**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO INTERUNIDADES EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**Estudo teórico e experimental de vigas de madeira laminada
colada reforçadas com fibra de vidro**

Juliano Fiorelli

Tese apresentada à Área Interunidades em
Ciência e Engenharia de Materiais, da
Universidade de São Paulo, como parte dos
requisitos para a obtenção do título de Doutor
em Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientador: **Prof. Dr. Antonio Alves Dias**

*São Carlos
2005*

De acordo com Fernando Pessoa, de tudo ficaram três coisas:

A certeza de que estamos sempre começando;
A certeza de que é preciso continuar;
A certeza de que seremos interrompidos antes de terminar;
Portanto, devemos:
Fazer da interrupção um caminho novo;
Da queda um passo novo de dança;
Do medo, uma escada;
Do sonho, uma ponte;
Da procura, um encontro.

Dedicatória:
A minha esposa Erika,
pelos momentos de alegria e de dificuldades em nossas vidas.
Pelo amor e dedicação, o meu amor do fundo do coração.

AGRADECIMENTOS

A Deus, muito obrigado. Grandes foram as lutas, maiores as vitórias. Sempre estivestes comigo. Muitas vezes pensei recuar ou parar, porém, Tu sempre estiveste ao meu lado, ensinado-me a fazer da derrota uma vitória, da fraqueza uma força. Não cheguei ao fim, mas ao início de uma longa jornada, na qual Tu seguirás ao meu lado.

Ao meu orientador professor Antonio Alves Dias que sempre fez da docência um ideal supremo, mesclando a arte de ensinar com o dom da convivência. Que abnegou dos seus interesses particulares e transmitiu suas experiências que auxiliaram na minha formação. Graças a seus ensinamentos, me sinto mais preparado par enfrentar a vida.

À minha esposa Erika, de quem sempre recebi carinho e amor. Paciência era a sua palavra mágica. Acreditava no impossível, conseguia enxergar flores nos canteiros de espinhos. Sempre me ensinou a sonhar e nunca desanimar. Obrigado por estar ao meu lado.

Aos meus pais, Carlos e Marta, de quem recebi o dom mais precioso – A vida. Não contentes em presentear-me apenas com ela, revestiram minha experiência com amor, carinho e dedicação, cultivaram na criança todos os valores que a transformam em um adulto responsável e consciente. Abriram as portas do meu futuro iluminando o meu caminho com a luz mais brilhante que puderam encontrar, o estudo. Obrigado por tudo.

Ao meu amigo Malton Lindquist, que muitas vezes deixou seus afazeres para me ajudar. Obrigado pelos ensinamentos de programação.

À FAPESP – Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo, pelo suporte financeiro.

À FIBERTEX , pela doação das fibras de vidro, imprescindível para a realização deste trabalho.

Aos professores Calil, Rocco e Almir, pelos ensinamentos transmitidos durante toda a nossa convivência.

Aos amigos e funcionários do LaMEM que sempre me auxiliaram na realização dos experimentos.

Ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil LNEC - Núcleo de Estruturas de Madeira, pela estrutura física oferecida.

Aos pesquisadores Helena Cruz e José Saporiti Machado do LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil – Lisboa – Portugal, pelo apoio e orientação na realização dos ensaios de delaminação.

Aos amigos da Unesp – Dracena, pelo companheirismo, pela ajuda e pela solidão compartilhada na nova fase de nossas vidas.

A todos aqueles que, de alguma maneira, contribuíram para a elaboração deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	7
LISTA DE TABELAS.....	9
LISTA DE SÍMBOLOS	10
RESUMO	11
ABSTRACT	12
1 – INTRODUÇÃO	13
2 – OBJETIVOS	15
2.1 <i>Objetivos gerais.....</i>	<i>15</i>
2.2 <i>Objetivos específicos</i>	<i>15</i>
3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1 – <i>Generalidades a respeito da Madeira Laminada Colada</i>	<i>16</i>
3.2 – <i>Aspectos da fabricação de MLC.....</i>	<i>20</i>
3.2.1 - Densidade da madeira	20
3.2.2 - Secagem da madeira e teor de umidade das lâminas	20
3.2.3 - Tratamento preservativo.....	20
3.2.4 – Qualidade e características das lâminas.....	20
3.2.4.1 - Características dimensionais das lâminas.....	21
3.2.4.2 - Classificação das lâminas	21
3.2.4.2.1- Classificação visual	21
3.2.4.2.2 - Classificação mecânica.....	22
3.2.4.3 - Posição e distribuição das lâminas	23
3.2.4.4 - Adesivos	24
3.2.4.5 - União longitudinal das tábuas e composição das lâminas	25
3.2.4.5.1 - Geometria das emendas dentadas	26
3.2.4.5.2- Processo de produção de emendas dentadas.....	27
3.2.4.5.3- Distância entre emendas.....	27
3.2.4.5.4 - Pressão de colagem nas emendas	28
3.2.5 – Colagem das lâminas.....	28
3.2.5.1 - Pressão de colagem nas linhas de cola	28
3.2.5.2- Tempo de prensagem	29
3.2.5.3- Procedimento de fabricação de MLC	29
3.3 – <i>Polímeros reforçados com fibras</i>	<i>29</i>
3.3.1 – Porcentagem de reforço	30
3.4 – <i>Critérios normativos para dimensionamento de vigas de MLC</i>	<i>31</i>
3.4.1 NBR 7190/97 – Projeto de estruturas de madeira.....	31
3.4.2 ASTM D3737/96 – Standard test method for establishing stresses for structural Glued Laminated Timber (Glulam).....	31
3.4.3 EUROCODE 5	33
3.5 <i>Critérios para dimensionamento de vigas de madeira reforçadas com fibras</i>	<i>33</i>
3.6 – <i>Considerações finais</i>	<i>42</i>
4. MODELO TEÓRICO PARA DIMENSIONAMENTO DE VIGA DE MLC REFORÇADA COM FIBRA	45
4.1 <i>Determinação do momento fletor resistente</i>	<i>45</i>
4.1.1 Comportamento mecânico da madeira e da fibra	45
4.1.2 Hipóteses de distribuição de tensões na viga na fase de ruptura.....	48
4.1.3 Cálculo do momento fletor resistente	49
4.2 <i>Determinação da rigidez à flexão.....</i>	<i>49</i>

5. PROGRAMA COMPUTACIONAL PARA DETERMINAÇÃO DO MOMENTO FLETOR RESISTENTE E DA RIGIDEZ À FLEXÃO (MLC - REFORÇADA)	51
5.1 – Dados de entrada	51
5.2 – Procedimentos para determinação do momento fletor resistente.....	52
5.3 – Dados de Saída.....	54
5.4 – Fluxograma	56
6. ESTUDO DO COMPORTAMENTO DA MADEIRA NA COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS	58
6.1. Ensaios realizados.....	58
6.2 Resultados obtidos e análise.....	59
6.3 Análise da influência do coeficiente “m” no modelo teórico de resistência	62
7. CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE TECIDO UNIDIRECIONAL DE FIBRA DE VIDRO	65
7.1 Método de ensaio.....	65
7.2 Resultados obtidos e análise.....	67
8. ENSAIOS DE FLEXÃO EM VIGAS DE MLC.....	71
8.1 Materiais e Métodos	71
8.1.1 Fabricação das vigas	71
8.1.1.1 Método para aplicação de fibra de vidro à madeira	74
8.1.2 Caracterização das lâminas	75
8.1.3 Ensaio nas vigas	75
8.1.4 Caracterização da madeira	76
8.2 Resultados obtidos.....	76
8.2.1 Modos de ruptura.....	77
8.2.2 Rigidez à flexão e momento fletor resistente.....	80
8.2.3 Valores de resistência à compressão e à tração paralela às fibras da madeira	81
8.3 Análise dos resultados	82
8.3.1 Análise da rigidez à flexão	82
8.3.2 Análise das deformações – experimental e teórico.....	82
8.3.3 Análise do momento fletor máximo resistente - experimental e teórico	88
9. AVALIAÇÃO DE CORPOS-DE-PROVA DE MLC REFORÇADOS COM PRF SUBMETIDOS A ENSAIO DE DELAMINAÇÃO	92
9.1 Materiais e Métodos	92
9.1.1 Adesivos avaliados	92
9.1.2 Quantidade e dimensão dos corpos-de-prova	92
9.1.3 Procedimento de ensaio	93
9.1.4 Cálculo da porcentagem de delaminação.....	94
9.2 Resultados obtidos.....	94
9.3 Análise dos resultados	97
10. CONCLUSÕES	100
10.1 Perspectivas de continuidade	102
11. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	103

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Esquema geral e seção transversal de uma peça de MLC.....	17
Figura 3.2 – Equipamentos de classificação não destrutiva	23
Figura 3.3 - Tipos de emendas utilizadas em MLC. Fonte: Macedo (2000).	25
Figura 3.4 – Tipos de emendas dentadas	26
Figura 3.5 - Parâmetros geométricos da emenda dentada	26
Figura 3.6 – Processo de produção de emendas dentadas	27
Figura 3.7 – Pressão de colagem em função do comprimento da emenda (DIN 68 140).....	28
Figura 3.8 – Processo de produção de MLC.....	29
Figura 3.9 – Variação do SMF em função do R	32
Figura 3.10 - Distribuição de tensões em vigas reforçadas	34
Figura 3.11 - Diagrama de deformação na seção transversal	35
Figura 3.12 – Distribuição de tensão na seção transversal da viga.....	36
Figura 3.13 – Modos de ruptura para vigas de MLC.....	36
Figura 3.14 – Notação e relação tensão deformação na seção transversal	37
Figura 3.15 – Distribuição de tensão na seção transversal	40
Figura 3.16 – Relação tensão deformação para madeira na tração e na compressão paralela às fibras.....	42
(BUCHANAN, 1990).....	42
Figura 4.1 – Comportamento da madeira à compressão paralela às fibras.....	46
Figura 4.2 – Comportamento da madeira na tração paralela às fibras.....	46
Figura 4.3 – Relação tensão deformação para madeira na tração e na compressão paralela às fibras.....	47
Figura 4.4 – Relação tensão deformação para fibra de vidro	47
Figura 4.5 – Distribuição de deformação e tensão na seção transversal da viga – Ruptura por compressão ...	48
Figura 4.6 – Distribuição de deformação e tensão na seção transversal da viga – Ruptura por tração.....	49
Figura 5.1 – Variáveis do programa	51
Figura 5.2 – Valor inicial do ângulo alfa e posição inicial da L.N.	53
Figura 5.3 – Método para determinar a força normal resultante e a posição da L.N.	53
Figura 5.4 – Diagrama de forças atuantes nas lâminas de madeira	54
Figura 5.5 – Diagrama de deformação	55
Figura 5.6 – Diagrama de tensões atuantes nas lâminas de madeira	55
Figura 6.1 –Corpos-de-prova dimensão estrutural	59
Figura 6.2 – Ensaio de compressão paralela às fibras.....	59
Figura 6.3 – Comportamento real de um corpo-de-prova submetido a ensaio de compressão paralela às fibras	60
Figura 6.4 –Corpo-de-prova dimensão estrutural.....	62
Figura 6.5 – Variação do momento em função da relação entre as resistências (1,2% de reforço).....	64
Figura 6.6 – Variação do momento em função da relação entre as resistências (3,3 % de reforço).....	64
Figura 7.1 – Tecido unidirecional de fibra de vidro	66
Figura 7.2 – Laminação de corpos-de-prova de fibras de vidro com resina epóxi	66
Figura 7.3 – Tensão x deformação (UF- 0900 – Longitudinal).....	70
Figura 7.4 – Tensão x deformação (UF- 0076 – Longitudinal).....	70
Figura 8.1 Distribuição das emendas ao longo do comprimento das vigas	73
Figura 8.2– Processo de fabricação das vigas de MLC	74
Figura 8.3 - Procedimento de aplicação de fibras de vidro em vigas de madeira.....	74
Figura 8.4 – Esquema estático de ensaio das lâminas de madeira.....	75
Figura 8.5 – Esquema de ensaio de flexão estática.....	75
Figura 8.6 - Posição dos extensômetros na seção transversal da viga	76
Figura 8.7 – Ruptura inicial e final nas vigas de MLC.....	77
Figura 8.8 – Tipos de ruptura nas vigas de MLC	80
Figura 8.9 – Variação das deformações ao longo da altura da viga em função do nível do carregamento (Seção nominal 7 x 20 cm).....	84
Figura 8.10 – Variação das deformações ao longo da altura da viga em função do nível do carregamento (Seção nominal 7 x 30 cm)	85
Figura 8.11 – Variação das deformações em função do momento fletor resistente (Seção nominal 7 x 20cm)	86
Figura 8.12 – Variação das deformações em função do momento fletor resistente (Seção nominal 7 x 30cm)	87

Figura 9.1 – Dimensões (mm) do corpo-de-prova para ensaio de delaminação e seção transversal do CP avaliado	93
Figura 9.2 – Equipamento de ensaio de delaminação do LNEC	93
Figura 9.3 – Numeração das linhas de cola	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Dimensão máxima de nós	22
Tabela 3.2 - Densidade da madeira	22
Tabela 3.3 - Configurações para vigas de MLC	24
Tabela 3.4 – Tipo de cola em função do uso previsto para a estrutura (SZUCS (1992) ²)	25
Tabela 3.5 - Características geométricas dos perfis estruturais usados nas emendas dentadas	27
Tabela 3.6 - Características dos tecidos de fibras a 20°C (Fonte: Fiorelli (2002))	30
Tabela 3.7 - Fatores de ajuste da resistência de corpos-de-prova isentos de defeitos. ASTM D 3737-96	32
Tabela 3.8 – Valores de resistência e elasticidade.....	40
Tabela 6.1 – Corpos-de-prova com dimensões estruturais	60
Tabela 6.2 – Corpos-de-prova isentos de defeitos.....	61
Tabela 6.3 – Propriedades da viga.....	63
Tabela 7.1 - Geometria dos corpos-de-prova. Fonte: ASTM D3039/95	65
Tabela 7.2 - Valores de resistência à tração e módulo de elasticidade de fibras de vidro (UF-0900 longitudinal)	68
Tabela 7.3 - Valores de resistência à tração e módulo de elasticidade de fibras de vidro (UF-0076 longitudinal)	69
Tabela 7.4 - Valores médios e coeficiente de variação de resistência à tração e módulo de elasticidade de fibras de vidro (UF-0900 - Longitudinal).....	70
Tabela 7.5 - Valores médios e coeficiente de variação de resistência à tração e módulo de elasticidade de fibras de vidro (UF-0076 - Longitudinal).....	70
Tabela 8.1 – Propriedades geométricas das vigas de MLC avaliadas experimentalmente	72
Tabela 8.2 – Valor de rigidez à flexão e momento fletor resistente	81
Tabela 8.3 – Valor de resistência à compressão e à tração e coeficiente de variação.....	81
Tabela 8.4 – Valor da rigidez à flexão (experimental e teórico).....	82
Tabela 8.5 – Valor do momento fletor resistente (experimental e teórico)	89
Tabela 8.6 – Relação entre resistência à tração experimental e teórica	90
Tabela 8.7 – Valor do momento fletor resistente (experimental e teórico ASTM D 3737/96)	90
Tabela 9.1 – Resultados de delaminação medidos no corpo-de-prova 01	95
Tabela 9.2 – Resultados de delaminação medidos no corpo-de-prova 02	95
Tabela 9.3 – Resultados de delaminação medidos no corpo-de-prova 03	95
Tabela 9.4 – Resultados de delaminação medidos no corpo-de-prova 04	96
Tabela 9.5 – Resultados de delaminação medidos no corpo-de-prova 05	96
Tabela 9.6 – Resultados de delaminação medidos no corpo-de-prova 06	96
Tabela 9.7 – Resultados de delaminação medidos no corpo-de-prova 07	96
Tabela 9.8 – Resultados de delaminação medidos no corpo-de-prova 8	97
Tabela 9.9 – Resultados de delaminação medidos no corpo-de-prova 9	97
Tabela 9.10 – Resultados de delaminação medidos no corpo-de-prova 10	97
Tabela 9.11 – Porcentagem de delaminação.....	98
Tabela 9.12 – Delaminação total por linha de cola.....	98

LISTA DE SÍMBOLOS

$\bar{E}$ – Módulo de elasticidade máximo
 α – ângulo do diagrama de deformação
 ϵ_{cu} – deformação máxima à compressão
 ϵ_{tu} – deformação máxima à tração
 b – Largura da viga
 b – largura da viga;
 c_i – Espessura de cada lamina de madeira i
 d_i – distância do C.G. da lâmina ao C.G. da viga.
 e – espessura da camada de fibra;
 E_f – Módulo de elasticidade da fibra de vidro
 E_i – Módulo de elasticidade da lâmina de madeira i
 EI – Rigidez à flexão
 f_{c0} – resistência à compressão
 f_{c0i} – Resistência à compressão paralela de cada lâmina de madeira i
 f_{t0} – resistência à tração
 f_{t0i} – Resistência à tração paralela de cada lâmina de madeira i
 h – altura da viga
 h_i – altura da lâmina i
 i – nº da lâmina de madeira ($i=1 \rightarrow n$), a partir da borda superior
 m – coeficiente angular do trecho inelástico
 $M_{exp.}$ – Momento fletor resistente experimental
 $M_{teo.}$ – Momento fletor resistente teórico
 Y – Altura da região tracionada da viga
RFV – Reforço de fibra de vidro

RESUMO

O uso de madeira laminada colada (MLC) em países da América do Norte e Europa é bastante difundido. No Brasil, apesar da técnica existir desde o século XX, a sua utilização é incipiente em relação à possibilidade de utilização desse produto. O desenvolvimento de produtos a partir de lâminas de madeira com pequenas dimensões se deve à necessidade de se eliminar defeitos nas peças estruturais, tais como nó e medula, os quais reduzem significativamente as características de resistência e elasticidade da peça, em comparação com a madeira sã. O aumento da resistência e da rigidez da viga de MLC pode ser conseguido por meio da classificação das lâminas, seguida de uma disposição adequada das mesmas. Outra maneira de se obter um aumento nas propriedades de rigidez e de resistência de elementos estruturais de MLC é a utilização de polímeros reforçados com fibras (PRF) na região mais tracionada da viga. Esta providência, além de melhorar as propriedades mecânicas do elemento estrutural, aumenta a confiabilidade em relação ao modo de ruptura. Dentro deste escopo, este trabalho procura estabelecer critérios para fabricação de vigas retas de MLC, sem e com reforço de fibras de vidro, a partir de informações obtidas na revisão bibliográfica, abordando aspectos relacionados à resistência da madeira (espécie e qualidade da madeira, quantidade de nós, inclinação das fibras em relação ao eixo longitudinal das peças, presença de medula), dimensões das lâminas, espaçamento mínimo entre emendas dentadas de uma mesma lâmina e posicionamento das emendas dentadas na viga, colagem e prensagem. Foi proposto um modelo numérico para cálculo do momento fletor resistente e da rigidez à flexão (EI) de vigas de MLC sem reforço e reforçadas com PRF. O modelo admite a validade da hipótese de distribuição linear de deformações ao longo da altura da viga, comportamento elásto-frágil-linear da madeira na tração paralela às fibras e bi-linear na compressão paralela às fibras. Este modelo foi implementado a um programa computacional que por meio de um processo iterativo determina o valor do momento fletor resistente e da rigidez à flexão. Resultados experimentais obtidos por meio de ensaios em vigas de MLC reforçadas com fibra de vidro indicam a validade do modelo teórico proposto. Também foram realizados ensaios de delaminação para avaliar a eficiência dos adesivos Phenol-resorcinol e Epóxi AR-300 quando submetidos a variação de temperatura, umidade e pressão. Resultados obtidos indicaram a eficiência destes adesivos.

ABSTRACT

Glulam beam is used in countries of North America and Europe. In Brazil, the technique exists since the 20th Century, but its use is incipient in relation to the possibility of the product. The development of products that use wood with small dimensions is important to eliminate defects in the structural pieces, such as knot and marrow, which reduce the strength and stiffness of the piece. The increase of the strength and stiffness of the glulam beam can be achieved through the classification of the lumber, or by an appropriate disposition of the lumber. Another way to obtain an increase in the strength and stiffness of the glulam beam it is the use of fiber reinforced polymers (FRP). This way, besides improving the mechanical properties of the structural element, increases the reliability in relation to the rupture way. This work establish criteria for production of glulam beams, without and with reinforce of glass fiber, starting from information obtained in the bibliographical revision, approaching aspects related to the straight of the wood (species and quality of the wood, inclination of the fibers in relation to the longitudinal axis of the pieces, marrow presence), dimensions of the sheets, minimum spacing between bitten amendments of a same sheet and positioning of the jagged amendments in the beam. A numeric model for calculation of the straight moment and flexural stiffness (EI) of glulam beams was proposed. The model admits the validity of the hypothesis of lineal distribution of deformations along the height of the beam, elastic-fragile-lineal behavior of the wood in the parallel traction and bi-lineal in the parallel compression of the fibers. This model was implemented in a computer program that uses an interactive process to determine the value of the straight moment and of the flexural stiffness. Experimental results obtained indicate the validity of the theoretical model proposed. A test of delamination was done to evaluate the efficiency of the adhesives Phenol-resorcinol and Epoxy AR-300 when submitted to temperature, humidity and pressure variation. Results indicated the efficiency of these adhesives.

