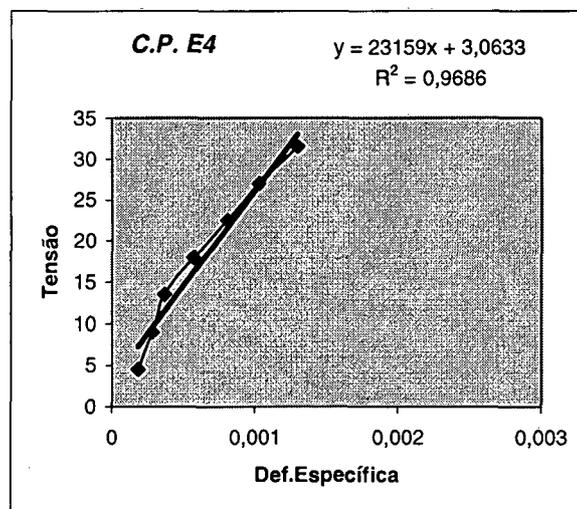


Figura 54 – Gráfico do ensaio de compressão paralela do C.P. E4

• C.P. E5

Dim. seção transversal		Área	F_{rup}	σ_{rup}	E_{A1}
a	b	[mm ²]	[kgf]	[MPa]	[MPa]
44,2	44,8	1980,16	9300	47,0	15948

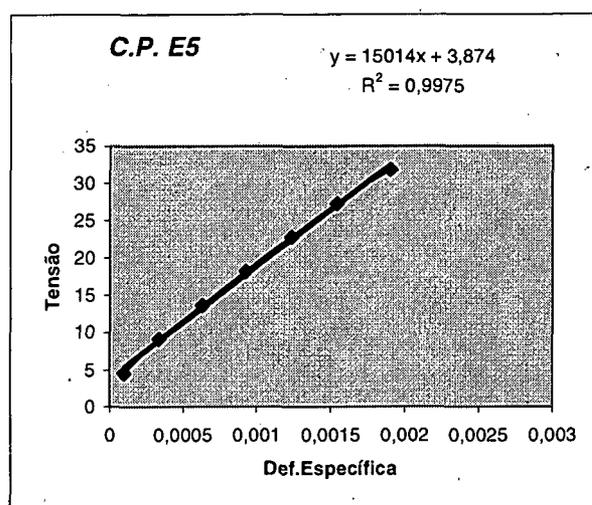


Figura 55 – Gráfico do ensaio de compressão paralela do C.P. E5

• C.P. E6

Dim. seção transversal		Área	F_{rup}	σ_{rup}	E_{A1}
a	b	[mm ²]	[kgf]	[MPa]	[MPa]
44,1	43,5	1918,35	9650	50,3	16248

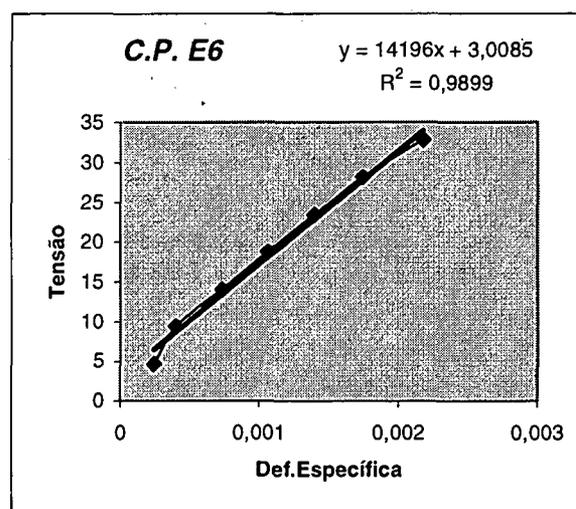


Figura 56 – Gráfico do ensaio de compressão paralela do C.P. E6

• C.P. E7

Dim. seção transversal		Área	F_{rup}	σ_{rup}	E_{A1}
a	b	[mm ²]	[kgf]	[MPa]	[MPa]
44,5	44	1958	9800	50,1	17024

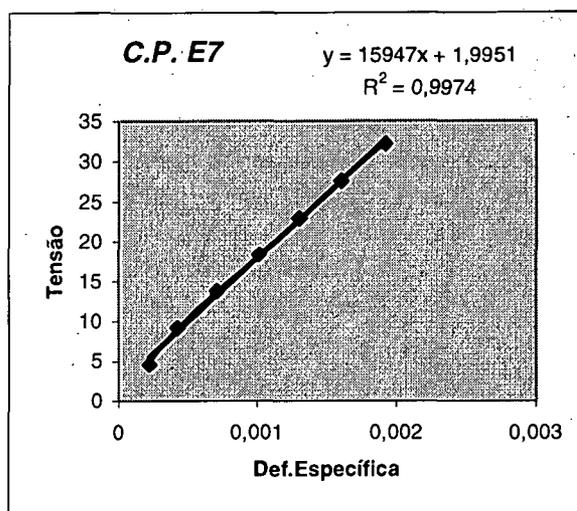


Figura 57 – Gráfico do ensaio de compressão paralela do C.P. E7

• C.P. E8

Dim. seção transversal		Área	F_{rup}	σ_{rup}	E_{A1}
a	b	[mm ²]	[kgf]	[MPa]	[MPa]
44,3	43,9	1944,77	7076	36,4	16818

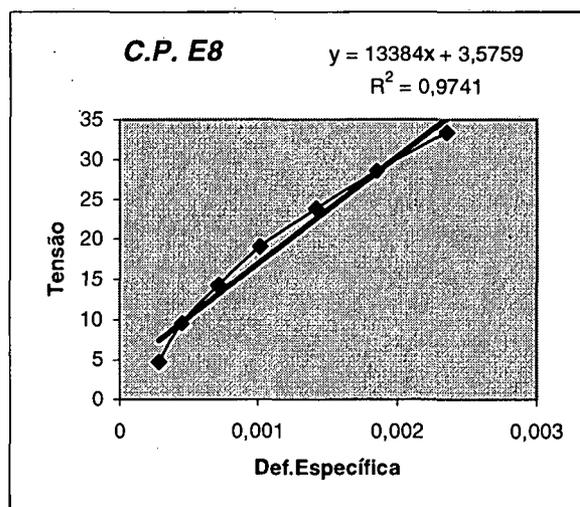


Figura 58 – Gráfico do ensaio de compressão paralela do C.P. E8

• C.P. E9

Dim. seção transversal		Área	F_{rup}	σ_{rup}	E_{A1}
a	b	[mm ²]	[kgf]	[MPa]	[MPa]
44,3	43,9	1944,77	7076	36,4	16818

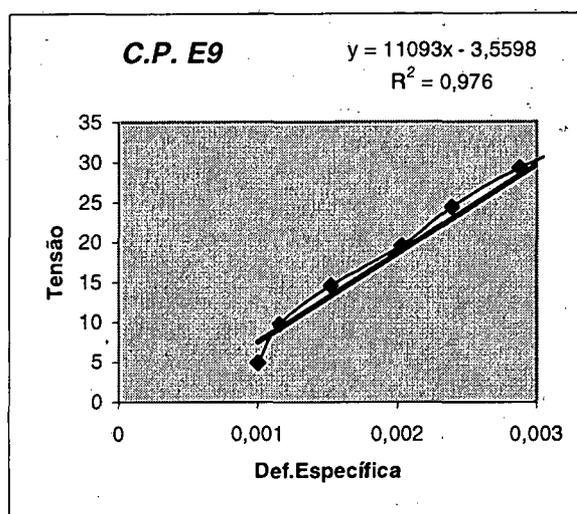


Figura 59 – Gráfico do ensaio de compressão paralela do C.P. E9

• C.P. E10

Dim. seção transversal		Área	F_{rup}	σ_{rup}	E_{A1}
a	b	[mm ²]	[kgf]	[MPa]	[MPa]
42,9	44,3	1900,47	7760	40,8	16767

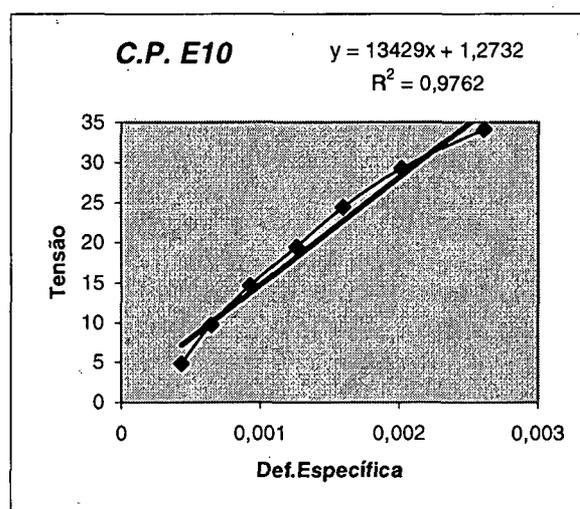


Figura 60 – Gráfico do ensaio de compressão paralela do C.P. E10

• C.P. E11

Dim. seção transversal		Área	F_{rup}	σ_{rup}	E_{AI}
a	b	[mm ²]	[kgf]	[MPa]	[MPa]
43,7	44,4	1940,28	8541	44,0	13195

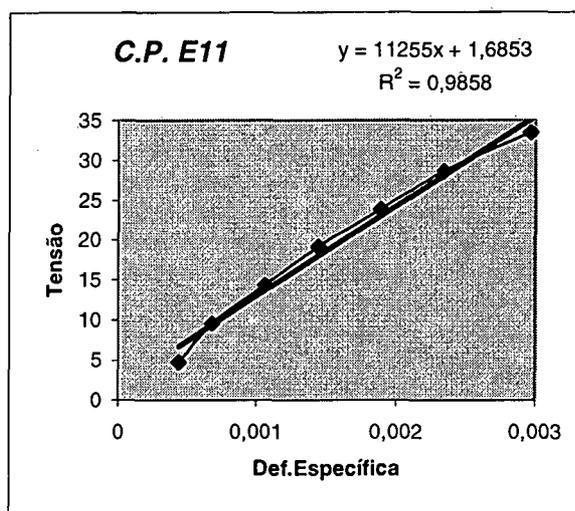


Figura 61 – Gráfico do ensaio de compressão paralela do C.P. E11

A.2 ANÁLISE DO DESEMPENHO DAS VIGAS (CAPÍTULO III)

São apresentados os dados referentes ao cálculo da resistência à flexão e da rigidez das vigas ensaiadas. Além disso são incluídos dois gráficos. O primeiro relaciona os valores de carga e flecha registrados nos ensaios das vigas, sendo representativo da rigidez das peças. O segundo apresenta a aplicação de carga em intervalos regulares de tempo. Como durante os ensaios não houve alteração na velocidade de aplicação de carga, este gráfico mostra o momento em que se dá a ruptura das vigas assim como a passagem gradual do material do estado elástico ao plástico.

Cód. Viga **V1-M**
 Espécie **Angelim**
 Dimensões a = 0,077 [m]
 b = 0,164 [m]
 Vão 2,3 [m]

Resistência à Flexão

$$f_M = \frac{M_{m\acute{a}x}}{W_e} = 53,61 \text{ [MPa]}$$

$$W_e = \frac{b \cdot h^2}{6}$$

$$M_{m\acute{a}x} = 18504 \text{ [MPa]}$$

$$W_e = 345,16 \text{ [mm}^3\text{]}$$

Rigidez

$$E_{M0} = \frac{Pa}{f} \left(\frac{3l^2 - 4a^2}{24l} + \frac{20\eta}{A} \right)$$

$$E_{M0} = 11379 \text{ [MPa]}$$

$$F_{rup} = 49344,33 \text{ [N]}$$

$$V_{rup}^* = 0,0357 \text{ [m]}$$

* Por estimação

Dados:

$$F_{50\%} = 24672,16 \text{ [N]}$$

$$f_{50\%} = 17,85 \text{ [mm]}$$

$$I = 28303557,33 \text{ [mm}^4\text{]}$$

$$A = 12628,00 \text{ [mm}^2\text{]}$$

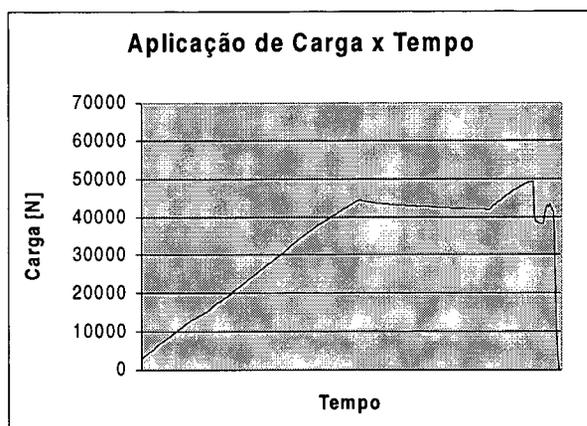
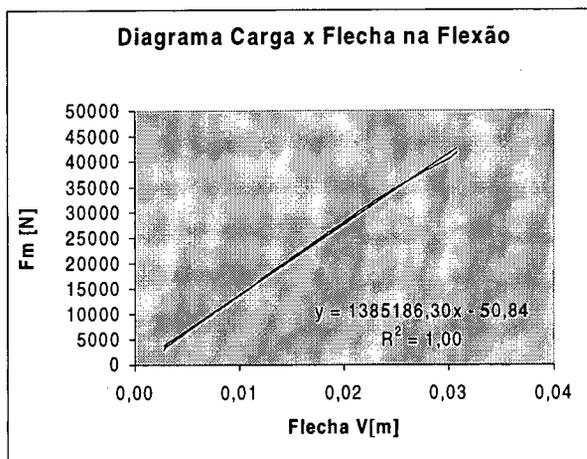
$$\eta = 1,2$$

$$G = 569 \text{ [MPa]}$$

Flechas:

$$f_{flex\tilde{a}o} = 16,30 \text{ [mm]} \quad 91,34 \%$$

$$f_{c\tilde{a}isal} = 1,55 \text{ [mm]} \quad 8,66 \%$$



Cód. Viga **V2-M**Espécie **Angelim**

Dimensões a = 0,077 [m]
 b = 0,163 [m]
 Vão 2,3 [m]