1 – INTRODUÇÃO

No Brasil, a madeira desempenha importante papel como material junto à construção civil. A produção mundial de madeira para fins estruturais encontra-se por volta de 10^9 toneladas por ano (MACEDO 2000), o que torna este material muito importante no contexto mundial. O Brasil apresenta uma grande disponibilidade de madeira, oriunda de reservas tropicais e de reflorestamento, que precisa ser explorada adequadamente.

Porém, com a redução da disponibilidade de espécies de madeiras nativas torna-se necessário o desenvolvimento de alternativas viáveis para a utilização racional da madeira proveniente de florestas plantadas. Perante esta realidade, a Madeira Laminada Colada (MLC) aparece como uma alternativa técnica viável para o aproveitamento racional deste material. A versatilidade da MLC com respeito às formas, dimensões e resistência dos elementos estruturais, aliada ao aumento da durabilidade proporcionado pelo tratamento preservativo sob pressão, vem ampliando seu uso em diversos países.

Desta forma, torna-se necessário o conhecimento de vários fatores que influenciam nas características de resistência e rigidez da viga de MLC. Entre estes fatores pode-se destacar os aspectos relacionados à resistência como: espécie de madeira, resistência da madeira, quantidade de nós, direção das fibras e módulo de elasticidade das lâminas. E também aspectos relacionados à fabricação tais como: posição das emendas longitudinais e laterais, quantidade, posição e espessura das lâminas e dimensões da peça.

Uma solução que vem sendo estudada e adotada nos Estados Unidos e na Europa para aumentar a resistência e a rigidez de vigas de MLC é o uso de polímeros reforçados com fibras (PRF). Este material é fixado na última linha de cola da viga de MLC e altera o modo de ruptura do respectivo elemento. Vigas de MLC sem reforço apresentam um modo de ruptura por tração nas fibras inferiores ou nas emendas. Vigas de MLC reforçadas com fibra apresentam uma

complexidade na ruptura que consiste em uma combinação de ruptura por compressão, tração e cisalhamento.

Dando continuidade aos estudos existentes, este trabalho tem como objetivo estabelecer critérios para fabricação de vigas retas de MLC, a partir de informações obtidas em revisão bibliográfica, e critérios de dimensionamento para vigas com reforço de fibras. O modelo de dimensionamento proposto admite a validade da hipótese de distribuição linear de deformações ao longo da altura da viga e considera um comportamento elásto-frágil-linear da madeira na tração paralela às fibras e bi-linear na compressão paralela às fibras. Este modelo foi implementado a um programa computacional que por meio de um processo iterativo determina o valor do momento fletor resistente e da rigidez à flexão. O respectivo programa leva em consideração o comportamento à tração e à compressão da madeira e à tração da fibra para calcular o valor do momento fletor resistente.

Para avaliar o modelo numérico de dimensionamento foram realizados ensaios em protótipos de vigas de Madeira Laminada Colada da espécie *Pinus Caribea Var. Hondurensis*, sem e com reforço de fibra de vidro (RFV). Esta experimentação permitiu verificar o incremento de rigidez e de resistência das vigas reforçadas. Resultados obtidos indicam a validade do modelo teórico proposto.

Com objetivo de avaliar a eficiência dos adesivos Phenol-resorcinol e epóxi AR-300, quando submetidos à variação de pressão, umidade e temperatura foi realizado ensaios de delaminação em corpos-de-prova extraídos das vigas de MLC reforçadas. Resultados indicam uma boa eficiência dos adesivos avaliados.

2 – OBJETIVOS

2.1 Objetivos gerais

- Estabelecimento de critérios para fabricação de vigas retas de MLC, a partir de informações obtidas em revisão bibliográfica.
- Estabelecimento de critério de dimensionamento de vigas retas de MLC com reforço de fibra de vidro, avaliado experimentalmente por meio de ensaios de vigas de MLC sem e com RFV.

2.2 Objetivos específicos

- Apresentar os principais sobre MLC reforçada com fibra;
- Estabelecer critérios para fabricação de vigas de MLC e vigas de MLC reforçadas com fibra;
- Propor modelo numérico para o dimensionamento de vigas de MLC reforçadas com fibra;
- Elaboração de um programa computacional para determinação do momento fletor resistente e da rigidez à flexão de vigas de MLC;
- Avaliação experimental de vigas de MLC com reforço de fibra de vidro, para verificação do modelo de cálculo proposto;
- Avaliação da eficiência dos adesivos na colagem da madeira e da fibra de vidro quanto à delaminação.

3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta os principais trabalhos desenvolvidos relacionados a critérios para fabricação e dimensionamento de vigas de MLC e vigas de MLC reforçadas com fibras. São apresentadas resumidamente informações de pesquisas realizadas no exterior e no Brasil sobre MLC, aspectos da sua fabricação e critérios para dimensionamento de vigas retas de MLC sem e com reforço de fibra. Finalizando, são apresentadas as contribuições a serem abordadas neste trabalho, definindo assim a contribuição dada pelo autor.

3.1 – Generalidades a respeito da Madeira Laminada Colada

A técnica da Madeira Laminada Colada (MLC) teve seu começo no século passado, em Wiemar, Alemanha, quando *Otto Karl Frederick Hetzer*, obteve a primeira patente desta técnica de construção. Em 1960, Hetzer patenteou na Alemanha construções com MLC na forma curva e, desde então, esta técnica foi utilizada por diversos países europeus sendo chamado no princípio de “*Estruturas Hettzer*”. A maioria das aplicações da MLC destinava-se a sistemas estruturais interiores. Entretanto, com o desenvolvimento dos adesivos a prova d’água, a MLC veio a ser usada com sucesso em estruturas expostas. Isso permitiu utilizar a MLC na construção dos mais variados tipos de estruturas de cobertura e pontes.

Como decorrência do avanço da MLC na Europa, sua introdução nos Estados Unidos da América (EUA) foi apenas uma questão de tempo. Max Hanisch foi o responsável por trazer a técnica para a América. A primeira aplicação da MLC em estruturas na América data de 1934, na construção de um ginásio para a Pesthtigo High School, Wisconsin. Após estudos realizados na Forest Products Laboratory, que provaram a confiabilidade da MLC, e a divulgação de Normas Técnicas, houve um verdadeiro surto de construções Hetzer nos EUA.

O termo Madeira Laminada Colada (MLC), quando aplicada a elementos estruturais refere-se ao material obtido a partir da colagem de topo e de face de pequenas peças de madeira, na forma

reta ou curva, com as fibras de todas as lâminas paralelas ao eixo da peça. As lâminas, de comprimento suficientemente grande, são obtidas através da emenda longitudinal de tábuas e podem ser coladas face a face e borda a borda para a obtenção da altura e largura desejada, podendo ainda ser arqueadas para obter uma forma curva durante a colagem. Todos estes fatores oferecem uma grande variedade de escolhas no projeto, sujeitos somente a restrições econômicas envolvidas na produção e/ou uso. A figura 3.1 apresenta um esquema geral de uma peça de MLC com o objetivo de visualizar os elementos que a constituem.

Figura 3.1 - Esquema geral e seção transversal de uma peça de MLC

Lâminas - apresentam espessura variável de acordo com o tipo do elemento estrutural, podendo variar de 1 cm (3/8") a 5 cm (2");

Lâminas de Cola - são constituídas por um tipo de adesivo compatível com a madeira e a finalidade do elemento estrutural;

Emendas longitudinais - são utilizadas para a obtenção de lâminas de comprimentos suficientemente grandes;

Emendas transversais ou laterais - são empregadas para obtenção de largura superior à largura das tábuas disponíveis.

Dependendo da disposição das lâminas em relação ao plano da peça flexionada, a MLC pode ser classificada em vertical ou horizontal, sendo mais comum o uso do horizontal.

Segundo STAMATO (1997), um dos fatores que levou ao desenvolvimento de produtos a base de lâminas de madeira foi a diminuição da resistência de uma peça de madeira maciça pelo enfraquecimento da seção devido à ocorrência de defeitos, tais como nó e medula, que reduzem significativamente as características de resistência e elasticidade da peça se comparada com a madeira isenta de defeitos.

As principais vantagens de se construir com MLC são:

- Possibilidade de construir grandes estruturas, com comprimentos e larguras variadas, a

partir da união de pequenas peças de madeira, possibilitando o empregando de peças com seção transversal variável ao longo do comprimento;

- Eliminação dos principais defeitos típicos existentes em peças de grandes dimensões, como rachaduras, nós, empenamento, encanoamento etc e possibilidade de uma distribuição seletiva das lâminas da peça;

Entre as principais desvantagens podem ser destacas as seguintes:

- Maior custo da MLC em relação à madeira maciça. Isto se deve ao processo de produção utilizado que envolve seleção das peças de madeira, adesivo e uma quantidade maior de mão-de-obra especializada;

- O alto custo se deve a perda de madeira e de adesivo durante a etapa de produção, devido principalmente, as emendas, acabamento e considerações de projeto e também devido ao alto custo do adesivo.

As principais pesquisas relacionadas a MLC no exterior aconteceram inicialmente no ano de 1954 quando FREAS & SELBO (1954) publicaram um boletim técnico do FPL N° 1069 - Fabrication and Design of Glued laminated Wood Members, que pode ser considerado a base para o conhecimento de MLC e para os atuais documentos normativos em vigor (CARRASCO, 1989).

A norma americana ASTM D 3737/96 - Standard Practice for Establishing Stresses for Structural Glued Laminated Timber, da AMERICAN SOCIETY for TESTING and MATERIALS (1996), utiliza o método da seção transformada para avaliação da rigidez, considerando um comportamento elástico linear da madeira. Para a determinação da resistência, é utilizado método empírico desenvolvido por FREAS & SELBO (1954) que determina o coeficiente de redução da resistência da madeira em função dos defeitos existentes nas peças.

Com o aumento da utilização da MLC, nos Estados Unidos, foi criada a American Institute of Timber Construction (AITC), para fornecer informações uniformizadas a respeito da fabricação da MLC. Atualmente a AITC publica vários documentos que apresentam critérios para a fabricação e utilização da MLC.

Com o objetivo de melhorar as propriedades mecânicas de resistência e de elasticidade de vigas de MLC, estudos passaram a despendar mais atenção para a associação da madeira a outros materiais. Dentre os novos materiais que estão sendo estudados, destacam-se os Polímeros Reforçados com Fibras (PRF), que estão proporcionando incremento nas propriedades mecânicas das vigas de MLC.

DAGHER (1999) estudou a utilização de reforço com lâminas de fibras de carbono (espessura 1,5mm) em vigas laminadas coladas, com o objetivo de avaliar o aumento da capacidade de carga dos elementos estruturais. Estas fibras proporcionaram um melhor desempenho estrutural às peças, permitindo uma maior utilização deste tipo de viga na construção civil. As fibras foram aplicadas na última linha de cola da região tracionada da viga. Resultados positivos de aumento da

resistência foram conseguidos. Para vigas reforçadas com 1,1% de reforço em relação a altura, o incremento na capacidade de carga foi de 25% e para vigas reforçadas com 3,3% o incremento foi de 60%.

No Brasil, estudos científicos relacionados a MLC foram desenvolvidos por CARRASCO (1989). No seu trabalho de doutorado, o autor apresentou os principais trabalhos referentes a MLC no Brasil e no exterior e desenvolveu um estudo da resistência, elasticidade e distribuições de tensões em vigas retas de MLC.

SZÜCZ (1992)¹ desenvolveu um trabalho no qual confeccionou corpos-de-prova em MLC, de tração normal às fibras, com fibra de vidro no interior de cada junta de cola, formando um compósito. O tecido de fibra de vidro foi disposto perpendicular às fibras da madeira e colados com adesivo resorcina-fenol-formol. O autor apresenta como resultado um aumento de cerca de 5 vezes a resistência à tração normal às fibras da madeira e afirma que o problema da baixa resistência da madeira, quando solicitada por esforços transversais às suas fibras, pode ser solucionado com um reforço de fibras de vidro, aplicado perpendicular às fibras da madeira dentro da técnica de fabricação de MLC.

GRAEFF (1995) avaliou a eficiência de emendas de topo reforçadas com fibra de vidro como proposta para substituição de emendas finger-joints em vigas de MLC. Como conclusões o autor afirma que vigas de MLC com emendas de topo reforçadas com fibra de vidro, com comprimento de ancoragem não inferior a 10 cm a partir da emenda, apresentaram um excelente comportamento mecânico. Afirma também que a partir do eixo neutro até a penúltima camada de lâminas (última linha de colagem) da peça, podem ser dispensadas as emendas por entalhes múltiplos, bastando simplesmente envolver as emendas de topo com tecido de fibra de vidro.

MACEDO (2000) realizou um estudo da resistência e da rigidez de emendas dentadas à fadiga na tração, estabelecendo coeficientes de redução para a respectiva situação.

HENRIQUES DE JESUS (2000) apresenta um estudo de adesivo poliuretano à base de mamona para confecção de MLC. Resultados indicam que o adesivo é uma boa alternativa para ser utilizado na produção de MLC.

ZANGIÁCOMO (2003) estudou espécies de madeira tropicais para confecção de MLC. Como resultado o autor afirma que a espécie Cedrinho (*Erismia sp*) foi a que apresentou melhor desempenho para ser utilizada na produção de madeira laminada colada.

A norma brasileira NBR 7190/97 – Projeto de estruturas de Madeira, da ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, recomenda que peças de MLC devem ser dimensionadas segundo os critérios estabelecidos para peças de madeira maciças e nos casos da existência de emendas deve-se considerar coeficientes de redução de área, relacionado com o tipo de emenda.

3.2 – Aspectos da fabricação de MLC

Este item apresenta os principais estudos referentes a critérios para fabricação de elementos estruturais em MLC, com o objetivo de melhorar as propriedades mecânicas e garantir a eficiência do elemento estrutural.

3.2.1 - Densidade da madeira

A densidade da madeira é um fator importante a ser considerado para garantir a eficiência de elementos estruturais em MLC. Pesquisas desenvolvidas mostram que devem ser utilizadas espécies de madeira que apresentem densidade compreendida entre $0,40 \text{ g/cm}^3$ e $0,75 \text{ g/cm}^3$. As espécies mais indicadas são as madeiras do gênero *Pinus Spp* que, segundo a norma NBR 7190/97 – Projeto de Estruturas de Madeira, apresentam densidade em torno de $0,5 \text{ g/cm}^3$. Madeiras que apresentem coeficientes de retração muito diferentes segundo as direções radial e tangencial, não devem ser utilizadas na composição do mesmo elemento estrutural em MLC.

3.2.2 - Secagem da madeira e teor de umidade das lâminas

Segundo SZÜCS (1992)² a secagem das tábuas é necessária, para se conseguir um melhor efeito na etapa da colagem. Neste sentido, é preciso que as tábuas estejam com um teor de umidade entre 7% e 14%. No caso de se ter um ambiente não climatizado no local onde será realizada a colagem, esse teor de umidade pode estar compreendido entre 12% e 16 %. O autor afirma ainda que é importante que não haja uma diferença entre teor de umidade de tábuas adjacentes, de mais de 5%, por exemplo, uma tábua com 10% e outra com 15%.

3.2.3 - Tratamento preservativo

O tratamento preservativo consiste na utilização de produtos químicos que proporcionem proteção a fungos e insetos. Os principais produtos recomendados para a realização de tratamento preservativo à madeira são:

CCA – Arseniato de Cobre Cromatado;

CCB – Borato de Cobre Cromatado.

Com relação às vigas de MLC, as tábuas empregadas no processo de fabricação devem ser tratadas sob pressão, antes da colagem, utilizando algum dos produtos indicados anteriormente.

3.2.4 – Qualidade e características das lâminas

Segundo ASTM D 3737/96 - Standard Test Method for Establishing Stresses for Structural Glue Laminated Timber (Glulam), da AMERICAN SOCIETY for TESTING and MATERIALS (1996), a qualidade das lâminas influencia significativamente a resistência de vigas de MLC. A adoção de critérios para a classificação das lâminas e posterior posicionamento na viga, colocando

as de melhor qualidade nas bordas mais externas e as de qualidade inferior próximas a linha neutra, garante um aumento da resistência e da rigidez dos elementos estruturais.

Este item apresenta os principais critérios, relacionados à qualidade das lâminas, que devem ser adotados para garantir a eficiência das vigas de MLC.

3.2.4.1 - Características dimensionais das lâminas

Segundo a norma ASTM D 3737/96 a espessura máxima das lâminas que constituirão os elementos estruturais em MLC deve ser de $5 \text{ cm} \pm 0,03 \text{ cm}$.

3.2.4.2 - Classificação das lâminas

As lâminas que serão utilizadas na composição da viga de MLC devem ser classificadas visualmente e mecanicamente.

3.2.4.2.1- Classificação visual

Segundo MADESEN (1962) a ruptura de uma viga de MLC geralmente se origina nas lâminas tracionadas, principalmente quando essas lâminas apresentam algum tipo de defeito, como por exemplo, nós e fibras inclinadas em relação ao eixo da peça. A partir deste ponto, a ruptura se propaga pela viga, geralmente por pontos com emendas, conduzindo-a ao colapso.

COIADO & DIAS (2004) quantificaram a influência dos nós e do desvio das fibras na resistência à tração de peças estruturais de *Pinus Spp* e observaram que, para peças com defeitos a ruptura ocorre na maioria das vezes nestas regiões, e a resistência da peça diminui significativamente.

Nota-se a importância da classificação das lâminas de madeira que serão utilizadas na confecção de elementos estruturais de MLC.

CARREIRA (2003) desenvolveu um trabalho a respeito de regras de classificação baseado no SPIB – Southern Pine Inspection Bureau (1994). A seguir serão comentados os aspectos mais importantes destas regras levantadas por CARREIRA.

A classificação visual consiste na inspeção visual das quatro faces e da extremidade de cada peça. Deve-se examinar todo o comprimento das peças e avaliar a localização e a natureza dos nós e outros defeitos presentes na superfície das mesmas e também a densidade da madeira.

A qualidade visual da madeira é definida em quatro níveis:

Classe Estrutural Especial (SS);

Classe Estrutural Nº 1 (Nº 1);

Classe Estrutural Nº 2 (Nº 2);

Classe Estrutural Nº 3 (Nº 3).

A tabela 3.1 apresenta a dimensão máxima dos nós permitida para cada classe.

Tabela 3.1 – Dimensão máxima de nós

Posição dos nós	SS	Nº1	Nº2	Nº3
Face estreita e Canto da face larga	20%	25%	33%	50%
Centro da face larga	35%	45%	50%	75%

Com relação a densidade da madeira é possível classificar a madeira em dois grupos:

Madeira Densa (D);

Madeira Não-Densa (ND).

A tabela 3.2 resume as condições estabelecidas para a densidade das peças de madeira.

Tabela 3.2 - Densidade da madeira

Classe	Número de anéis de inverno em 2,5cm	Quantidade de madeira de inverno
Densa	≥ 6	$> 1/3$
	≥ 4	$> 1/2$
Não Densa	≥ 4	$\leq 1/2$
	< 4	

Uma classe visual é descrita pelo nível de qualidade visual, seguido da densidade. Exemplificando, a descrição Nº 1-ND indica madeira com qualidade visual Nº 1 e com madeira Não-Densa.

Informações complementares referentes à classificação visual podem ser encontradas no anexo A.

3.2.4.2.2 - Classificação mecânica

Com o desenvolvimento tecnológico ocorrido nos últimos anos, vários equipamentos foram desenvolvidos com o objetivo de classificar mecanicamente a madeira.

A classificação mecânica consiste em determinar o módulo de elasticidade longitudinal (E) das lâminas, por meio de um método não destrutivo. Entre estes métodos pode-se destacar flexão estática, MSR, método de vibração transversal, stress-wave e ultra-som. A figura 3.2 ilustra os equipamentos utilizados para a classificação não destrutiva das lâminas.

MSR

Vibração transversal

Stress Wave

Ultra-som

Figura 3.2 – Equipamentos de classificação não destrutiva

Esta classificação permite formar um sub-lote superior com tábuas de E acima da média representativa das tábuas da espécie empregada e um sub-lote inferior com tábuas de E abaixo dessa média.

Pesquisas recentes, desenvolvidas por pesquisadores brasileiros, empregando técnicas não destrutivas em madeiras nativas e de reflorestamento, evidenciaram a eficácia deste método na estimativa das propriedades mecânicas da madeira. A validade desta técnica é testada por meio da comparação com resultados obtidos em ensaios destrutivos, os quais forneceram índices de correlação significativos [PUCCINI, C.T. & GONÇALVES, (2000); OLIVEIRA, F. G. R. & SALES, A. (2000); BARTHOLOMEU, A. & GONÇALVES, R. (2000); PUCCINI, C. T.; BALLARIN, A. W.; GONÇALVES, R. (2001)].

3.2.4.3 - Posição e distribuição das lâminas

O correto posicionamento das lâminas em vigas de MLC garante uma boa eficiência ao sistema. Na composição das peças de MLC horizontal, considera-se que as faces maiores das lâminas estejam posicionadas paralelas ao plano da linha neutra.

Com o objetivo de melhorar a resistência e a rigidez das peças de MLC, pode ser feita uma disposição seletiva da qualidade das lâminas da peça. Segundo a AMERICAN PLYWOOD ASSOCIATION (2000), vigas de MLC devem ser produzidas com madeira de melhor resistência nas lâminas superiores e inferiores, onde ocorrem as máximas tensões de compressão e de tração. Este conceito permite o uso mais eficiente da madeira, ao utilizar as mais resistentes nas zonas de tensões máximas e as de qualidade estrutural inferior nas zonas de menores tensões. Assim, a classificação estrutural das peças para fabricação de MLC torna-se imprescindível para se obter um produto eficiente.

A Norma ANSI/AITC 117-2001 – Standard Specifications for Structural Glued Laminated Timber of Softwoods Species Manufacturing Requirements estabelece classes de resistência para vigas de MLC relacionadas com a classificação visual e com E-Rated. São fornecidas várias configurações de vigas para cada classe de resistência, e também são apresentadas configurações para vigas balanceadas, nas quais a classificação visual e a porcentagem de lâminas na região comprimida são iguais às da região tracionada e para vigas desbalanceadas, nas quais a

classificação visual e a porcentagem das lâminas na região comprimida são diferentes. A tabela 3.3 apresenta configurações para vigas de MLC da espécie Southern Pine recomendadas pela AITC 117-2001, segundo a classificação visual e a classificação E-Rated.

Tabela 3.3 - Configurações para vigas de MLC

Classificação Visual		Quantidade mínima de lâminas classificadas				
Símbolo	Altura da viga	Região tracionada	Região tracionada intermediária	Região central	Região comprimida intermediária	Região comprimida
20F-V3 SP	<12 in	20% N1D 1:14	10% N2M	N3M	10% N2M	10% N1D
	12in – 15 in	10% N1D 1:15	10% N2M	N3M	15% N2M	10% N1M 1:14
Classificação E-Rated						
20F-E1 SP	<12 in	25% 2.1E6	--	N2M	--	10% 2.1E2
	12in – 15 in	15% 2.1E6	15% 1.9E6	N2M	--	10% 2.1E2

As nomenclaturas apresentadas na tabela são:

20F – Resistência característica à flexão (psi) de vigas de MLC

N1D – Classe visual 1, madeira densa

N2M – Classe visual 2, madeira de média densidade

2.1E6 – Módulo de elasticidade ($2,1 \cdot 10^6$ psi) (14.700 MPa), 1/6 da seção apresenta nó

3.2.4.4 - Adesivos

Para a correta escolha do adesivo a ser utilizado na confecção de vigas de MLC é preciso levar em consideração principalmente o meio a que a estrutura estará inserida, ou seja, temperatura e teor de umidade.

Segundo a NBR 7190/97 – Projeto de Estruturas de Madeira, o adesivo utilizado para a produção de vigas de MLC deve ser a prova d'água.

Para a escolha do tipo de adesivo é importante considerar se a estrutura vai permanecer abrigada no interior da edificação, ou exposta à variação das condições atmosféricas, tais como alternância de sol e chuva. De acordo com SZÜCS (1992)² a tabela 3.4 apresenta os tipos de colas que podem ser utilizadas em função do uso previsto para a estrutura.

Tabela 3.4 – Tipo de cola em função do uso previsto para a estrutura (SZUCS (1992)²)

	Boas condições atmosféricas		Más condições atmosféricas
	Umidade da madeira <18%	Umidade da madeira ≥18%	Exposição em atmosfera contendo produtos químicos ou exposição direta às intempéries
temperatura elevada	resorcina	resorcina	resorcina
temperatura normal	caseína		
	resorcina	resorcina	resorcina
	caseína	uréia-formol	
	uréia-formol		
Obs: As colas de resorcina-fenol devem oferecer as mesmas condições das colas de resorcina pura. Na dúvida, devem ser realizados ensaios de laboratório.			

A verificação da eficiência da cola deverá ser atestada por ensaios, de cisalhamento na lâmina de cola, tração normal à lâmina de cola, segundo as recomendações da norma NBR 7190/97.

Para o emprego em MLC, os resultados característicos desses ensaios deverão indicar no mínimo 90% do valor da resistência característica da própria madeira, quando submetida aos mesmos ensaios.

A quantidade de adesivo deve seguir a orientação do fabricante em função do tipo da cola.

3.2.4.5 - União longitudinal das tábuas e composição das lâminas

Os elementos em MLC de dimensões consideráveis necessitam de lâminas de comprimento suficientemente grande, que pode ser conseguido por meio da união longitudinal de peças de madeira de dimensões menores que a dimensão final do elemento.

Para obter lâminas com comprimentos suficientemente grandes, podem ser feitas emendas de tábuas (emendas longitudinais e laterais). As emendas longitudinais nas lâminas de madeira surgem quando se deseja obter elementos de MLC com comprimentos superiores ao da madeira serrada, ou durante a retirada de defeitos das lâminas. As emendas nas lâminas podem ser de topo, biseladas ou dentadas, figura 3.3.

Figura 3.3 - Tipos de emendas utilizadas em MLC. Fonte: Macedo (2000).

As emendas de topo são de fácil execução, porém são as menos eficientes, e não devem ser empregadas no processo de fabricação de elementos estruturais em MLC. As emendas biseladas foram desenvolvidas para suprir as limitações de resistência das emendas de topo. Contudo, do ponto de vista de fabricação, este tipo de emenda é muito dispendioso, uma vez que para atingir

uma boa proporção de resistência da madeira maciça é necessário que o corte do bisel apresente uma baixa inclinação, da ordem de 1:10. As emendas dentadas foram desenvolvidas com o objetivo de substituir as emendas biseladas. Atualmente, recomenda-se a utilização desse tipo de emenda por parte dos produtores de MLC, devido ao fato da mesma reunir condições de boa resistência e de praticidade de produção.

3.2.4.5.1 - Geometria das emendas dentadas

Quanto à geometria das emendas dentadas, essa deve ser compatível com o esforço solicitante e definida em função do seu comprimento, inclinação de seus flancos e espessura de sua extremidade.

Segundo SELBO (1963), para se atingir a mais alta resistência da emenda dentada, a ponta (*b*) dos dentes deve ser tão fina quanto possível, isto é, dentro dos limites práticos dos cortadores. A relação comprimento/largura (*l/t*) deve ser consideravelmente grande de maneira a garantir uma adequada área de cola da emenda, desenvolvendo assim a resistência necessária ao cisalhamento.

Para MACEDO (1996) o comprimento de 20 mm, correspondente à especificação da DIN 68140 (1971), foi amplamente utilizado na fabricação de MLC.

De acordo com HERNANDEZ (1998), a emenda mais eficiente é a emenda dentada e os perfis destes tipos de emendas mais utilizados na América do Norte pela indústria de MLC, são os perfis verticais e horizontais (figura 3.4).

Figura 3.4 – Tipos de emendas dentadas

A figura 3.5 e a tabela 3.5 apresentam a geometria destes perfis.

Figura 3.5 - Parâmetros geométricos da emenda dentada

Tabela 3.5 - Características geométricas dos perfis estruturais usados nas emendas dentadas

Parâmetro	Perfil vertical	Perfil horizontal
L - comprimento (mm)	28	26
t - largura do dente (mm)	6,98	6,73
b- largura da ponta do dente (mm)	0,81	0,76
α - inclinação	1:10,6	1:10,9

CHEUNG et al (2002) testaram 28 peças em ensaios de tração paralela às fibras, com emendas dentadas de madeira da espécie de *Pinus taeda*, sendo 14 peças com perfis verticais e 14 com perfis horizontais. Foi utilizado adesivo Resorcinol-Formaldeído (CASCOPHEN RS-216-M), em ambas as emendas. Para avaliar a eficiência de tais emendas, também foram testadas 14 peças de mesma seção transversal, porém sem emendas. Os resultados mostram que as emendas dentadas verticais e horizontais são iguais, considerando um nível de significância de 5%. Observou-se também, que tais emendas apresentaram uma eficiência aproximada de 80% quando comparadas com a resistência da madeira sem emenda.

3.2.4.5.2- Processo de produção de emendas dentadas

Para garantir a eficiência das emendas dentadas é necessário um rigoroso controle no processo de produção. Além da execução correta dos dentes, que garantirão um perfeito encaixe das emendas, é necessário aplicar uma quantidade correta de adesivo e também controlar a pressão nas lâminas. A figura 3.6 apresenta o processo de produção de emendas dentadas verticais.

Execução de emendas dentadas

Passagem de cola nas emendas

Prensagem das emendas

Figura 3.6 – Processo de produção de emendas dentadas

3.2.4.5.3- Distância entre emendas

Outro fator que deve ser levado em consideração para garantir a qualidade do produto de MLC refere-se ao espaçamento entre as emendas.

Para emendas de lâminas adjacentes, SZÜCS (1992)², recomenda a seguinte distribuição:

- As lâminas mais externas, ou seja, que se encontram na quarta parte externa da altura da seção transversal da peça, deve-se espaçar as emendas de lâminas vizinhas de no mínimo

20 vezes a espessura da lâmina;

- Na metade central da peça, o espaçamento entre emendas de lâminas vizinhas deve ser de no mínimo 12 vezes a espessura da lâmina;

HERNANDEZ (2002) recomenda um espaçamento entre emendas, de uma mesma lâmina, superior a 1800 mm e para lâminas adjacentes um espaçamento mínimo de 150mm.

A norma brasileira NBR 7190/97 estabelece como espaçamento mínimo entre emendas adjacentes, igual a 25 t ou a altura da peça (t = espessura da lâmina).

3.2.4.5.4 - Pressão de colagem nas emendas

As emendas dentadas deverão ser coladas sob pressão, em função do comprimento do dente e da densidade da madeira. A figura 3.7 apresenta um gráfico que relaciona comprimento dos dentes com a respectiva pressão de colagem. O tempo mínimo de prensagem recomendado é de 2 segundos.

Figura 3.7 – Pressão de colagem em função do comprimento da emenda (DIN 68 140)

3.2.5 – Colagem das lâminas

Este item apresenta algumas recomendações quanto à colagem das lâminas, visando a garantia da eficiência de vigas de MLC.

3.2.5.1 - Pressão de colagem nas linhas de cola

Na colagem das peças de MLC deve-se levar em consideração a pressão a ser aplicada na viga para garantir uma eficiência na colagem das lâminas. Segundo HENRIQUES DE JESUS (2000), para madeiras de densidade inferior ou igual a 0,5 g/cm³ deve-se utilizar uma pressão de colagem igual a 0,7 MPa e para madeiras de densidade superior a 0,5 g/cm³ pressão igual a 1,2 MPa, ou então atender a recomendação do fabricante da cola.

SZÜCS (1992)² relata que para cola de caseína, a França e a Suíça recomendam uma pressão entre 0,5 MPa e 0,8 MPa. Para uréia-formol, a França recomenda 0,7 MPa a 1 MPa, para junta fina e 0,3 MPa a 0,5 MPa para junta espessa. Para cola de resorcina os norte-americanos recomendam uma pressão de 1,3 MPa e os franceses entre 1,5 e 1,7 MPa. Já o Canadá recomenda a aplicação de 0,7 MPa em todos os casos.

3.2.5.2- Tempo de prensagem

Em não havendo outra indicação, para adesivo phenol-resorsinol, a prensagem deve ser mantida por um período mínimo de 12 horas, tomando-se por base um ambiente com temperatura de 20°C e teor de umidade relativa do ar de 65%. Este valor pode variar dependendo do tipo de adesivo.

Após o período de prensagem, a retirada da pressão deverá ser gradativa e alternada ao longo da peça.

3.2.5.3- Procedimento de fabricação de MLC

Com objetivo de ilustrar o procedimento de fabricação de vigas de MLC a figura 3.8 apresenta o processo de classificação da madeira, execução das emendas, aplicação de adesivo, prensagem e aplainamento das peças.

Classificação da madeira

Execução de emendas dentadas

Aplicação de pressão nas emendas

Aplicação de cola na lâmina

Prensagem das lâminas

Aplainamento da viga

Figura 3.8 – Processo de produção de MLC

3.3 – Polímeros reforçados com fibras

Os polímeros reforçados com fibras (PRF) são formados a partir da união de fibras a uma matriz (adesivo), constituindo um compósito que apresenta propriedades mecânicas de resistência e elasticidade superiores às propriedades individuais de cada material. Segundo NORRIS & SAADATMANESH (1994), as fibras são responsáveis pela resistência do compósito, e a matriz é o produto que as une, sendo responsável pela transmissão dos esforços.

Dentre as fibras que estão sendo utilizadas para formar um PRF destacam-se as fibras de vidro, Kevlar 49 (aramid) e fibras de carbono.

Segundo HULL (1995) as fibras de vidro são produzidas a partir da sílica (SiO_2), por meio da adição de óxido de cálcio, boro, sódio e alumínio. Estas fibras são materiais amorfos e sua cristalização ocorre após prolongado tratamento com altas temperaturas.

As fibras orgânicas, também conhecidas por Kevlar, marca registrada da empresa Dupont apresentam três estruturas moleculares diferentes como nylon, aramida e poliestireno. Este tipo de fibra é utilizado principalmente na indústria aeroespacial e automobilística. Quando comparadas com outros materiais, as fibras aramidadas mostram uma resistência específica (resistência/densidade) muito grande, acima de qualquer outro tipo de fibra disponível no mercado.

As fibras de carbono são produzidas a partir de um componente básico conhecido como PAN (Poliacrilonitrila). Dependendo do tipo de tratamento recebido pela fibra básica, o qual inclui carbonização, oxidação e grafitação, é possível fabricar fibras de carbono em diversas configurações de resistência e de módulo de elasticidade.

Entre os adesivos mais utilizados para a formação de PRF destacam-se as resinas poliéster, vinílicas e epoxídicas.

A tabela 3.6 apresenta valores de propriedades das fibras de vidro, das fibras de carbono e do kevlar.

Tabela 3.6 - Características dos tecidos de fibras a 20°C (Fonte: Fiorelli (2002))

Fibras	Características		
	Resistência a Tração (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Densidade (g/cm ³)
Fibra de vidro	900	76	2,55
Orgânica (Kevlar)	1500	125	1,44
Fibra de carbono	2200	160-300	1,75

3.3.1 – Porcentagem de reforço

Segundo FIORELLI (2002) a porcentagem máxima de fibra que deve ser utilizada em reforço de vigas de MLC é de 3,3% em relação à altura da peça. O autor afirma que a partir deste ponto o ganho de resistência e rigidez não é significativo.

3.4 – Critérios normativos para dimensionamento de vigas de MLC

Neste item são apresentados alguns documentos normativos e trabalhos científicos a respeito do dimensionamento de vigas de MLC. Os critérios normativos apresentados são da NBR 7190/97 - Projeto de Estruturas de Madeira, da ASTM D 3737/96 - Standard Practice for Establishing Stresses for Structural Glued Laminated Timber e do EUROCODE 5.

3.4.1 NBR 7190/97 – Projeto de estruturas de madeira

Segundo a NBR 7190/97 – Projeto de Estruturas de Madeira peças de MLC devem ser dimensionadas segundo as recomendações estabelecidas para peças de madeira maciças, porém deve ser considerado um fator de redução da seção resistente das lâminas emendadas, utilizando coeficientes em função do tipo de emenda que a peça apresenta. Esta norma admite uma área reduzida dada por:

$$A_{red} = \alpha_r \cdot A_{ef} \quad (3.1)$$

Onde:

A_{ef} é a área da seção transversal da peça.

Para emenda finger-joint $\alpha_r = 0,9$

Para emenda em cunha (1:10) $\alpha_r = 0,85$

Para emenda de topo $\alpha_r = 0$

3.4.2 ASTM D3737/96 – Standard test method for establishing stresses for structural Glued Laminated Timber (Glulam)

A norma D 3737/96 utiliza o conceito de seção transformada para avaliação da rigidez, considerando um comportamento elástico linear do material. Para a determinação da resistência, é utilizado o método empírico desenvolvido por FREAS & SELBO (1954). Este método considera um comportamento elástico linear da madeira, sendo a resistência à flexão diminuída por meio de um coeficiente obtido em função da relação ($R=I_k/I_g$), como apresentado na equação 3.2. Os termos da relação (I_k e I_g) são, respectivamente, os momentos de inércia dos nós presentes na seção transversal crítica e da seção transversal total da viga.

$$SMF_b = (1 + 3R) \cdot (1 - R)^3 \cdot \left(1 - \frac{R}{2}\right) \quad (3.2)$$

Onde:

SMF_b = fator modificador da resistência à flexão;

$R = I_k/I_g$ ¹

¹ O método da ASTM D3737/96 para determinação do fator R está apresentado no Anexo A

A figura 3.9 procura ilustrar a variação do fator de modificação da resistência à flexão (SMF) em função do fator I_k/I_g . É possível observar que o fator SMF diminui em função do aumento da quantidade de defeitos.

Figura 3.9 – Variação do SMF em função do R

Para a obtenção do índice de resistência à flexão (BSI) é considerado o valor da resistência à flexão de corpos-de-prova isentos de defeitos, apresentado pela norma ASTM D2555-96 - Standard Practice for Establishing Structural Grades and Related Allowable Properties for Visually Graded Lumber, multiplicando-os pelos fatores de ajuste, de acordo com a tabela 3.7 e por 0,743 para relacioná-los às condições padrões de 30cm de altura, viga bi-apoiada com carregamento uniformemente distribuído e com relação vão:altura igual a 21.

Tabela 3.7 - Fatores de ajuste da resistência de corpos-de-prova isentos de defeitos. ASTM D 3737-96

Propriedade	Coníferas	Dicotiledôneas	Fator de correção para o teor de umidade de 12%
Flexão	0,476	0,435	1,35
Compressão paralela	0,526	0,476	1,75
Módulo de elasticidade	1,095	1,095	1,20
Cisalhamento horizontal	0,244	0,222	1,13

Para determinação da resistência à flexão de vigas de MLC, deve-se multiplicar o índice de resistência à flexão (BSI) pelo fator de modificação da resistência à flexão SMF, conforme apresentado na equação 3.3.

$$f_m = BSI_m \cdot SMF_m \quad (3.3)$$

Onde:

f_m = resistência de cálculo à flexão para um elemento de MLC;

BSI_m = índice de resistência à flexão;

SMF_m = fator modificador da resistência à flexão.

Rigidez à flexão

O valor da rigidez à flexão de elementos laminados horizontalmente deve ser igual a 95% do valor calculado pelo método da seção transformada (Anexo A2 ASTM D3737-96).

3.4.3 EUROCODE 5

Para o dimensionamento de vigas de MLC o EUROCODE 5, diz que estes elementos estruturais devem ser dimensionados como vigas maciças e para situações em que a viga apresenta altura menor que 600mm, o valor da resistência característica à flexão ($f_{m,k}$), deve ser aumentado por meio da multiplicação da mesma pelo fator K_h , onde:

$$K_h = \min \left\{ \left(\frac{600}{h} \right)^{0,1} \right. \\ \left. 1,1 \right\}$$

h em (mm).

3.5 Critérios para dimensionamento de vigas de madeira reforçadas com fibras

A idéia de reforçar vigas de MLC surgiu com o objetivo de melhorar as propriedades mecânicas de resistência e rigidez, além de aumentar a confiabilidade deste tipo de elemento estrutural.

LINDYBERG (2000) afirma que vários métodos de dimensionamento estão sendo utilizados para analisar vigas sem reforço e vigas com reforço, na flexão. Esses métodos podem ser divididos em semi-empíricos, determinísticos e probabilísticos. Ressalta ainda que as principais normas internacionais estabelecem métodos empíricos para dimensionamento de vigas de madeira laminada colada (MLC), os quais levam em consideração a resistência à flexão de corpos-de-prova isentos de defeitos e estabelecem coeficientes de modificação relacionados aos defeitos existentes nas peças. O autor conclui dizendo que vigas de MLC reforçadas possuem uma complexidade na ruptura, o que dificulta o uso de soluções semi-empíricas.

BELPERIO & GRAD (1999) apresentam uma análise teórica comparando a deformação sofrida por vigas de madeira laminada colada com duas espécies diferentes de madeira reforçadas com PRF e vigas laminadas sem reforço. Utilizaram o método da seção transformada para a

avaliação da rigidez das vigas reforçadas. Para a avaliação da resistência, foi utilizado um modelo que faz uma analogia com o cálculo de vigas de concreto armado.

A figura 3.10 apresenta a distribuição de tensões assumida pelo modelo na seção da viga reforçada, na fase de ruptura. Nesta aproximação, foi considerado que as regiões acima da Linha Neutra estão solicitadas por tensões de compressão iguais à resistência à compressão (observa-se que existem dois materiais diferentes, o que causa dois níveis diferentes de tensões de compressão). Abaixo da linha neutra, considera-se distribuição linear de tensões de tração na madeira, atuando em conjunto com a força resultante do material de reforço.

Figura 3.10 - Distribuição de tensões em vigas reforçadas

Relatam que os valores de deslocamentos estimados pela teoria da seção transformada foram próximos aos valores obtidos com a realização dos ensaios. Porém, os valores experimentais para força máxima resistida pela viga foram inferiores aos estimados pela teoria.

FIORELLI (2002) apresenta um modelo para a determinação da rigidez e da resistência de vigas de madeira maciça reforçadas com fibras. Para a rigidez foi considerado o conceito de seção transformada. Para o cálculo do momento de ruptura, o modelo considera ruptura por compressão das fibras superiores ou ruptura por tração das fibras inferiores. Para a avaliação do momento fletor último foi considerado os estados limites de ruptura por tração e por compressão da madeira. Este modelo é obtido a partir da hipótese de Navier/Bernoulli (seções planas permanecem planas após a deformação), conforme ilustra a figura 3.11.

Figura 3.11 - Diagrama de deformação na seção transversal

Resultados experimentais apresentados, comparados com resultados teóricos, demonstram uma proximidade entre os valores de resistência e de rigidez.