Resistência à Flexão

$$f_M = \frac{M_{\max}}{W_c} = 63,11 \text{ [MPa]}$$

$$W_c = \frac{b \cdot h^2}{6}$$

$$M_{\max} = 21518 \text{ [MPa]}$$

$$W_c = 340,96 \text{ [mm}^3\text{]}$$

Rigidez

$$E_{M0} = \frac{Pa}{f} \left(\frac{3l^2 - 4a^2}{24I} + \frac{20\eta}{A} \right)$$

$$E_{M0} = 12322 \text{ [MPa]}$$

$$F_{rup} = 57383,18 \text{ [N]}$$

$$V_{rup}^* = 0,0398 \text{ [m]}$$

* Por estimação

Dados:

$$F_{50\%} = 28691,59 \text{ [N]}$$

$$f_{50\%} = 19,50 \text{ [mm]}$$

$$I = 27788959,92 \text{ [mm}^4\text{]}$$

$$A = 12551 \text{ [mm}^2\text{]}$$

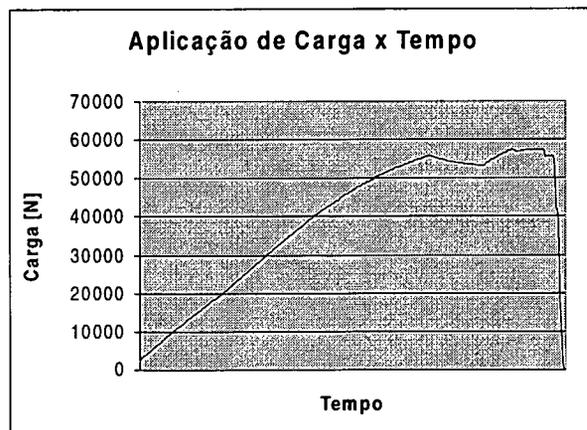
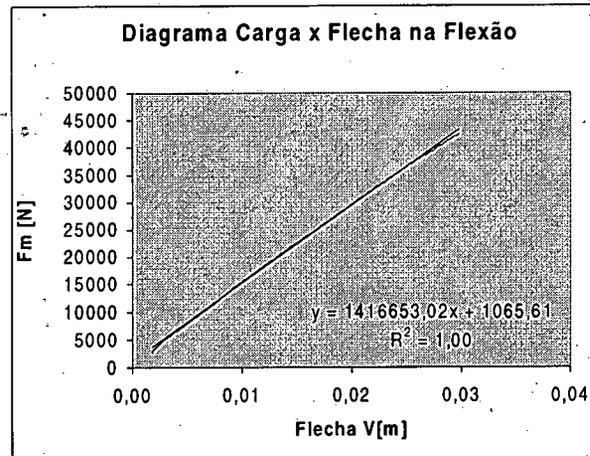
$$\eta = 1,2$$

$$G = 616 \text{ [MPa]}$$

Flechas:

$$f_{flexão} = 17,83 \text{ [mm]} \quad 91,44 \%$$

$$f_{cisal} = 1,67 \text{ [mm]} \quad 8,56 \%$$



Cód. Viga **V3-M**Espécie **Angelim**

Dimensões a = 0,077 [m]

b = 0,162 [m]

Vão 2,3 [m]

Resistência à Flexão

$$f_M = \frac{M_{\max}}{W_c} = 61,71 \text{ [MPa]}$$

$$W_c = \frac{b \cdot h^2}{6}$$

$$M_{\max} = 20783 \text{ [MPa]}$$

$$W_c = 336,80 \text{ [mm}^3\text{]}$$

Rigidez

$$E_{M0} = \frac{Pa}{f} \left(\frac{3l^2 - 4a^2}{24I} + \frac{20 \eta}{A} \right)$$

$$E_{M0} = 11564 \text{ [MPa]}$$

$$F_{rup} = 55421,80 \text{ [N]}$$

$$V_{rup}^* = 0,0398 \text{ [m]}$$

* Por estimativa

Dados:

$$F_{50\%} = 28691,59 \text{ [N]}$$

$$f_{50\%} = 20,42 \text{ [mm]}$$

$$I = 27280638 \text{ [mm}^4\text{]}$$

$$A = 12474,00 \text{ [mm}^2\text{]}$$

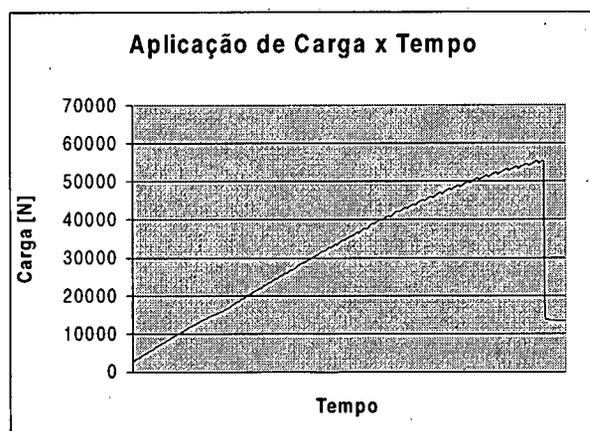
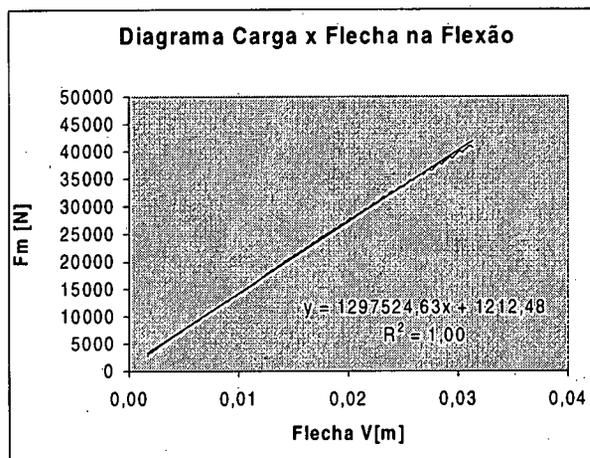
$$\eta = 1,2$$

$$G = 578 \text{ [MPa]}$$

Flechas:

$$f_{flexão} = 18,69 \text{ [mm]} \quad 91,53 \%$$

$$f_{cisal} = 1,73 \text{ [mm]} \quad 8,47 \%$$



Cód. Viga **V4-M**
 Espécie **Angelim**
 Dimensões a = 0,077 [m]
 b = 0,161 [m]
 Vão 2,3 [m]

Resistência à Flexão

$$f_M = \frac{M_{m\acute{a}x}}{W_c} \quad 65,09 \text{ [MPa]}$$

$$W_c = \frac{b \cdot h^2}{6}$$

$$M_{m\acute{a}x} = 21651 \text{ [MPa]}$$

$$W_c = 332,65 \text{ [mm}^3\text{]}$$

Rigidez

$$E_{M0} = \frac{Pa}{f} \left(\frac{3I^2 - 4a^2}{24I} + \frac{20\eta}{A} \right)$$

$$E_{M0} = 11605 \text{ [MPa]}$$

$$F_{rup} = 57737,23 \text{ [N]}$$

$$V_{rup}^* = 0,0433 \text{ [m]}$$

* Por estimação.

Dados:

$$F_{50\%} = 28868,62 \text{ [N]}$$

$$f_{50\%} = 21,58 \text{ [mm]}$$

$$I = 26778553 \text{ [mm}^4\text{]}$$

$$A = 12397,00 \text{ [mm}^2\text{]}$$

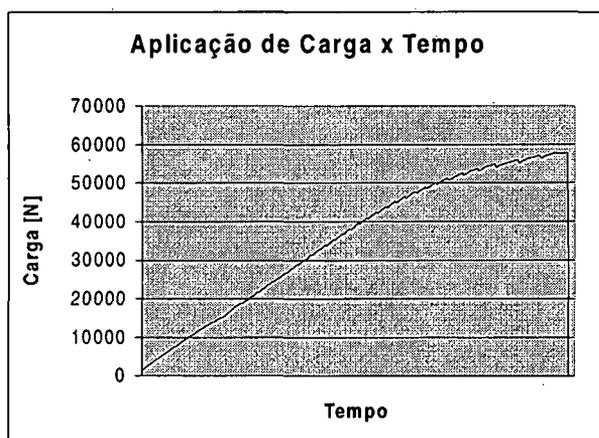
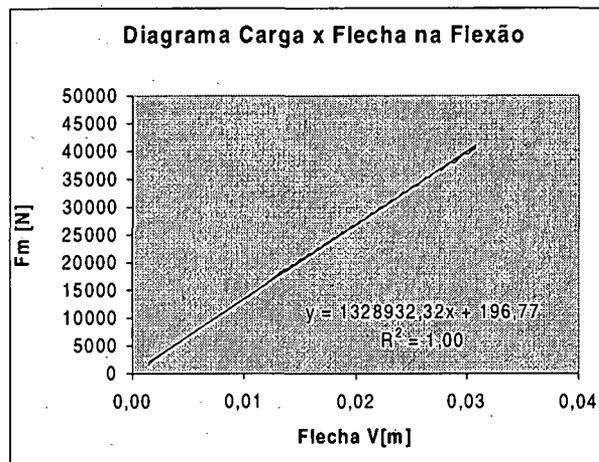
$$\eta = 1,2$$

$$G = 580 \text{ [MPa]}$$

Flechas:

$$f_{flex\tilde{a}o} = 19,77 \text{ [mm]} \quad 91,63 \%$$

$$f_{c\tilde{a}l} = 1,81 \text{ [mm]} \quad 8,37 \%$$



Cód. Viga **V5-M**Espécie **Angelim**

Dimensões a = 0,077 [m]
 b = 0,162 [m]
 Vão 2,3 [m]

Resistência à Flexão

$$f_M = \frac{M_{\max}}{W_c} = 65,55 \text{ [MPa]}$$

$$W_c = \frac{b \cdot h^2}{6}$$

$$M_{\max} = 22077 \text{ [MPa]}$$

$$W_c = 336,80 \text{ [mm}^3\text{]}$$

Rigidez

$$E_{M0} = \frac{Pa}{f} \left(\frac{3l^2 - 4a^2}{24I} + \frac{20 \eta}{A} \right)$$

$$E_{M0} = 12929 \text{ [MPa]}$$

$$F_{rup} = 58874,52 \text{ [N]}$$

$$V_{rup}^* = 0,0388 \text{ [m]}$$

* Por estimação

Dados:

$$F_{50\%} = 29437,26 \text{ [N]}$$

$$f_{50\%} = 19,40 \text{ [mm]}$$

$$I = 27280638 \text{ [mm}^4\text{]}$$

$$A = 12474,00 \text{ [mm}^2\text{]}$$

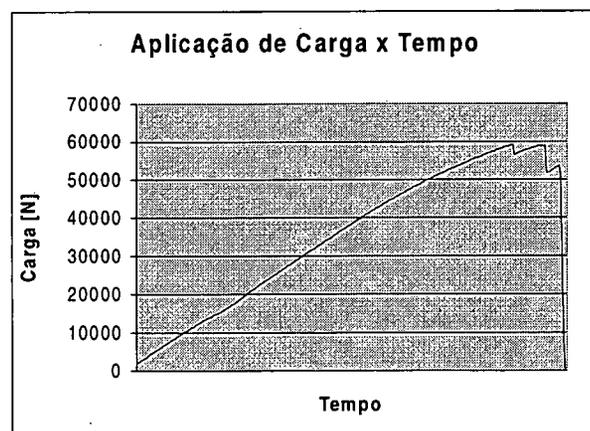
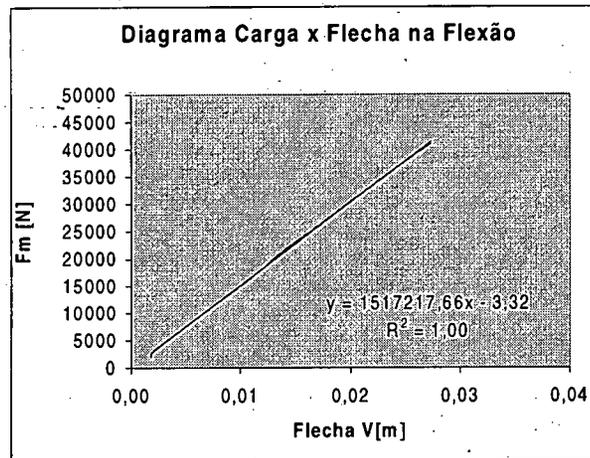
$$\eta = 1,2$$

$$G = 646 \text{ [MPa]}$$

Flechas:

$$f_{flexão} = 17,76 \text{ [mm]} \quad 91,53 \%$$

$$f_{dist} = 1,64 \text{ [mm]} \quad 8,47 \%$$



Cód. Viga **V6-M**
 Espécie **Angelim**
 Dimensões a = 0,077 [m]
 b = 0,162 [m]
 Vão 2,3 [m]

Resistência à Flexão

$$f_M = \frac{M_{m\acute{a}x}}{W_e} \quad 69,09 \text{ [MPa]}$$

$$W_e = \frac{b \cdot h^2}{6}$$

$$M_{m\acute{a}x} = 23270 \text{ [MPa]}$$

$$W_e = 336,80 \text{ [mm}^3\text{]}$$

Rigidez

$$E_{M0} = \frac{Pa}{f} \left(\frac{3l^2 - 4a^2}{24I} + \frac{20\eta}{A} \right)$$

$$E_{M0} = 12261 \text{ [MPa]}$$

$$F_{rup} = 62054,99 \text{ [N]}$$

$$V_{rup}^* = 0,0435 \text{ [m]}$$

* Por estimação

Dados:

$$F_{50\%} = 31027,50 \text{ [N]}$$

$$f_{50\%} = 21,57 \text{ [mm]}$$

$$I = 27280638 \text{ [mm}^4\text{]}$$

$$A = 12474,00 \text{ [mm}^2\text{]}$$

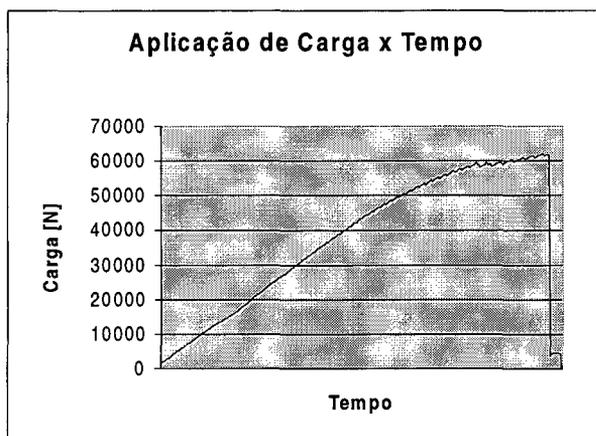
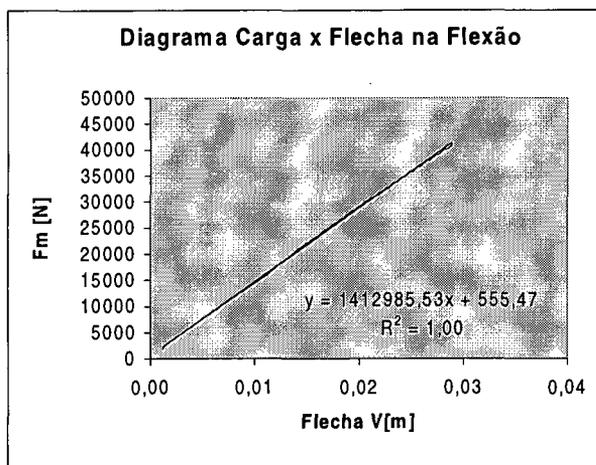
$$\eta = 1,2$$

$$G = 613 \text{ [MPa]}$$

Flechas:

$$f_{flex\grave{a}o} = 19,74 \text{ [mm]} \quad 91,53 \%$$

$$f_{c\acute{i}s\grave{a}l} = 1,83 \text{ [mm]} \quad 8,47 \%$$



Cód. Viga	V7-M		
Espécie	Angelim		
Dimensões	a =	0,077	[m]
	b =	0,161	[m]
Vão		2,3	[m]