TRIANTAFILLOU & DESKOVIC (1992) apresentam um modelo analítico que estabelece uma relação entre tensão e deformação para a madeira e considera a fibra com comportamento elástico linear. Este modelo assume as mesmas considerações estabelecidas por BUCHANAN (1990) que avaliou vigas de MLC sem reforço. Os autores consideram quatro situações possíveis para a viga reforçada, no instante da ruptura. A primeira situação (a) considera que a fibra e a madeira apresentam um comportamento elástico linear, (b) madeira apresenta um comportamento elástico linear e a fibra rompe, (c) madeira apresenta um comportamento plástico e a fibra elástico linear, (d) madeira plastifica e fibra rompe.

Pela geometria do diagrama de tensão deformação e pelo equilíbrio de forças é possível definir a posição da Linha Neutra (LN). O momento de curvatura ($M\phi$) é calculado pelo momento das forças internas em relação à LN.

A avaliação experimental apresentada pelo autor consistiu em avaliar vigas maciças de madeira reforçadas com fibras de carbono unidirecionais fixadas com adesivo epóxi. Foi utilizado tecido com espessura variando de 0,55 a 0,75 mm. Optaram pela utilização deste tipo de material para reforçar estruturas por apresentar alta resistência, baixa densidade, resistência à corrosão, combinando as vantagens oferecidas pelos materiais compósitos com a eficiência dos reforços externos, resultando em peças estruturais com excelentes propriedades mecânicas de resistência, rigidez e ductilidade. Conseguiram um aumento de 20% a 40% na capacidade de carga da peça estrutural reforçada.

Uma comparação entre resultados teóricos e experimentais permitiu concluir que os resultados obtidos foram satisfatórios, apesar da variabilidade associada com as propriedades da

madeira.

O ICBO Evaluation Service, Inc. (1995), apresenta um modelo teórico para a determinação do momento resistente de vigas de MLC reforçadas com PRF. O modelo de cálculo considera o equilíbrio de forças resultantes da região comprimida e tracionada da viga de madeira e também no reforço de fibra, para a determinação na Linha Neutra (L.N.) e posteriormente para o cálculo do momento fletor resistente, conforme ilustra a figura 3.12.

Figura 3.12 – Distribuição de tensão na seção transversal da viga

ROMANI & BLAB (2001), apresentam um modelo de dimensionamento para vigas de MLC reforçadas com fibra. Neste trabalho os autores apresentam diferentes modos de ruptura para a viga de MLC reforçada. Assumindo módulo de elasticidade constante, resistência à tração e resistência à compressão constante e um comportamento ideal elasto-plástico-linear. A figura 3.13 ilustra os modos de ruptura adotados.

Figura 3.13 – Modos de ruptura para vigas de MLC

A figura 3.14 apresenta a notação e a relação entre tensão e deformação assumidas.

Figura 3.14 – Notação e relação tensão deformação na seção transversal

Os fatores α_i e k_i são determinados pelas seguintes equações:

$$\alpha_i = \frac{h_i}{h} \quad (3.4)$$

$$k_f = \frac{f_c}{f_t} = \frac{\epsilon_{c,u}}{\epsilon_{t,u}} \quad (3.5)$$

$$k_f = \frac{E_{R,t}}{E_0} - 1 \quad (3.6)$$

Para a ruptura por tração, quatro modos de ruptura são assumidos:

Modo a: ($h=h_0$; $\sigma_{1,t}=f_t$; $\sigma_{1,c} \leq f_c$)

$$\alpha_{NA} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1 + \alpha_{R,t} \cdot k_t \cdot (2 \cdot \alpha_{p,t} + \alpha_{R,t})}{1 + \alpha_{R,t} \cdot k_t} \quad (3.7)$$

$$K_{M,a} = \frac{2}{\alpha_{NA}} \cdot \left[(1 - \alpha_{NA})^3 + \alpha_{NA}^3 - k_t \cdot (\alpha_{z,t}^3 - (\alpha_{z,t} + \alpha_{R,t})^3) \right] \quad (3.8)$$

Modo b: ($h=h_0-h_{pt}$; $\sigma_t=f_t$; $\sigma_{1,c} \leq f_c$)

$$\alpha_{N,A} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1 + \alpha_{R,t} \cdot k_t \cdot \alpha_{R,t}}{1 + \alpha_{R,t} \cdot k_t} \quad (3.9)$$

$$K_{M,b} = \frac{2}{\alpha_{z,t}} \cdot \left[(1 - \alpha_{NA})^3 + (1 + k_t) \cdot \alpha_{NA}^3 - k_t \cdot \alpha_{z,t}^3 \right] \quad (3.10)$$

Modo c: ($h=h_0$; $\sigma_t=f_t$; $\sigma_c \geq 0$)

$$\alpha_{NA} = \frac{1}{(1+k_f)^2} \cdot \left[k_f - \alpha_{R,t} \cdot k_t + \sqrt{(\alpha_{R,t} \cdot k_t - k_f)^2 + \alpha_{R,t} \cdot k_t \cdot (1+k_f)^2 \cdot (\alpha_{R,t} + 2 - \alpha_{p,t})} \right] \quad (3.11)$$

$$\alpha_c = 1 - \alpha_{NA} \cdot (1 + k_f) \quad (3.12)$$

$$k_{Mc} = 2 \cdot k_f \cdot \left[3 \cdot \alpha_c \cdot \left(1 - \alpha_{NA} - \frac{\alpha_c}{2} \right) + (1 + \alpha_{NA} - \alpha_c)^2 \right] - 2 \cdot \frac{k_t}{\alpha_{NA}} \cdot (\alpha_{z,t}^3 - (\alpha_{z,t} + \alpha_{R,t})^3 + 2 \cdot \alpha_{NA}^2) \quad (3.13)$$

Modo d: ($h=h_0-h_{pt}$; $\sigma_t=f_t$; $\sigma_c \geq 0$)

$$\alpha_{NA} = \frac{1}{(1+k_f)^2} \cdot \left[k_f + \alpha_{R,t} \cdot (k_f \cdot (1+k_f) - k_t) + \sqrt{(\alpha_{R,t} \cdot k_t - k_f)^2 + \alpha_{R,t}^2 \cdot k_t \cdot (1+k_f)^2 - 2 \cdot \alpha_{R,t} \cdot k_f \cdot (1+k_f)} \right] \quad (3.14)$$

$$\alpha_c = 1 + k_f \cdot \alpha_{R,t} - \alpha_{NA} \cdot (1 + k_f) \quad (3.15)$$

$$k_{Md} = 2 \cdot \left[k_f \cdot \left(3 \cdot \alpha_c \cdot \left(1 - \alpha_{NA} - \frac{\alpha_c}{2} \right) + (1 - \alpha_{NA} - \alpha_c)^2 \right) \right] - k_t \cdot \alpha_{z,t}^2 + \frac{\alpha_{NA}^3}{\alpha_{z,t}} \cdot (1 + k_t) \quad (3.16)$$

Para a ruptura por compressão dois modos de ruptura são assumidos:

Modo e: ($h=h_0$; $\sigma_c \geq 0$; $\varepsilon_{tu} \geq \varepsilon_t$)

$$\psi = \frac{\varepsilon_{2,c}}{\varepsilon_{1,c}} \quad (3.17)$$

$$\alpha_{NA} = \frac{1}{(\psi-1)^2} \cdot \left[1 - 2 \cdot \psi - \psi^2 \cdot \alpha_{R,t} \cdot k_t + \psi \cdot \sqrt{2 \cdot \psi + \psi^2 \cdot \alpha_{R,t}^2 \cdot k_t \cdot (k_t + 1) + 2 \cdot \alpha_{p,t} \cdot (\psi - 1)^2} \right] \cdot \frac{1}{\alpha_{R,t} \cdot k_t - 1 + \alpha_{R,t} \cdot k_t \cdot (2 - \alpha_{R,t}) \cdot (2 \cdot \psi - 1)}$$

$$\alpha_c = \frac{(1 - \alpha_{NA}) \cdot (\psi - 1)}{\psi} \quad (3.18)$$

$$k_{Me} = \frac{2 \cdot k_f}{1 - \alpha_c - \alpha_{NA}} \cdot \left[3 \cdot \alpha_c \cdot \left(1 - \alpha_{NA} - \frac{\alpha_c}{2} \right) \cdot (1 - \alpha_{NA} - \alpha_c) + (1 - \alpha_{NA} - \alpha_c)^3 + \alpha_{NA}^3 + k_t \cdot (\alpha_{NA} - \alpha_{p,t})^3 - k_t \cdot \alpha_{z,t}^3 \right] \quad (3.19)$$

$$\varepsilon_{t,u} \geq \varepsilon_{2c} \cdot \frac{\alpha_{NA}}{1 - \alpha_{NA}} \quad \text{com } \varepsilon_{tu} = \frac{f_t}{E_0}$$

Modo f: ($h=h_0-h_{pt}$; $\sigma_c \geq 0$; $\varepsilon_{tu} \geq \varepsilon_t$)

$$\varepsilon_{tu} \geq \varepsilon_{2c} \cdot \frac{\alpha_{NA} - \alpha_{Rt}}{1 - \alpha_{NA}} \quad \text{com } \varepsilon_{tu} = \frac{f_t}{E_0} \quad (3.20)$$

O valor do momento de ruptura da viga reforçada depende do modo de ruptura (figura 3.13). Portanto o momento de ruptura pode ser calculado pela seguinte equação:

$$M_u = f_t \cdot W \cdot k_{M,Mode} \quad (3.21)$$

Onde:

$K_{M,Mode}$ - fator baseado no modo de ruptura da viga.

$$W = \frac{b \cdot h^2}{6} \quad f_t - \text{resistência à flexão da viga}$$

O autor realizou ensaios experimentais em vigas de madeira laminada colada de seção 10 x 30 cm, reforçadas com fibras de carbono e com fibras aramid. Os resultados experimentais de momento de ruptura obtidos foram comparados com resultados teóricos. O autor afirma que o modelo de cálculo proposto é bastante conservador, chegando a uma diferença de aproximadamente 35%.

Para o cálculo teórico da rigidez, o autor utilizou o método da seção transformada. Comparando estes resultados com os obtidos experimentalmente, nota-se uma boa concordância entre os valores com diferenças de aproximadamente 5%.

A idéia do uso de um modelo probabilístico para o dimensionamento de vigas de madeira reforçadas com fibras, partiu da premissa em que as propriedades mecânicas das lâminas de madeira são aleatoriamente variáveis, com coeficiente de variação entre 10% e 30%. No entanto, para calcular a distribuição de resistência à flexão e rigidez de uma população de vigas de MLC reforçadas o autor afirma que é necessário a utilização de um método que considera as variações das propriedades mecânicas das lâminas de madeira e das fibras. Conclui dizendo que o modelo determinístico não considera a variabilidade dos materiais (madeira e fibra), para levar em consideração esta variabilidade é necessário o uso de um simulador computacional.

GILFILLAN et. al. (2001) desenvolveram um estudo teórico e experimental com vigas de madeira laminada colada, reforçadas com fibra de carbono. O objetivo principal do trabalho era melhorar o comportamento estrutural das vigas incorporando reforço de fibras e também reduzir o uso de madeira.

A primeira parte do trabalho consistiu de uma análise teórica para avaliação da rigidez e do momento resistente de vigas sem reforço e reforçadas com PRF. Para a avaliação da rigidez

assumiu-se um comportamento elástico linear e para o cálculo foi utilizado o método da seção transformada.

Para a avaliação do momento de ruptura das vigas reforçadas foram utilizados os valores experimentais, determinados por meio de ensaios em corpos-de-prova, de resistência e elasticidade à compressão igual à tração da madeira e de resistência à tração para a fibra (tabela 3.8). Seis modos de ruptura foram considerados, conforme apresentado na figura 3.15.

Tabela 3.8 – Valores de resistência e elasticidade

Material	Resistência a tração (MPa)	Módulo de elasticidade (MPa)
CFRP	3050	165.000
CFRP	1000	44.000
Madeira (Stika spruce h. g.)	35	9000

Figura 3.15 – Distribuição de tensão na seção transversal

- (i) elástico
- (ii) plastificação parcial da região comprimida
- (iii) plastificação completa da região comprimida
- (iv) plastificação completa da região comprimida, despreza o efeito da tração
- (v) plastificação completa por compressão na altura total da viga
- (vi) viga sem reforço, resistência a tração é menor que resistência a compressão.

Dentre os modos de ruptura apresentados na figura 3.15, foram adotados os modos (ii) e (iii), utilizando o menor valor dentre os dois.

A segunda parte consistiu de análise experimental para avaliar a resistência e a rigidez de vigas de MLC com três e seis metros de comprimento. Estas vigas foram reforçadas com 0,4%, 0,64% e 1,2% de fibra de carbono e com 2% de fibra de vidro.

Como resultado, o autor afirma que as vigas com maior quantidade de PRF ocorreu um incremento de aproximadamente 55% na rigidez. Com relação à resistência, notou-se um aumento de 60% em relação a uma viga semelhante sem reforço.

O autor apresentou também uma comparação entre resultados teóricos e experimentais e afirma que ocorreu uma boa concordância entre os mesmos.

LINDYBERG (2000) apresenta um modelo computacional para o cálculo da resistência de

vigas de MLC reforçadas e afirma que esta é a solução mais eficiente para avaliá-las.

Além disso, um modelo computacional não linear semi-probabilístico (ReLAM) também é apresentado para análise de viga laminada colada reforçada. Neste trabalho há dois principais componentes. A primeira parte consiste em um modelo numérico determinístico que calcula a curva de carga-deflexão da viga reforçada. Este modelo é baseado no momento de curvatura ($M-\phi$), método previamente usado para analisar vigas de concreto protendido. A segunda parte incorpora o modelo determinístico a um modelo probabilístico. Para o desenvolvimento do modelo probabilístico dentro do modelo determinístico é utilizado o simulador computacional Monte Carlo.

O método de Monte Carlo é incorporado ao ReLAM. Dado um modelo numérico determinístico ($M-\phi$), alguns parâmetros relacionados aos materiais são assumidos:

E – Módulo de elasticidade da madeira;

E_f – Módulo de elasticidade da fibra;

f_c – resistência à compressão da madeira;

f_t – resistência à tração da madeira;

m – relação entre módulo de elasticidade à compressão na fase elástica e na fase plastificada (figura 3.19).

Baseado nestes parâmetros, distribuições pseudo-aleatórias são geradas e com estes valores resolve-se o modelo determinístico. O programa ReLAM assume uma distribuição normal de probabilidade para a geração dos valores.

Os valores de resistência e de elasticidade da madeira e da fibra utilizados no ReLAM foram determinados por meio de ensaios de corpos-de-prova de acordo com os procedimentos estabelecidos pelas normas ASTM D 198/96 - Standard Methods of Static Tests of Timbers in Structural Sizes e ASTM D 3039/97 - Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials, da AMERICAN SOCIETY for TESTING and MATERIALS.

Este trabalho adota o modelo numérico determinístico desenvolvido por (BUCHANAN, 1990), apresentado no anexo A, para a determinação da resistência à flexão de vigas de MLC reforçadas com fibras. Nesse modelo, a madeira, quando submetida a esforços de tração, apresenta um comportamento elástico linear e, quando submetida a esforços de compressão, apresenta um comportamento elástico linear e um comportamento não linear inelástico (figura 3.16).

Para a determinação da rigidez foi utilizado o método da seção transformada apresentado pela norma ASTM D 3737/96.

Figura 3.16 – Relação tensão deformação para madeira na tração e na compressão paralela às fibras
(BUCHANAN, 1990)

LINDYBERG (2000) afirma que a ruptura de vigas de MLC sem reforço é resultado da ruptura por tração da madeira ou das emendas dentadas. Para as vigas reforçadas, a ruptura observada tem sido uma combinação de ruptura por compressão, por cisalhamento e por tração na madeira.

Foram confeccionadas 96 vigas de MLC com dimensões de 13x30x670 cm, das espécies Western Hemlock Lamstock e Douglas-fir. As lâminas das vigas foram previamente classificadas pelo sistema E-rated. Posteriormente as vigas foram avaliadas sem reforço e reforçadas com 1,1% e 3,3% de fibra de vidro em relação à altura da seção transversal. A fibra foi aplicada entre a penúltima e a última lâmina de madeira, na fase tracionada da viga. Os ensaios foram realizados de acordo com as recomendações da norma ASTM D 198 (1996). O autor afirma que, porcentagem de reforço acima de 3,3%, não são viáveis economicamente devido ao baixo incremento na resistência e na rigidez a partir deste valor.

O autor apresenta uma comparação entre resultados experimentais e teóricos de resistência e rigidez, determinados pelo programa ReLAM. Os resultados obtidos indicam uma proximidade entre os valores experimentais e teóricos tanto para o módulo de elasticidade como para a resistência. O autor conclui que o método numérico determinístico adotado pelo ReLAM é adequado para prever o comportamento estrutural da viga.

3.6 – Considerações finais

Uma análise da revisão bibliográfica permite concluir que a utilização de MLC é uma alternativa viável para o aproveitamento racional da madeira. A versatilidade da MLC com respeito às formas, dimensões e resistência do elemento estrutural, aliada ao aumento da durabilidade da

madeira, proporcionado pelo tratamento preservativo sob pressão, vem ampliando seu uso em diversos países.

Estudos em andamento no exterior indicam que os PRF (polímeros reforçados com fibras) mostram-se como um ótimo material para reforço de vigas de MLC. O uso destas fibras proporciona um ganho significativo de resistência e de rigidez aos elementos estruturais.

No Brasil, os trabalhos científicos desenvolvidos com MLC avaliaram resistência, elasticidade e distribuições de tensões em vigas de MLC. Foram desenvolvidos estudos que propuseram a utilização de emenda de topo com tecido de fibra de vidro como uma alternativa para substituição de emendas dentadas, uso de espécies de madeiras tropicais e adesivos alternativos para fabricação de MLC entre outros.

Quanto aos critérios para fabricação de vigas retas de MLC, é possível concluir, a partir das informações apresentadas na revisão bibliográfica, que a madeira para produção de vigas de MLC deve apresentar densidade básica variando de $0,4 \text{ g/cm}^3$ a $0,7 \text{ g/cm}^3$, possuir teor de umidade variando de 7% a 14% e receber tratamento preservativo que garanta o aumento da durabilidade. Recomenda-se a utilização de adesivo a prova d'água, para a confecção do elemento em MLC, principalmente quando as estruturas estiverem expostas.

Além dessas considerações, recomenda-se a confecção de lâminas de madeira com espessura máxima de 5 cm. Todas as lâminas que formarão o elemento estrutural em MLC deverão ser classificadas por meio de método visual e mecânico, para garantir a eficiência do elemento estrutural. Posteriormente, as lâminas de melhor qualidade deverão ser posicionadas nas regiões solicitadas por maiores esforços de tração ou de compressão (borda).

As emendas dentadas devem ser fabricadas com comprimento mínimo de 26 mm (horizontal) e 28 mm (vertical), coladas com adesivo à prova d'água por meio da aplicação de uma pressão de 6 MPa a 8 MPa, por aproximadamente 5 segundos e posicionadas à uma distância mínima entre emendas na mesma lâmina de 180 cm e em lâminas adjacentes 15 cm.

A espessura da camada de RFV que deve ser utilizada em vigas de MLC é de 3,3% em relação à altura do elemento estrutural.

Quanto ao dimensionamento de vigas de MLC vários métodos estão sendo utilizados para analisar vigas sem reforço e vigas com reforço, na flexão. Esses métodos podem ser divididos em semi-empíricos, determinísticos e probabilísticos. A norma americana estabelece métodos empíricos para dimensionamento de vigas de madeira laminada colada (MLC), os quais levam em consideração a resistência à flexão de corpos-de-prova isentos de defeitos e estabelecem coeficientes de modificação relacionados aos defeitos existentes nas peças. No entanto, vigas de MLC reforçadas possuem uma complexidade na ruptura que tem sido uma combinação de ruptura por compressão, por cisalhamento e por tração na madeira o que dificulta o uso de soluções empíricas. Dessa forma a adoção de soluções determinísticas e semi-probabilísticas para a determinação da resistência de vigas de MLC reforçadas mostram-se mais indicadas.

Para determinação do momento fletor resistente de vigas de MLC reforçadas, o modelo teórico que considera a madeira com um comportamento elástico linear quando submetida a esforços de tração e um comportamento não linear inelástico quando submetida a esforços de compressão é o que conduz a melhores resultados. Para a determinação da posição da Linha Neutra (L.N.), estudos realizados, recomendam a realização do equilíbrio de forças atuantes na seção transversal da viga.

Dentro deste cenário, o desenvolvimento de um modelo numérico determinístico para determinação da resistência de vigas de MLC reforçadas com fibras, baseado no comportamento da madeira à compressão e à tração e posteriormente implementação de soluções semi-probabilísticas ao modelo é a forma mais adequada para determinar o valor do momento fletor de vigas de MLC reforçadas com fibras.

Para o cálculo da rigidez teórica de vigas de MLC reforçadas com fibra é possível concluir que o método da seção transformada é bastante eficiente, como comprovado na avaliação experimental.

4. MODELO TEÓRICO PARA DIMENSIONAMENTO DE VIGA DE MLC REFORÇADA COM FIBRA

Neste capítulo são apresentadas as considerações utilizadas para avaliação do momento fletor resistente e da rigidez à flexão. Para avaliação do momento fletor resistente, é admitida a validade da hipótese de distribuição linear de deformações ao longo da altura da viga, e considerado um comportamento elásto-frágil-linear da madeira na tração paralela às fibras e bi-linear na compressão paralela às fibras (inicialmente elástico e posteriormente inelástico, com declividade negativa do diagrama tensão x deformação). São consideradas as propriedades mecânicas individuais de cada lâmina e do RFV. São apresentados, também, os conceitos para determinação da rigidez à flexão da viga de MLC baseados no método da seção transformada que considera os módulos de elasticidade de cada elemento que compõe a viga.

4.1 Determinação do momento fletor resistente

4.1.1 Comportamento mecânico da madeira e da fibra

O modelo teórico de cálculo proposto procura utilizar, de forma realista, o comportamento sob tensão da madeira e da fibra.

No caso da madeira solicitada por esforços de compressão na direção paralela às fibras, a madeira exibe um comportamento inicialmente elástico-linear, atinge a resistência à compressão paralela às fibras (f_c), ocorrendo posteriormente diminuição nos níveis de tensão com o incremento de deformações, até ser observada a desagregação do material (BUCHANAN, 1990). A figura 4.1 ilustra o comportamento típico relacionando tensão e deformação da madeira, solicitada por compressão.

Figura 4.1 – Comportamento da madeira à compressão paralela às fibras

Para a madeira solicitada por esforços de tração na direção paralela às fibras, pode ser observado um comportamento elástico-linear até a proximidade da ruptura, conforme ilustrado na figura 4.2.

Figura 4.2 – Comportamento da madeira na tração paralela às fibras

A figura 4.3 apresenta o comportamento admitido para o material no modelo de cálculo: comportamento elásto-frágil-linear da madeira na tração paralela às fibras e bi-linear na compressão paralela às fibras (inicialmente elástico e, posteriormente inelástico, com declividade negativa do diagrama tensão x deformação). O coeficiente angular do trecho inelástico (mE), será avaliado experimentalmente, posteriormente.

Figura 4.3 – Relação tensão deformação para madeira na tração e na compressão paralela às fibras

Os valores de deformação nos níveis de tensão correspondentes à resistência na tração e na compressão (f_{t0} e f_{c0} , respectivamente), são obtidos a partir desses valores e do módulo de elasticidade (E), de acordo com a equação 4.1.

$$\varepsilon_{tu} = \frac{f_{t0}}{E} \quad \varepsilon_{cy} = \frac{f_{c0}}{E} \quad 4.1$$

A figura 4.4 apresenta o comportamento da fibra de vidro solicitada por tração, que é linear praticamente até a ruptura, hipótese que é assumida no modelo teórico.

Figura 4.4 – Relação tensão deformação para fibra de vidro

4.1.2 Hipóteses de distribuição de tensões na viga na fase de ruptura

Com relação à atuação do momento fletor, a viga de MLC pode apresentar os seguintes modos de ruptura:

- ruptura por compressão na madeira;
- ruptura por tração na madeira;
- ruptura por tração na fibra de vidro.

Admitindo-se a hipótese de distribuição linear de deformações ao longo da altura da viga, podem ser obtidos os diagramas de distribuição de tensão, de acordo com o tipo de ruptura em consideração.

A figura 4.5 mostra a distribuição de tensões normais, no caso da ruptura ocorrer na borda superior por compressão. Salienta-se que, nesta figura, está sendo admitido que todas as lâminas de madeira possuem o mesmo módulo de elasticidade. Posteriormente, no modelo teórico serão considerados os módulos de elasticidade de cada lâmina.

Figura 4.5 – Distribuição de deformação e tensão na seção transversal da viga – Ruptura por compressão

No caso do modo de ruptura ser por tração paralela às fibras da madeira, a região comprimida pode estar com ou sem plastificação, dependendo da relação entre as resistências à tração e à compressão e da quantidade de fibra utilizada. A figura 4.6 apresenta as duas possibilidades de distribuição de tensão normal para esse caso. Para essa situação, o posicionamento da linha neutra pode ser obtido pela consideração de resultante nula das tensões normais.

Figura 4.6 – Distribuição de deformação e tensão na seção transversal da viga – Ruptura por tração

O terceiro modo possível de ruptura (ruptura por tração da fibra de vidro) não será considerado, pois a resistência à tração da fibra de vidro é cerca de 20 vezes a resistência à tração da madeira, enquanto que o módulo de elasticidade da fibra de vidro não chega a ser 10 vezes superior ao da madeira. Assim, as tensões máximas de tração na fibra de vidro se situam em níveis distantes da resistência desse material, o que garante que o modo de ruptura em discussão não ocorra.

4.1.3 Cálculo do momento fletor resistente

Depois de determinada a posição da linha neutra (L.N.) é possível avaliar as forças atuantes em cada região da seção transversal da viga de MLC e determinar o momento fletor resistente.

Com relação ao modo de ruptura por tração, considera-se que o estado limite último é atingido quando a tensão atuante máxima na madeira atinge o valor da resistência à tração (f_t).

Quanto ao modo de ruptura por compressão, após a tensão na borda comprimida atingir o valor de f_c , ocorre plastificação gradativa da seção, provocando um abaixamento da linha neutra. Nota-se um incremento do valor do momento resistente, até atingir um máximo, ocorrendo uma diminuição, posteriormente. O estado limite último quanto à compressão é considerado no ponto onde o momento resistente atinge o valor máximo.

4.2 Determinação da rigidez à flexão

A rigidez à flexão foi determinada pelo método da seção transformada. A posição do centro de gravidade (Y_{cg}) da viga reforçada em relação à borda superior é dada pela equação 4.2.

$$y_{cg} = \sum_{i=1}^n \left[\frac{\frac{E_i}{\bar{E}} \cdot b \cdot h_i \cdot \left(\frac{h_i}{2} + h_i \cdot (i-1) \right)}{\sum \frac{E_i}{\bar{E}} \cdot b \cdot h_i} \right] \quad (4.2)$$

Onde:

E_i – Módulo de elasticidade da lâmina i

$\bar{E}$ – Módulo de elasticidade máximo

h_i – altura da lâmina i

b – Largura da viga

Após a determinação da posição da L.N., é determinado o valor da rigidez à flexão (EI) da seção transformada (equação 4.3).

$$\bar{EI} = \sum \left(\frac{E_i \cdot b \cdot h_i^3}{12} + E_i \cdot b \cdot h_i \cdot d_i^2 \right) \quad (4.3)$$

Onde:

d_i – distância do C.G. da lâmina ao C.G. da viga.

5. PROGRAMA COMPUTACIONAL PARA DETERMINAÇÃO DO MOMENTO FLETOR RESISTENTE E DA RIGIDEZ À FLEXÃO (MLC - REFORÇADA)

Este capítulo apresenta um programa computacional, em linguagem Borland C++ Builder, executado em ambiente windows, que determina o momento fletor resistente e a rigidez à flexão (EI) de vigas de MLC sem reforço e reforçadas com fibras, de acordo com os modelos teóricos apresentados no capítulo 4.

5.1 – Dados de entrada

Com o intuito de apresentar os dados geométricos de entrada e as propriedades mecânicas, a figura 5.1 apresenta uma seção transversal de uma viga de MLC e as respectivas denominações.

Figura 5.1 – Variáveis do programa

Na entrada de dados do programa o usuário informa:

- A largura da viga, o número de lâminas de madeira que compõem a viga e as espessuras de cada lâmina;

- O valor do módulo de elasticidade (E_{Mi}), da resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}) e da resistência à tração paralela às fibras (f_{t0}) de cada lâmina de madeira;

- A quantidade de fibra (espessura da camada de reforço sem considerar o adesivo) e o seu respectivo módulo de elasticidade (E_f);

- O coeficiente angular do trecho inelástico (m) na compressão (figura 4.3);

O programa considera sempre uma lâmina de madeira (lâmina “n”) abaixo da camada de reforço.

5.2 – Procedimentos para determinação do momento fletor resistente

Por meio de um processo iterativo de variação do ângulo “alfa” e da posição da Linha Neutra (L.N.), o programa determina o valor das forças normais atuantes nas lâminas de madeira e o valor do momento fletor resistente, considerando as propriedades de cada lâmina.

O programa estabelece o seguinte procedimento:

- 1 - adota um valor para o ângulo “alfa (α)”;

- 2 - varia a posição da L.N., calculando para cada posição os valores das forças normais em cada lâmina de acordo com as leis construtivas dos materiais adotados, até ser verificado o equilíbrio de forças normais;

- 3 - determina o valor do momento fletor resistente para esta situação;

- 4 - verifica se o momento fletor resistente é maior que o momento fletor resistente determinado pelo alfa anterior; caso isso ocorra, adota um novo "alfa", refazendo o processo; caso contrário, estabelece como momento fletor da viga, o valor determinado pelo "alfa anterior", finalizando o processo.

O programa adota um valor inicial para o ângulo “alfa” igual a $0,0001 \text{ cm}^{-1}$ e estabelece a metade da altura da viga como posição inicial da L.N., o que corresponde a deformação no topo da viga igual a $0,0001 * h/2$ conforme ilustrado na figura 5.2.

A partir deste ponto, o programa aumenta automaticamente o ângulo alfa com uma precisão de $0,00001 \text{ cm}^{-1}$, adota uma nova posição para a L.N. e determina o valor das forças normais atuantes nas lâminas de madeira e finalmente o programa determina o valor do momento fletor resistente.

Figura 5.2 – Valor inicial do ângulo alfa e posição inicial da L.N.

Para a determinação da posição da L.N. o programa inicialmente estabelece uma posição inicial para a L.N. Z_1 , igual a $h/2$ e calcula a somatória de forças normais, N_1 . Estabelece uma nova posição para a L.N. Z_2 , calcula a soma das forças normais, N_2 . A variação é aproximadamente linear, ou seja, a partir de uma equação da reta que utiliza (Z_1, N_1) , (Z_2, N_2) , pode-se encontrar o ponto em que a soma de forças normais é igual a zero. A equação da reta $N = aZ + b$ é encontrada utilizando os conceitos matemáticos para determinar a equação de uma reta a partir de dois pontos no plano cartesiano. Como a relação não é exatamente linear, o valor de N para o novo valor de Z , igual a $(-b/a)$, não será exatamente zero, mas próximo de zero. Dessa forma o processo pode ser repetido até encontrar uma precisão satisfatória para N , ou um N suficientemente próximo de 0. A figura 5.3 ilustra o processo para determinação da posição da L.N. que equilibra a viga.

Figura 5.3 – Método para determinar a força normal resultante e a posição da L.N.

O estado limite último de tração da madeira é detectado quando, para determinado valor do ângulo alfa, ocorrerem valores de tensão superiores à resistência à tração. Nesse caso, o programa desconsidera a contribuição da seção da lâmina submetida à tensões superiores à resistência, no cálculo da força normal daquela lâmina. Isto acarreta um valor de momento resistente inferior ao calculado para o alfa anterior, finalizando o processo de cálculo. Este processo é realizado para comprovar que o momento fletor resistente calculado é menor que o anterior e também é utilizado para verificar o valor da tensão atuante na segunda lâmina, após a ruptura da primeira.

Considera-se que o estado limite último de compressão é atingido quando, ao se aumentar a plastificação, ocorre uma diminuição do momento fletor resistente.

5.3 – Dados de Saída

Como resultado o programa fornece o valor de momento fletor resistente, diagramas de força, deformação e tensão, mostrando os respectivos valores atuantes em cada lâmina de madeira (figura 5.4, 5.5 e 5.6) e a rigidez à flexão (EI) da viga de MLC.

Figura 5.4 – Diagrama de forças atuantes nas lâminas de madeira

Figura 5.5 – Diagrama de deformação

Figura 5.6 – Diagrama de tensões atuantes nas lâminas de madeira

5.4 – Fluxograma

O fluxograma a seguir ilustra o procedimento de cálculo utilizado no programa computacional.

6. ESTUDO DO COMPORTAMENTO DA MADEIRA NA COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS

O modelo numérico para o dimensionamento de vigas de MLC reforçadas com fibra de vidro apresentado no capítulo 4 admite que, no caso de atuação de tensões de compressão na direção paralela às fibras, a madeira exibe um comportamento inicialmente elástico-linear até atingir o valor máximo de tensão, definido como a resistência à compressão paralela às fibras (f_c); posteriormente, com o incremento das deformações ocorre diminuição nos níveis de tensão, até ser observada a desagregação do material. Este item apresenta o estudo efetuado com o objetivo de determinar os valores experimentais do coeficiente angular do trecho inelástico, relacionando-o com o módulo de elasticidade obtido na fase elástica. Em suma, procura-se determinar o valor do coeficiente “m” citado no capítulo 4.

6.1. Ensaios realizados

A relação entre os coeficientes angulares dos dois trechos do diagrama tensão x deformação varia de acordo com a espécie de madeira. Neste trabalho, a espécie de madeira em estudo para a confecção de vigas de MLC é o *Pinus Spp*. Foram realizados ensaios de compressão paralela às fibras da madeira, seguindo a metodologia estabelecida pela ASTM D198-97-Methods of Static Tests of Timbers in Structural Sizes, da American Society for Testing and Materials.

Os ensaios avaliaram o comportamento na compressão paralela às fibras de 6 corpos-de-prova com dimensão estrutural igual à (15 x 15 x 45 cm) e de 36 corpos-de-prova isentos de defeitos com dimensão igual à (4 x 4 x 12 cm). Os ensaios foram realizados a uma velocidade de deslocamento igual a 0,001 mm/mm.min.

Os corpos-de-prova com dimensão estrutural foram confeccionados por meio da colagem de três peças de madeira com dimensão (5 x 15 x 45 cm), como mostrado na figura 6.1.

Figura 6.1 –Corpos-de-prova dimensão estrutural

Os ensaios dos corpos-de-prova com dimensões estruturais foram realizados em uma máquina universal de ensaios, marca INSTRON, com capacidade de 2.500 kN e os ensaios dos corpos-de-prova isentos de defeitos realizados em uma máquina universal de ensaios, marca DARTEC; com capacidade para 100 kN, ambas servocontroladas, conectadas a um computador que, por meio de um software específico, gerencia as operações do atuador e registra automaticamente os valores de forças, deslocamentos e deformações.

peça de dimensões estruturais

corpo-de-prova isento de defeito

Figura 6.2 – Ensaio de compressão paralela às fibras

6.2 Resultados obtidos e análise

A figura 6.3 mostra o comportamento real de um corpo-de-prova isento de defeito (CP 6), submetido ao ensaio de compressão paralela às fibras, e também a determinação do coeficiente angular do trecho inelástico “m”, por meio da determinação dos coeficientes angulares das equações das retas do trecho elástico-linear e do trecho inelástico.

Figura 6.3 – Comportamento real de um corpo-de-prova submetido a ensaio de compressão paralela às fibras

As tabelas 6.1 e 6.2 apresentam os resultados de resistência e elasticidade obtidos nos ensaios de compressão paralela às fibras da madeira para peças com dimensão estrutural e corpos-de-prova isentos de defeitos, respectivamente.

São apresentados também, o valor do coeficiente angular (mE) da curva tensão deformação, observado após atingir a tensão máxima (f_{c0}).

Tabela 6.1 – Corpos-de-prova com dimensões estruturais

Corpo-de-prova	f_{c0} (MPa)	E (MPa)	mE (MPa)	m
1	29,2	8127	-2514,7	-0,31
2	31,1	10474	-1696,8	-0,16
3	31,4	10891	-1748,6	-0,16
4	31,0	10072	-1460,5	-0,14
5	29,7	10230	-889,24	-0,08
6	31,8	9939	-1115,8	-0,11
Média	30,7	9956	569,6	-0,16
Desvio Padrão	1,0	932	-1382,2	0,08
CV (%)	3,3	7,9	-41,2	50
95% superior				-0,31

Tabela 6.2 – Corpos-de-prova isentos de defeitos

Corpo-de-prova	f_{c0} (MPa)	E (MPa)	mE (MPa)	m
1	60,0	7715	-974,5	-0,13
2	50,6	6196	-611,5	-0,01
3	59,7	8238	-1395,4	-0,17
4	61,8	8000	-1852,9	-0,23
5	61,4	8549	-1716,9	-0,20
6	65,3	8019	-1430,5	-0,18
7	61,0	8654	-755,4	-0,09
8	62,6	7908	-1329,2	-0,17
9	50,0	5944	-958,2	-0,16
10	51,0	8493	-1369,1	-0,16
11	48,8	6818	-1259,9	-0,18
12	45,1	5794	-569,5	-0,01
13	51,6	7198	-1462,6	-0,20
14	48,9	6205	-939,4	-0,15
15	53,5	6897	-1556,8	-0,22
16	53,2	7050	-1647,0	-0,23
17	52,3	6760	-1246,0	-0,18
18	56,0	7725	-1341,7	-0,17
19	51,8	8115	-1723,1	-0,21
20	42,0	4071	-691,9	-0,17
21	41,6	5790	-1031,2	-0,17
22	42,4	6814	-638,7	-0,09
23	46,3	5020	-458,4	-0,09
24	44,3	3551	-787,2	-0,22
25	50,0	4842	-646,9	-0,13
26	54,6	5231	-1596,9	-0,30
27	51,0	4017	-773,6	-0,19
28	56,4	5656	-1082,3	-0,19
29	51,0	4075	-1931,2	-0,41
30	56,6	5486	-605,3	-0,11
31	42,6	3336	-550,5	-0,16
32	47,6	3967	-675,3	-0,17
33	54,8	5582	-932,1	-0,17
34	57,3	4369	-846,6	-0,19
35	46,0	5744	-837,7	-0,16
36	43,0	4899	-1002,6	-0,20
Média	52,0	6187	-1089	-0,17
Desvio	6,5	1576,7	418,8	0,06
CV (%)	12	25	38	34
95% superior				-0,29

O módulo de elasticidade (E) foi determinado no regime elástico, considerando 10% e 50% do carregamento.

Observando os valores apresentados nas tabelas 6.1 e 6.2, nota-se que o valor médio do coeficiente “m” referente aos corpos-de-prova com dimensão estrutural ficou abaixo do valor obtido para os corpos-de-prova isentos de defeitos, porém os valores estão muito próximos.

Pode ser observado que o valor do coeficiente “m”, para o corpo-de-prova número 1 é superior aos valores dos outros corpos-de-prova. Esse valor influenciou na estimativa da variância da amostra, fazendo com que o valor 95% superior ficasse acima do valor observado para os corpos-de-prova isentos de defeitos. Para que o cálculo seja feito a favor da segurança, será considerado o valor de “m” igual a 0,31.

Outra consideração a ser observada, é quanto ao modo de ruptura dos corpos-de-prova de dimensão estrutural. Para os corpos-de-prova com pequenos defeitos, a ruptura foi por cisalhamento, formando um plano de ruptura com ângulo em torno de 45°. Já para os corpos-de-prova com defeitos maiores a ruptura ocorreu por fendilhamento ao redor do defeito (figura 6.4).

Ruptura por cisalhamento

Ruptura por fendilhamento

Figura 6.4 –Corpo-de-prova dimensão estrutural

6.3 Análise da influência do coeficiente “m” no modelo teórico de resistência

Com objetivo de avaliar a influência do coeficiente angular do trecho inelástico “m”, no modelo teórico de dimensionamento, proposto no capítulo 04, apresenta-se nas figuras 6.5 e 6.6, a variação do momento fletor resistente em função da relação entre as resistências à compressão e à tração paralela às fibras da madeira, para diversos valores de m.

O valor do momento máximo nos gráficos é o correspondente à relação entre resistência à compressão e à tração igual a 1, valor acima do qual a ruptura ocorre por tração, sem ocorrer

plastificação na parte comprimida, isto é, o valor do momento resistente não depende do coeficiente “m”.

As figuras 6.5 e 6.6 foram construídas com base nos valores de uma viga fictícia de MLC reforçada com fibra de vidro. As propriedades mecânicas da madeira, utilizadas na análise foram baseadas nos ensaios experimentais apresentados no capítulo 8 e estão apresentadas na tabela 6.3.

Tabela 6.3 – Propriedades da viga

Propriedades	Valores
Altura	21 cm
largura	7 cm
Número de lâminas de madeira	6
Resistência à tração (f_{t0})	45 MPa
Módulo de elasticidade madeira (E_m)	11.000 MPa
Módulo de elasticidade fibra (E_f)	56154 MPa
Porcentagem de fibra	1,2% e 3,3% da altura
Espessura das lâminas de madeira	3,5 cm

Foram construídas curvas para valores de $m=0$, $m=-0,16$ e $m = -0,4$, com o objetivo de mapear o comportamento da viga de MLC. Foram utilizados dois valores extremos e o valor médio obtido no ensaios:

- $m=0$ - viga apresenta um comportamento elasto-plástico perfeito;
- $m=-0,16$ – média do coeficiente “m” obtida nos ensaios experimentais;
- $m=-0,4$ – valor extremo.

Figura 6.5 – Variação do momento em função da relação entre as resistências (1,2% de reforço)

Figura 6.6 – Variação do momento em função da relação entre as resistências (3,3 % de reforço)

Pode ser observado pelas figuras 6.5 e 6.6 que o coeficiente “m” não tem influência significativa no modelo teórico.

Pelas figuras 6.5 e 6.6 é possível dizer que para valores de resistência à compressão, menores que de resistência à tração, ocorre plastificação da viga e ruptura por compressão.

7. CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE TECIDO UNIDIRECIONAL DE FIBRA DE VIDRO

Este capítulo apresenta o método de ensaio para determinar as propriedades mecânicas de resistência e elasticidade de tecidos unidirecionais de fibra de vidro e os respectivos resultados.

7.1 Método de ensaio

O método de ensaio empregado foi o da norma ASTM D3039-95 – Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials, da American Society for Testing and Materials, que especifica os procedimentos para determinação da resistência à tração e do módulo de elasticidade de materiais compósitos reforçados com matriz polimérica.