Resistência à Flexão

$$f_M = \frac{M_{máx}}{W_c} \quad 57,91 \text{ [MPa]}$$

$$W_c = \frac{b \cdot h^2}{6}$$

$$M_{máx} = 19264 \text{ [MPa]}$$

$$W_c = 332,65 \text{ [mm}^3\text{]}$$

Rigidez

$$E_{M0} = \frac{Pa}{f} \left(\frac{3l^2 - 4a^2}{24I} + \frac{20\eta}{A} \right)$$

$$E_{M0} = 11069 \text{ [MPa]}$$

$$F_{rup} = 51371,76 \text{ [N]}$$

$$V_{rup}^* = 0,0403 \text{ [m]}$$

* Por estimação

Dados:

$$F_{50\%} = 25685,88 \text{ [N]}$$

$$f_{50\%} = 20,13 \text{ [mm]}$$

$$I = 26778553,08 \text{ [mm}^4\text{]}$$

$$A = 12397,00 \text{ [mm}^2\text{]}$$

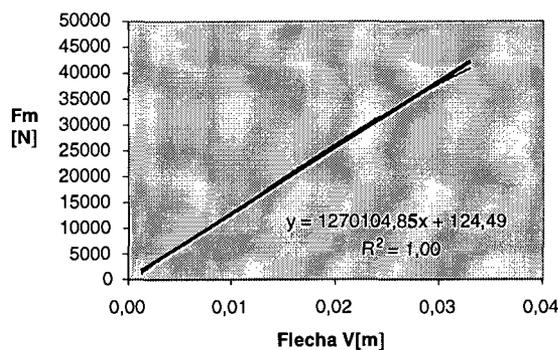
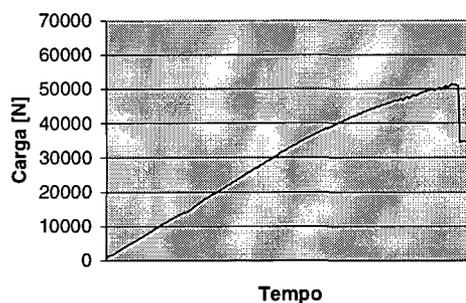
$$\eta = 1,2$$

$$G = 553 \text{ [MPa]}$$

Flechas:

$$f_{flexão} = 18,44 \text{ [mm]} \quad 91,63 \%$$

$$f_{cisal} = 1,68 \text{ [mm]} \quad 8,37 \%$$

Diagrama Carga x Flecha na Flexão**Aplicação de Carga x Tempo**

Cód. Viga **V8-M**Espécie **Angelim**

Dimensões a = 0,077 [m]

b = 0,163 [m]

Vão 2,3 [m]

Resistência à Flexão

$$f_M = \frac{M_{\max}}{W_c} = 65,16 \text{ [MPa]}$$

$$W_c = \frac{b \cdot h^2}{6}$$

$$M_{\max} = 22218 \text{ [MPa]}$$

$$W_c = 340,97 \text{ [mm}^3\text{]}$$

Rigidez

$$E_{M0} = \frac{Pa}{f} \left(\frac{3l^2 - 4a^2}{24I} + \frac{20\eta}{A} \right)$$

$$E_{M0} = 14573 \text{ [MPa]}$$

$$F_{rup} = 59248,36 \text{ [N]}$$

$$V_{rup}^* = 0,0340 \text{ [m]}$$

* Por estimação

Dados:

$$F_{50\%} = 29624,18 \text{ [N]}$$

$$f_{50\%} = 17,03 \text{ [mm]}$$

$$I = 27788959,92 \text{ [mm}^4\text{]}$$

$$A = 12551,00 \text{ [mm}^2\text{]}$$

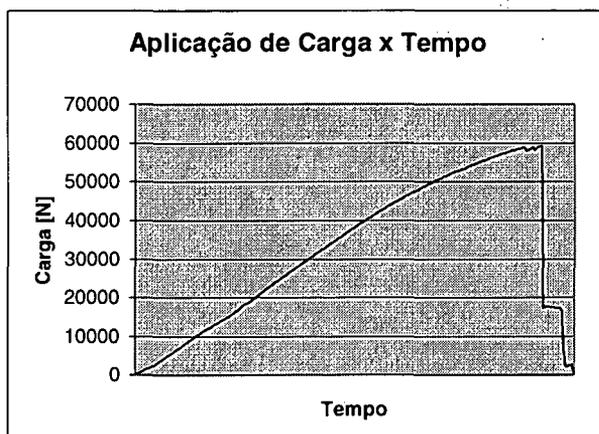
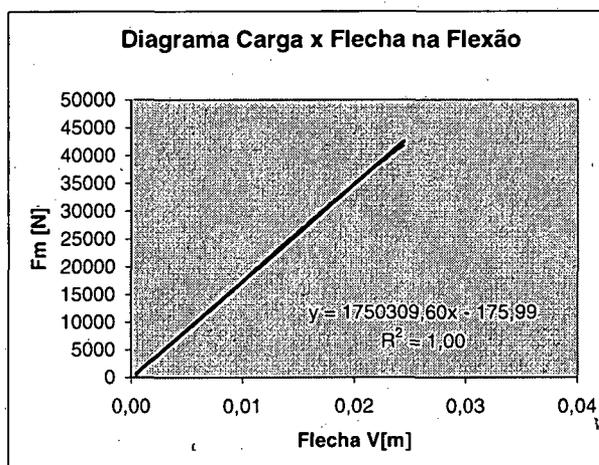
$$\eta = 1,2$$

$$G = 729 \text{ [MPa]}$$

Flechas:

$$f_{flexão} = 15,57 \text{ [mm]} \quad 91,44 \%$$

$$f_{cisal} = 1,46 \text{ [mm]} \quad 8,56 \%$$



Cód. Viga **V9-M**
 Espécie **Angelim**
 Dimensões a = 0,077 [m]
 b = 0,162 [m]
 Vão 2,3 [m]

Resistência à Flexão

$$f_M = \frac{M_{m\acute{a}x}}{W_e} = 56,78 \text{ [MPa]}$$

$$W_e = \frac{b \cdot h^2}{6}$$

$$M_{m\acute{a}x} = 19123 \text{ [MPa]}$$

$$W_e = 336,80 \text{ [mm}^3\text{]}$$

Rigidez

$$E_{M0} = \frac{Pa}{f} \left(\frac{3l^2 - 4a^2}{24I} + \frac{20\eta}{A} \right)$$

$$E_{M0} = 11234 \text{ [MPa]}$$

$$F_{rup} = 50996,28 \text{ [N]}$$

$$V_{rup}^* = 0,0385 \text{ [m]}$$

* Por estimação

Dados:

$$F_{50\%} = 25498,14 \text{ [N]}$$

$$f_{50\%} = 19,34 \text{ [mm]}$$

$$I = 27280638 \text{ [mm}^4\text{]}$$

$$A = 12474,00 \text{ [mm}^2\text{]}$$

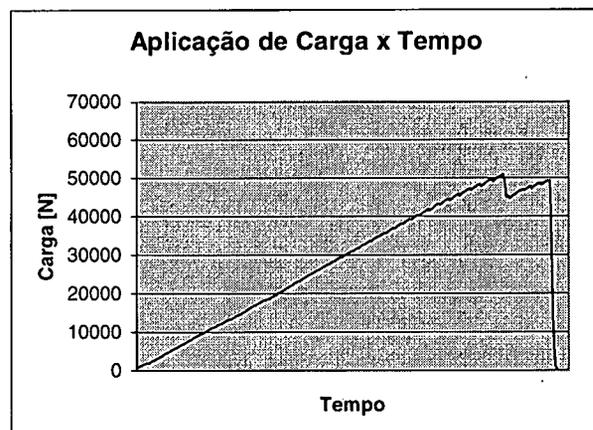
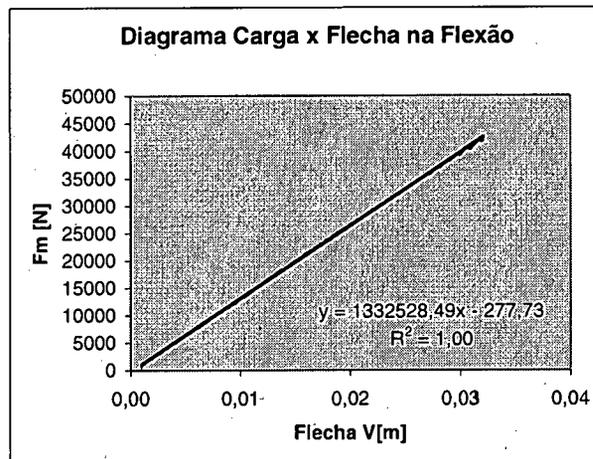
$$\eta = 1,2$$

$$G = 562 \text{ [MPa]}$$

Flechas:

$$f_{flex\tilde{a}o} = 17,71 \text{ [mm]} \quad 91,53 \%$$

$$f_{cisal} = 1,64 \text{ [mm]} \quad 8,47 \%$$



Cód. Viga **VI-H**
 Espécie **Eucalyptus grandis**
 Dimensões a = 0,077 [m]
 b = 0,157 [m]
 Vão 2,3 [m]

Resistência à Flexão

$$f_M = \frac{M_{\max}}{W_e} = 66,52 \text{ [MPa]}$$

$$W_e = \frac{b \cdot h^2}{6}$$

$$M_{\max} = 21041 \text{ [MPa]}$$

$$W_e = 316,33 \text{ [mm}^3\text{]}$$

Rigidez

$$E_{M0} = \frac{Pa}{f} \left(\frac{3l^2 - 4a^2}{24I} + \frac{20\eta}{A} \right)$$

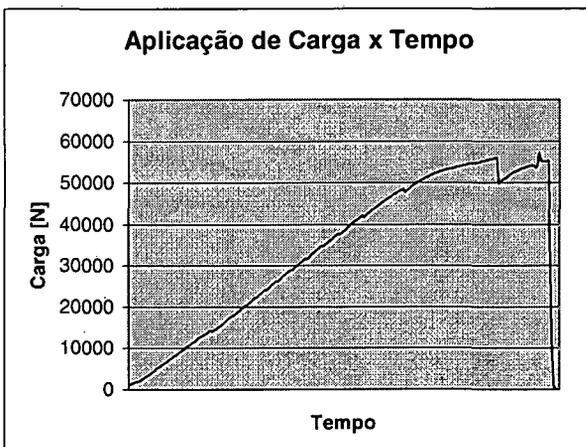
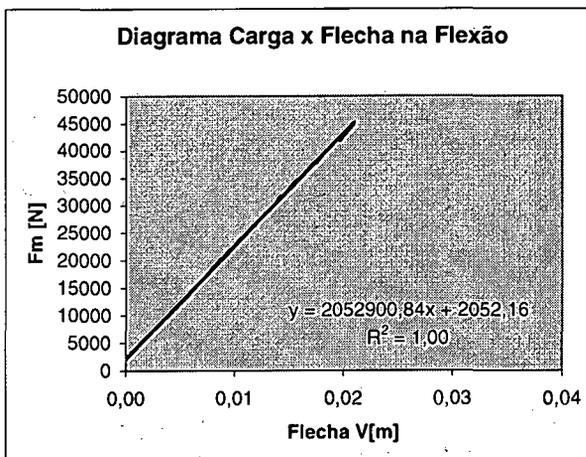
$E_{M0} = 20631 \text{ [MPa]}$
 $F_{rup} = 56110,46 \text{ [N]}$
 $V_{rup}^* = 0,0263 \text{ [m]}$
 * Por estimação

Dados:

$F_{50\%} = 28055,23 \text{ [N]}$
 $f_{50\%} = 12,67 \text{ [mm]}$
 $I = 24831813,4 \text{ [mm}^4\text{]}$
 $A = 12089,00 \text{ [mm}^2\text{]}$
 $\eta = 1,2$
 $G = 1032 \text{ [MPa]}$

Flechas:

$f_{flexão} = 11,65 \text{ [mm]} \quad 92,01 \%$
 $f_{cisal} = 1,01 \text{ [mm]} \quad 7,99 \%$



Cód. Viga **V2-H**
 Espécie *Eucalyptus grandis*
 Dimensões a = 0,077 [m]
 b = 0,157 [m]
 Vão 2,3 [m]

Resistência à Flexão

$$f_M = \frac{M_{m\acute{a}x}}{W_e} \quad 83,55 \text{ [MPa]}$$

$$W_e = \frac{b \cdot h^2}{6}$$

$$M_{m\acute{a}x} = 26429 \text{ [MPa]}$$

$$W_e = 316,33 \text{ [mm}^3\text{]}$$

Rigidez

$$E_{M0} = \frac{Pa}{f} \left(\frac{3l^2 - 4a^2}{24I} + \frac{20 \eta}{A} \right)$$

$$E_{M0} = 23620 \text{ [MPa]}$$

$$F_{rup} = 70477,37 \text{ [N]}$$

$$V_{rup}^* = 0,0287 \text{ [m]}$$

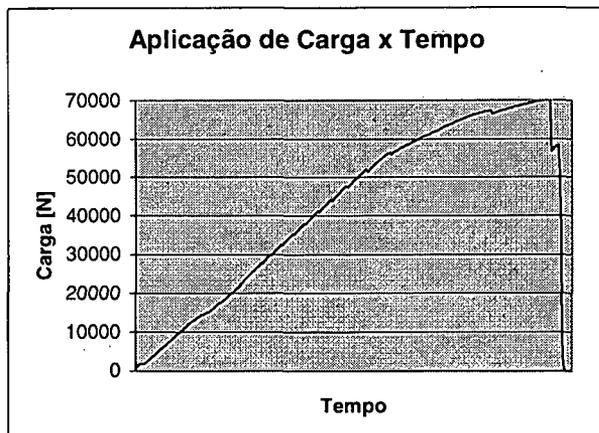
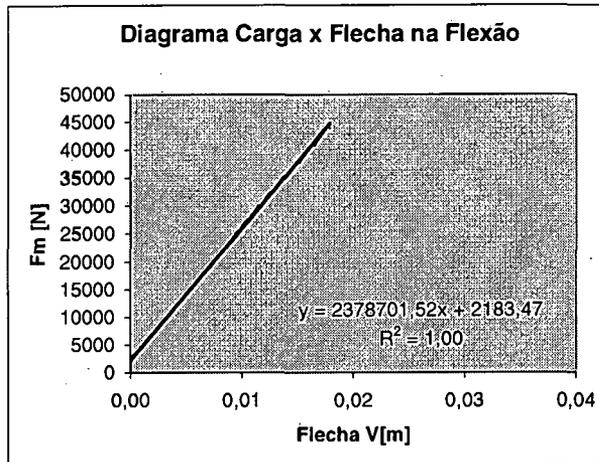
* Por estimacão

Dados:

$F_{50\%} = 35238,68 \text{ [N]}$
 $f_{50\%} = 13,90 \text{ [mm]}$
 $I = 24831813,4 \text{ [mm}^4\text{]}$
 $A = 12089,00 \text{ [mm}^2\text{]}$
 $\eta = 1,2$
 $G = 1181 \text{ [MPa]}$

Flechas:

$f_{flex\tilde{a}o} = 12,79 \text{ [mm]} \quad 92,01 \%$
 $f_{c\tilde{a}isal} = 1,11 \text{ [mm]} \quad 7,99 \%$



Cód. Viga **V3-H**
 Espécie **Eucalyptus grandis**
 Dimensões a = 0,077 [m]
 b = 0,158 [m]
 Vão 2,3 [m]