As dimensões mínimas dos corpos-de-prova para serem utilizados nos ensaios de tração estão apresentadas na tabela 7.1. As fibras avaliadas neste trabalho são 0° unidirecionais.

Tabela 7.1 - Geometria dos corpos-de-prova. Fonte: ASTM D3039/95

Geometrias recomendadas para ensaio de tração em fibras						
Orientação das fibras	Largura (mm)	Comp. (mm)	Esp. (mm)	Comp. Aba (mm)	Esp. Aba (mm)	Angulo da Aba (°)
0° Unidirecional	15	250	1,0	56	1.5	7 ou 90
90° Unidirecional	25	175	2,0	25	1.5	90
Fios Descontínuos	25	250	2,5	-	-	-

Os ensaios avaliaram o comportamento à tração do tecido unidirecional de fibra de vidro (UF-0900 longitudinal, espessura 0,50 mm e UF-0076, espessura 0,3 mm longitudinal), ambos de fabricação FIBERTEX, (figura 7.1). Foram avaliados 12 corpos-de-prova para cada tipo de tecido, todos laminados com resina epóxi AR-300. Esta resina já foi avaliada por FIORELLI & DIAS (2002) e apresentou bons resultados para laminação das fibras e para fixação das fibras à madeira.

Os respectivos ensaios foram realizados na máquina de ensaio DARTEC com velocidade constante de deformação igual a 2mm/min. As medidas de deformações foram feitas por meio de extensômetros elétricos do tipo “LVDT” marca Dartec. As deformações foram obtidas em um comprimento de 100 mm, posicionado na região central do corpo-de-prova. Para evitar danos no equipamento, foram medidos valores de deformação até a aproximadamente 50% do valor da força máxima.

Figura 7.1 – Tecido unidirecional de fibra de vidro

Os corpos-de-prova foram confeccionados com as dimensões estabelecidas na tabela 7.1, para orientação unidirecional das fibras.

As fibras foram cortadas na direção paralela, obtendo-se tiras com largura igual a 15 mm e comprimento igual a 250 mm. Foram dispostas sobre uma superfície impermeável para aplicação do adesivo sobre as mesmas, com o auxílio de um pincel. Retirou-se o ar do material com a utilização de um rolo de desaeração. A quantidade de adesivo utilizada foi cerca de 3,2 gramas por corpo-de-prova.

A figura 7.2 ilustra o procedimento descrito, mostrando a laminação das fibras de vidro com resina epóxi.

Figura 7.2 – Laminação de corpos-de-prova de fibras de vidro com resina epóxi

7.2 Resultados obtidos e análise

Este item apresenta os resultados obtidos nos ensaios de tração de tecido unidirecional de fibra de vidro. As tabelas 7.2 e 7.3 apresentam os resultados obtidos de resistência à tração e módulo de elasticidade dos tecidos UF-0900 e UF-0076 longitudinal, ambos de fabricação FIBERTEX.

Vale ressaltar que os valores da espessura dos corpos-de-prova apresentados nas tabelas 7.2 e 7.3 não são utilizados nos cálculos da resistência e do módulo de elasticidade. Foi utilizado o valor nominal da espessura da fibra.

Tabela 7.2 - Valores de resistência à tração e módulo de elasticidade de fibras de vidro (UF-0900 longitudinal)

Tecido unidirecional de fibras de vidro								
Corpo-de-prova	Espessura de fibra (mm) (Nominal)	Espessura do corpo-de-prova (mm)	Largura (mm)	Área da fibras (mm ²)	Área do corpo- de-prova (mm ²)	Força de ruptura (N)	Resistência (MPa)	Módulo de elasticidade(MPa)
1	0,5	0,9	15,91	7,95	14,32	9680	1217	54054
2	0,5	1,2	15,03	7,51	18,04	9400	1251	57884
3	0,5	1,15	15,2	7,60	17,48	9940	1308	56579
4	0,5	1,1	15,11	7,55	16,62	9430	1248	55592
5	0,5	1,05	15,18	7,59	15,94	9390	1237	56653
6	0,5	0,9	15,91	7,95	14,32	9680	1217	54054
7	0,5	0,95	15,35	7,67	14,58	9450	1232	57760
8	0,5	1,12	15,80	7,90	17,69	9580	1213	55245
9	0,5	1,05	15,40	7,70	16,17	9500	1234	56120
10	0,5	0,98	15,25	7,62	14,94	9730	1277	56845
11	0,5	1,13	15,10	7,55	17,06	9560	1266	57120
12	0,5	0,9	15,08	7,54	13,57	9490	1259	55942

Tabela 7.3 - Valores de resistência à tração e módulo de elasticidade de fibras de vidro (UF-0076 longitudinal)

Tecido unidirecional de fibras de vidro								
Corpo-de-prova	Espessura de fibra (mm) (nominal)	Espessura do corpo-de-prova (mm)	Largura (mm)	Área da fibras (mm ²)	Área do corpo- de-prova (mm ²)	Força de ruptura (N)	Resistência (MPa)	Módulo de elasticidade(MPa)
1	0,3	0,8	15,12	4,53	12,096	5330	1176	70547
2	0,3	0,81	15,29	4,59	12,38	5790	1262	74995
3	0,3	0,79	15,06	4,52	11,89	5160	1142	70828
4	0,3	0,87	15,28	4,58	13,29	4350	949	70244
5	0,3	0,79	14,77	4,43	11,67	4370	986	71090
6	0,3	0,8	15,12	4,54	12,09	5330	1175	70547
7	0,3	0,85	15,35	4,61	13,05	5550	1204	73554
8	0,3	0,78	15,42	4,63	12,03	4780	1032	72425
9	0,3	0,90	15,58	4,67	14,02	4890	1047	70238
10	0,3	0,83	15,05	4,51	12,49	5120	1135	70840
11	0,3	0,77	14,89	4,47	11,46	5340	1195	70654
12	0,3	0,82	15,40	4,62	12,63	4555	986	71245

As figuras 7.3 e 7.4 apresentam gráficos de tensão x deformação para os tecidos de fibra de vidro UF-0900 e UF-0076 laminados com resina epóxi, respectivamente. Pode-se notar o comportamento frágil do tecido de fibra de vidro quando solicitado por esforços de tração.

Figura 7.3 – Tensão x deformação (UF- 0900 – Longitudinal)

Figura 7.4 – Tensão x deformação (UF- 0076 – Longitudinal)

As tabelas 7.4 e 7.5 apresentam valores da média e do coeficiente de variação para resistência à tração e módulo de elasticidade referente aos tecidos UF-0900 – Longitudinal e UF-0076 – Longitudinal.

Tabela 7.4 - Valores médios e coeficiente de variação de resistência à tração e módulo de elasticidade de fibras de vidro (UF-0900 - Longitudinal)

	Resistência	Módulo de elasticidade
Média (MPa)	1247	56154
Coeficiente de variação (%)	2,24	2,25

Tabela 7.5 - Valores médios e coeficiente de variação de resistência à tração e módulo de elasticidade de fibras de vidro (UF-0076 - Longitudinal)

	Resistência	Módulo de elasticidade
Média (MPa)	1107	71434
Coeficiente de variação (%)	9,27	2,07

Observando os valores médios da resistência e do módulo de elasticidade apresentados nas tabelas 7.4 e 7.5, nota-se que para a resistência à tração o valor relativo ao tecido UF-0900 é 12% superior ao valor da resistência do tecido UF-0076. Para o módulo de elasticidade o tecido UF-0900 apresenta módulo de elasticidade 21% inferior ao encontrado para o tecido UF-0076.

8. ENSAIOS DE FLEXÃO EM VIGAS DE MLC

Para o estudo do comportamento das vigas de MLC sem reforço e com reforço de fibra de vidro, procedeu-se além do estudo teórico a realização de ensaios experimentais para aferi-los.

Para aferir o modelo teórico de dimensionamento da viga de MLC reforçada com fibra de vidro em análise, foram fabricadas doze (12) vigas de MLC. As vigas possuíam dimensões nominais de 6 x 20 x 400 cm e 6 x 30 x 400 cm. Oito delas foram reforçadas com fibra de vidro e quatro não receberam reforço. O reforço tinha espessura correspondente a 1,2% e 3,3% da altura da viga. Foram confeccionados dois exemplares semelhantes, para cada um dos tipos de vigas. Foi determinado o valor do módulo de elasticidade individual de cada lâmina constituinte das vigas, a rigidez à flexão (EI) das vigas e, posteriormente, as mesmas foram levadas à ruptura, sendo possível o cálculo do momento fletor resistente das vigas.

8.1 Materiais e Métodos

Este item apresenta os procedimentos adotados e os ensaios realizados para avaliar o comportamento à flexão de vigas de MLC sem reforço e reforçadas com fibra de vidro. Foram realizados ensaios para caracterização das lâminas de madeira, ensaios de flexão nas vigas de MLC sem reforço e reforçadas com fibra de vidro e ensaios de compressão e de tração paralela às fibras da madeira.

8.1.1 Fabricação das vigas

Foram confeccionadas doze vigas em MLC da espécie *Pinus caribea var. hondurensis*. As vigas foram reforçadas com fibra de vidro na última linha de cola da seção tracionada. Para a colagem da madeira foi utilizado adesivo Phenol-resorcinol (Axo-Nobel) e para a colagem do tecido de fibra de vidro adesivo AR-300 (Barracuda). A espessura do reforço considerada refere-se à espessura nominal da fibra. A porcentagem de reforço indicada é referente à altura da viga de MLC. A dimensão, o

número de lâminas, a espessura das lâminas e a quantidade de reforço das vigas de MLC avaliadas experimentalmente estão descritas na tabela 8.1.

Tabela 8.1 – Propriedades geométricas das vigas de MLC avaliadas experimentalmente

Viga	Nº de lâminas de madeira	Espessura aproximada das lâminas (cm)	b (cm)	h (cm)	Porcentagem de reforço (%)	Espessura do reforço (cm)
01	6	3,3 ± 0,2	6,9	20,0	0	0,0
02			6,9	20,5		
03			6,9	20,5	1,2	0,25
04			6,9	20,2		
05			7,0	20,5	3,3	0,6
06	7		7,0	24,0		0,7
07	9		7,7	28,9	0	0,0
08			7,5	28,7		
09			7,6	30,4	1,2	0,35
10			7,0	30,2		
11			6,9	30,8	3,3	0,9
12			7,0	30,6		

Foram confeccionadas emendas dentadas horizontais para unir as peças de madeira e respeitadas às recomendações construtivas, quanto à dimensão das emendas, espaçamento de emendas, espessura das lâminas de madeira, pressão de colagem etc, apresentadas no capítulo 3. Procurou-se posicionar as emendas na região de momento máximo, compreendida no trecho central, entre os pontos de aplicação de carga.

Nas vigas 01 a 05, com altura nominal igual a 20 cm e na viga 06, com altura nominal 24 cm, foram confeccionadas emendas nas três lâminas inferiores. Nas vigas 07 a 12, com altura nominal igual a 30 cm, foram confeccionadas emendas nas quatro lâminas inferiores.

A figura 8.1 ilustra a disposição das emendas ao longo do comprimento da viga.

Figura 8.1 Distribuição das emendas ao longo do comprimento das vigas

As vigas foram confeccionadas em uma prensa de MLC do Laboratório de Madeira e de Estruturas de Madeiras – LaMEM. A figura 8.2 ilustra o processo de confecção das vigas e de aplicação do reforço.

Aplicação de cola nas lâminas

Prensagem da viga

Aplicação do tecido de fibra de vidro

Prensagem da viga com reforço

Controle da pressão por meio de torquímetro

Detalhe da viga reforçada

Figura 8.2– Processo de fabricação das vigas de MLC

8.1.1.1 Método para aplicação de fibra de vidro à madeira

O bom desempenho do polímero reforçado com fibra (PRF), está diretamente ligado ao processo de laminação utilizado. Para reforço de estruturas de madeira, concreto ou aço, utilizando fibras, deve-se realizar o processo de laminação manual, onde a resina é aplicada diretamente sobre a superfície a ser reforçada e também sobre o respectivo tecido. Como produto final se obtém um material laminado (fibra + resina).

O primeiro passo para realizar a aplicação do reforço com fibras é verificar a condição em que se encontra a estrutura. No caso da madeira, a superfície deve estar limpa, seca, livre de partículas soltas, contaminações de graxas e óleos. Se houver cavidades ou buracos na superfície, deverão ser preenchidos com algum tipo de argamassa epóxi. Inicialmente, aplica-se uma camada de resina utilizando um rolo de impregnação (lã) ou pincel, sobre a superfície de madeira. Em seguida coloca-se uma camada de fibra sobre a superfície a ser reparada. Com um rolo para desaeração deve-se pressionar a fibra contra o adesivo, eliminando desta forma bolhas de ar que possam existir e prejudicar o reforço. Sobre a fibra aplica-se uma nova camada de resina. Em seguida o procedimento acima descrito é repetido. A cura demanda cerca de 24 a 48 horas.

Aplicação de resina sobre a viga de madeira

Colagem do tecido de fibra de vidro

Aplicação da 2ª camada de resina

Retirada de bolhas de ar - rolo de desaeração

Figura 8.3 - Procedimento de aplicação de fibras de vidro em vigas de madeira

8.1.2 Caracterização das lâminas

Os ensaios das lâminas de madeira foram realizados para determinar o valor do módulo de elasticidade de cada lâmina. Foi aplicada força até obter um deslocamento vertical no meio do vão igual à $L/200$, sendo medidos os valores dos deslocamentos verticais ao longo deste intervalo, correspondentes a 0,1 e 0,5 da força de ruptura. Este procedimento garante que as tensões não ultrapassem o regime elástico do material. A figura 8.4 mostra o esquema do ensaio realizado.

Figura 8.4 – Esquema estático de ensaio das lâminas de madeira

A classificação visual das lâminas de madeiras utilizadas na fabricação das vigas de MLC seguiu os procedimentos estabelecidos por CARREIRA (2003). Os resultados da classificação visual, a espessura das lâminas e os respectivos módulos de elasticidade estão apresentados no Anexo D.

8.1.3 Ensaio nas vigas

Os ensaios de flexão estática realizados nas vigas de MLC seguiram os procedimentos da norma americana ASTM D198-97-Standard Test Methods of Static Tests of Lumber in Structural Sizes, da American Society for Testing and Materials. Foram determinados os valores de rigidez à flexão (EI) e do momento fletor resistente das vigas avaliadas.

Os ensaios foram realizados com carga aplicada nos terços do vão e a flecha foi medida no meio do vão (figura 8.5).

Figura 8.5 – Esquema de ensaio de flexão estática

As vigas 02, 04, 05, 08, 10 e 12 foram instrumentadas na seção situada no meio do vão, nas faces superior e inferior, e na metade da altura das faces laterais da penúltima lâmina, adjacente ao reforço (figura 8.6). Foram escolhidas estas vigas levando em consideração a altura e a quantidade de reforço, sendo possível mapear o comportamento de cada par de vigas.

Figura 8.6 - Posição dos extensômetros na seção transversal da viga

8.1.4 Caracterização da madeira

Após a realização dos ensaios de flexão foram retirados das vigas corpos-de-prova para determinação da resistência à compressão (f_{c0}) e da resistência à tração (f_{t0}), paralela às fibras da madeira. Os corpos-de-prova foram retirados de posições menos solicitadas da viga, que não foram danificadas no ensaio. Foram retirados três corpos-de-prova da região comprimida e três da tracionada e confeccionados seguindo as recomendações da norma NBR 7190/97. Os ensaios foram realizados seguindo os procedimentos dessa norma.

8.2 Resultados obtidos

Este item apresenta a classificação visual e o valor dos módulos de elasticidade de cada lâmina constituinte das vigas, uma análise do tipo de ruptura observado, valores de rigidez à flexão (EI) das vigas sem reforço e reforçadas com fibra de vidro, valor do momento fletor resistente das vigas de MLC sem reforço e reforçadas e valores de deformações.

8.2.1 Modos de ruptura

Este item apresenta o modo de ruptura obtido para cada uma das vigas de MLC reforçadas e sem RFV. Nota-se que as rupturas iniciais, tanto para as vigas sem reforço, como para as vigas reforçadas, ocorreram sempre na lâmina abaixo da camada de fibra e foi iniciada na emenda dentada posicionada na região de momento fletor máximo e após um incremento de carga ocorreu a ruptura final da viga. A figura 8.7 ilustra os tipos de rupturas observados nas vigas. Primeiramente a ruptura foi caracterizada pela abertura da emenda na lâmina inferior, mas a viga ainda manteve a capacidade de receber carga. Posteriormente, apenas para as vigas com reforço, observou-se uma segunda ruptura, para um valor maior da carga aplicada.

Ruptura na lâmina abaixo do reforço

Ruptura final da viga

Figura 8.7 – Ruptura inicial e final nas vigas de MLC

A figura 8.8 apresenta as rupturas iniciais e finais para as vigas avaliadas experimentalmente.

Primeira Ruptura	Ruptura Final

Viga 01 (Sem reforço) - Ruptura iniciou na emenda inferior e propagou-se por cisalhamento.

Viga 02 – (Sem reforço) – Ruptura na emenda lâmina inferior e propagação por cisalhamento.

Viga 03 – (1,2% de reforço) – Primeira ruptura na emenda da lâmina localizada abaixo da camada de fibra de vidro e posteriormente ruptura por compressão, tração e cisalhamento.

Viga 04 - (1,2% de reforço) – Primeira ruptura na emenda da lâmina localizada abaixo da camada de fibra de vidro e posteriormente ruptura por compressão, tração e cisalhamento.	
Primeira Ruptura	Ruptura Final

Viga 05 - (3,3% de reforço) – Primeira ruptura na emenda da lâmina localizada abaixo da camada de fibra de vidro e posteriormente ruptura por compressão, tração e cisalhamento.

<p>Viga 06 - (3,3% de reforço) - Primeira ruptura na emenda da lâmina localizada abaixo da camada de fibra de vidro e posteriormente ruptura por compressão, tração e cisalhamento.</p>

<p>Viga 07 - (Sem reforço) - Ruptura iniciou na emenda da última lâmina tracionada e propagou-se por cisalhamento.</p>

<p>Viga 08 – (Sem reforço) – Ruptura iniciou na última lâmina de madeira da região tracionada e propagou-se para a emenda localizada na região central da lâmina superior.</p>	
<p>Primeira Ruptura</p>	<p>Ruptura Final</p>

<p>Viga 09 - (1,2% de reforço) - Primeira ruptura na emenda da lâmina localizada abaixo da camada de fibra de vidro e posteriormente ruptura por compressão, tração e cisalhamento.</p>

Figura 8.8 – Tipos de ruptura nas vigas de MLC

8.2.2 Rigidez à flexão e momento fletor resistente

Este item apresenta os resultados experimentais de rigidez à flexão (EI) e de momento fletor resistente das vigas de MLC avaliadas.

Com relação ao momento fletor resistente das vigas de MLC reforçadas são apresentados dois valores que correspondem a:

- M_1 – valor do momento quando ocorreu a ruptura na última lâmina tracionada, posicionada abaixo do reforço (figura 8.7);
- M_2 – valor do momento fletor quando ocorreu a ruptura final da viga (figura 8.7).

Tabela 8.2 – Valor de rigidez à flexão e momento fletor resistente

Viga	Porcentagem de reforço	Seção		EI (kN.cm ²)	Momento fletor		Flecha máxima
					(kN.cm)		(cm)
					M ₁	M ₂	
01	----	6,9	20,0	6.488.396	2489		8
02	----	6,9	20,5	6.914.197	2273		8
03	1,2% FV	6,9	20,5	6.644.274	2381	2814	11
04	1,2% FV	6,9	20,2	6.766.187	2056	2887	13
05	3,3% FV	7,0	20,5	7.022.504	2561	3283	16
06	3,3% FV	7,0	24,0	9.980.947	3210	3694	12
07	----	7,7	28,9	16.826.463	3824		6
08	----	7,5	28,7	17.179.260	4220		5
09	1,2% FV	7,6	30,4	22.050.998	6200	7835	12
10	1,2% FV	7,0	30,2	19.278.948	6143	6875	9
11	3,3% FV	6,9	30,8	24.255.268	8173	8906	12
12	3,3% FV	7,0	30,6	21.978.306	7948	8568	10

8.2.3 Valores de resistência à compressão e à tração paralela às fibras da madeira

Este item apresenta os valores experimentais de resistência à compressão e à tração paralela às fibras da madeira, determinados por meio de ensaios em corpos-de-prova. O valor entre parêntesis refere-se ao coeficiente de variação.

Tabela 8.3 – Valor de resistência à compressão e à tração e coeficiente de variação

Viga	Resistência (MPa)	
	f _{c0}	f _{t0}
01	52,3 (0,9%)	89,2 (10,5%)
02	51,4 (2,6%)	70,4 (13,5%)
03	49,2 (2,4%)	67,3 (3,0)
04	51,1 (2,1%)	65,3 (5,7%)
05	50,5 (4,8%)	62,1 (9,4%)
06	51,3 (5,6%)	70,2 (6,8%)
07	44,4 (3,2%)	66,2 (15,3%)
08	47,2(2,8%)	58,5 (4,41%)
09	54,6 (3,6%)	78,1 (4,30%)
10	51,4 (3,0%)	90,0 (10,25%)
11	61,3 (4,3%)	76,3 (3,8%)
12	54,0 (1,8%)	98,2 (6,7%)

8.3 Análise dos resultados

Este item apresenta uma análise comparativa entre valores experimentais e teóricos de rigidez à flexão (EI), deformações e momento fletor resistente.

8.3.1 Análise da rigidez à flexão

Este item apresenta uma comparação entre a rigidez à flexão EI experimental ($EI_{exp.}$) e teórica ($EI_{teo.}$). A rigidez à flexão teórica foi determinada de acordo com o modelo de seção transformada apresentado no capítulo 04.

A tabela 8.4 apresenta valores de rigidez à flexão experimental e teórico e uma comparação entre os mesmos.

Tabela 8.4 – Valor da rigidez à flexão (experimental e teórico)

Viga	$EI_{exp.}$ kN.cm ²	$EI_{teo.}$ kN.cm ²	$EI_{exp.}/EI_{teo.}$
1	6.488.396	6.864.927	0,94
2	6.914.197	6.882.334	1,01
3	6.644.274	7.402.057	0,90
4	6.766.187	6.711.977	1,01
5	7.022.504	6.972.873	1,01
6	9.980.947	10.245.491	0,97
7	16.826.463	18.179.793	0,93
8	17.179.260	17.458.861	0,98
9	22.050.998	20.186.708	1,09
10	19.278.948	20.080.207	0,96
11	24.386.700	23.300.058	1,04
12	21.601.543	22.844.327	0,94

A análise da rigidez das vigas sem reforço e reforçadas com fibra de vidro compara valores obtidos em ensaios experimentais com valores teóricos determinados de acordo com o modelo de seção transformada. Verifica-se, de maneira geral, que os resultados experimentais apresentam boa concordância em relação à rigidez à flexão teórica estimada. Os resultados obtidos indicam que a recomendação da norma ASTM D 3737-96 ($EI_{exp.} = 95\%$ do $EI_{teo.}$) para vigas sem reforço é conveniente tanto para vigas reforçadas como para vigas sem reforço.

8.3.2 Análise das deformações – experimental e teórico

Este item apresenta gráficos com valores experimentais e teóricos da variação da deformação

ao longo da altura, para diferentes níveis de carregamento (figura 8.9 e 8.10) e também a variação da deformação em função do aumento do momento fletor atuante em cada viga (figura 8.11 e 8.12).

Nas figuras 8.9 e 8.10, os valores das deformações experimentais são marcados por pontos, com uma linha tracejada ligando os pontos referentes a um determinado valor de carregamento. As linhas contínuas representam os valores de deformações obtidos pelo modelo teórico. Em cada figura, as linhas tracejadas e contínuas de mesma cor são referentes ao mesmo nível de carregamento.

A última linha contínua representa deformações teóricas calculadas para o valor de momento experimental na primeira ruptura, para a qual não foi possível avaliar experimentalmente as deformações. Nas figuras 8.11 e 8.12 são apresentados valores de deformações, em função do aumento do momento fletor atuante, para a face tracionada e comprimida. Nessas figuras, as linhas tracejadas representam os valores experimentais, e as linhas contínuas valores teóricos.

Figura 8.9 – Variação das deformações ao longo da altura da viga em função do nível do carregamento (Seção nominal 7 x 20 cm)

Figura 8.10 – Variação das deformações ao longo da altura da viga em função do nível do carregamento (Seção nominal 7 x 30 cm)

Viga 02 - MLC sem reforço

Viga 04 - MLC reforçada (1,2%)

Viga 05 - MLC reforçada (3,3%)

Figura 8.11 – Variação das deformações em função do momento fletor resistente (Seção nominal 7 x 20cm)

Viga 08 - MLC sem reforço

Viga 10 - MLC reforçada (1,2%)

Viga 12 - MLC reforçada (3,3%)

Figura 8.12 – Variação das deformações em função do momento fletor resistente (Seção nominal 7 x 30cm)

Observando as figuras 8.9 a 8.12 é possível perceber que:

- as deformações teóricas são próximas das deformações experimentais, com exceção da viga 12;

- a diferença notada entre deformações experimentais e teóricas para a viga 12 pode ter ocorrido pelo fato desta viga possuir o maior número de lâminas de madeira (maior altura e maior porcentagem de reforço) e conseqüentemente a existência de uma deformação do adesivo por cisalhamento, efeito que não é considerado no modelo teórico.

Com relação a esta viga, é possível afirmar que ela tem a menor relação de EI. Mas por outro lado possui a maior relação resistência estrutural / resistência de C.P. Essa viga foi, entre as reforçadas de mesma altura, a que apresentou uma das menores relações entre o momento fletor na segunda e na primeira ruptura.

As vigas sem reforço 2 e 8 apresentam uma pequena diferença entre deformações experimentais e teóricas.

8.3.3 Análise do momento fletor máximo resistente - experimental e teórico

Este item apresenta valores de momento fletor resistente experimental e teórico. Para avaliação teórica do momento, utilizando o modelo numérico proposto no capítulo 04, foram consideradas as propriedades mecânicas de resistência e elasticidade da madeira e da fibra de vidro.

Para a resistência à tração paralela às fibras foram considerados dois valores. O primeiro é referente à resistência de CP isentos de defeitos (f_{t0}) (tabela 8.3), e o segundo é referente à resistência à tração teórica ($f_{t0Teórico}$) que corresponde ao valor que conduz a um momento fletor resistente teórico igual ao momento fletor resistente experimental, considerando que em todas as vigas avaliadas a ruptura se iniciou por tração.

A tabela 8.5 apresenta valores das propriedades mecânicas das vigas avaliadas e valores de momento fletor resistente experimental e teórico.

A tabela 8.6 apresenta uma relação entre resistência à tração paralela às fibras de CP isentos de defeitos e resistência à tração teórica. São apresentados também, valores do coeficiente de redução da resistência recomendado pela norma ASTM D 3737/96. Este valor é determinado pela multiplicação dos coeficientes SMF e BSI, desconsiderando o coeficiente apresentado na tabela 3.7, conforme modelo de cálculo apresentado no item 3.4.2.

Tabela 8.5 – Valor do momento fletor resistente (experimental e teórico)

Viga	f_{c0}	f_{t0}	f_{t0}	M_{exp.}	M_{teo} (kN.cm)
	CP	CP	Teórico	(kN.cm)	(f_{t0} CP)
1	52,3	89,2	58,3	2489	3090
2	51,4	70,4	49,0	2273	3057
3	49,2	67,3	48,5	2381	2641
4	51,1	65,3	42,5	2056	2997
5	50,5	62,1	47,0	2561	3256
6	51,3	70,2	44,5	3210	4747
7	44,4	66,2	42,0	3824	5946
8	47,2	58,5	44,2	4220	5525
9	54,6	78,1	59,0	6200	7693
10	51,4	90,0	57,0	6143	7722
11	61,3	76,3	64,0	8173	9165
12	54,0	98,2	70,0	7948	8809

Tabela 8.6 – Relação entre resistência à tração experimental e teórica

Viga	f_{t0}	f_{t0}	$f_{to} \text{ (teórico)} / f_{t0}$	Coef. de redução da resistência ASTM D3737/96
	CP	Teórico	CP	
1	89,2	58,3	0,65	0,47
2	70,4	49,0	0,70	0,42
3	67,3	48,5	0,72	0,64
4	65,3	42,5	0,66	0,32
5	62,1	47,0	0,75	0,41
6	70,2	44,5	0,64	0,52
7	66,2	42,0	0,64	0,50
8	58,5	44,2	0,75	0,49
9	78,1	59,0	0,75	0,61
10	90,0	57,0	0,63	0,54
11	76,3	64,0	0,84	0,55
12	98,2	70,0	0,70	0,50

A tabela 8.7 apresenta uma comparação entre o momento fletor resistente experimental, referente as vigas sem reforço 01, 02, 07 e 08 e momento teórico determinado pelo método da ASTM D 3737/96. Os valores de resistência e dos coeficientes de redução utilizados para a determinação do momento fletor resistente, estão apresentados no Anexo C.

Tabela 8.7 – Valor do momento fletor resistente (experimental e teórico ASTM D 3737/96)

Viga	Momento de ruptura experimental (kN.cm)	Momento de ruptura teórico (kN.cm)	Relação
	M	ASTM	$M/M_{teórico}$
01	2489	1610	1,54
02	2273	1576	1,44
07	3824	3933	0,97
08	4220	3862	1,09

Pela tabela 8.4 é possível afirmar que o valor do momento fletor resistente teórico determinado considerando a resistência à tração de CP isentos de defeitos é, em média, 30% superior ao valor experimental.

Pela análise dos valores apresentados na tabela 8.5 é possível notar que a relação entre

resistência à tração teórica e resistência à tração de CP isentos de defeitos varia de 0,64 a 0,84. Para trabalhar a favor da segurança, recomenda-se a utilização, no modelo numérico de dimensionamento, de um coeficiente de redução da resistência à tração de CP igual a 0,64, quando se utiliza madeira da classe SS-D nas regiões mais solicitadas por tração.

Comparando os coeficientes determinados pela relação entre resistência à tração experimental e teórica, com coeficientes de redução da resistência, apresentado pela norma ASTM D3737/96, é possível notar que estes últimos são em média, 30% inferiores.

Para valores de momento fletor resistente de vigas de MLC sem reforço, determinados segundo os procedimentos da norma ASTM D 3737/96 observa-se valores aproximadamente 50% inferiores em comparação com valores experimentais, quando analisadas as vigas de seção transversal (7 x 20 cm). Para as vigas de seção transversal (7 x 30 cm) essa diferença entre valores experimentais e teóricos não é pronunciada.

9. AVALIAÇÃO DE CORPOS-DE-PROVA DE MLC REFORÇADOS COM PRF SUBMETIDOS A ENSAIO DE DELAMINAÇÃO

Este capítulo apresenta uma avaliação da qualidade da colagem do adesivo Phenol-resorcinol, utilizado na confecção das vigas de MLC avaliadas e do adesivo epóxi AR-300, utilizado na fixação da fibra de vidro à madeira, quando submetidos ao ensaio de delaminação.

A avaliação da eficiência destes adesivos, quando submetidos a variações de umidade e temperatura é de fundamental importância para garantir a integridade do elemento estrutural em Madeira Laminada Colada e do RFV, durante a vida útil da construção.

Os ensaios de delaminação, aqui apresentados, foram realizados no Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Núcleo de Estruturas de Madeiras (LNEC-Lisboa-Portugal).

9.1 Materiais e Métodos

Este item apresenta os procedimentos adotados para a realização dos ensaios de delaminação. Os ensaios foram realizados conforme os procedimentos da norma europeia EN 391 (1995) – Glued Laminated Timber – Delamination test of Glue Lines.

9.1.1 Adesivos avaliados

Foram avaliados os adesivos Phenol-resorcinol fabricado pela Axo-Nobel, utilizados na colagem da madeira e o adesivo Epóxi AR-300 fornecido pela Barracuda Technologies, utilizado na colagem da fibra de vidro à madeira. Os adesivos avaliados foram os mesmos utilizados na confecção das vigas de MLC avaliadas experimentalmente (capítulo 8).

9.1.2 Quantidade e dimensão dos corpos-de-prova

A norma prEN 14080 (2000) - Timber structures - Glued laminated timber - Requirements, recomenda a avaliação de pelo menos 10 corpos-de-prova (CP), com a secção transversal igual a dos elementos estruturais fabricados. Baseados nesta norma foram realizados ensaios de delaminação em

10 CP confeccionados segundo as recomendações da norma europeia EN 391 (1995), conforme apresentado na figura 9.1. Os CP, com 75 mm de largura foram retirados de uma viga de MLC que possuía sete lâminas de madeira e 3,3% de fibra de vidro na última linha de cola da região tracionada da viga.

Figura 9.1 – Dimensões (mm) do corpo-de-prova para ensaio de delaminação e seção transversal do CP avaliado

9.1.3 Procedimento de ensaio

Os ensaios de delaminação foram realizados no equipamento de delaminação denominado “Dispositivo de delaminação para testes em linha de cola”, de fabricação alemã (ULRICH LÜBBERT), conforme ilustrado na figura 9.2.

Figura 9.2 – Equipamento de ensaio de delaminação do LNEC

O procedimento do ensaio de delaminação foi escolhido seguindo as recomendações da norma EN 386/2001 – Glued Laminated Timber – Performance requirements and maximum production requirements. Esta norma afirma que estruturas de MLC expostas ao intemperismo deverão ser avaliadas à delaminação pelo método A, especificado na norma EN 391.

Sendo assim, os ensaios foram realizados de acordo com o método A, seguindo o respectivo procedimento:

- colocação dos CP na autoclave, submerso em água com temperatura variando de 10°C a 20°C;

- aplicação de um vácuo com uma pressão absoluta de 30kPa por um período de 5 min.;

- retirada do vácuo e aplicação de uma pressão absoluta de 600kPa por 60 min.

Este ciclo de vácuo-pressão foi repetido por mais duas vezes. Após o final dos ciclos, os CP foram retirados da autoclave e colocados em uma estufa umidificadora. Os CP permaneceram dentro da estufa por um período de 22 horas com temperatura de 70°C e umidade relativa do ar em torno de 15% circulando com uma velocidade de 3m/s.

9.1.4 Cálculo da porcentagem de delaminação

A porcentagem de delaminação foi determinada pela equação 9.1.

$$\%D.T = \frac{L_{tot,delam}}{L_{totalinhadeCola}} \times 100 \quad (9.1)$$

Onde: %D.T. = porcentagem de delaminação total

$L_{tot,delam.}$ = comprimento total das fendas de delaminação dado pela somatória dos comprimentos individuais de delaminação das faces A e B;

$L_{total\ linha\ de\ cola}$ = comprimento total das linhas de cola dado pela somatória do comprimento total das linhas de cola.

9.2 Resultados obtidos

As linhas de cola dos CP foram numeradas conforme apresentado na figura 9.3.

Figura 9.3 – Numeração das linhas de cola

As tabelas apresentadas a seguir contêm informações referentes aos CP avaliados quanto a delaminação. São apresentados os comprimentos das linhas de cola, comprimento de delaminação e peso dos CP antes e depois da realização dos ensaios de delaminação. O comprimento e delaminação, segundo a norma EN 391 (1995), deve ser medido na maior face do CP. Estas faces foram convencionadas, como sendo, face A e face B. As outras duas faces, possuíam comprimento de 75 mm cada uma, conforme apresentado na figura 9.1.

Tabela 9.1 – Resultados de delaminação medidos no corpo-de-prova 01

	Comp. da linha de cola (mm)	Delaminação (mm)		Delaminação na linha (mm)
		Face A	Face B	
LC 1	139	0	0	0
LC 2	139	19	0	19
LC 3	138	7	7	14
LC 4	138	37	48	85
LC 5	138	0	0	0
LC 6	138	0	0	0
LC 7	139	0	11	11
Peso Antes (g)	728,8			
Peso Depois (g)	798,9			

Tabela 9.2 – Resultados de delaminação medidos no corpo-de-prova 02

	Comp. da linha de cola (mm)	Delaminação (mm)		Delaminação na linha (mm)
		Face A	Face B	
LC 1	138	0	0	0
LC 2	138	12	0	12
LC 3	137	9	0	9
LC 4	138	9	16	25
LC 5	138	22	11	33
LC 6	138	0	4	4
LC 7	138	0	0	0
Peso Antes (g)	706,6			
Peso Depois (g)	788,2			

Tabela 9.3 – Resultados de delaminação medidos no corpo-de-prova 03

	Comp. da linha de cola (mm)	Delaminação (mm)		Delaminação na linha (mm)
		Face A	Face B	
LC 1	138	0	0	0
LC 2	138	0	19	19
LC 3	138	5,5	8	14
LC 4	138	55	12	67
LC 5	138	15	0	15
LC 6	137	3	0	3
LC 7	138	10,5	7	18
Peso Antes (g)	727,6			
Peso Depois (g)	787,8			

Tabela 9.4 – Resultados de delaminação medidos no corpo-de-prova 04

	Comp. da linha de cola (mm)	Delaminação (mm)		Delaminação na linha (mm)
		Face A	Face B	
LC 1	138	0	0	0
LC 2	138	66	30	96
LC 3	137	0	0	0
LC 4	137	4	56	60
LC 5	138	0	0	0
LC 6	138	7,5	0	8
LC 7	138	0	0	0
Peso Antes (g)	720,5			
Peso Depois (g)	789,3			

Tabela 9.5 – Resultados de delaminação medidos no corpo-de-prova 05

	Comp. da linha de cola (mm)	Delaminação (mm)		Delaminação na linha (mm)
		Face A	Face B	
LC 1	138	0	0	0
LC 2	138	15	0	15
LC 3	138	8	7	15
LC 4	138	7	21	28
LC 5	138	0	25	25
LC 6	122	21	0	21
LC 7	138	0	21	21
Peso Antes (g)	735,8			
Peso Depois (g)	785,8			

Tabela 9.6 – Resultados de delaminação medidos no corpo-de-prova 06

	Comp. da linha de cola (mm)	Delaminação (mm)		Delaminação na linha (mm)
		Face A	Face B	
LC 1	138	0	0	0
LC 2	138	9	37	46
LC 3	138	11	7	18
LC 4	138	7	5	12
LC 5	138	0	27	27
LC 6	109	3	0	3
LC 7	138	0	0	0
Peso Antes (g)	733,9			
Peso Depois (g)	812,6			

Tabela 9.7 – Resultados de delaminação medidos no corpo-de-prova 07

	Comp. da linha de cola (mm)	Delaminação (mm)		Delaminação na linha (mm)
		Face A	Face B	
LC 1	138	0	0	0
LC 2	138	62	0	62
LC 3	138	32	20	52
LC 4	124	20	44	64
LC 5	109	0	0	0
LC 6	138	0	0	0
LC 7	138	0	15	15
Peso Antes (g)	731,7			
Peso Depois (g)	795,5			

Tabela 9.8 – Resultados de delaminação medidos no corpo-de-prova 8

	Comp. da linha de cola (mm)	Delaminação (mm)		Delaminação na linha (mm)
		Face A	Face B	
LC 1	138	0	0	0
LC 2	138	44	10	54
LC 3	138	14	6	20
LC 4	136	27	29,5	57
LC 5	138	0	0	0
LC 6	138	0	0	0
LC 7	138	0	0	0
Peso Antes (g)	715,3			
Peso Depois (g)	771			

Tabela 9.9 – Resultados de delaminação medidos no corpo-de-prova 9

	Comp. da linha de cola (mm)	Delaminação (mm)		Delaminação na linha (mm)
		Face A	Face B	
LC 1	138	0	0	0
LC 2	138	10	55	65
LC 3	137	0	0	0
LC 4	118	11,5	10	22
LC 5	113	12	5	17
LC 6	137	0	19	19
LC 7	137	0	8,5	9
Peso Antes (g)	874,5			
Peso Depois (g)	932,2			

Tabela 9.10 – Resultados de delaminação medidos no corpo-de-prova 10

	Comp. da linha de cola (mm)	Delaminação (mm)		Delaminação na linha (mm)
		Face A	Face B	
LC 1	138	0	0	0
LC 2	138	0	4	4
LC 3	138	0	4	4
LC 4	137	0	55	55
LC 5	138	17	3	20
LC 6	138	7	11,5	19
LC 7	138	0	0	0
Peso Antes (g)	726			
Peso Depois (g)	809,3			

9.3 Análise dos resultados

Este item apresenta uma análise dos resultados obtidos nos ensaios de delaminação. São apresentados resultados de delaminação para os CP, para os adesivos Phenol-resorcinol e para o adesivo epóxi. Segundo a norma EN 386 (2001), a porcentagem máxima de delaminação permitida, para CP submetidos ao ensaio especificado no método A da norma EN 391 (1995), após o 3º ciclo, é de 10%. A tabela 9.11 apresenta, para cada CP avaliado, a porcentagem de delaminação total do CP, do adesivo Phenol-resorcinol, fabricado pela Axo-Nobel (fixação da madeira) e do Adesivo Epóxi

AR-300 (fixação da fibra).

Tabela 9.11 – Porcentagem de delaminação

Corpo-de-prova	% delaminação Total	% delaminação Phenol-Resorcinol	% delaminação Epóxi AR-300
1	6,3	7,6	3,3
2	4,1	4,9	2,0
3	6,7	8,1	3,3
4	8,1	4,7	16,0
5	6,2	7,7	2,6
6	5,3	4,2	7,9
7	9,8	9,3	10,0
8	6,5	5,3	9,3
9	6,7	4,8	11,0
10	5	6,8	1

Analisando os resultados apresentados na tabela 9.11 é possível afirmar que a porcentagem de delaminação total dos CP avaliados ficou sempre abaixo do limite de 10% estabelecido pela norma EN 386 (2001). Para o adesivo Phenol-resorcinol a porcentagem de delaminação obtida para os CP avaliados também ficou abaixo dos 10%. Para o adesivo Epóxi AR-300 a recomendação da norma também foi atendida, com exceção dos CP 04 e 09, onde a porcentagem de delaminação ficou acima dos 10%. Pode-se afirmar que os adesivos utilizados para a confecção das vigas de MLC e para fixação da fibra de vidro à madeira apresentaram um comportamento eficiente quando submetidos a ensaios de delaminação.

Foi realizada uma análise da delaminação acumulada por linha de cola. O resultados obtidos estão apresentados na tabela 9.12., e são referentes a somatória das delaminações das faces A e B de cada linha de cola.