Resistência à Flexão

$$f_M = \frac{M_{\max}}{W_e} = 80,43 \text{ [MPa]}$$

$$W_e = \frac{b \cdot h^2}{6}$$

$$M_{\max} = 25767 \text{ [MPa]}$$

$$W_e = 320,37 \text{ [mm}^3\text{]}$$

Rigidez

$$E_{M0} = \frac{Pa}{f} \left(\frac{3l^2 - 4a^2}{24I} + \frac{20\eta}{A} \right)$$

$$E_{M0} = 18527 \text{ [MPa]}$$

$$F_{rup} = 68713,38 \text{ [N]}$$

$$V_{rup}^* = 0,0337 \text{ [m]}$$

* Por estimação

Dados:

$$F_{50\%} = 34356,69 \text{ [N]}$$

$$f_{50\%} = 16,96 \text{ [mm]}$$

$$I = 25309335,3 \text{ [mm}^4\text{]}$$

$$A = 12166,00 \text{ [mm}^2\text{]}$$

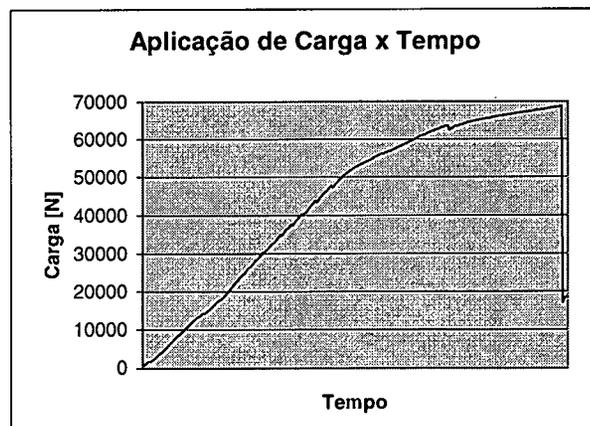
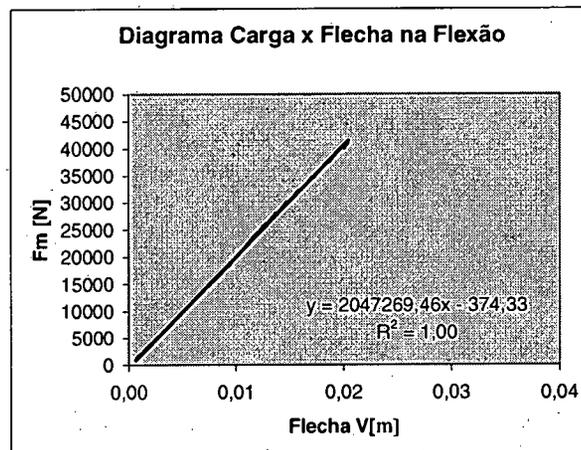
$$\eta = 1,2$$

$$G = 926 \text{ [MPa]}$$

Flechas:

$$f_{flexão} = 15,59 \text{ [mm]} \quad 91,91 \%$$

$$f_{cisal} = 1,37 \text{ [mm]} \quad 8,09 \%$$



Cód. Viga **V4-H**Espécie **Eucalyptus grandis**

Dimensões a = 0,077 [m]
 b = 0,158 [m]
 Vão 2,3 [m]

Resistência à Flexão

$$f_M = \frac{M_{m\acute{a}x}}{W_c} = 67,34 \text{ [MPa]}$$

$$W_c = \frac{b \cdot h^2}{6}$$

$$M_{m\acute{a}x} = 21572 \text{ [MPa]}$$

$$W_c = 320,37 \text{ [mm}^3\text{]}$$

Rigidez

$$E_{M0} = \frac{Pa}{f} \left(\frac{3l^2 - 4a^2}{24I} + \frac{20\eta}{A} \right)$$

$$E_{M0} = 19883 \text{ [MPa]}$$

$$F_{rup} = 57526,65 \text{ [N]}$$

$$V_{rup}^* = 0,0268 \text{ [m]}$$

* Pór estimacão

Dados:

$$F_{50\%} = 28763,32 \text{ [N]}$$

$$f_{50\%} = 13,23 \text{ [mm]}$$

$$I = 25309335,3 \text{ [mm}^4\text{]}$$

$$A = 12166,00 \text{ [mm}^2\text{]}$$

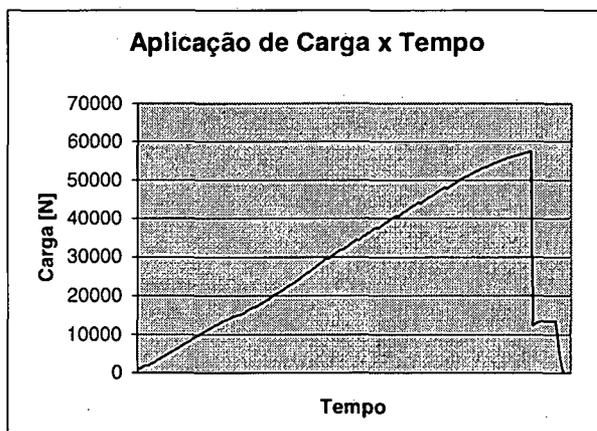
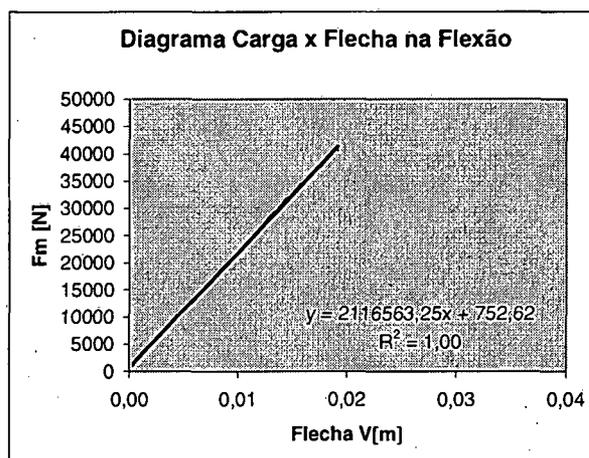
$$\eta = 1,2$$

$$G = 994 \text{ [MPa]}$$

Flechas:

$$f_{flex\tilde{a}o} = 12,16 \text{ [mm]} \quad 91,91 \%$$

$$f_{cisal} = 1,07 \text{ [mm]} \quad 8,09 \%$$



Cód. Viga **V5-H**
 Espécie **Eucalyptus grandis**
 Dimensões a = 0,077 [m]
 b = 0,156 [m]
 Vão 2,3 [m]

Resistência à Flexão

$$f_M = \frac{M_{m\acute{a}x}}{W_c} = 73,28 \text{ [MPa]}$$

$$W_c = \frac{b \cdot h^2}{6}$$

$$M_{m\acute{a}x} = 22885 \text{ [MPa]}$$

$$W_c = 312,31 \text{ [mm}^3\text{]}$$

Rigidez

$$E_{M0} = \frac{Pa}{f} \left(\frac{3I^2 - 4a^2}{24I} + \frac{20 \eta}{A} \right)$$

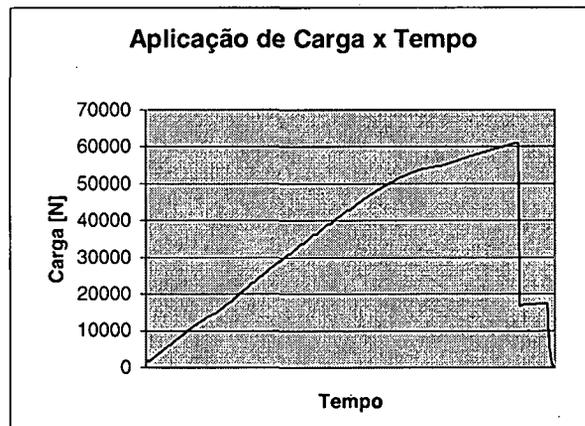
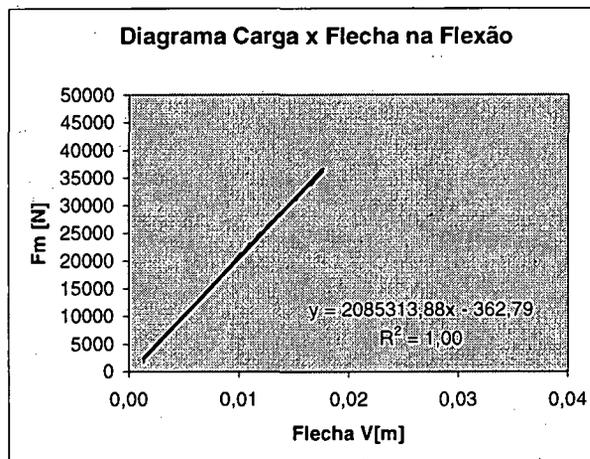
$E_{M0} = 19547 \text{ [MPa]}$
 $F_{rup} = 61028,85 \text{ [N]}$
 $V_{rup} = 0,0294 \text{ [m]}$
 * Por estimação

Dados:

$F_{50\%} = 30514,42 \text{ [N]}$
 $f_{50\%} = 14,81 \text{ [mm]}$
 $I = 24360336 \text{ [mm}^4\text{]}$
 $A = 12012,00 \text{ [mm}^2\text{]}$
 $\eta = 1,2$
 $G = 977 \text{ [MPa]}$

Flechas:

$f_{flex\tilde{a}o} = 13,64 \text{ [mm]} \quad 92,10 \%$
 $f_{c\tilde{a}l} = 1,17 \text{ [mm]} \quad 7,90 \%$



Cód. Viga **V6-H**
 Espécie **Eucalyptus grandis**
 Dimensões a = 0,077 [m]
 b = 0,157 [m]
 Vão 2,3 [m]

Resistência à Flexão

$$f_M = \frac{M_{\max}}{W_c} = 76,01 \text{ [MPa]}$$

$$W_c = \frac{b \cdot h^2}{6}$$

$$M_{\max} = 24043 \text{ [MPa]}$$

$$W_c = 316,33 \text{ [mm}^3\text{]}$$

Rigidez

$$E_{M0} = \frac{Pa}{f} \left(\frac{3l^2 - 4a^2}{24I} + \frac{20\eta}{A} \right)$$

$$E_{M0} = 19800 \text{ [MPa]}$$

$$F_{rup} = 64115,74 \text{ [N]}$$

$$V_{rup}^* = 0,0302 \text{ [m]}$$

* Por estimação

Dados:

$$F_{50\%} = 32057,87 \text{ [N]}$$

$$f_{50\%} = 15,08 \text{ [mm]}$$

$$I = 24831813,4 \text{ [mm}^4\text{]}$$

$$A = 12089,00 \text{ [mm}^2\text{]}$$

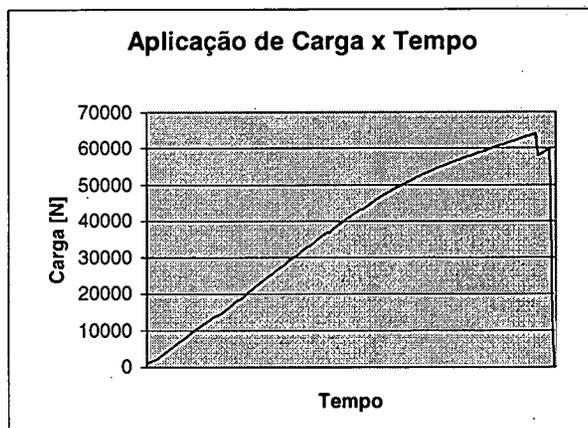
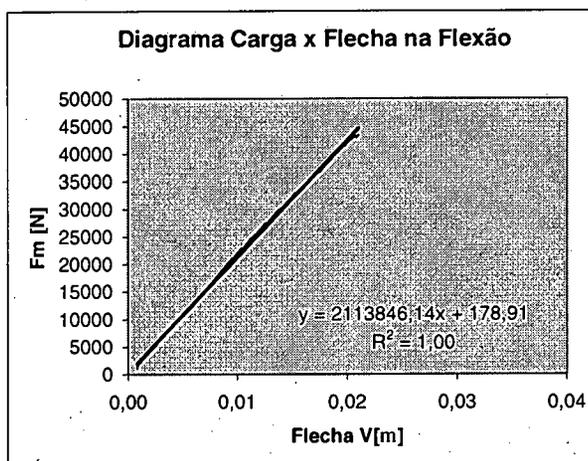
$$\eta = 1,2$$

$$G = 990 \text{ [MPa]}$$

Flechas:

$$f_{flexão} = 13,88 \text{ [mm]} \quad 92,01 \%$$

$$f_{cisal} = 1,21 \text{ [mm]} \quad 7,99 \%$$



Cód. Viga **VI-V**
 Espécie **Eucalyptus grandis**
 Dimensões a = 0,077 [m]
 b = 0,158 [m]
 Vão 2,3 [m]

Resistência à Flexão

$$f_M = \frac{M_{\max}}{W_c} = 72,82 \text{ [MPa]}$$

$$W_c = \frac{b \cdot h^2}{6}$$

$$M_{\max} = 23329 \text{ [MPa]}$$

$$W_c = 320,37 \text{ [mm}^3\text{]}$$

Rigidez

$$E_{M0} = \frac{Pa}{f} \left(\frac{3l^2 - 4a^2}{24I} + \frac{20\eta}{A} \right)$$

$$E_{M0} = 18907 \text{ [MPa]}$$

$$F_{rup} = 62212,99 \text{ [N]}$$

$$V_{rup}^* = 0,0302 \text{ [m]}$$

* Por estimação

Dados:

$$F_{50\%} = 31106,49 \text{ [N]}$$

$$f_{50\%} = 15,05 \text{ [mm]}$$

$$I = 25309335,33 \text{ [mm}^4\text{]}$$

$$A = 12166,00 \text{ [mm}^2\text{]}$$

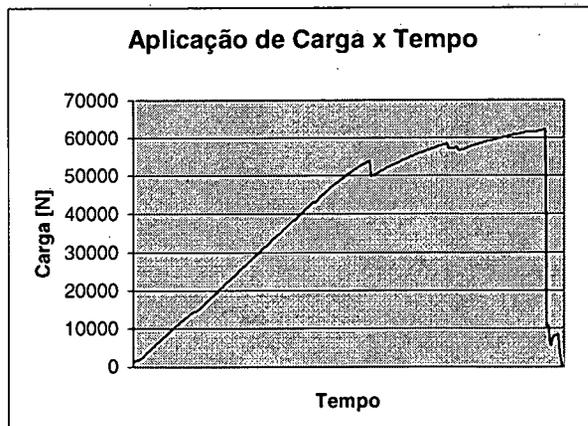
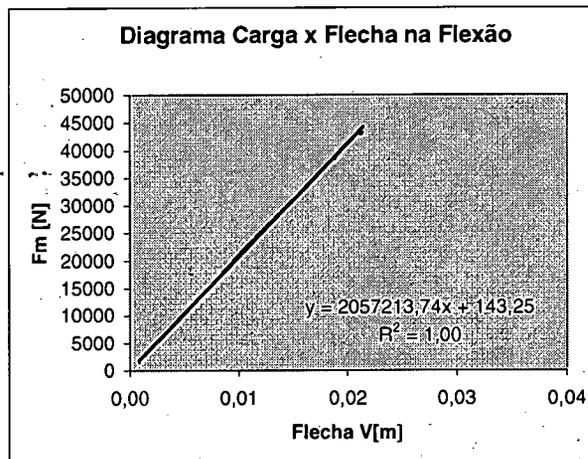
$$\eta = 1,2$$

$$G = 945 \text{ [MPa]}$$

Flechas:

$$f_{\text{flexão}} = 13,83 \text{ [mm]} \quad 91,91 \%$$

$$f_{\text{cisal}} = 1,22 \text{ [mm]} \quad 8,09 \%$$



Cód. Viga V2-V
 Espécie *Eucalyptus grandis*
 Dimensões a = 0,077 [m]
 b = 0,158 [m]
 Vão 2,3 [m]

Resistência à Flexão

$$f_M = \frac{M_{m\acute{a}x}}{W_c} = 68,91 \text{ [MPa]}$$

$$W_c = \frac{b \cdot h^2}{6}$$

$$M_{m\acute{a}x} = 22077 \text{ [MPa]}$$

$$W_c = 320,37 \text{ [mm}^3\text{]}$$

Rigidez

$$E_{M0} = \frac{Pa}{f} \left(\frac{3l^2 - 4a^2}{24I} + \frac{20\eta}{A} \right)$$

$$E_{M0} = 17993 \text{ [MPa]}$$

$$F_{rup} = 58872,27 \text{ [N]}$$

$$V_{rup}^* = 0,0302 \text{ [m]}$$

* Por estimacão

Dados:

$$F_{50\%} = 29436,13 \text{ [N]}$$

$$f_{50\%} = 14,97 \text{ [mm]}$$

$$I = 25309335,33 \text{ [mm}^4\text{]}$$

$$A = 12166,00 \text{ [mm}^2\text{]}$$

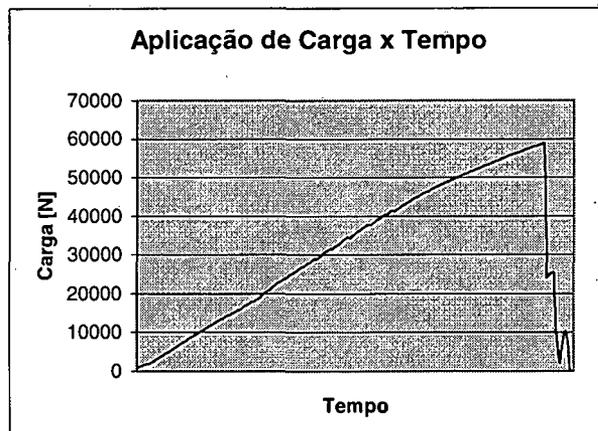
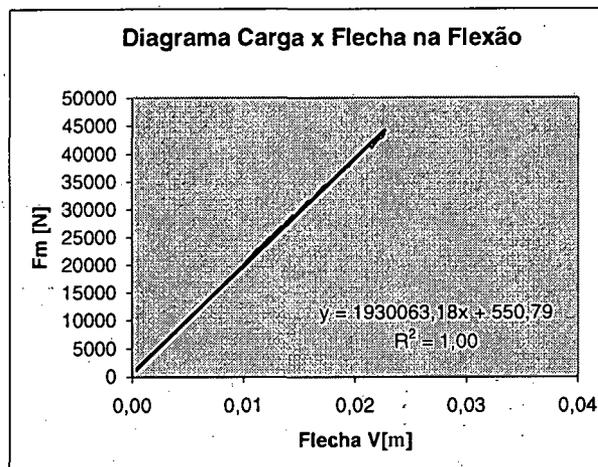
$$\eta = 1,2$$

$$G = 900 \text{ [MPa]}$$

Flechas:

$$f_{flex\tilde{a}o} = 13,76 \text{ [mm]} \quad 91,91 \%$$

$$f_{cisal} = 1,21 \text{ [mm]} \quad 8,09 \%$$



Cód. Viga **V3-V**
 Espécie **Eucalyptus grandis**
 Dimensões a = 0,077 [m]
 b = 0,158 [m]
 Vão 2,3 [m]

Resistência à Flexão

$$f_M = \frac{M_{m\acute{a}x}}{W_e} \quad 64,13 \text{ [MPa]}$$

$$W_e = \frac{b \cdot h^2}{6}$$

$$M_{m\acute{a}x} = 20545 \text{ [MPa]}$$

$$W_e = 320,37 \text{ [mm}^3\text{]}$$

Rigidez

$$E_{M0} = \frac{Pa}{f} \left(\frac{3l^2 - 4a^2}{24I} + \frac{20\eta}{A} \right)$$

$$E_{M0} = 18661 \text{ [MPa]}$$

$$F_{rup} = 54788,65 \text{ [N]}$$

$$V_{rup}^* = 0,0269 \text{ [m]}$$

* Por estimação

Dados:

$$F_{50\%} = 27394,32 \text{ [N]}$$

$$f_{50\%} = 13,43 \text{ [mm]}$$

$$I = 25309335,33 \text{ [mm}^4\text{]}$$

$$A = 12166,00 \text{ [mm}^2\text{]}$$

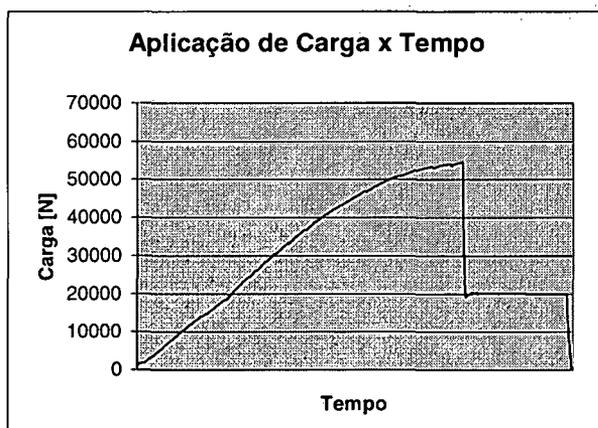
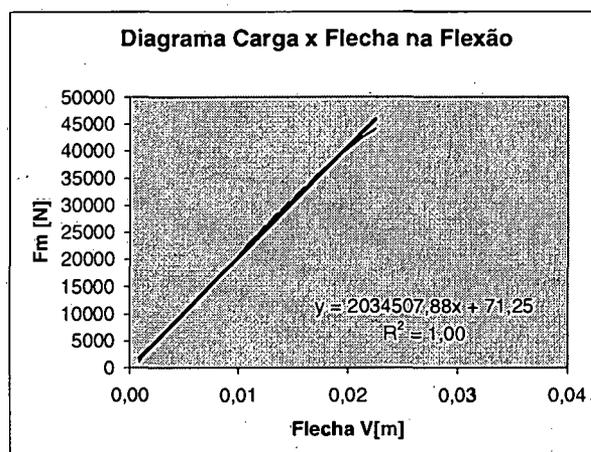
$$\eta = 1,2$$

$$G = 933 \text{ [MPa]}$$

Flechas:

$$f_{flex\tilde{a}o} = 12,34 \text{ [mm]} \quad 91,91 \%$$

$$f_{cisal} = 1,09 \text{ [mm]} \quad 8,09 \%$$



Cód. Viga **V4-V**
 Espécie **Eucalyptus grandis**
 Dimensões a = 0,077 [m]
 b = 0,158 [m]
 Vão 2,3 [m]

Resistência à Flexão

$$f_M = \frac{M_{\max}}{W_e} = 67,34 \text{ [MPa]}$$

$$W_e = \frac{b \cdot h^2}{6}$$

$$M_{\max} = 21572 \text{ [MPa]}$$

$$W_e = 320,37 \text{ [mm}^3\text{]}$$

Rigidez

$$E_{M0} = \frac{Pa}{f} \left(\frac{3l^2 - 4a^2}{24I} + \frac{20\eta}{A} \right)$$

$$E_{M0} = 19883 \text{ [MPa]}$$

$$F_{rup} = 57526,65 \text{ [N]}$$

$$V_{rup}^* = 0,0268 \text{ [m]}$$

* Por estimação

Dados:

$$F_{50\%} = 28763,32 \text{ [N]}$$

$$f_{50\%} = 13,23 \text{ [mm]}$$

$$I = 25309335,33 \text{ [mm}^4\text{]}$$

$$A = 12166,00 \text{ [mm}^2\text{]}$$

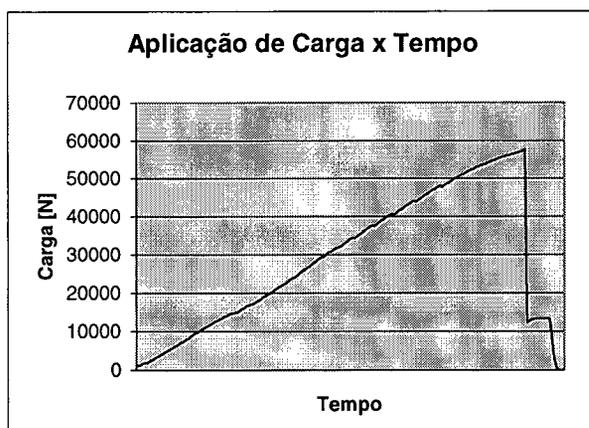
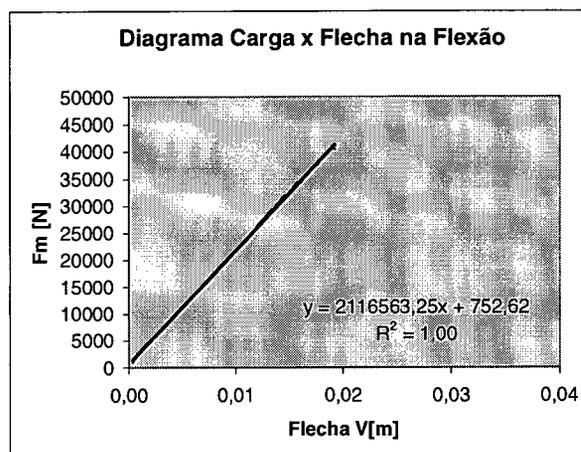
$$\eta = 1,2$$

$$G = 994 \text{ [MPa]}$$

Flechas:

$$f_{flexão} = 12,16 \text{ [mm]} \quad 91,91 \%$$

$$f_{cisal} = 1,07 \text{ [mm]} \quad 8,09 \%$$



Cód. Viga **V5-V**
 Espécie **Eucalyptus grandis**
 Dimensões a = 0,077 [m]
 b = 0,158 [m]
 Vão 2,3 [m]

Resistência à Flexão

$$f_M = \frac{M_{máx}}{W_e} = 67,19 \text{ [MPa]}$$

$$W_e = \frac{b \cdot h^2}{6}$$

$$M_{máx} = 21525 \text{ [MPa]}$$

$$W_e = 320,37 \text{ [mm}^3\text{]}$$

Rigidez

$$E_{M0} = \frac{Pa}{f} \left(\frac{3l^2 - 4a^2}{24I} + \frac{20 \eta}{A} \right)$$

$$E_{M0} = 19884 \text{ [MPa]}$$

$$F_{rup} = 57401,19 \text{ [N]}$$

$$V_{rup}^* = 0,0278 \text{ [m]}$$

* Por estimação

Dados:

$$F_{50\%} = 28700,59 \text{ [N]}$$

$$f_{50\%} = 13,20 \text{ [mm]}$$

$$I = 25309335,33 \text{ [mm}^4\text{]}$$

$$A = 12166,00 \text{ [mm}^2\text{]}$$

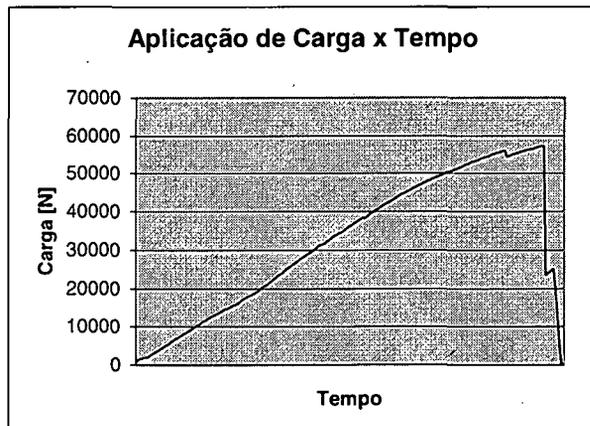
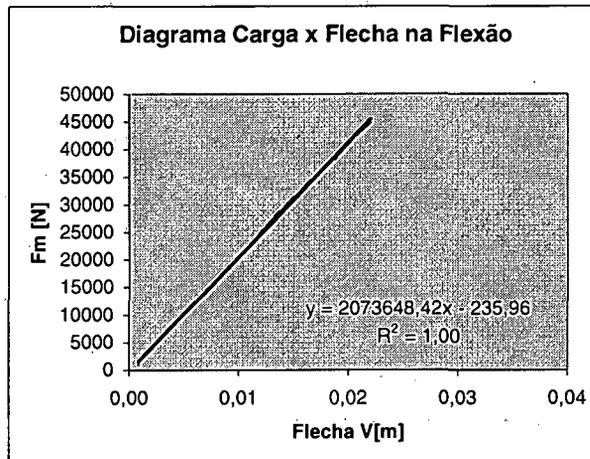
$$\eta = 1,2$$

$$G = 994 \text{ [MPa]}$$

Flechas:

$$f_{flexão} = 12,14 \text{ [mm]} \quad 91,91 \%$$

$$f_{cisl} = 1,07 \text{ [mm]} \quad 8,09 \%$$



Cód. Viga V6-V
 Espécie *Eucalyptus grandis*
 Dimensões a = 0,077 [m]
 b = 0,158 [m]
 Vão 2,3 [m]

Resistência à Flexão

$$f_M = \frac{M_{m\acute{a}x}}{W_e} = 62,12 \text{ [MPa]}$$

$$W_e = \frac{b \cdot h^2}{6}$$

$$M_{m\acute{a}x} = 19902 \text{ [MPa]}$$

$$W_e = 320,37 \text{ [mm}^3\text{]}$$

Rigidez

$$E_{M0} = \frac{Pa}{f} \left(\frac{3l^2 - 4a^2}{24I} + \frac{20 \eta}{A} \right)$$

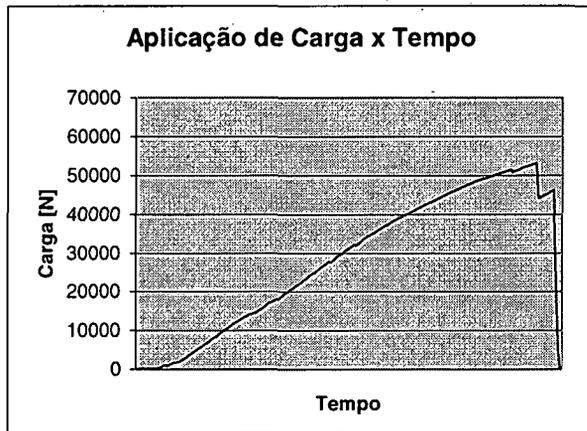
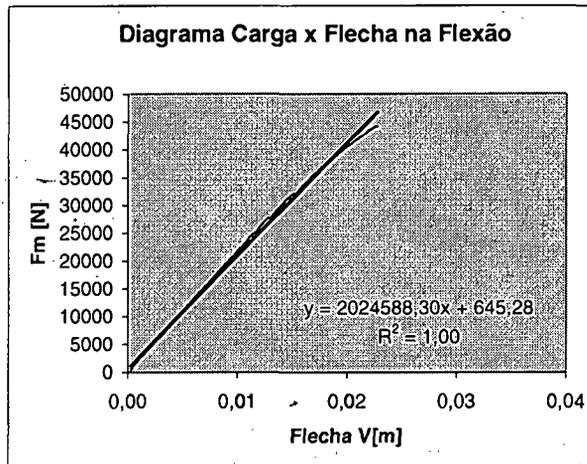
$E_{M0} = 19928 \text{ [MPa]}$
 $F_{rup} = 53074,19 \text{ [N]}$
 $V_{rup}^* = 0,0259 \text{ [m]}$
 * Por estimação

Dados:

$F_{50\%} = 26537,10 \text{ [N]}$
 $f_{50\%} = 12,18 \text{ [mm]}$
 $I = 25309335,33 \text{ [mm}^4\text{]}$
 $A = 12166,00 \text{ [mm}^2\text{]}$
 $\eta = 1,2$
 $G = 996 \text{ [MPa]}$

Flechas:

$f_{flex\tilde{a}o} = 11,20 \text{ [mm]} \quad 91,91 \%$
 $f_{c\acute{i}sul} = 0,99 \text{ [mm]} \quad 8,09 \%$



Cód. Viga **V7-VR**
 Espécie **Eucalyptus grandis**
 Dimensões A = 0,077 [m]
 B = 0,158 [m]
 Vão 2,3 [m]

Resistência à Flexão

$$f_M = \frac{M_{\max}}{W_e} = 76,48 \text{ [MPa]}$$

$$W_e = \frac{b \cdot h^2}{6}$$

$$M_{\max} = 24500 \text{ [MPa]}$$

$$W_e = 320,37 \text{ [mm}^3\text{]}$$

Rigidez

$$E_{M0} = \frac{Pa}{f} \left(\frac{3l^2 - 4a^2}{24I} + \frac{20\eta}{A} \right)$$

$$E_{M0} = 19819 \text{ [MPa]}$$

$$F_{rup} = 65335,34 \text{ [N]}$$

$$V_{rup}^* = 0,0313 \text{ [m]}$$

* Por estimação

Dados:

$$F_{50\%} = 32667,67 \text{ [N]}$$

$$f_{50\%} = 15,08 \text{ [mm]}$$

$$I = 25309335,33 \text{ [mm}^4\text{]}$$

$$A = 12166,00 \text{ [mm}^2\text{]}$$

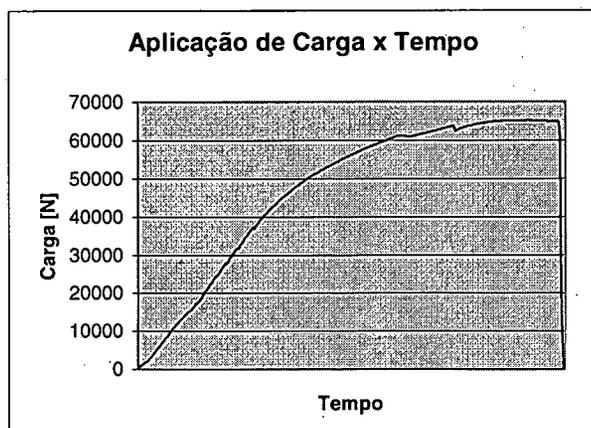
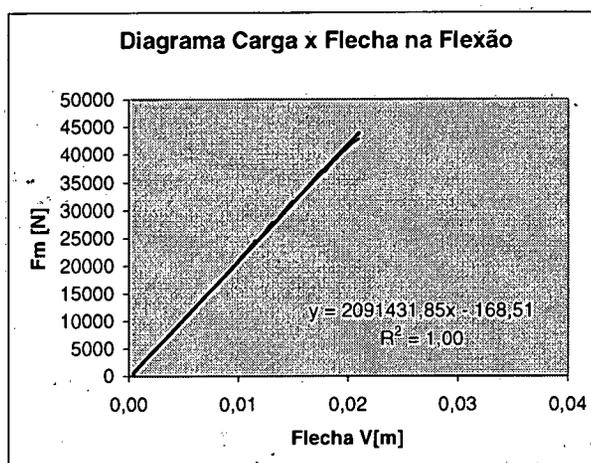
$$\eta = 1,2$$

$$G = 991 \text{ [MPa]}$$

Flechas:

$$f_{\text{flexão}} = 13,86 \text{ [mm]} \quad 91,91 \%$$

$$f_{\text{cisal}} = 1,22 \text{ [mm]} \quad 8,09 \%$$



Cód. Viga **V8-VR**
 Espécie **Eucalyptus grandis**
 Dimensões A = 0,077 [m]
 B = 0,154 [m]
 Vão 2,15 [m]

Resistência à Flexão

$$f_M = \frac{M_{m\acute{a}x}}{W_e} = 71,77 \text{ [MPa]}$$

$$W_e = \frac{b \cdot h^2}{6}$$

$$M_{m\acute{a}x} = 21844 \text{ [MPa]}$$

$$W_e = 304,35 \text{ [mm}^3\text{]}$$

Rigidez

$$E_{M0} = \frac{Pa}{f} \left(\frac{3l^2 - 4a^2}{24I} + \frac{20\eta}{A} \right)$$

$$E_{M0} = 17142 \text{ [MPa]}$$

$$F_{rup} = 64725,38 \text{ [N]}$$

$$V_{rup}^* = 0,0350 \text{ [m]}$$

* Por estimação

Dados:

$$F_{50\%} = 32362,69 \text{ [N]}$$

$$f_{50\%} = 14,93 \text{ [mm]}$$

$$I = 23435360,67 \text{ [mm}^4\text{]}$$

$$A = 11858,00 \text{ [mm}^2\text{]}$$

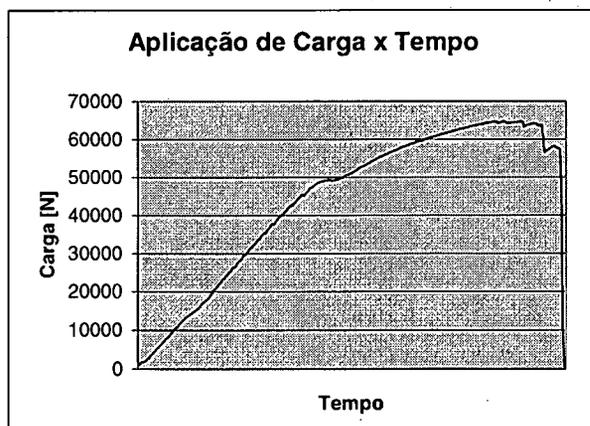
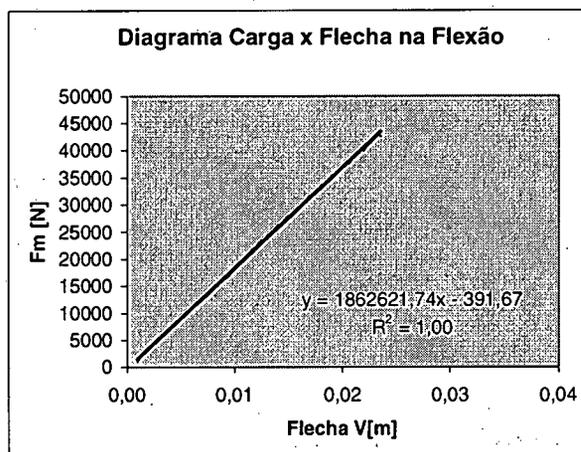
$$\eta = 1,2$$

$$G = 857 \text{ [MPa]}$$

Flechas:

$$f_{flex\acute{o}} = 13,65 \text{ [mm]} \quad 91,37 \%$$

$$f_{c\acute{i}s\acute{a}l} = 1,29 \text{ [mm]} \quad 8,63 \%$$



Cód. Viga **V9-VR**
 Espécie **Eucalyptus grandis**
 Dimensões A = 0,077 [m]
 B = 0,158 [m]
 Vão 2,3 [m]

Resistência à Flexão

$$f_M = \frac{M_{m\acute{a}x}}{W_c} = 95,07 \text{ [MPa]}$$

$$W_c = \frac{b \cdot h^2}{6}$$

$$M_{m\acute{a}x} = 30456 \text{ [MPa]}$$

$$W_c = 320,37 \text{ [mm}^3\text{]}$$

Rigidez

$$E_{M0} = \frac{Pa}{f} \left(\frac{3l^2 - 4a^2}{24I} + \frac{20\eta}{A} \right)$$

$$E_{M0} = 19728 \text{ [MPa]}$$

$$F_{rup} = 81217,54 \text{ [N]}$$

$$V_{rup}^* = 0,0275 \text{ [m]}$$

* Por estimação

Dados:

$$F_{50\%} = 40608,77 \text{ [N]}$$

$$f_{50\%} = 18,83 \text{ [mm]}$$

$$I = 25309335,33 \text{ [mm}^4\text{]}$$

$$A = 12166,00 \text{ [mm}^2\text{]}$$

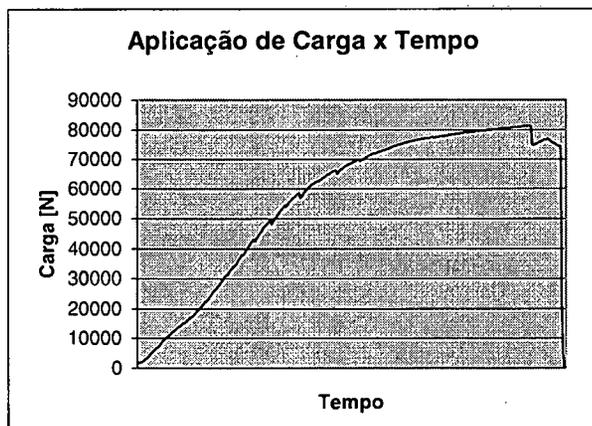
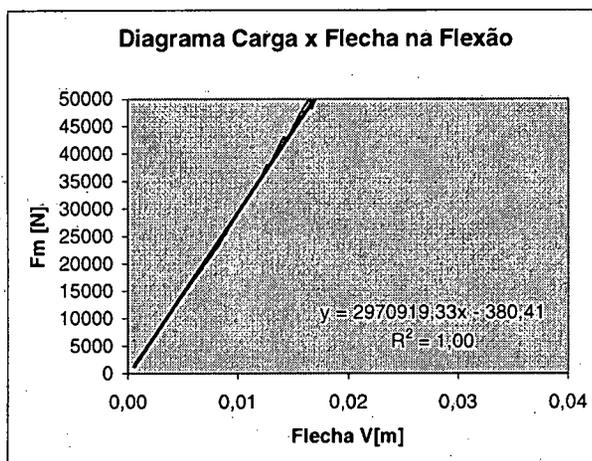
$$\eta = 1,2$$

$$G = 986 \text{ [MPa]}$$

Flechas:

$$f_{flex\acute{o}} = 17,31 \text{ [mm]} \quad 91,91 \%$$

$$f_{c\acute{i}s\acute{a}l} = 1,52 \text{ [mm]} \quad 8,09 \%$$



ANEXO B - TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS DADOS

B.1 DADOS DOS ENSAIOS DE COMPRESSÃO PARALELA

B.1.1 Verificação de espuriedade dos dados de resistência à compressão paralela

a) Angelim pedra (*Hymenolobium petraeum*)

C.P.	I	Valor [MPa]	T
A ₇	1	43,6	-0,21
A ₁	2	46,9	0,93
A ₈	3	48,3	1,41
A ₄	4	42,7	-0,52
A ₅	5	40,3	-1,34
A ₆	6	43,0	-0,41
A ₃	7	47,1	1,00
A ₂	8	41,8	-0,83

Média $A_i = 44,2$ MPa

D.P. = 2,9

P/ $i=8$ e 5% de significância o $T_{\text{máximo}} = 2,03$

Conclui-se que nenhum dos dados é espúrio.

b) Eucalipto (*Eucalyptus grandis*)

C.P.	I	Valor [MPa]	T
E _{5x}	1	36,4	-1,65
E _{7x}	2	40,8	-0,98
E _{6x}	3	41,9	-0,82
E _{8x}	4	44,0	-0,50
E ₃	5	46,5	-0,12
E ₅	6	47,0	-0,05
E ₁	7	48,2	0,14
E ₇	8	50,1	0,42
E ₆	9	50,3	0,45
E ₄	10	57,1	1,48
E ₂	11	58,5	1,70

Média $A_i = 47,3$ MPa

D.P. = 6,6

$P/i = 11$ e 5% de significância o $T_{\text{máximo}} = 2,23$

Conclui-se que nenhum dos dados é espúrio.

B.1.2 Verificação de espuriedade dos dados de rigidez à compressão paralela

a) Angelim pedra (*Hymenolobium petraeum*)

C.P.	i	Valor [MPa]	T
A7	1	12269	-1,45
A1	2	13897	-0,99
A8	3	14927	-0,70
A4	4	17322	-0,01
A5	5	18234	0,25
A6	6	18614	0,35
A3	7	21772	1,25
A2	8	21917	1,29

Média $A_i = 17369$ MPa

D.P. = 3513

$P/i = 8$ e 5% de significância o $T_{\text{máximo}} = 2,03$

Conclui-se que nenhum dos dados é espúrio.

b) Eucalipto (*Eucalyptus grandis*)

1ª Prova

C.P.	i	Valor [MPa]	T
E _{5x}	1	13195	-0,69
E _{7x}	2	13195	-0,69
E _{6x}	3	14053	-0,59
E _{8x}	4	14707	-0,52
E ₃	5	15948	-0,38
E ₅	6	16248	-0,34
E ₁	7	16767	-0,28
E ₇	8	17024	-0,25
E ₆	9	19548	0,03
E ₄	10	28828	1,08
E ₂	11	42551	2,62

Média $A_i = 19278$ MPa

D.P. = 8870

$P/i = 11$ e 5% de significância o $T_{\text{máximo}} = 2,23$

Conclui-se que E₂ é espúrio.

2ª Prova

C.P.	i	Valor [MPa]	T
E _{5x}	1	13195	-0,82
E _{7x}	2	13195	-0,82
E _{6x}	3	14053	-0,63
E _{8x}	4	14707	-0,49
E ₃	5	15948	-0,22
E ₅	6	16248	-0,15
E ₁	7	16767	-0,04
E ₇	8	17024	0,02
E ₆	9	19548	0,56
E ₄	10	28828	2,58

Média $A_i = 16951$ MPa

D.P. = 4607

P/ $i=10$ e 5% de significância o $T_{\text{máximo}} = 2,18$

Conclui-se que E₄ é espúrio.

3ª Prova

C.P.	i	Valor [MPa]	T
E _{5x}	1	13195	-1,18
E _{7x}	2	13195	-1,18
E _{6x}	3	14053	-0,76
E _{8x}	4	14707	-0,45
E ₃	5	15948	0,15
E ₅	6	16248	0,30
E ₁	7	16767	0,55
E ₇	8	17024	0,67
E ₆	9	19548	1,89

Média $A_i = 15631$ MPa

D.P. = 2070

P/ $i=9$ e 5% de significância o $T_{\text{máximo}} = 2,11$

Conclui-se que nenhum dos dados é espúrio.

B.1.3 Verificação da normalidade dos dados de rigidez à compressão paralela

a) Angelim pedra (*Hymenolobium petraeum*)

C.P.	I	Valor	Freq.Esp.Acum.	Z_i	P	D
A7	1	12269	0,13	-1,45	0,0735	-0,0515
A1	2	13897	0,25	-0,99	0,1611	-0,0889
A8	3	14927	0,38	-0,70	0,2420	-0,1330
A4	4	17322	0,50	-0,01	0,4960	-0,0040
A5	5	18234	0,63	0,25	0,5987	-0,0263
A6	6	18614	0,75	0,35	0,7734	0,0234
A3	7	21772	0,88	1,25	0,8944	0,0194
A2	8	21917	1,00	1,29	0,9015	-0,0985

Média = 17369

D.P.= 3513

P/ n=8 e $\alpha=5\%$ D deve ser $< 0,285$

OK!

b) Eucalipto (*Eucalyptus grandis*)

C.P.	I	Valor	Freq.Esp.Acum.	Z_i	P	D
E5x	1	13195	0,11	-1,18	0,1190	0,0079
E8x	2	13195	0,22	-1,18	0,1190	-0,1032
E6x	3	14053	0,33	-0,76	0,2236	-0,1097
E3	4	14707	0,44	-0,45	0,3264	-0,1180
E5	5	15948	0,56	0,15	0,5596	0,0040
E6	6	16248	0,67	0,30	0,6179	-0,0488
E7x	7	16767	0,78	0,55	0,7088	-0,0690
E7	8	17024	0,89	0,67	0,7486	-0,1403
E1	9	19548	1,00	1,89	0,9706	-0,0294

Média = 15631

D.P.= 2070

P/ n=9 e $\alpha=5\%$ D deve ser $< 0,271$

OK!

B.2 DADOS DOS ENSAIOS DE FLEXÃO DAS VIGAS

B.2.1 Verificação de espuriedade dos valores de resistência à flexão

- *Lote I - Angelim pedra (Hymenolobium petraeum)*

Viga	i	F_{rup}	T
V7-M	1	53,61	-1,69
V9-M	2	56,78	-1,05
V1-M	3	57,91	-0,82
V3-M	4	61,71	-0,06
V4-M	5	63,11	0,22
V6-M	6	65,09	0,62
V2-M	7	65,55	0,71
V5-M	8	65,16	0,63
V8-M	9	69,09	1,43

Média $F_{rup,médio} = 62,00$ MPa

D.P. = 5

P/ i=9 e 5% de significância o $T_{máximo} = 2,11$

Conclui-se que nenhum dos dados é espúrio.

- *Lote II - Eucalipto (Eucalyptus grandis)*

Viga	i	F_{rup}	T
V1-H	1	66,52	-1,17
V4-H	2	67,34	-1,05
V5-H	3	73,28	-0,18
V6-H	4	76,01	0,22
V3-H	5	80,43	0,86
V2-H	6	83,55	1,31

Média $F_{rup,médio} = 74,52$ MPa

D.P. = 7

P/ i=6 e 5% de significância o $T_{máximo} = 1,82$

Conclui-se que nenhum dos dados é espúrio.

- *Lote III - Eucalipto (Eucalyptus grandis)*

Viga	i	F_{rup}	T
V3-V	1	48,22	-1,57
V6-V	2	50,17	-0,45
V2-V	3	50,23	-0,42
V5-V	4	51,93	0,56
V1-V	5	52,19	0,71
V4-V	6	52,96	1,16

Média $F_{rup,médio} = 50,95$ MPa

D.P. = 2

P/ $i=6$ e 5% de significância o $T_{máximo} = 1,82$

Conclui-se que nenhum dos dados é espúrio.

- *Lote IV - Eucalipto (Eucalyptus grandis)*

Viga	i	F_{rup}	T
V8-VR	1	71,77	-0,76
V7-VR	2	76,48	-0,38
V9-VR	3	95,07	1,13

Média $F_{rup,médio} = 81,11$ MPa

D.P. = 12,32

P/ $i=3$ e 5% de significância o $T_{máximo} = 1,15$

Conclui-se que nenhum dos dados é espúrio.

B.2.2 Verificação de espuriedade dos valores de rigidez à flexão

- *Lote I - Angelim pedra (Hymenolobium petraeum)*

1ª Prova

Viga	i	E_{M0}	T
V7-M	1	11069	-0,94
V9-M	2	11234	-0,79
V1-M	3	11379	-0,66
V3-M	4	11564	-0,49
V4-M	5	11605	-0,45
V6-M	6	12261	0,14
V2-M	7	12322	0,20
V5-M	8	12929	0,75
V8-M	9	14573	2,24

Média $E_{M0,médio} = 12104$ MPa

D.P. = 1103

P/ $i=9$ e 5% de significância o $T_{máximo} = 2,11$

Conclui-se que o valor de V8-M é espúrio.

2ª Prova

Viga	i	E_{M0}	T
V7-M	1	11069	-1,13
V9-M	2	11234	-0,87
V1-M	3	11379	-0,65
V3-M	4	11564	-0,36
V4-M	5	11605	-0,30
V6-M	6	12261	0,73
V2-M	7	12322	0,82
V5-M	8	12929	1,77

Média $E_{M0,médio} = 11796$ MPa

D.P. = 642

$P/i=8$ e 5% de significância o $T_{máximo} = 2,03$

Conclui-se que nenhum dos dados é espúrio.

- Lote II - Eucalipto (*Eucalyptus grandis*)

1ª Prova

Viga	i	E_{M0}	T
V3-H	1	18527	-1,03
V5-H	2	19547	-0,45
V6-H	3	19800	-0,31
V4-H	4	19883	-0,26
V1-H	5	20631	0,17
V2-H	6	23620	1,88

Média $E_{M0,médio} = 20335$ MPa

D.P. = 1747

$P/i=6$ e 5% de significância o $T_{máximo} = 1,82$

Conclui-se que o valor de V2-H é espúrio.

2ª Prova

Viga	i	E_{M0}	T
V3-H	1	18527	-1,52
V5-H	2	19547	-0,17
V6-H	3	19800	0,16
V4-H	4	19883	0,27
V1-H	5	20631	1,26

Média $E_{M0,médio} = 19678$ MPa

D.P. = 759

$P/i=5$ e 5% de significância o $T_{máximo} = 1,67$

Conclui-se que nenhum dos dados é espúrio.

• *Lote III - Eucalipto (Eucalyptus grandis)*

Viga	i	E_{M0}	T
V2-V	1	17993	-1,50
V3-V	2	18661	-0,68
V1-V	3	18907	-0,37
V4-V	4	19883	0,83
V5-V	5	19884	0,83
V6-V	6	19928	0,88

Média $E_{M0,médio} = 19209$ MPa

D.P. = 812

P/ $i=6$ e 5% de significância o $T_{máximo} = 1,82$

Conclui-se que nenhum dos dados é espúrio.

• *Lote IV - Eucalipto (Eucalyptus grandis)*

Viga	i	E_{M0}	T
V8-VR	1	17142	-1,15
V9-VR	2	19728	0,55
V7-VR	3	19819	0,61

Média $E_{M0,médio} = 18897$ MPa

D.P. = 1520

P/ $i=3$ e 5% de significância o $T_{máximo} = 1,15$

Conclui-se que nenhum dos dados é espúrio.

B.2.3 Verificação da normalidade dos dados de resistência à flexão

• *Lote I – Angelim pedra (Hymenolobium petraeum)*

C.P.	i	Valor	Freq.Esp.Acum.	Z_i	P	D
V1-M	1	53,61	0,11	-1,69	0,0455	-0,0656
V9-M	2	56,78	0,22	-1,05	0,1469	-0,0753
V7-M	3	57,91	0,33	-0,82	0,2061	-0,1272
V3-M	4	61,71	0,44	-0,06	0,4761	0,0317
V2-M	5	63,11	0,56	0,22	0,5871	0,0315
V4-M	6	65,09	0,67	0,62	0,7324	0,0657
V8-M	7	65,16	0,78	0,63	0,7357	-0,0421
V5-M	8	65,55	0,89	0,71	0,7611	-0,1278
V6-M	9	69,09	1,00	1,43	0,9236	-0,0764

Média = 62,00

D.P.= 4,98

P/ n=9 e $\alpha=5\%$ D deve ser $< 0,271$

OK!

• *Lote II – Eucalipto (Eucalyptus grandis)*

C.P.	i	Valor	Freq.Esp.Acum.	Z_i	P	D
V1-H	1	66,52	0,17	-1,17	0,1210	-0,0457
V4-H	2	67,34	0,33	-1,05	0,1469	-0,1864
V5-H	3	73,28	0,50	-0,18	0,4286	-0,0714
V6-H	4	76,01	0,67	0,22	0,5871	-0,0796
V3-H	5	80,43	0,83	0,86	0,8051	-0,0282
V2-H	6	83,55	1,00	1,31	0,9049	-0,0951

Média = 74,52

D.P.= 6,87

P/ n=6 e $\alpha=5\%$ D deve ser $< 0,319$

OK!

• *Lote III – Eucalipto (Eucalyptus grandis)*

C.P.	i	Valor	Freq.Esp.Acum.	Z_i	P	D
V3-V	1	48,22	0,17	-1,57	0,0582	-0,1085
V6-V	2	50,17	0,33	-0,45	0,3264	-0,0069
V2-V	3	50,23	0,50	-0,42	0,3372	-0,1628
V5-V	4	51,93	0,67	0,56	0,7123	0,0456
V1-V	5	52,19	0,83	0,71	0,7611	-0,0722
V4-V	6	52,96	1,00	1,16	0,8770	-0,1230

Média = 50,95

D.P.= 1,74

P/ n=6 e $\alpha=5\%$ D deve ser $< 0,319$

OK!

- *Lote IV – Eucalipto (Eucalyptus grandis)*

C.P.	i	Valor	Freq.Esp.Acum.	Z_i	P	D
V8-VR	1	76,48	0,33	-0,38	0,3520	0,0187
V9-VR	2	71,77	0,67	-0,76	0,2236	-0,4431
V7-VR	3	95,07	1,00	1,13	0,8708	-0,1292

Média = 81,11

D.P.= 12,32

P/ n=4 e a =5% D deve ser < 0,381*

A resistência de V9-VR não faz parte de uma distribuição normal.

- Não há valor de D_{\max} para 3 elementos.

B.2.4 Verificação da normalidade dos dados de rigidez à flexão

- *Lote I – Angelim pedra (Hymenolobium petraeum)*

C.P.	i	Valor	Freq.Esp.Acum.	Z_i	P	D
V7-M	1	11069	0,13	-1,13	0,1292	0,0042
V9-M	2	11234	0,25	-0,87	0,1922	-0,0578
V1-M	3	11379	0,38	-0,65	0,2578	-0,1172
V3-M	4	11564	0,50	-0,36	0,3594	-0,1406
V4-M	5	11605	0,63	-0,30	0,3821	-0,2429
V6-M	6	12261	0,75	0,73	0,7673	0,0173
V2-M	7	12322	0,88	0,82	0,7939	-0,0811
V5-M	8	12929	1,00	1,77	0,9616	-0,0384

Média = 11796

D.P.= 642

P/ n=8 e a =5% D deve ser < 0,285

OK!

- *Lote II – Eucalipto (Eucalyptus grandis)*

C.P.	i	Valor	Freq.Esp.Acum.	Z_i	P	D
V3-H	1	18527	0,20	-1,46	0,1271	-0,0729
V4-H	2	19547	0,40	0,17	0,3669	-0,0331
V5-H	3	19800	0,60	0,58	0,5987	-0,0013
V6-H	4	19883	0,80	0,71	0,8907	0,0907
V1-H	5	20631	1,00	1,91	0,9719	-0,0281

Média = 19439

D.P.= 625

P/ n=5 e a =5% D deve ser < 0,337

OK!

• *Lote III – Eucalipto (Eucalyptus grandis)*

C.P.	i	Valor	Freq.Esp.Acum.	Z _i	P	D
V2-V	1	17993	0,17	-1,50	0,0668	-0,0999
V3-V	2	18661	0,33	-0,68	0,2483	-0,0850
V1-V	3	18907	0,50	-0,37	0,3557	-0,1443
V4-V	4	19883	0,67	0,83	0,7967	0,1300
V5-V	5	19884	0,83	0,83	0,7967	-0,0366
V6-V	6	19928	1,00	0,88	0,8106	-0,1894

Média = 19209

D.P.= 812

P/ n=6 e a =5% D deve ser < 0,319

OK!

• *Lote IV – Eucalipto (Eucalyptus grandis)*

C.P.	i	Valor	Freq.Esp.Acum.	Z _i	P	D
V8-VR	1	17142	0,33	-1,15	0,1251	-0,2082
V9-VR	2	19728	0,67	0,55	0,7088	0,0421
V7-VR	3	19819	1,00	0,61	0,7291	-0,2709

Média = 18897

D.P.= 1520

P/ n=4 e a =5% D deve ser < 0,381*

OK!

* Não há valor de D_{máx} para 3 elementos.

ANEXO C - RELAÇÃO DE EMPRESAS PARTICIPANTES DA PESQUISA

- KLABIN – Fornecimento da madeira de *Eucalyptus grandis* utilizada na confecção das vigas de MLC;
- PALEDSON Ind. e Com. de Madeiras Ltda. – Pelo desdobro e secagem do *Eucalyptus grandis*;
- BATTISTELLA Ind. e Com. Ltda. – Pelo suporte operacional na fabricação das vigas de MLC;
- OWENS CORNING do Brasil – Fornecimento das mechas de fibra de vidro utilizadas como reforço.

BIBLIOGRAFIA

ANDRADE, Ulisses R. A. de. Florestas catarinenses. Secretaria de Estado do Desenvolvimento Rural e da Agricultura. [online]. Disponível na Internet via WWW. URL:

< http://www.agricultura.sc.gov.br/programas/prog_florestal.htm > Acesso em maio de 2001.

ABNT. ABNT – Home Page. Sistema *online* de consulta de normas técnicas. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1997 [online]. Disponível na Internet via WWW. URL:

< <http://www.abnt.org.br/normas1/> > Acesso em março de 2001.

ABNT. NBR 7190 - Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, RJ: ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1997.

BITTENCOURT, Rosa Maria. Madeira comercializada x madeira especificada para a construção. Anais do V EBRAMEM, Belo Horizonte (MG), 19 a 21 de julho de 1995.

BEER, Ferdinand Pierre/e **JOHNSTON JR.**, E. Russell. Resistência dos materiais. 3^a ed. – São Paulo: Makron Books, 1995.

BODIG, Jozef/ e **JAYNE**, Benjamin A. Mechanics of wood and wood composites. Originalmente impresso em Nova Iorque pela Ed. Van Nostrand Reinhold, 1982. Edição reimpressa com correções, Flórida, EUA: Krieger Publishing Company, 1992.

BONO, Cynara Tessoni. Madeira laminada colada na arquitetura: Sistematização de Obras Executadas no Brasil. Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) da Universidade de São Paulo (USP), como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Arquitetura, São Carlos, 1996.

BRASIL, Katia. Madeireiras asiáticas expandem ação no AM. Matéria publicada no jornal O Estado de SP, São Paulo, 19 jan. 1998, p. A13.

CALIL Carlito, Jr. / **BARALDI**, L.T. / **STAMATO**, G.C. / e **FERREIRA**, N.S.S. Estruturas de madeira (notas de aula). São Carlos (SP): LAMEM / EESC / USP, 2000.

CARRASCO, Edgar V. Mantilla. Secagem do eucalipto grandis, uma avaliação experimental. Artigo publicado nos anais do VI Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira (VI EBRAMEM). Florianópolis, SC, jul. 1998, vol. 3, p. 159-172.

CATHARINO, Eduardo Luís. Eucalipto. Jornal Atuante, Cotia, SP, ano I - n.º 10 – dez. 1999. Árvore do mês.

COSTA NETO, Pedro Luís de Oliveira. Estatística. São Paulo, Ed. Edgard Blücher, 1977.

CUNHA, Rita Dione Araújo/ e **CÉSAR**, Sandro Fábio. Diagnóstico da produção das madeireiras e serrarias da cidade do Salvador e arredores. Florianópolis, SC: Anais do VI Encontro Brasileiro em Madeiras e Estruturas de Madeira, UFSC, 1998.

DAGHER, H. J. High-Performance Wood Composites for Construction. Artigo publicado relativo à palestra realizada no dia 13 jul. 2000. São Carlos, SP: Anais do VII Encontro Brasileiro em Madeiras e Estruturas de Madeira, EESC/USP, 2000.

DE JESUS, José Henriques / e **RIOS**, Gisele A. Almeida. Secagem ao ar livre do angelim-pedra. São Carlos, SP: Anais do IV Encontro Brasileiro em Madeiras e Estruturas de Madeira, EESC/USP, 1992.

DE JESUS, José M. Henriques / **CALIL**, Carlito, Jr. / e **CHIERICE**, Gilberto Orivaldo. Resistência ao cisalhamento do adesivo poliuretano à base de mamona: parâmetros de colagem. São Carlos, SP: Anais do VII Encontro Brasileiro em Madeiras e Estruturas de Madeira, EESC/USP, 2000.

ELBEZ, Gérard/ e **BENTZ**, Dominique. Le collage du bois. Paris: CTBA, 1991.

ENCICLOPÉDIA BARSA, Eucalipto (verbetes). Vol. 7, p.215. São Paulo: Encyclopaedia Britannica Consultoria Editorial Ltda., 1983.

EPAGRI. Desenvolvimento da produção florestal. Projetos de pesquisa e extensão. [online]. Disponível na Internet via WWW. URL:
< <http://www.epagri.rct-sc.br/flores.html> > Acesso em maio de 2001.

FEDERAL REGISTER. Final National Pollutant Discharge Elimination System Storm Water Multi-Sector General Permit for Industrial Activities; Notice. Environmental Protection Agency – EPA. Vol. 60, No. 189 / 29 set. 1995. [online]. Disponível na Internet via WWW. URL:
< http://www.epa.gov/OW-OWM.html/sw/industry/msgp/sw_ms.pdf > Acesso em maio de 2001.

FAGUNDES, Glene Suely Ribes. Composição racional de vigas de madeira laminada colada de pinus. Florianópolis, SC: Curso de Pós Graduação em Eng. Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, 1998, 92 p., (dissertação de mestrado).

GALVÃO, Antônio Paulo Mendes de. Secagem racional da madeira / A.P.M. de G; Ivaldo Pontes Jankwsky – São Paulo: Nobel, 1985.

GONÇALVES, Marcos T. T. / **SERRA**, Bruno Lino / e **DELLA NOCE**, Luiz Gustavo. Secagem de *Eucalyptus grandis* pelo método de ventilação forçada. Artigo publicado nos anais do VI Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira (VI EBRAMEM). Florianópolis, SC, jul. 1998, vol. 3, p. 175-182.

GORGE-FARIAS, Marzely / e **WEINGAERTNER**, Walter Lindolfo Fresamento em alta velocidade (HSC) de madeiras reflorestadas de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus dunnii*. São Carlos, SP: Anais do VII Encontro Brasileiro em Madeiras e Estruturas de Madeira, EESC/USP, 2000.

GREEN LANE, site Web d'Environnement Canada. *The Role of Wood Preservatives*. [online]. Disponível na Internet via WWW. URL:
< <http://www.atl.ec.gc.ca/epb/factsheets/pesticides/wood.html> > Atualizado em maio de 2001. Acesso efetuado em maio de 2001.

GROHMANN, Sandra Zampieri. Vigas de madeira laminada colada com lâminas pré-classificadas de *Eucalyptus grandis* – Florianópolis, SC: UFSC, 1998, (dissertação de mestrado).

HERNANDEZ, Roland / **DAVALOS**, Julio F. / **SONTI**, Somnath S. / **KIM**, Youngchan / e **MOODY**, Russell C. *Strength and Stiffness of Reinforced Yellow-Poplar Glued-Laminated Beams*. Relatório de pesquisa. Madison, WI: U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, jul. 1997.

KNAPP, Laura. Brasil inicia projeto para o genoma do eucalipto. Gazeta Mercantil, São Paulo, 18 out. 2000.

LAKATOS, Eva Maria / e **MARCONI**, Marina de Andrade. Metodologia do trabalho científico: procedimentos básicos, pesquisa bibliográfica, projeto e relatório, publicações e trabalhos científicos. 4ª ed., São Paulo: Ed. Atlas, 1992.

LORENZI, Harri, Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil. Vol. 1, 2ª Ed., Nova Odessa, SP: Ed. Plantarum, 1998.

MACÊDO, Alcebiades Negrão / **DIAS**, Antonio Alves / e **BARATA**, Tomas Queiroz Ferreira. Madeiras tropicais da Amazônica como alternativa para aplicação em madeira laminada colada (MLC). São Carlos, SP: Anais do VII Encontro Brasileiro em Madeiras e Estruturas de Madeira, EESC/USP, 2000.

MADEIRA TOTAL. Madeiras. Traz informações detalhadas e classificadas sobre um grande número de espécies de madeira nativas e exóticas. Disponível na Internet em:

<<http://www.madeiratotal.com.br/Madeiras.htm>>. Acesso em julho de 2000.

MENDES, Alfredo de Souza, A secagem da madeira – Manaus: INPA, 1996. 62 págs.

MENDES, Carlos. Árvore exótica pode substituir o mogno. O Estado de SP, São Paulo, 18 fev. 1998, p. G3.

MENDES, Lourival M. / **SILVA**, José R. M. / **TRUGILHO**, Paulo F. / e **BOTELHO**, Jomara E. Comportamento da madeira de 25 espécies de eucalipto durante a secagem ao ar livre. Artigo publicado nos anais do VI Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira (VI EBRAMEM). Florianópolis, SC, jul. 1998, vol. 3, p. 147-157.

MERICO, Luiz Fernando Krieger. Introdução à economia ecológica. Blumenau: Ed. da FURB, 1996. 160 pág. – Coleção sociedade e ambiente.

MOURA, Gevilacio Aguiar Coêlho de. Citações e referências a documentos eletrônicos. [online] Disponível na Internet via WWW. URL:

<http://www.quatrocantos.com/tec_web/refere/index.htm>. Última atualização em 01 de janeiro de 2001. Endereço eletrônico do autor: gmoura@elogica.com.br

MOLITERNO, Antônio. Caderno de projetos de telhados em estruturas de madeira. São Paulo: Ed. Edgard Blücher Ltda., 1981.

NANNI, Luis Fernando. Análise estatística de dados com uso de técnicas computacionais. Caderno técnico, Porto Alegre, RS: Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil - UFRGS, 1986.

NATTERER, Julius / **HERZOG**, Thomas / e **VOLZ**, Michaël. Construire en bois 2. Edição original em língua alemã: *Holzbau Atlas Zwei*. Lausanne, Suisse: Presses polytechniques et universitaires romandes, 1994.

NEIVA, Gérson Shirahama. Estudo de vigas retas de madeira laminada colada (MLC). São Carlos, SP: Anais do IV Encontro Brasileiro em Madeiras e Estruturas de Madeira, EESC/USP, 1992.

NOGUEIRA, Marta Cristina de J. A./ **NOGUEIRA**, José de Souza/ e **CARVALHO**, André Calvoso de. Indicação e aplicação do angelim pedra e itaúba na construção civil. São Carlos, SP: Anais do VII Encontro Brasileiro em Madeiras e Estruturas de Madeira, EESC/USP, 2000.

OLIVEIRA, J.T.S. Caracterização da madeira de eucalipto para a construção civil. Tese de doutorado. São Paulo: Escola Politécnica da USP, 1997.

PEREZ GALAZ, V. V. Manual de Madera Laminada. Santiago, Chile: Departamento Construcciones en Madera, Instituto Forestal, Manual nº 11, 1979.

PETRAUSKI, Alfredo / **DELLA LUCIA**, Ricardo Marius / e **BAÊTA**, Fernando da Costa. Construção e teste de estruturas para telhados feitas em laminado colado de *Eucalyptus grandis*. São Carlos, SP: Anais do VII Encontro Brasileiro em Madeiras e Estruturas de Madeira, EESC/USP, 2000.

PETRAUSKI, Alfredo. Desempenho de juntas coladas de *Eucalyptus grandis* em função de diferentes níveis de pressão, consumo de cola e número de faces de aplicação do adesivo. Florianópolis, SC: Anais do VI Encontro Brasileiro em Madeiras e Estruturas de Madeira, UFSC, 1998.

PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL. Subchefia para assuntos jurídicos. Lei n.º 4.771, de 15 de setembro de 1965. Institui o novo Código Florestal. [online]. Disponível na Internet via WWW. URL: < <http://www.planalto.gov.br/> > Acesso em maio de 2001.

REIS, Eduardo Almeida. De madeiras & relógios. Artigo publicado na revista A Granja, n.º 611, nov/1999. Porto Alegre, RS: Editora Centaurus Ltda., 1999.

RIBEIRO, Arley Grieco. Adesivos para madeira – visão geral dos produtos encontrados no mercado brasileiro. São Carlos, SP: Anais do IV Encontro Brasileiro em Madeiras e Estruturas de Madeira, EESC/USP, 1992.

ROCCO LAHR, F. A. Contribuição ao estudo de vigas retas de madeira laminada colada. São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), Universidade de São Paulo (USP), 1991.

RODRIGUES, Liziane / e FERNANDES, Márcio. Estado volta a investir em reflorestamento. Jornal Diário Catarinense, caderno de Economia, Florianópolis, SC, 11 fev. 2001.

RODRIGUES, Rodrigo Augusto Dias / e FRANCO, Nilson. Avaliação das propriedades físicas e mecânicas de lotes de madeira serrada de eucalipto, utilizadas na construção civil. São Carlos, SP: Anais do VII Encontro Brasileiro em Madeiras e Estruturas de Madeira, EESC/USP, 2000.

ROPER, John / e ROBERTS, Ralph W. *Le déclin des forêts tropicales*. Réseau des Conseillers Forestiers (RCFA) de l'Agence canadienne de développement international (ACDI), 1999. Disponível em:

< <http://www.rcfa-cfan.org/french/f.issues.12.html> > Acesso em: 13 de abril de 2001.

ROVERE, Henriette Lebre La. Aplicações do método de homogeneização da seção a vigas de madeira laminada colada. Artigo publicado nos anais do VI Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira (VI EBRAMEM). Florianópolis, SC, jul. 1998, vol. 1, p. 391-400.

SANDOZ, Jean Luc. *Bois lamellé-collé: fiabilité et hautes performances*. Conferência proferida e publicada nos anais do VI Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira (VI EBRAMEM). Florianópolis, SC, jul. 1998, vol. 2, p. 3-11.

SMERALDI, Roberto/ e VERÍSSIMO, José Adalberto de Oliveira. Acertando o alvo: consumo de madeira no mercado interno brasileiro e promoção da certificação florestal. São Paulo: Amigos da Terra - Programa Amazônia; Piracicaba, SP: IMAFLORA; Belém, PA: IMAZON, 1999.

SOUZA, Maria Helena de/ MAGLIANO, Mauro Mendonça/ CAMARGOS, José Arlete Alves. Madeiras tropicais brasileiras. Brasília: Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis Laboratório de Produtos Florestais, 1997.

STALNAKER, Judith J. / e HARRIS, Ernest. *Structural Design in Wood*. New York, USA: Ed. Chapman and Hall, 2ª ed., 1997.

SZÜCS, Carlos Alberto. Entalhes múltiplos. Determinação da geometria, da pressão de colagem e do enfraquecimento causado. Anais do IV Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira (IV EBRAMEM). São Carlos, SP, jul. 1992a, vol. 3, p. 21-31.

Étude d'un assemblage par pièce de coin en bois lamellé-collé renforcé par fibres de verre. Metz, França: Université de Metz, 1991 (tese de doutorado em ciências da madeira).

Madeira laminada colada reforçada com fibras de vidro na direção transversal às suas fibras. Anais do IV Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira (IV EBRAMEM). São Carlos, SP, jul. 1992b, vol. 3, p. 79-90.

SZÜCS, Carlos Alberto / e **CHANG**, Tuing Ching. Possibilidades de fabricação de estruturas de madeira laminada, reforçadas com fibras de vidro de fios orientados. Anais do IV Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira (IV EBRAMEM). São Carlos, SP, jul. 1992, vol. 2, p. 105-114.

SZÜCS, Carlos Alberto / **GRAEFF**, André / **SILVA**, Robson Hoffmann / e **SILES**, Mário Henrique Pires. Influência da diluição do adesivo na composição da madeira laminada colada reforçada. Florianópolis, SC: Anais do VI Encontro Brasileiro em Madeiras e Estruturas de Madeira, UFSC, 1998a, vol. 1, p. 313-324.

Influência da diluição do adesivo na composição de peças de madeira laminada colada. Florianópolis, SC: Anais do VI Encontro Brasileiro em Madeiras e Estruturas de Madeira, UFSC, 1998b, vol. 1, p. 325-334.

SZÜCS, Carlos Alberto / **JODIN**, Philippe / e **PLUVINAGE**, Guy. Ligação por peça de canto composta de madeira laminada-colada reforçadas por fibras de vidro. Anais do IV Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira (IV EBRAMEM). São Carlos, SP, jul. 1992, vol. 3, p. 65-77.

TIMOSHENKO, S. P. / e GERE, J. E. Mecânica dos sólidos. Vol. 2, 1ª Ed., Rio de Janeiro, RJ: Livros Técnicos e Científicos Editora, 1999 (reimpressão). Tradução do original "*Mechanics of Materials*": Wadsworth International Group, 1982.

VICENZI, Herculano / e PINTER, Silvia. Florestal catarinense quer conter devastação. Jornal A Notícia. Caderno Geral. 14 de novembro de 1999.

ZENID, Geraldo José/ e COSTA, Adriana Donizetti Carvalho. Grupamento das madeiras serradas empregadas na construção civil habitacional na cidade de São Paulo. São Carlos, SP: Anais do VII Encontro Brasileiro em Madeiras e Estruturas de Madeira, EESC/USP, 2000.