Tabela 9.12 – Delaminação total por linha de cola

Linha de cola	Delaminação acumulada (mm)
1	0
2	392
3	145,5
4	473,5
5	137
6	76
7	73

Analisando os dados apresentados na tabela 9.12 é possível dizer que a delaminação acumulada (mm), das linhas de cola mais externas das vigas, é menor que a delaminação das linhas de

cola internas à viga. Isso se repete tanto para o adesivo Epóxi AR-300 como para o Adesivo Phenol-Resorcinol. Esse efeito provavelmente ocorreu devido a melhor qualidade das lâminas de madeira localizadas externamente.

10. CONCLUSÕES

Este item apresenta as principais conclusões obtidas da revisão bibliográfica e das análises teóricas e experimentais efetuadas, sendo que a maioria delas já foram comentadas no decorrer do trabalho.

Em relação à revisão da literatura podemos concluir que:

A utilização de MLC é uma alternativa viável para o aproveitamento racional da madeira. A versatilidade da MLC com respeito às formas, dimensões e resistência dos elementos estruturais, aliada ao aumento da durabilidade, proporcionado pelo tratamento preservativo sob pressão, vem ampliando seu uso em diversos países. A utilização de PRF (Polímeros Reforçados com Fibras) mostra-se como um ótimo material para reforço de vigas de MLC. O uso destas fibras proporciona um ganho significativo de resistência e rigidez à estrutura.

Para garantir a eficiência dos elementos estruturais de MLC alguns critérios devem ser considerados durante o processo de fabricação. A madeira para produção de vigas de MLC deve apresentar densidade variando de $0,4 \text{ g/cm}^3$ a $0,7 \text{ g/cm}^3$, possuir teor de umidade entre 7% e 14% e receber tratamento preservativo que garanta o aumento da durabilidade. É necessário utilizar adesivo a prova d'água, para a confecção do elemento em MLC, principalmente quando as estruturas estiverem expostas. As lâminas de madeira devem ser confeccionadas com espessura máxima de 5 cm. Todas as lâminas que formarão o elemento estrutural em MLC deverão ser classificadas por meio de método visual e mecânico. Posteriormente, as de melhor qualidade serão posicionadas nas regiões solicitadas por maiores esforços de tração e compressão.

As emendas dentadas devem ser fabricadas com comprimento mínimo de 26 mm (horizontal) e 28 mm (vertical), coladas com adesivo à prova d'água por meio da aplicação de uma pressão de 6 MPa a 8 MPa, por aproximadamente 5 segundos e posicionadas a uma distância mínima entre emendas na mesma lâmina de 180 cm e em lâminas adjacentes no mínimo de 15 cm.

A porcentagem máxima de RFV sugerida em vigas de MLC é de 3,3% em relação à altura do elemento estrutural, tendo em vista que a partir desse valor o ganho proporcionado pelo reforço não é significativo.

É importante a utilização de uma lâmina de madeira abaixo da camada de reforço, com o

objetivo de minimizar os efeitos de altas temperaturas na fibra de vidro, em caso de incêndio, bem como proporcionar um efeito estético agradável. O modelo numérico apresentado considera a existência desta última lâmina.

Em relação ao programa teórico de cálculo e as análises experimentais efetuadas no trabalho podemos concluir que:

Para a madeira, o modelo de cálculo proposto considera um comportamento do diagrama tensão x deformação elasto-frágil na tração e elasto-plástico na compressão (bi-linear, com declividade negativa na região de plastificação). Para a fibra de vidro é considerado um comportamento elasto-frágil na tração. Foi desenvolvido um programa computacional, incorporando esse modelo teórico, para determinar o valor do momento fletor resistente e da rigidez à flexão.

O programa computacional considera as propriedades geométricas e mecânicas individuais de cada lâmina e do RFV, tais como: espessura, módulo de elasticidade, resistência à compressão e à tração.

Para avaliar o comportamento da madeira na compressão, foram realizados ensaios de compressão paralela às fibras da madeira. Os ensaios foram realizados em corpos-de-prova de pequenas dimensões isentos de defeito, e em peças com dimensão estrutural, todas com madeira de *Pinus*. Observou-se comportamento semelhante para ambos os casos. Tendo em vista os resultados obtidos, recomenda-se utilizar, para o trecho plástico, declividade igual a -0,31 da declividade observada no trecho elástico, do diagrama tensão x deformação.

Foi avaliada a influência da variação da declividade do trecho plástico nos resultados de momento fletor resistente pelo modelo teórico. Conclui-se que essa declividade não tem influência significativa.

A avaliação da delaminação dos adesivos Phenol-resorcinol e Epóxi AR-300 mostrou que os mesmos apresentaram-se eficientes quando submetidos a variação de pressão, umidade e temperatura. Para os corpos-de-prova avaliados a porcentagem de delaminação ficou abaixo dos 10%, dentro do limite recomendado pela norma europeia EN 386 (2001).

Tendo em vista esses resultados, recomenda-se a utilização de adesivo phenol-resorcinol e para a fixação da fibra de vidro unidirecional a madeira, adesivo epóxi AR-300. Entretanto, esta recomendação não significa que outros adesivos possam ser utilizados com o mesmo, ou melhor, desempenho.

O modelo de cálculo proposto apresenta uma boa correlação entre resultados experimentais e teóricos, para as vigas ensaiadas. Na avaliação da rigidez à flexão EI (método da seção transformada), foi observada uma diferença em torno de 5% entre os valores. Para o momento fletor resistente foi obtida uma boa correlação entre os valores experimentais e teóricos, desde que as laminas de madeira solicitadas por tração sejam da classe SS-D e a resistência a tração determinada a partir de corpos-de-prova isentos de defeitos seja multiplicada por 0,64, para considerar a transposição para peça estrutural

e a existência de emenda nas lâminas.

Com relação à resistência das emendas, é possível afirmar que ela é muito influenciada pelos procedimentos adotados na etapa de fabricação, além de outros fatores como classe da madeira, geometria dos dentes etc, devendo ser objeto específico de um estudo futuro.

Uma análise das deformações das vigas avaliadas experimentalmente permite afirmar que para a maioria das vigas avaliadas, as deformações teóricas determinadas pelo modelo de cálculo proposto são próximas das deformações experimentais, comprovando-se a validade das hipóteses adotadas. Tendo em vista os resultados obtidos para a viga de maior altura e maior porcentagem de reforço, pode-se intuir que melhores resultados poderão ser obtidos incorporando-se a deformação por cisalhamento do adesivo na camada de reforço no modelo teórico.

Para as vigas reforçadas, foram observados dois estágios de ruptura. O primeiro, já descrito, iniciando por tração na emenda da lâmina de madeira localizada abaixo da camada de reforço, que é considerado um estado limite último. Após haver um aumento da força aplicada, observa-se um segundo estágio de ruptura, devido a uma combinação de ruptura por compressão, tração e cisalhamento. Também foi observada a ocorrência de esmagamento pronunciado na região comprimida, obtendo-se grandes deslocamentos na proximidade dessa última ruptura, em comparação às vigas de madeira sem reforço. Esse comportamento do elemento estrutural garante uma reserva adicional de segurança, e propicia o anúncio da ruptura por grandes deslocamentos.

10.1 Perspectivas de continuidade

- Avaliação do comportamento estrutural de vigas “T” com mesa de concreto e alma de MLC reforçadas com fibra de vidro;
- Avaliação do comportamento de vigas de MLC reforçadas com fibra de vidro utilizando emenda de topo na última lâmina tracionada;
- Determinação da resistência à tração de emendas dentadas fabricadas com madeira *Pinus Sp*;
- Análise por meio de elementos finitos da resistência e rigidez de vigas de MLC reforçadas com fibra de vidro;
- Incorporação de uma análise semi-probabilística ao modelo determinístico proposto.

11. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN NATIONAL STANDARDS FOR WOOD PRODUCTS. *ANSI/AITC A190.1-9 – Structural Glued Laminated Timber*. Englewood, CO, 1992.

AMERICAN NATIONAL STANDARDS FOR WOOD PRODUCTS. *AITC 117 Manufacturing – 2001. Standard Specifications for Structural Glued Laminated Timber of Softwood Species Manufacturing Requirements*. Englewood, CO, 1992.

AMERICAN PLYWOOD ASSOCIATION *Glulam Product Guide*. Tacoma, Washington, EUA, 2000.

AMERICAN SOCIETY for TESTING and MATERIALS. *ASTM D198-Standard Test Methods of Static Tests of Lumber in Structural Sizes*. Philadelphia, PA, 1997.

AMERICAN SOCIETY for TESTING and MATERIALS. *ASTM D3737-Standard Test Method for Establishing Stresses for Structural Glue Laminated Timber (Glulam)*. Philadelphia, PA, 1996.

AMERICAN SOCIETY for TESTING and MATERIALS. *ASTM D3039-Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*, Philadelphia, PA, 1997.

AMERICAN SOCIETY for TESTING and MATERIALS. *ASTM D245-93. Standard Practice for Establishing Structural Grades and Related Allowable Properties for Visually Graded Lumber*. Philadelphia, PA, 1993.

AMERICAN SOCIETY for TESTING and MATERIALS. *ASTM D2555-96. Standard Test Methods for Establishing Clear Wood Strength Values*. Philadelphia, PA, 1993.

AMERICAN SOCIETY for TESTING and MATERIALS. *ASTM D2559- Adhesives for structural laminated wood products for use under exterior (wet use) exposure conditions*. Philadelphia, PA, 1976.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7190-Projeto de estruturas de madeira*. Rio de Janeiro, 1997.

ASKELAND, D.R. *The Science and Engineering of Materials*. Chapman & Hall, 1988.

BAKOSS, S.; GREENLAND, A.; CREWS, K. Application of advanced fibre reinforced plastic composites to structural timber. In: WORLD CONFERENCE ON TIMBER ENGINEERING, Montreux, Switzerland, 1998. *Anais*. v.2, p.716-717.

- BARRACUDA (2000). Tecidos Prepregs. <http://www.barracudatec.com.br>
- BARTHOLOMEU, A. & GONÇALVES, R. O uso do ultra-som na determinação de constante elástica da madeira. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS, 19. São Paulo, 2000. *Anais*, Cd-rom, arquivo digital.
- BELPERIO, R., GRAD, IE. The performance of glulam beams reinforced with carbon fibre. In: PACIFIC TIMBER ENGINEERING CONFERENCE, New Zeland, 1999. *Anais*. v.2, p.99-106.
- BERGMEISTER, K., LUGGIN, W. Innovative strengthening of timber structures using carbon fibres. In. INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR BRIDGE AND STRUCTURAL ENGINEERING, Malta, 2001. *Anais*. p. 361-366.
- BLASS, H. & GARD, W. Machine strength grading of timber. In: PACIFIC TIMBER ENGINEERING CONFERENCE, Gold Coast Australia, 1994. *Anais*. v.2, p.598-603.
- BUCHANAN, A. H. Bending Strength of Lumber. *Journal of Structural Engineering*, ASCE. 116(5). 1990. p. 1213-1229.
- BUCUR, V. & FEENEY, F. Attenuation of ultrasound in solid wood. *Ultrasonics*, 1992, v. 30, n.2, p.76-81.
- BUI, Q.D., MILLER, H.R., WILLIAMS, J.M. Fibre reinforced finger joints. In: INTERNACIONAL WOOD ENGINEERING CONFERENCE, New Orleans, Louisiana, USA, 1996. *Anais*. v.1, p.427-430.
- CARREIRA, Marcelo Rodrigo. *Critérios para classificação visual de peças estruturais de Pinus sp.* São Carlos, 2002. Exame de Qualificação – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- CARREIRA, Marcelo Rodrigo. *Critérios para classificação visual de peças estruturais de Pinus spp.* São Carlos, 2003. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- CARRASCO, Edgard V. Mantilla. *Resistência, Elasticidade e distribuição de tensões nas vigas retas de madeira laminada colada (MLC)*. São Carlos, 1989. Tese (doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- CHEUNG, A. B.; CALIL Jr. C. ; CARREIRA, M. R. ; MARTINEZ, M. Avaliação da resistência à tração de emendas dentadas em peças de madeira de dimensões estruturais. *Revista Ciência y Tecnología*, Chile, 2002.
- CHUGG, W.A. *Glulam the theory and practice of the manufacture of glued-laminated timber structures*. London, 1964. Ernest Benn, 423p.
- CHRISTIANSEN, A W.; CONNER, A. H. *Wood adhesives. Proceedings of the 1996 symposium sponsored by U.S. Department of Agriculture Forest Service, Forest Products Laboratory and Forest Product Society*. June 29-30. Madison, WI, 1995.
- COIADO, B., DIAS, A. A. *Avaliação da resistência à tração paralela às fibras de peças de madeira de Pinus Sp com dimensões estruturais e classificadas visualmente*. São Carlos, 2004. Relatório (Iniciação científica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

- DAGHER, H.J. FRP- Reinforced Wood in Bridge Applications. In: 1st RILEM SYMPOSIUM TIMBER ENGINEERING, 13-15 september 1999, Stockholm, Sweden, 1999. *Anais*. p.591-598.
- DAGHER, H.J. High – Performance Wood Composites for Construction. In: VII EBRAMEM, São Carlos, 2000. *Anais* Cd-room.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. *DIN 68 140-Wood Finger-Jointing*. Berlin, 1971. Alemanha.
- EMERSON, R. N. et al. Nondestructive evaluation techniques for timber bridges. In: WORLD CONFERENCE ON TIMBER ENGINEERING, Montreux, Switzerland, 1998. *Proceedings*. p. 670-677.
- ERIKSON, R. G. et al. Mechanical grading of lumber sawn from small-diameter lodgepole pine, ponderosa pine and grand fir trees from northern Idaho. *Forest Products Journal*. v. 50, n. 7/8, p.59-65, 2000.
- EUROPEAN STANDARD (EN 391) *Glued Laminated Timber – Delamination test of glue lines*. 1995. 8p.
- EUROPEAN STANDARD (EN 386) *Glued Laminated Timber – Performance requirements and minimum production requirements*. 2001. 16p.
- EUROPEAN STANDARD (prEN 14080) Timber structures - *Glued Laminated Timber – Requirements*. 2003. 35p.
- FIORELLI, Juliano. *Utilização de fibra de carbono e de fibra de vidro para reforço de vigas de madeira*. São Carlos, 2002. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- FOSCHI, R. O.; J.D. BARRETT. Glued laminated beam strength: A model. *Journal of Structural Engineering*, ASCE. 106 (ST8). p. 1735-1754, 1980.
- FREAS, A.D.; M.L. SELBO. Fabrication and Design of Glued laminated Wood Members. *USDA Forest Products Laboratory*. Technical Bulletin. Nº 1069, 1954.
- GABRIEL, M. S. C. *O uso do método das ondas de tensão na qualificação mecânica da madeira serra de Pinus taeda L*. Botucatu, 2000. 75p. Dissertação (Mestrado) – Campus de Botucatu, Universidade Estadual Paulista.
- GALLIGAN, L. W.; MCDONALD, K. A. Machine grading of lumber – Practical concerns for lumber producers. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-7 USDA, *Department of Agriculture, Forest Service*, Madison, 2000. WI.39 p.
- GILFILLAN, J. R. GILBERT, S. G. RUSSELL, D. P. Enhancement of the structural performance of glue laminated, homegrown Stika spruce, using carbonfibre-reinforced polymer. *The Structural Engineering*, v.79, nº8. p. 23-28, 2001.
- GRAEFF, A. Estudo da madeira laminada colada com emendas de topo reforçadas com fibra de vidro. Florianópolis, 1995. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina.
- HENRIQUES DE JESUS, J. M.; CALIL Jr. C. *Estudo do adesivo poliuretano à base de mamona em madeira laminada colada (MLC)*. São Carlos, 2000. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

- HERNANDEZ R. (1991). *Simulation Modeling and analysis of glued-laminated timber beams*. Master Thesis - Texas A&M University.
- HERNANDEZ, R. *Analisis of Strain in Finger-Jointed Lumber*. In: 5th WORLD CONFERENCE ON TIMBER ENGINEERING, Montreux, Switzerland, 1998.
- HERNANDEZ, R.. Comunicação pessoal. São Carlos, Brasil, 2002. LaMEM, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- HULL, D. *An introduction to composite materials*. Cambridge University, 1995.
- INTERNATIONAL CONFERENCE OF BUILDING OFFICIALS (ICBO). Fiber-Reinforced Plastic (FIRP) Reinforced Glued-Laminated Beams. Report ER-5100. ICBO Evaluation Service, Inc. Whittier, CA, 1995.
- JANG, B.Z. *Advanced Polymer Composites*. ASTM International, 1994.
- JAYNE, B. A. Vibrational properties of wood as indices of quality. *Forest Products Journal*, v. 9, n. 11, 1959. p. 413-416.
- LAHR, F. A. R. *Contribuição ao estudo de vigas retas de madeira laminada colada*. São Carlos, 1991. Relatório de atividades, 35p. LaMEM – EESC- USP.
- LINDYBERG, R. F. *ReLAM: A nonlinear, probabilistic model for the analysis of reinforced glulam beams in bending*. Maine-USA, 2000. Tese (Doutorado) - University of Maine.
- MACEDO, A. N. *Estudo de emendas dentadas em madeira laminada colada (MLC): avaliação de método de ensaio*. São Carlos, 1996. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- MACEDO, A. N. *Fadiga em emendas dentadas em madeira laminada colada*. São Carlos, 2000. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- MADESEN, B. Research on design of structural glued-laminated material. *Forest Products Journal*, Madison, Wisconsin, 1962. 497-502, out.
- MATTHEWS. F.L. RAWLINGS, R.D. *Composite materials: engineering and science*. London, 1996.
- MELO, J. E. *Classificação mecânica de peças estruturais de madeira*. São Carlos, 1984. Dissertação (mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- MOODY, R. C. Improved Utilization of Lumber in Glued Laminated Beams. *Research paper FPL 292, Forest Products Laboratory*, Madison, WI, 1977.
- NORRIS, T.; SAADATMANESH, H. Improving the Serviceability of Concrete Beams Using Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP). Sheets, FHA, 1994. Grant No. DDEGRF-93-P-05.
- OLIVEIRA, F. G. R. & SALES, A. Caracterização de propriedades físicas de dicotiledôneas nativas por meio de técnicas de ultra-som. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 14. São Pedro, 2000. *Anais*. Cd-room, arquivo digital.

OLIVEIRA, F. G. R.; SALES, A. *Estudo de propriedades mecânicas de dicotiledôneas por meio de ensaios não destrutivos utilizando equipamento de ultra-som*. São Carlos, 2001. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

PELLERIN, R. F. A vibrational approach to nondestructive testing of structural lumber. *Forest Products Journal*. v. 15, n. 3, 1965. p. 93-101.

PELLERIN, R. F. (1969). Nondestructive testing of timber at Washington State University. In: SYMPOSIUM ON NONDESTRUCTIVE TESTING OF CONCRETE AND TIMBER, London, 1969. p. 85-90.

PUCCINI, C.T. & GONÇALVES, R. Uso do ultra-som na avaliação da qualidade da madeira. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS, 19. São Paulo, 2000. *Anais*, Cd-room, arquivo digital.

PUCCINI, C. T.; BALLARIN, A. W.; GONÇALVES, R. Dispersão de ondas de ultra-som em peças de madeira serrada de pinho do paran em funo do comprimento. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENSAIOS NO-DESTRUTIVOS, 20. So Paulo, 2001. *Anais*, Cd-room, arquivo digital.

ROMANI, M. BLAB, H. J. Design model for FRP Reinforced Glulam Beams. In. INTERNATIONAL COUNCIL FOR RESEARCH AND INNOVATION IN BUILDING AND CONSTRUCTION, Venice, Italy, 2001.

SOUTHERN PINE INSPECTION BUREAU (1994). *Standard Grading Rules for Southern Pine Lumber*. Pensacola, Fla.

STAMATO, G. C. *Resistncia ao embutimento da madeira compensada*. So Carlos, 1997. Exame de qualificao – Escola de Engenharia de So Carlos, Universidade de So Paulo.

SZUCS, C.A.¹. Madeira laminada colada reforada com fibra de vidro na direo transversal as suas fibras. In. ENCONTRO BRASILEIRO DE MADEIRA E DE ESTRUTURAS DE MADEIRA, So Carlos, 1992. *Anais*.

SZUCS, C.A.². *Aplicao estrutural da madeira sob a tcnica do laminado colado*. Florianpolis, 1992. Notas de aula - Universidade Federal de Santa Catarina.

TINGLEY, D., CEGELKA, S. High-Strength-Fiber-Reinforced-Plastic Reinforced Wood. In: INTERNACIONAL WOOD ENGINEERING CONFERENCE, New Orleans, Louisiana, USA, 1996. *Anais*. v.3, p.57-64.

TINGLEY, D., KENT, S. Structural Evaluation of fiber reinforced hollow wood beams. In. INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR BRIDGE AND STRUCTURAL ENGINEERING, Malta, 2001. *Anais*. p. 367-372.

TRIANTAFILLOU, T. and DESKOVIC, N. Prestressed FRP sheets as external reinforcement of wood members. *Journal of Structural Engineering*, (1992) ASCE, 118 (5), 1270-1284.

TIMOSHENKO, S. et al. *Vibration problems in engineering*. 4 ed. New York, 1974.

WANG, X. et al. Nondestructive evaluation os standig trees with stress wave methods. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NONDESTRUCTIVE TESTING OF WOOD, Sopron, 2000. *Procedings*. p. 197-206.

ZANGIÁCOMO A. L. *Emprego de espécies tropicais alternativas na produção de elementos estruturais de Madeira Laminada Colada*. São Carlos, 2003. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo.