

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA FLORESTAL**

**CARACTERÍSTICAS FÍSICO-MECÂNICAS
DE PAINÉIS DE LÂMINAS PARALELAS
REFORÇADOS COM FIBRA DE VIDRO**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Ediane Andréia Buligon

Santa Maria, RS, Brasil

2011

**CARACTERÍSTICAS FÍSICO-MECÂNICAS
DE PAINÉIS DE LÂMINAS PARALELAS REFORÇADOS
COM FIBRA DE VIDRO**

Ediane Andréia Buligon

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Área de Concentração em Tecnologia de Produtos Florestais, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Florestal.**

Orientador: Prof. Clovis Roberto Haselein

**Santa Maria, RS, Brasil
2011**

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Ciências Rurais
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal**


A comissão examinadora, abaixo assinada,
aprova a Dissertação de Mestrado

**CARACTERÍSTICAS FÍSICO-MECÂNICAS DE PAINÉIS DE
LÂMINAS PARALELAS REFORÇADOS COM FIBRA DE VIDRO**

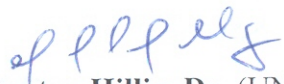
elaborada por
Ediane Andréia Buligon

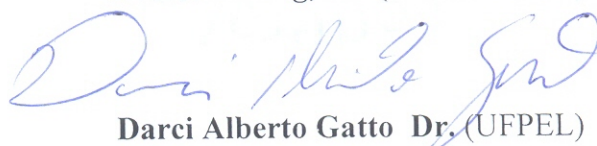
como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Florestal

COMISSÃO EXAMINADORA:


Clovis Roberto Haselein, Dr.
(Presidente/Orientador)


Merielen de Carvalho Lopes, Dr^a. (UFPEL)


Éverton Hillig, Dr. (UNICENTRO)


Darci Alberto Gatto Dr. (UFPEL)

Santa Maria, 18 de julho de 2011.

B933c Buligon, Ediane Andréia
 Características físico-mecânicas de painéis de lâminas paralelas reforçados
 com fibra de vidro / por Ediane Andréia Buligon. – 2011.
 96 f. ; il. ; 30 cm

 Orientador: Clóvis Roberto Haselein
 Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciên-
 cias Rurais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, RS, 2011

 1. Engenharia florestal 2. LVL 3. Fibra de vidro 4. Resina Epóxi 5. Resina
 isofáltica I. Haselein, Clóvis Roberto II. Título.

 CDU 630.8

Ficha catalográfica elaborada por Cláudia Terezinha Branco Gallotti – CRB 10/1109
Biblioteca Central UFSM

©2011

Todos os direitos autorais reservados a Ediane Andréia Buligon. A reprodução de partes ou do
todo deste trabalho só poderá ser feita com autorização por escrito do autor.

Endereço: Avenida Roraima, nº 1000, prédio 44, sala 5006. Santa Maria, RS, Brasil, CEP:
97105-900;

Endereço Eletrônico: eabuligon@hotmail.com

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal (PPGEF) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) pela oportunidade e ao CNPQ pela concessão da bolsa de estudos.

Ao meu orientador, Professor Clovis Roberto Haselein, pela oportunidade, pelos conhecimentos transmitidos, pelo apoio, pela amizade e principalmente pela paciência.

Ao professor Élio José Santini pela coorientação e constante disponibilidade.

Aos professores Rômulo Trevisan (CESNORS), Daniela Lilge (UNIPAMPA), Darci Gatto (UFPEL) e Marcos Müller (UFPEL) pela disponibilidade, ajuda e apoio.

À FEPAGRO-Florestas de Santa Maria e à Hexion Química Indústria e Comércio Ltda, pela disponibilização do material essencial para o desenvolvimento desta pesquisa.

Aos funcionários da FEPAGRO – Florestas de Santa Maria, em especial, Roberto, Plínio, Vanderlei e Pedro que, por duas vezes, disponibilizaram-se em ajudar na confecção do material utilizado na pesquisa.

À Cerlene Machado (Tita) secretária do PPGEF da UFSM que sempre esteve disponível para ajudar.

Aos funcionários do Laboratório de Produtos Florestais (LPF) Fabiana Ratzlaff, Tarso Michelotti e Nelson Castro, que, por duas vezes, auxiliaram no desenvolvimento desta pesquisa.

Aos colegas do mestrado Renata, Magnos, Helton, Wesley (Mineiro), Felipe, Joel, Rosana, Leandro, Eduardo e Rafael (Brow) pela ajuda, pela troca de conhecimento e pela amizade. Aos demais colegas de laboratório Rafael e Douglas, pelo auxílio e amizade. À Bibiana e ao Fernando, pela ajuda prestada no desenvolvimento deste trabalho.

À Renata Rauber novamente, pela ajuda constante durante todo o período do mestrado, pela amizade sincera e pelo apoio incondicional.

Aos amigos e aos familiares pela amizade e cumplicidade.

Aos meus irmãos Leandro, Eliane e Lidiane, pela amizade e companheirismo. Em especial à Lidiane, pelo auxílio e incansável apoio durante todas as fases do mestrado.

E meu eterno muito obrigado aos meus pais, Alamir e Marlene, pelo amor incondicional, pelo incentivo e pelo apoio em todas as decisões.

Agradeço.

...tente outra coisa
tente ver as coisas
de um modo diferente
por cima do muro
por baixo dos panos
tente outra vez
o que você já fez
de um modo diferente...

(Humberto Gessinger)

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal
Universidade Federal de Santa Maria

CARACTERÍSTICAS FÍSICO-MECÂNICAS DE PAINÉIS DE LÂMINAS PARALELAS REFORÇADOS COM FIBRA DE VIDRO

AUTORA: EDIANE ANDRÉIA BULIGON
ORIENTADOR: PROF. CLOVIS ROBERTO HASELEIN
Data e Local da Defesa: Santa Maria, 18 de julho de 2011.

O objetivo desta pesquisa foi avaliar as propriedades físico-mecânicas de painéis de lâminas paralelas (LVL) reforçadas com camadas de fibra de vidro impregnadas com dois tipos de matrizes. Lâminas de madeira de *Pinus elliottii* com espessura de 1,5 mm foram utilizadas na fabricação dos painéis. A montagem dos painéis foi realizada em duas etapas. A primeira consistiu na fabricação dos painéis LVL com nove camadas de lâminas de madeira unidas com resina à base de fenol-formaldeído na gramatura de 190 g/m² em linha simples. E a segunda etapa consistiu na aplicação do reforço de fibra de vidro impregnado com resinas epóxi (E) ou poliéster isoftálica com NPG (I). Os tratamentos utilizados foram: painéis sem reforços (T), painéis com uma camada de fibra de vidro (E – T1 e I – T1), painéis com duas camadas de fibra de vidro, sendo uma camada no lado de compressão e uma camada no lado de tração (E – T2 e I – T2) e painéis com quatro camadas de fibra de vidro, duas camadas do lado de compressão e duas camadas no lado de tração separados por uma lâmina de madeira (E – T3 e I – T3). Foram realizadas três repetições por tratamento, totalizando 21 painéis. As dimensões finais dos painéis foram 45 cm x 34 cm x 1,08 cm. Para determinar a qualidade dos painéis LVL foram avaliadas as propriedades físicas (massa específica e teor de umidade) e a resistência mecânica (flexão estática na posição *flatwise* e *edgewise*, resistência ao cisalhamento, dureza Janka e teste não destrutivo utilizando ultrassom). A resina epóxi e a resina isoftálica apresentaram as mesmas qualidades mecânicas nos diferentes tratamentos. A aplicação do reforço influenciou na resistência e na rigidez do painel. Na flexão estática na posição *flatwise* o módulo de elasticidade (MOE) foi influenciado por uma camada de reforço e o módulo de ruptura (MOR) por duas camadas de reforço. Na posição *edgewise* os valores de MOE e do MOR se mantiveram estáveis com a aplicação de duas camadas de reforços de fibra de vidro. O MOE pelo método ultrassônico apresentou valores maiores quando comparado com o método estático; em ambos os métodos os valores mantiveram-se estáveis com a aplicação de duas camadas de reforço. A dureza Janka foi maior para as painéis com mais camadas de fibra de vidro na posição de tração e compressão. A resina epóxi apresentou maior resistência ao cisalhamento e maior percentual de falhas na madeira, enquanto que a resina isoftálica, apesar de apresentar valores de resistência similares à fenólica, não apresentou boa adesão à madeira, representada pelo baixo percentual de falhas na madeira. A aplicação de uma camada de reforço de fibra de vidro com resina epóxi na posição de tração seria o suficiente para melhorar as qualidades mecânicas dos painéis LVL fabricados com lâminas de madeira de pinus unidas com fenol-formaldeído.

Palavras-chave: LVL. Fibra de vidro. Resina epóxi. Resina isoftálica.

ABSTRACT

Master's Thesis

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal
Universidade Federal de Santa Maria

PHYSICAL AND MECHANICAL CHARACTERISTICS OF LAMINATED VENEER LUMBER REINFORCED WITH FIBERGLASS

AUTHOR: EDIANE ANDRÉIA BULIGON

ADVISER: PROF. CLOVIS ROBERTO HASELEIN

Defense data and place: Santa Maria, July 18th 2011.

The aim of the present research was to evaluate the physical and mechanical properties of LVL reinforced with fiberglass with two types of resins. *Pinus elliottii* veneers with 1,5 mm thickness were used to manufacture of the LVL panels. The panels were manufactured in two steps. The first one was the assembling of the LVL panels with nine layers of wood veneer glued with phenol-formaldehyde resin. The second step consisted into reinforcing the LVL with fiberglass impregnated with epoxy resin (E) or isophthalic resin (I). The treatments were: panels without reinforcement (T), panels reinforced with one fiberglass layer (E – T1 e I – T1), panels reinforced with two fiberglass layers (E – T2 e I – T2) and panels reinforced with four fiberglass layers (E – T3 e I – T3). The size of panel was 45 cm x 34 cm x 1,08 cm. The physical properties tested were density and moisture content. The mechanical properties tested were: static bending in flatwise and edgewise position, modulus of elasticity (MOE) and modulus of rupture (MOR); glueline shear strength by compression loading; hardness test; and non-destructive test by ultrasound method. The epoxy and the isophthalic resin showed similar mechanical performance among the different treatments. The resistance and stiffness of the panels were influenced by the reinforcement. The MOE in flatwise position was influenced by one reinforcement layer and the MOR was influenced by two reinforcement layers. In the edgewise position the MOE and the MOR values remained constant among the treatments with two fiberglass reinforcement layers. The MOE in non-destructive test had higher values when compared with the destructive method, however these values remained stable with two layers of reinforcement. Two layers of reinforcement on the tensile and compression side had higher values in hardness test. The epoxy resin presented higher glueline resistance and higher percentage of wood failure. Isophthalic and phenolic resin presented similar values of glueline strength, however the isophthalic resin had lower percentage of wood failure. Thus, the reinforcement with one layer of fiberglass impregnated with epoxy resin on the tensile side would be enough to promote the mechanical qualities of LVL.

Keywords: LVL. Fiberglass. Epoxy resin. Isophthalic resin. Wood veneer.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Processo de laminação da madeira. Abate da árvore (a), descascamento (b) e desenrolamento (c).	23
Figura 2 – Embalagem de manta de fibra de vidro com gramatura de 300 g/m ²	26
Figura 3 – Fibra de vidro na forma de manta de fibras contínuas (a); dimensionamento das placas de fibra de vidro (b).	27
Figura 4 – Preparo da resina fenólica. Componentes para obtenção da resina (a); mistura dos componentes (b); resina fenol-formaldeído pronta para uso (c).	28
Figura 5 – Resinas para impregnação da fibra de vidro. Resina epóxi com endurecedor (a); resina isoftálica com NPG com catalizador e acelerador (b).	29
Figura 6 – Montagem dos painéis LVL. Pesagem da resina, 190 g/m ² (a); aplicação da resina sobre a lâmina de madeira (b).	31
Figura 7 – Impregnação da fibra de vidro com resina isoftálica. Aplicação da resina sobre a fibra de vidro (a); fibra de vidro impregnada com a resina (b); prensagem dos painéis reforçados com fibra de vidro (c); painel após a prensagem (d).	32
Figura 8 – Modelo para a marcação dos painéis LVL para posterior corte.	33
Figura 9 – Aparelho de ultrassom. Transdutores de ponto seco (a); transdutores de face plana (b).	35
Figura 10 – Teste de flexão estática na posição <i>flatwise</i> . Ensaio com painéis LVL (a); ensaio com painéis de compósito (b).	37
Figura 11 – Posicionamento do corpo de prova no ensaio de flexão estática na posição <i>edgewise</i>	38
Figura 12 – Posicionamento do corpo de prova no teste de dureza Janka.	39
Figura 13 – Teste de cisalhamento a seco na linha de cola de fibra de vidro e resina epóxi (FV + E).	40
Figura 14 – Desenho ilustrativo dos tratamentos testemunhas (T0 e T) e dos painéis com uma, duas e quatro camadas de reforço de fibra de vidro (T1, T2 e T3).	44
Figura 15 – Dispersão dos dados de ME _b das 207 lâminas de <i>Pinus elliotti</i>	46
Figura 16 – Intervalo de confiança para as médias da ME _b dos diferentes tratamentos.	53
Figura 17 – ME _b das lâminas, dos painéis LVL após prensagem, nominal e real.	55
Figura 18 – Intervalo de confiança para as médias do MOE dos compósitos e dos painéis LVL.	57
Figura 19 – MOE em função da ME _b dos painéis LVL reforçados com fibra de vidro com resina epóxi e com resina isoftálica na posição <i>flatwise</i>	58
Figura 20 – MOE em função da ME _b para os sete tratamentos em estudo na posição <i>flatwise</i>	59
Figura 21 – Intervalo de confiança para as médias do MOR na posição <i>flatwise</i>	61
Figura 22 – MOR em função da ME _b dos painéis LVL reforçados com fibra de vidro com resina epóxi e com resina isoftálica na posição <i>flatwise</i>	63
Figura 23 – MOR em função da ME _b para os sete tratamentos em estudo na posição <i>flatwise</i>	64
Figura 24 – MOR em função do MOE para os sete tratamentos em estudo na posição <i>flatwise</i>	65
Figura 25 – Intervalo de confiança dos valores médios do MOE dos painéis LVL na posição <i>edgewise</i>	66

Figura 26 – Dispersão dos valores de MOE em função da MEb dos painéis LVL reforçados com fibra de vidro com resina epóxi e com resina isoftálica testados na posição <i>edgewise</i>	68
Figura 27 – MOE em função da MEb para os sete tratamentos em estudo na posição <i>edgewise</i>	69
Figura 28 – Intervalo de confiança para os valores médios do MOR para cada tratamento em estudo na posição <i>edgewise</i>	70
Figura 29 – MOR em função da MEb dos painéis LVL reforçados com fibra de vidro com resina epóxi e com resina isoftálica na posição <i>edgewise</i>	71
Figura 30 – MOE em função MEb para os sete tratamentos em estudo testados na posição <i>edgewise</i>	72
Figura 31 – MOR em função do MOE para a posição <i>edgewise</i>	72
Figura 32 – Superfície do painel impregnado com resina. Resina isoftálica (a); Resina epóxi (b).	76
Figura 33 – MOEs em função do MOEp dos painéis LVL reforçados com fibra de vidro e resina epóxi, e resina isoftálica.	77
Figura 34 – MOE em função do MOEp para os sete tratamentos em estudo.	79
Figura 35 – MOE em função do MOEs para os sete tratamentos em estudo.	79
Figura 36 – Intervalo de confiança entre as médias de dureza Janka.	81
Figura 37 – Intervalo de confiança entre as médias de dureza Janka.	84
Figura 38 – Corpos de prova após o teste de cisalhamento a seco. Tratamento FV + E (a); tratamento FV + I (b); tratamento FF (c).	84
Figura 39 – Percentual de falha na madeira para o teste de cisalhamento na linha de cola após fervura.	86
Figura 40 – Comparação da tensão de ruptura nos testes a seco e após fervura e decréscimo dos valores de resistência com a após fervura.	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Ensaio com as correspondentes normas e dimensões dos corpos de prova.	42
Tabela 2 – Tratamentos avaliados na presente pesquisa.	44
Tabela 3 – ME_b das lâminas de madeira de <i>Pinus elliotti</i>	47
Tabela 4 – Distribuição da frequência das lâminas de madeira da Classe A por faixa ME_b	47
Tabela 5 – Distribuição da frequência das lâminas de madeira da Classe B por faixa ME_b	48
Tabela 6 – Distribuição da frequência das lâminas de madeira da Classe C por faixa ME_b	48
Tabela 7 – Valores de ME_b , coeficiente de variação e comparação das médias das Classes A, B e C.	49
Tabela 8 – ME_b de cada lâmina nos diferentes tratamentos e a média da ME_b do painel.	49
Tabela 9 – TUE dos painéis LVL dos diferentes tratamentos.	51
Tabela 10 – Valores de ME_b , desvio padrão e comparação das médias entre os tratamentos.	52
Tabela 11 – Valores médios do peso e ME_b dos painéis antes e após a prensagem (nominal e real).	54
Tabela 12 – Comparação percentual entre a ME_b nominal e a ME_b real.	55
Tabela 13 – Valores máximo, médio e mínimo do MOE, coeficiente de variação e comparação das médias dos tratamentos.	56
Tabela 14 – Valores máximo, médio e mínimo do MOR, coeficiente de variação e comparação das médias dos tratamentos.	60
Tabela 15 – Valores máximo, médio e mínimo do MOE, coeficiente de variação e comparação das médias dos tratamentos.	66
Tabela 16 – Valores máximo, médio e mínimo do MOR, coeficiente de variação e comparação das médias dos tratamentos.	70
Tabela 17 – Valores médios, diferença entre os valores médios e percentual da diferença do MOE e do MOR nas posições de ensaio <i>flatwise</i> e <i>edgewise</i>	73
Tabela 18 – Valores da ME_b , velocidade ultrassônica, MOE dinâmico pelo ponto seco e face plana, teste de média e coeficiente de variação.	75
Tabela 19 – Valores do MOE estático e do MOE dinâmico do ponto seco e da face plana, teste de média e coeficiente de variação.	78
Tabela 20 – Valores máximo, médio e mínimo da dureza Janka, coeficiente de variação e comparação das médias dos tratamentos.	80
Tabela 21 – Tensão de ruptura na linha de cola e falha na madeira – teste a seco.	82
Tabela 22 – Tensão de ruptura na linha de cola e falha na madeira – teste após fervura.	85

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1 Painel de Lâminas Paralelas - LVL	13
2.2 Lâminas de madeira	15
2.3 Fibra de vidro	16
2.4 Matrizes poliméricas ou resinas	18
2.4.1 Resina Fenólica	19
2.4.2 Resina poliéster isoftálica insaturada com NPG (Neopentilglicol).....	20
2.4.3 Resina epóxi	21
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	23
3.1 Espécie laminada e laminação da madeira	23
3.1.1 Classificação e seleção das lâminas de madeira	24
3.2 Fibra de vidro	26
3.3 Resinas	27
3.3.1 Etapa 1 – Colagem das lâminas de madeira.....	27
3.3.2 Etapa 2 – Colagem dos painéis LVL com reforço de fibra de vidro	29
3.4 Montagem dos painéis LVL.....	30
3.4.1 Etapa 1 – Confecção dos painéis LVL.....	30
3.4.2 Etapa 2 – Aplicação dos reforços de fibra de vidro nos painéis LVL.....	31
3.5 Confecção dos corpos de prova	33
3.6 Propriedades físico-mecânicas	34
3.6.1 Teor de umidade e massa específica básica das lâminas e dos painéis LVL.....	34
3.6.2 Teste não destrutivo - Ultrassônico.....	34
3.6.3 Flexão estática na posição <i>flatwise</i>	36
3.6.4 Flexão estática na posição <i>edgewise</i>	38
3.6.5 Dureza Janka	39
3.6.6 Cisalhamento.....	40
3.6.6.1 Cisalhamento na linha de cola a seco	41
3.6.6.2 Cisalhamento na linha de cola após fervura	41
3.7 Resumo das normas utilizadas nos ensaios	42
3.8 Delineamento experimental	43
3.9 Análise estatística	45
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	46
4.1 Classificação e propriedades das lâminas de madeira	46
4.1.1 Teor de umidade de equilíbrio (TU_e) e massa específica básica dos painéis LVL.....	51
4.1.2 Comparação da ME_b antes e após a prensagem	53
4.2 Flexão estática na posição <i>flatwise</i>	56
4.2.1 Módulo de elasticidade (MOE).....	56
4.2.2 MOE em função da ME_b na posição <i>flatwise</i>	58
4.2.3 Módulo de ruptura (MOR)	60

4.2.4 MOR em função da ME_b na posição <i>flatwise</i>	62
4.2.5 Relação do MOR com o MOE na posição <i>flatwise</i>	64
4.3 Flexão estática na posição <i>edgewise</i>	65
4.3.1 Módulo de elasticidade (MOE).....	65
4.3.2 MOE em função da ME_b na posição <i>edgewise</i>	67
4.3.3 Módulo de ruptura (MOR)	69
4.3.4 MOR em função da ME_b na posição <i>edgewise</i>	71
4.3.5 Relação do MOR em função do MOE para a posição <i>edgewise</i>	72
4.4 Comparação do MOE e MOR nas posições de ensaio <i>flatwise</i> e <i>edgewise</i>	73
4.5 MOE pelo método dinâmico - Ultrassom	75
4.5.1 Relação entre MOE estático x MOE dinâmico	78
4.6 Dureza Janka dos painéis LVL	80
4.7 Cisalhamento na linha de cola.....	82
4.7.1 Teste a seco	82
4.7.2 Teste após fervura	85
CONCLUSÕES.....	89
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	90

1 INTRODUÇÃO

A obtenção da matéria-prima para móveis e para construção civil à base de madeira está inserida no contexto de busca de inovações tecnológicas para o aproveitamento e melhoramento das propriedades da madeira e para a utilização de matérias-primas alternativas. Além disso, otimizar tempo de produção, minimizar esforços, criar produtos alternativos e economizar em fontes de energia são metas traçadas pelas empresas que se destacam na concorrência no setor madeireiro.

Um exemplo de madeira alternativa utilizada para diversos usos é a madeira de pinus, cuja produção se tornou viável em todo o Brasil, constituindo uma importante fonte de madeira para usos gerais, englobando fabricação de celulose e papel, lâminas e painéis de diversos tipos, madeira serrada para fins estruturais, confecção de embalagens, móveis e marcenaria em geral (GRIGOLLETI JÚNIOR, 2005).

Na construção civil nacional a madeira de pinus ainda é vista com preconceito, devido às suas características tecnológicas, massa específica e uniformidade do lenho, inferiores às outras madeiras encontradas no mercado nacional.

No entanto, uma alternativa para corrigir essa heterogeneidade do lenho é a transformação da madeira em lâminas e sua posterior colagem, originando painéis. De acordo com o tamanho, forma e orientação das lâminas, e também dos tipos de adesivos utilizados, os painéis podem receber diferentes denominações e usos, como exemplo, o *Laminated Veneer Lumber* (LVL), conhecido nacionalmente como painel de lâminas paralelas (PLP).

O LVL não é produzido no Brasil, talvez por receio das indústrias de investir em algo novo que não dê o retorno desejado no mercado interno, e como material de exportação requer muitos investimentos. Porém, nos Estados Unidos e na Europa, o LVL ganhou escala comercial a partir da segunda guerra mundial, e hoje estruturas de casas e muitos móveis são fabricados a partir deste painel.

O LVL também despertou interesse na pesquisa e vem sendo investigado por décadas na busca de se aumentar suas propriedades tecnológicas, a fim de ampliar as opções de utilização e durabilidade deste material. Algumas pesquisas estão direcionadas à aplicação de reforços no LVL com o objetivo de aumentar suas propriedades, ou como alternativa para substituir madeiras de alta qualidade por madeiras de menor qualidade.

A aplicação da fibra de vidro com resina sobre painéis de LVL é considerada tecnologicamente viável. A fibra de vidro, de forma geral, pode ocasionar um significativo aumento

da resistência e da rigidez dos painéis de madeira, baixo aumento do peso próprio do material e facilidade de manuseio.

Diante disso, o presente trabalho teve como objetivo geral avaliar as propriedades físico-mecânicas dos painéis de lâminas paralelas reforçados com camadas de fibra de vidro impregnadas por dois tipos de resina, epóxi e isoftálica.

Os objetivos específicos foram:

- Classificar as lâminas de madeira de acordo com a massa específica.
- Avaliar a massa específica dos painéis nos diferentes tratamentos.
- Analisar o módulo de elasticidade e o módulo de ruptura a partir do teste de flexão estática na posição *flatwise* e na posição *edgewise*.
- Comparar o módulo de elasticidade dinâmico com o módulo de elasticidade estático.
- Analisar nos painéis LVL, nos diferentes tratamentos, a dureza Janka.
- Avaliar o cisalhamento na linha de cola utilizando-se fenol-formaldeído, fibra de vidro impregnadas com resina epóxi ou com resina isoftálica.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Painel de Lâminas Paralelas - LVL

Laminated Veneer Lumber (LVL) é um produto a base de madeira em forma de painel, composto de lâminas de madeira coladas todas na mesma direção. É traduzido para o português como Painel de Lâminas Paralelas (PLP), mas por ser pouco usado ou até mesmo desconhecido em comparação com o termo LVL, este último será preferencialmente utilizado neste trabalho.

O LVL integra o grupo dos compostos estruturais de madeira junto com o PSL (*Parallel Strand Lumber*) e o LSL (*Laminated Strand Lumber*). Os produtos de madeira são ainda divididos em painéis estruturais, que incluem os compensados e painéis de partículas orientadas (OSB – *Oriented Strand Board*), em painéis não estruturais como o MDF (*Medium Density Fiberboard*) e as chapas de partículas. Sem um grupo definido, ainda é possível encontrar-se a madeira laminada colada (MLC ou Glulam) e as vigas estruturais com perfil *I-joists*.

Müller (2009) descreve o LVL como um material manufaturado com lâminas de madeira com pequena espessura, obtidas pelo corte em tornos desenroladores ou faqueadeiras, sobrepostas e coladas com adesivo estrutural, seguindo o mesmo alinhamento da grã. O autor comenta que o LVL é o produto engenheirado que mais conserva as propriedades naturais da madeira, apresentando a vantagem de ser um produto mais uniforme, devido à maior dispersão dos defeitos naturais, como os nós e rachaduras, nas finas lâminas que o constituem.

Os painéis LVL se dividem em duas categorias distintas, LVL estrutural (vigas) e LVL não estrutural (painéis), de acordo com as características técnicas, o adesivo utilizado e a aparência do produto.

O LVL estrutural é um produto sofisticado e com características técnicas superiores às da madeira comum quanto à qualidade, estabilidade, flexibilidade de medidas e retidão. Estas características fazem do LVL uma alternativa viável quando comparado a outros componentes estruturais de madeira serrada convencional, sendo seu principal uso em aplicações de largas dimensões e longos períodos, também para confecção de paredes, estruturas de telhados, pontes e bordas de vigas (GABRIEL, 2007; SANTOS, 2008).

Maloney (1996) comenta que os LVLs produzidos nos Estados Unidos são fabricados em maior escala para aplicações estruturais e em menor escala, são produzidos LVLs para a utilização em estruturas de portas, janelas e na fabricação de móveis.

O LVL não estrutural ou de instalação móvel, é um produto indicado para usos em que as características estéticas são de interesse, não sendo recomendada sua aplicação onde se exige desempenho estrutural. Normalmente, estes painéis são utilizados em aplicações que precisam de superfícies de qualidade, uniformes e de fácil trabalhabilidade como, por exemplo, batentes de portas e janelas, corrimãos, degraus de escadas, pisos, tampos de mesa, estruturas de móveis em geral (GABRIEL, 2007; SANTOS, 2008).

Em relação à fabricação de móveis com LVL, Eckelmam (1993) descreve que o mesmo pode ser usado para a produção de peças ou para a confecção do móvel inteiro, o autor cita como exemplos a fabricação de mesas, estrutura de sofá, cadeiras, armários de cozinha, estantes, prateleiras e camas.

O método de fabricação do LVL estrutural permite o uso de lâminas de qualidade inferior (menor resistência) nas zonas de menor solicitação e lâminas de melhor qualidade nas zonas de alta solicitação (maiores esforços), aumentando, assim, a qualidade da matéria-prima.

Na fabricação de LVL estrutural utilizam-se até cinco tipos de qualidade de lâminas na montagem. Outra forma de agregar qualidade ao produto consiste no uso da técnica da mistura de lâminas, com o objetivo de dispersar uniformemente as lâminas de menor qualidade entre as demais lâminas que farão parte da composição do painel. Além disso, o processo permite ainda a utilização de combinações de espécies distintas, sem interferir a integridade estrutural da peça (GABRIEL, 2007; MÜLLER, 2009).

Uma das vantagens do LVL frente à madeira maciça é sua maior resistência, pois a estrutura reconstituída dos painéis torna-os mais estáveis. O processo de classificação das lâminas pode conferir propriedades de resistência mais seguras e precisas. A flexibilidade dimensional é outra vantagem, assim os painéis podem ser produzidos com qualquer largura e comprimento, podendo ser produzidos com formas curvilíneas. A utilização de grande variedade de espécies e tamanhos de toras, é uma outra grande vantagem diante da madeira maciça (LVL, 2009).

Eckelman (1993) comenta que o LVL, além de apresentar características únicas, agrega as propriedades tanto de madeira sólida como de painéis compensados e de partículas. Segundo o autor, o LVL, enquanto matéria-prima para móveis, deve ser usado quando a estética do móvel for requerida, e quando há exigência de resistência à flexão, ao cisalhamento e à

rigidez das partes estruturais. Também, quando há interesse de obter superfícies planas, pois o LVL tem como característica a estabilidade dimensional.

O LVL pode receber tratamento com os mesmos preservativos utilizados para madeira sólida. Ritter et al. (1996) comentam que os preservativos penetram mais facilmente em todo o material devido à fina espessura das lâminas.

O Brasil ainda não apresenta mercado interno para o LVL, se comparado aos Estados Unidos, em que o LVL, juntamente com o LSL, representa 35% do material usado na construção civil (BIS, 2011). Mattos et al. (2008) comentam que mesmo para os painéis com histórico de fabricação nacional, como o MDF, fabricado desde 1997 e o OSB, desde 2001, o mercado de painéis no Brasil ainda não pode ser considerado maduro.

2.2 Lâminas de madeira

As lâminas de madeira produzidas no Brasil são destinadas, na sua grande maioria, à produção de compensados. Segundo Iwakiri et al. (2002), esta produção estava baseada na utilização de madeiras tropicais, oriundas da Região Amazônica. Mas, os reflorestamentos de pinus e de eucalipto localizados na Região Sul do país e os altos custos de transporte levaram os fabricantes de compensados, localizados na região Sudeste e Sul, a reduzirem a participação de lâminas originárias da Região Norte. Dessa forma, a madeira de pinus passou a ocupar um espaço bastante representativo na indústria de compensados, ainda que existam limitações de qualidade nas lâminas de capa, que continuam sendo trazidas do norte do País.

Iwakiri et al. (2000) comentam que espécies como *Eucalyptus* spp. e *Pinus* spp. apresentam grande potencial para suprir a demanda por madeiras de boa qualidade para laminação, em função das suas características físico-mecânicas, por serem espécies de rápido crescimento e também devido à disponibilidade de grandes áreas plantadas no Brasil. Os autores informam que as lâminas de pinus já estão sendo utilizadas pelas indústrias de laminação desde o início da década de 90.

A seleção das espécies de madeira, segundo Haselein e Pauleski (2003), é realizada com base no uso final que será dado às lâminas, entre os principais usos estão: a produção de chapas e vigas laminadas destinadas à construção civil, painéis decorativos para o uso na indústria moveleira e em interiores e a produção de embalagens para diversas finalidades.

As lâminas de madeira podem ser obtidas de duas formas, a saber, a partir do “desenrolamento” de toras grossas, relativamente curtas, utilizando um torno laminador no qual se faz girar contra o gume de uma longa faca, formando-se uma superfície contínua de lâminas (lâminas torneadas), ou, no caso das lâminas faqueadas, a partir de cortes planos feitos por uma faqueadeira em peça de madeira não roliça (pranchão), obtendo-se folhas de lâminas decorativas que são usadas como capas na indústria de painéis (HASELEIN; PAULESKI, 2003).

Segundo Gonçalves (1998), a produção industrial de lâminas de alta qualidade exige espécies adequadas, tornos sem vibração, geometria correta para laminação em faqueadeiras e substituição das facas em tempo certo. As características mais importantes para definir a qualidade das lâminas normalmente são a uniformidade de espessura, a rugosidade de superfície, as fendas de laminação, as deformações, a cor e o desenho (JANKOWSK, 1978).

Schult (2008) comenta que são três os fatores que exercem efeitos marcantes na produção de lâminas, começando pelo teor de umidade, em que madeiras totalmente saturadas ou abaixo do PSF diminuem a qualidade das lâminas. A permeabilidade é outro fator, pois quanto maior a permeabilidade da madeira, melhor será a condição de laminação e a qualidade da lâmina produzida. E o terceiro fator é a temperatura, que é controlável no processo através do aquecimento e influencia na qualidade das lâminas em termos de rigidez, suavidade da superfície, uniformidade em espessura, teor de umidade da lâmina seca e qualidade da adesão.

A madeira de pinus pode ser laminada à temperatura ambiente, porém, devido a presença de nós é aconselhável seu condicionamento. O amolecimento de nós pelo cozimento aumenta a vida útil das ferramentas de corte e evita lâminas de madeira com superfícies ásperas sejam produzidas (HASELEIN; PAULESKI, 2003).

2.3 Fibra de vidro

A utilização das fibras de vidro começou em 1836, quando foi patenteado na Europa um método de tecer vidro maleável. Em 1839, tecidos de fibra de vidro foram então colocados pela primeira vez em uma exposição industrial, sendo que por volta de 1840, essa mesma fábrica começou a receber seus primeiros pedidos. Levou praticamente um século até que esse material ressurgisse no mercado mundial para utilização em isolamento de cabos e condutores elétricos. A partir de 1940, o desenvolvimento das resinas sintéticas promoveu uma ampla

utilização para esse tipo de fibra e suas aplicações abriram uma grande variedade de mercados (NASSEH, 2010).

A fibra de vidro é utilizada para fabricar móveis, telhas, capacetes, pranchas, barcos, carrocerias de automóveis, objetos de decoração, revestimentos, aero-modelos, entre outras muitas utilizações. Em muitos casos é insubstituível, seja por questões econômicas, pela facilidade de execução ou por suas características como material de engenharia (REIS, 2008).

Na literatura podem ser encontrados termos como fiberglass, plástico reforçado com fibra de vidro, compósitos de fibra de vidro, ou abreviaturas como FRP, GRP ou PRFV, as quais referem-se ao mesmo material, ou seja, a fibras de vidro em conjunto com uma matriz (resina).

Os compósitos de fibra de vidro são usados para melhorar a rigidez e a resistência mecânica da matriz, além de conferir estabilidade dimensional e bom desempenho em temperaturas elevadas (FREIRE et al. 1994).

Reis (2008) faz referência aos profissionais de engenharia e arquitetura que utilizam os compósitos de fibra de vidro em reforços estruturais, em isolamentos acústico e elétrico, na aeronáutica civil e militar, em equipamentos comerciais e bancários. Nos setores médico e odontológico a fibra de vidro é utilizada, por exemplo, em alguns tipos de próteses.

Soares (2009) cita que são 12 as características mais importantes dos compósitos de fibra de vidros: leveza, reciclagem, não apodrecimento, baixa condutividade térmica, higiene, resistência alta a agentes químicos, força mecânica, características elétricas, incombustibilidade, estabilidade dimensional, compatibilidade com matrizes orgânicas e permeabilidade de dielétricos.

Dagher et al. (1996) comentam que os compósitos de fibra de vidro são materiais versáteis que podem ser usados, por exemplo, para melhorar a qualidade da madeira. A fibra de vidro é citada pelos mesmos autores como um material com potencial para ser aplicado na área de tração de vigas de madeiras de baixa densidade melhorando a rigidez e a resistência. Assim, o uso do reforço pode vir a substituir o uso de madeiras de alta densidade.

As principais vantagens do compósito de fibra de vidro, quando aplicado como reforço em vigas de madeira, segundo Gardner et al. (2000), são: alta resistência à tração, proteção da viga contra as ações do clima e tempo, fácil aplicação e manuseio. Além disso, as fibras de vidro são as mais amplamente empregadas por serem materiais amorfos, possuindo como principais características baixo coeficiente de expansão térmica, facilidade de processamento e baixo custo (FREIRE, 1994).

A partir da década de 60, muitas pesquisas foram publicadas fazendo referência ao reforço de madeira com fibra de vidro, como é o caso dos pesquisadores Wangaard (1964) e Biblis (1965), que estudaram o efeito da colagem de fibra de vidro com resina epóxi na compressão e tração de madeiras de várias espécies. Nas últimas duas décadas, é possível encontrar pesquisas como as de Dagher et al. (1996), que estudaram o reforço de fibra de vidro em espécies de baixa densidade; Gardner et al. (2000), que analisaram diferentes resinas em associação para a impregnação da fibra de vidro com a madeira; entre outros pesquisadores como Soltis (1998), Michael (2002), Richie (2003), Dagher e Altimore (2005).

Dagher e Altimore (2005) comentam que os pesquisadores da Universidade de Maine nos Estados Unidos iniciaram, em meados dos anos 90, pesquisas com o objetivo de aprovar o uso de madeiras reforçadas com fibra de vidro com polímeros em estruturas de pontes, em vez do uso comum com barras de ferro.

Pesquisas no Brasil utilizando fibra de vidro como reforço em estruturas de madeiras são recentes. Fiorelli (2002) estudou o comportamento de vigas de madeira reforçadas com fibra de vidro e fibra de carbono com adesivos à base de mamona e com adesivo fenol-formaldeído em substituição a resina epóxi. Fiorelli (2005) introduziu em sua pesquisa critérios para a produção de vigas com e sem reforço de fibra de vidro. Já Miotto (2009) avaliou, de forma experimental e numérica, o comportamento estrutural de vigas mistas de madeira laminada colada (MLC) e concreto reforçadas com fibras de vidro.

A madeira pode receber o reforço com a colagem direta do compósito fibra-resina já consolidado ou com a aplicação “molhada” da fibra de vidro e matriz sobre a madeira. Este último método tem a dupla função de aderir à madeira e de formar um compósito com a fibra de vidro. Alguns estudos já provaram a eficiência da resina epóxi, mas outras pesquisas também obtiveram resultados positivos usando a resina fenólica, poliéster e fenol-resorcinol como matriz para fibra de vidro.

2.4 Matrizes poliméricas ou resinas

Faria (2007) explica, que a palavra polímero significa “muitas partes”, assim um material polimérico pode ser considerado como constituído por muitas partes ou unidades ligadas quimicamente entre si de modo à formar um sólido. Dependendo do modo como estão ligados

quimicamente e estruturalmente, os plásticos podem ser divididos em duas classes: termoplásticos e termorrígidos (termofixos).

O termo “resina termoplástica” se refere às resinas que uma vez submetidas a altas temperaturas, após a cura ou polimerização, tornam-se plásticas, todavia perdem a plasticidade com o aumento gradual da temperatura. Normalmente, estas resinas são utilizadas na fabricação de peças em processos de injeção, extrusão e *vacuum forming*. São alguns exemplos de resinas termoplásticas: polietileno, polipropileno, poliamida (nylon), policarbonato, poliéster saturado (JAIGOBIND et al, 2007).

Já as resinas termorrígidas englobam as resinas que uma vez submetidas a altas temperaturas ou catalizadores específicos após a cura (polimerização) permanecem rígidas, insolúveis e infusíveis, devido a ação das ligações inter cruzadas (*cross linking*). A grande vantagem das resinas termorrígidas está nas suas elevadas propriedades mecânicas. As principais resinas termofixas utilizadas na fabricação de peças em plástico reforçado ou compósito são as resinas poliésteres insaturadas, as resinas fenólicas, as resinas éster vinílica e as resinas epóxi (JAIGOBIND et al., 2007; MACIEL, 2001).

O que determina a escolha de uma resina para uma aplicação específica é a capacidade que esta tem de transferir carga de um elemento para outro e manter a integridade da ligação, quando sujeita às condições ambientais esperadas (BALSEIRO, 2007). Sellers (2000) comenta que, em termos de durabilidade em aplicações estruturais, a resina deve ser igual ou exceder a resistência da madeira. Além disso, a resina deve possuir características de uma união resistente, estável e durável, mas essas características devem se relacionar com as propriedades da madeira (CUNHA; MATOS, 2011).

2.4.1 Resina Fenólica

As resinas fenólicas são obtidas a partir da reação de um fenol (anel aromático de álcool derivado de benzeno) com formaldeído (gás reativo derivado do metano). Para a cura da resina fenol-formaldeído há a necessidade de altas temperaturas (130 – 160°C). Essa produz boa resistência das uniões coladas mesmo que atuando em condições extremamente adversas, como em longo tempo de exposição à água quente ou fria, ciclos de secagem e endurecimento, variações extremas de temperatura e umidade relativa, além disso, não é atacada por micro-organismos (FIORELLI, 2002; HASELEIN; PAULESKI, 2003).

Karpovas (2005) comenta que, grande parte da resina fenol-formaldeído é consumida pelo mercado de madeira, em especial para a produção de aglomerados, compensados, chapas MDF e OSB, a chamada indústria de painéis de madeira.

Segundo a Hexion (1996), a resina fenol-formaldeído (FF) diferencia-se das resinas convencionais existentes no mercado pelo seu alto teor de sólidos (49 – 51%) e maior viscosidade (400 – 800 cP), conferindo um maior rendimento e qualidade às colagens, sendo especialmente indicada para a fabricação de painéis multilaminados para uso naval, bem como outras utilizações onde a característica de ser à prova d'água seja especificada.

2.4.2 Resina poliéster isoftálica insaturada com NPG (Neopentilglicol)

As resinas poliésteres constituem uma família de polímeros de alto peso molecular resultantes da condensação de ácidos carboxílicos com glicóis, classificando-se como resinas saturadas ou insaturadas, dependendo, dos tipos de ácidos utilizados, que irão caracterizar o tipo de ligação entre os átomos de carbono da cadeia molecular. Desta maneira, originam moléculas formando o poliéster. No caso do poliéster saturado, resulta em um produto termoplástico. Já o poliéster insaturado, resulta em um produto termorrígido (ELEKEIROZ, 2004).

Os poliésteres insaturados conferem a capacidade da resina de ser líquida e, após determinado estímulo, sofrer o processo de cura e tornar-se termoestável. A denominação insaturado está relacionada também com a presença das duplas ligações em sua cadeia molecular. Essas duplas ligações, que serão quebradas pela ação de determinado catalisador, como calor, radiação ou peróxido orgânico, irão reagir novamente entre si para originar o polímero termoestável e irreversível, ou seja, a cadeia molecular composta por simples e duplas ligações entre os átomos de carbono resultam em um produto termorrígido (POLIRESINAS, 2011).

A resina poliéster insaturada pode ser dos tipos: ortoftálicas, tereftálicas, bisfenólica e isoftálica. Com o ácido isoftálico (resina isoftálica) podem ser obtidos poliéster de alto peso molecular, ou seja, com cadeias mais longas. Tais cadeias, conferem ao produto final maior resistência mecânica. Por isso, uma resina poliéster produzida com ácido isoftálico tem maior capacidade de absorver impacto comparado com os outros tipos de resina poliésteres (RESINFIBER, 2010).

Há dois tipos principais de resina insaturada isoftálica: as resinas isoftálicas comuns e as com neopentilglicol (NPG). As resinas isoftálicas comuns são normalmente formuladas

com propileno glicol, apresentam termo-distorção por volta de 100 °C. Enquanto as resinas isoftálicas com NPG, são formuladas com neopentilglicol, apresentando uma termo-distorção por volta de 130 °C, resistência química muito superior às demais resinas isoftálicas (BAGGIO, 2005). Estas, são resinas especiais para serem usadas em contato com a água e para temperaturas elevadas, possuem também como característica a resistência química à corrosão e às intempéries (DANTAS, 2011).

Diversas aplicações podem ser atribuídas à resina isoftálica com ou sem reforço, por exemplo, reforço de fibra de vidro. Porém, uma vez reforçada, esta se transforma em um excelente produto de engenharia, podendo ser utilizada como substituto de materiais como ferro, aço e concreto, devido às suas ótimas propriedades físico-mecânicas e ao seu custo compatível.

Alves et al. (2009) verificaram a utilização do compósito de fibra de vidro e resina isoftálica no reforço de vigas estruturais de concreto e de madeira. O reforço apresentou um ganho da resistência em até 185% para as vigas de madeira e em até 132% para as vigas de concreto. Porém, ocorreu o deslocamento da fibra de vidro no rompimento, tanto na viga de concreto tanto em uma das vigas de madeira.

A resina isoftálica com fibra de vidro pode ser utilizada na laminação de barcos com casco de madeira. No entanto, alguns construtores de barcos, não recomendam sua aplicação sobre a madeira, pois há risco de delaminação. Acredita-se que substâncias presentes na madeira interfiram na cura da resina que está diretamente em contato com ela (DANTAS, 2011). Porém, devido ao seu baixo custo de aquisição e boas qualidades, a resina isoftálica é utilizada para este fim.

2.4.3 Resina epóxi

O termo epóxi refere-se a um grupo constituído por um átomo de oxigênio ligado a dois átomos de carbono. Diferencia-se das demais resinas devido a baixa contração e forte poder adesão.

As resinas epoxídicas não secam por si só e necessitam serem modificadas com certos ácidos graxos ou combinadas com agentes de cura, formando uma estrutura tridimensional por polimerização com alguns materiais, para formarem um filme sólido à temperatura ambiente (BRAGA, 2010).

A resina epóxi é o principal polímero termorrígido para aplicações de engenharia de compósitos poliméricos devido à baixa retração durante a cura, excelente adesão a uma variedade de superfícies, boa estabilidade dimensional, baixa absorção de umidade, boas propriedades térmicas e elétricas, excelente resistência química e a intempéries com alta relação resistência/peso. Devido às propriedades superiores, estas resinas são freqüentemente usadas com fibras de alto desempenho, como a fibra de vidro, fibra de carbono e fibra de aramida (BIAGINI et al., 2006).

A propriedade mais singular da resina epóxi é a sua habilidade em transformar-se em um sólido termorrígido, tendo como ponto de partida o estado líquido, no qual a viscosidade é o parâmetro de particular importância. Viscosidade, ponto de fusão, percentual de insaturação, peso molecular e distribuição de peso molecular caracterizam a resina epóxi em seu estado termoplástico (FIORELLI, 2005).

Miotto (2009) comenta que a resina epóxi é a mais indicada para a ancoragem de barras de aço em peças estruturais de madeira, pois permite o desenvolvimento de ligações simples, fáceis de serem executadas, resistentes e duráveis. Devido ao seu excelente desempenho, esse tipo de conexão tem recebido atenção e reconhecimento, constituindo-se em objeto de constantes pesquisas.

A resina epóxi é utilizada amplamente na fabricação e na reforma de barcos, devido excelentes qualidades mecânicas, a estabilidade química, e a ótima adesão em diversos materiais, como metais e madeira. Além disso, a resina epóxi é a mais apropriada para colar peças e para impregnar fibra de vidro sobre a madeira dos barcos (DANTAS, 2011).

Pesquisadores como, Davalos et al. (2000), Fiorelli (2002) e (2005), Miotto (2009), Carneiro (2010), entre outros, encontraram bons resultados quanto a resistência da resina epóxi na interface com madeira. Davalos et al. (2000) comenta, que o aumento significativo da resistência e rigidez das estruturas de madeira podem ser alcançadas com o desenvolvimento de técnicas para a aplicação de reforços na interface fibra de vidro-resina-madeira, a qual é suscetível a delaminação.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Espécie laminada e laminação da madeira

As lâminas de madeira utilizadas nesta pesquisa foram obtidas junto à Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária (FEPAGRO - Florestas), localizada no município de Santa Maria/RS, na região central do Rio Grande do Sul. As árvores foram coletadas num povoamento formado por regeneração natural de *Pinus elliottii*, com idade entre 12 e 18 anos, que não sofreu intervenções silviculturais.

Para a obtenção do volume necessário de lâminas de madeira foram abatidas três árvores. De cada árvore abatida, utilizou-se uma tora de 1,05 m de comprimento a partir de 10 cm do solo (Figura 1.a), que foi encaminhada para a laminadora localizada na própria FEPAGRO – Florestas. No local da laminação, com auxílio de ferramentas de corte, as cascas das toras foram retiradas (Figura 1.b). Em seguida, foi iniciada a laminação em um torno desenrolador (Figura 1.c), em que a espessura das lâminas foi fixada em de 1,5 mm.



Figura 1 – Processo de laminação da madeira. Abate da árvore (a), descascamento (b) e desenrolamento (c).

Finalizado o desenrolamento das toras, as lâminas foram transportadas ao Laboratório de Produtos Florestais (LPF) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM).

Em seguida as lâminas foram dimensionadas manualmente com auxílio de um gabarito e estilete com comprimento de 45 cm e largura de 35 cm. Estas foram postas em estufa com temperatura controlada de 50°C, onde permaneceram durante 24 horas, tempo suficiente para secagem das lâminas até um teor de umidade em que não houvesse risco de ataque de fungos e, conseqüentemente, perda do material. Após este período, as mesmas foram acondicionadas umas sobre as outras em câmara climatizada até atingirem teor de umidade de equilíbrio higroscópico com o ambiente. Uma vez obtida a estabilização do teor de umidade das lâminas, calculado de acordo com a norma ASTM D 4442, realizou-se a pesagem e mediu-se o comprimento, largura e espessura das lâminas de madeira.

3.1.1 Classificação e seleção das lâminas de madeira

As lâminas de madeira foram classificadas de duas maneiras, primeiramente, foram submetidas a uma classificação visual, as quais foram separadas em três classes distintas: Classe A (livre de defeitos); Classe B (presença de nós); e Classe C (presença de nós e rachaduras); e, após, as lâminas foram classificadas de acordo com a massa específica básica (ME_b , razão entre a massa seca a 103°C e o volume ao teor de umidade de equilíbrio).

Com o peso e as medidas (volume), calculou-se a massa específica básica ao teor de umidade de equilíbrio (ME_e), determinada seguindo a norma ASTM D 2395 (massa e volume, ambos ao teor de umidade de equilíbrio). Além da ME_e fez-se a determinação da massa específica básica (ME_b) utilizando-se a equação 1.

$$ME_b = ME_e \times \frac{1}{1 + \frac{TU}{100}} \quad (1)$$

Onde:

ME_b = Massa específica básica (massa seca pelo volume ao teor de umidade de equilíbrio), em g/cm^3 .

ME_e = Massa específica básica ao teor de umidade de equilíbrio, em g/cm^3 .

TU = Teor de umidade de equilíbrio médio das lâminas de madeira (14%).

Com os valores de ME_b de cada classe, foi dada sequência à classificação das lâminas. Utilizou-se como base a metodologia descrita por Müller (2009), porém com as adaptações descritas a seguir. Após as lâminas serem classificadas em faixas de valores de ME_b foi demarcado um percentual de variação em relação à média para cada classe (A, B e C). Ou seja, valores que diferiram em até 5% da média para cima foram identificados como classe “1M” e os que diferiram em até 5% da média para baixo, como classe “1m”. Em seguida, estabeleceu-se a faixa de 5 a 10% (“2M” e “2m”), na faixa entre 10 e 15% (“3M” e “3m”), na faixa entre 15 e 20% (“4M” e “4m”) e, por último, para os que diferiram (e quando presentes) na faixa entre 20 e 25% (“5M” e “5m”).

Logo após a classificação das lâminas por classe e por ME_b , realizou-se a distribuição das mesmas em sentido giratório para a formação dos painéis; ou seja, partindo de uma posição de capa de um dos painéis passando por todos os tratamentos, de painel em painel, voltando pela posição de contracapa até o painel inicial.

Primeiramente, utilizaram-se todas as lâminas da Classe A em sentido horário, para formar as 21 capas (21 painéis) e no sentido anti-horário foram distribuídas as 21 contracapas, e as lâminas remanescentes da Classe A foram distribuídas em sentido horário. Distribuídas todas as lâminas pertencentes à Classe A, iniciou-se a distribuição das lâminas de valores médios da Classe B a partir da última lâmina da Classe A, após subclasse “1M”, seguindo o mesmo sentido e retornando pelo sentido oposto. Terminadas as lâminas “1M”, foram utilizadas as “2M”, após as lâminas “2M”, distribuíram-se as “3M”, “4M”, “5M”, “1m”, “2m”, “3m”, e assim sucessivamente até finalizarem todas as lâminas da Classe B. Das lâminas da Classe C, foram utilizadas apenas as lâminas médias, “1M” e “2M”, formando o miolo dos painéis.

Ao final da distribuição, obteve-se 21 grupos (painéis) com 9 lâminas, sem alterar a posição de distribuição, cada lâmina do grupo formado foi identificada com um número de 1 a 9, sendo o número 1 a capa e o número 9 a contracapa. Esta ordem foi obedecida no momento da confecção do painel. Além disso, cada grupo recebeu uma identificação de 1 a 21 (número total de painéis), sendo que cada número significava um tratamento. Tal procedimento foi adotado para facilitar e simplificar a identificação dos tratamentos durante o processo de montagem.

3.2 Fibra de vidro

A fibra de vidro utilizada foi adquirida de uma empresa especializada em produtos para laminação. Foi escolhida fibra de vidro em forma de manta de mechas contínuas com gramatura de 300 g/m² (Figura 3). A forma de manta de mechas contínuas é a mais indicada e frequentemente utilizada na laminação manual, pois foi especialmente desenvolvida para facilitar a remoção de ar do laminado, facilitar e agilizar a penetração e impregnação total da resina.

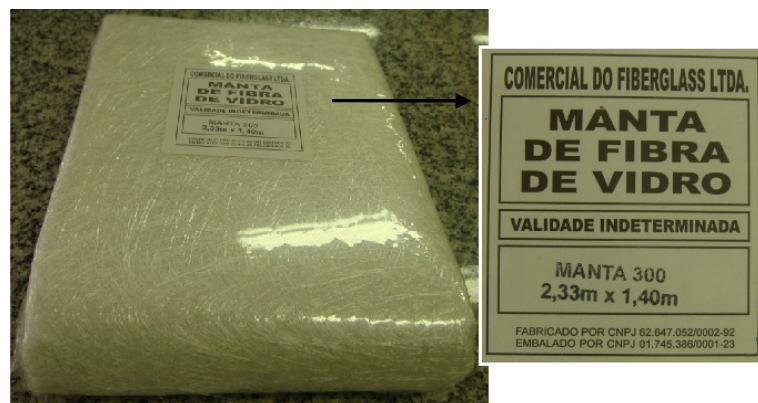


Figura 2 – Embalagem de manta de fibra de vidro com gramatura de 300 g/m².

Cada embalagem de fibra de vidro pesava 1 kg e continha aproximadamente 3 m² de manta de fibra de vidro. No total, foram utilizados, aproximadamente, 6,5 m² de fibra sintética, o que equivale a 2 kg de material.

A manta de fibra de vidro foi dimensionada do tamanho do painel, ou seja, 45 cm x 34 cm o que correspondeu a um peso médio de 48 g por camada. A pesagem das camadas de fibra de vidro foi necessária, pois há uma relação entre o peso da fibra com o peso de resina a ser utilizado. Na figura 4.a é apresentada a fibra de vidro logo após ser retirada da embalagem, e na figura 4.b, o dimensionamento da fibra de vidro.

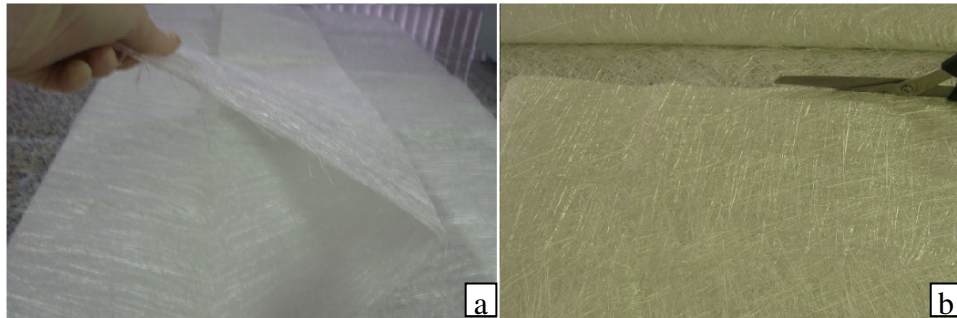


Figura 3 – Fibra de vidro na forma de manta de fibras contínuas (a); dimensionamento das placas de fibra de vidro (b).

Alguns cuidados foram tomados no manuseio com a manta de fibra de vidro, como o uso de luvas e roupas com mangas longas para evitar que os fiapos de fibra de vidro entrassem em contato com a pele, provocando coçejas e desconforto. Pelos mesmos motivos, o uso de máscara também foi necessário, porque o movimento do manuseio com a manta de fibra de vidro liberava pó e fiapos.

3.3 Resinas

As resinas fenol-formaldeído (FF), resina epóxi e resina poliéster foram preparadas em momentos diferentes no processo de fabricação dos painéis LVL.

A primeira resina preparada e utilizada foi a resina fenólica para colagem das lâminas de madeira que formaram os painéis LVL, preparo nomeado de Etapa 1. A Etapa 2 consistiu na impregnação da fibra de vidro sobre o painel já pronto de LVL, momento em que foram preparadas e utilizadas as resinas epóxi e a isoftálica.

3.3.1 Etapa 1 – Colagem das lâminas de madeira

Para a montagem dos painéis de lâminas de madeira foi utilizada resina fenol-formaldeído de nome comercial Cascophen HL-2080, doada pela empresa Hexion unidade de Curitiba. Foi utilizada gramatura de 190 g/m^2 em linha simples.

A resina foi preparada conforme recomendações técnicas do fabricante (HEXION, 2006), utilizando, para cada 100 partes de adesivo, 5 partes de água, 5 partes de extensor Albex – 9 (farinha de coco micropulverizada) e 5 partes de material de enchimento (farinha de trigo). A quantidade de resina preparada foi sempre proporcional a quantidade a ser utilizada no momento da confecção do painel.

A viscosidade da resina, após cada preparo, era medida com um viscosímetro tipo Copo Ford nº 8, cujo tempo de escoamento, em segundos, deveria ser de 40 a 45, em temperatura ambiente de 25°C. Quando necessário, a viscosidade foi ajustada com a adição de água ou com pequenas quantidades de farinha de trigo, para diminuir ou aumentar seu valor. A homogeneização adequada do adesivo foi obtida através do uso de um mix elétrico (Figura 5).

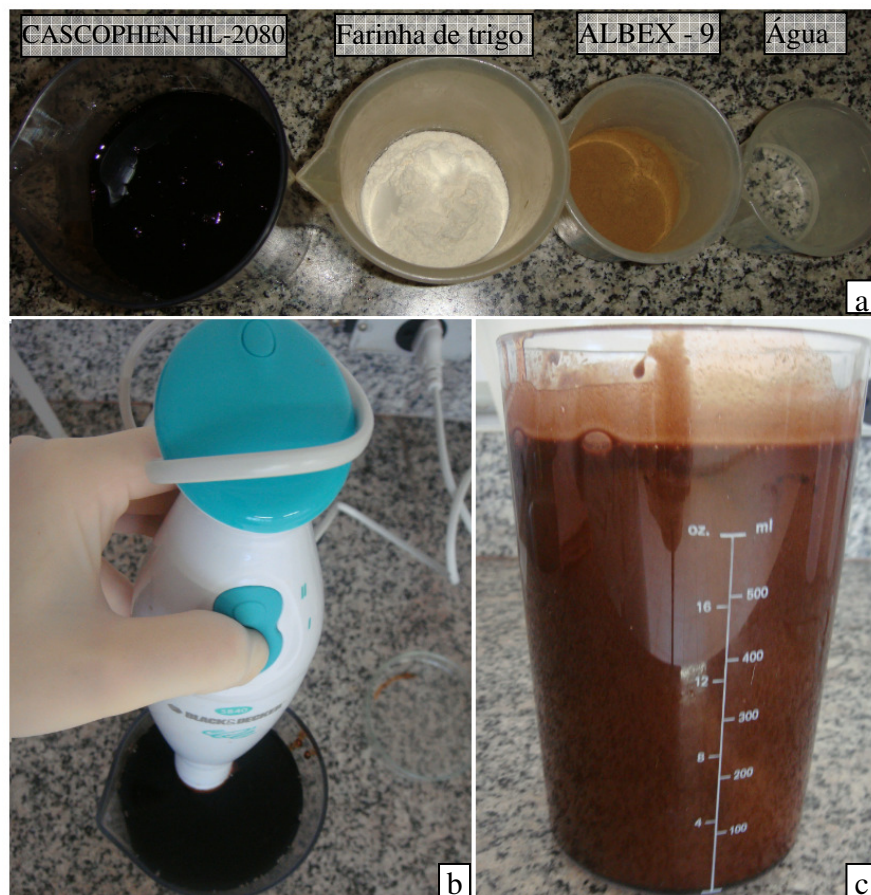


Figura 4 – Preparo da resina fenólica. Componentes para obtenção da resina (a); mistura dos componentes (b); resina fenol-formaldeído pronta para uso (c).

3.3.2 Etapa 2 – Colagem dos painéis LVL com reforço de fibra de vidro

As resinas testadas como impregnantes de fibra de vidro para reforço dos painéis foram a resina epóxi e a isoftálica, adquiridas em empresa especializada em produtos para laminação de fibra de vidro.

De acordo com as recomendações técnicas do produto, a resina epóxi foi utilizada na proporção de 100 partes de resina para 50 de endurecedor. O endurecedor foi misturado manualmente com resina até a mistura ficar incolor e sem bolhas. A quantidade de resina preparada sempre foi a suficiente para uma camada de fibra de vidro, pois a resina epóxi endurece em pouco tempo, inviabilizando seu posterior uso (Figura 6.a).

Para o endurecimento da resina isoftálica foi necessário aplicar para cada 100 partes de resina 2% de catalisador (Butanox) e 1% de acelerador (Cobalto 3%), de acordo com as recomendações do fabricante. No entanto, o catalisador Butanox em contato com o acelerador cobalto 3%, é inflamável, por isso, estes produtos tiveram que ser cuidadosamente misturados à resina. Primeiro o catalisador foi adicionado na resina isoftálica e misturado até sua completa dissolução, só então o acelerador foi aplicado e misturado na solução de resina com o catalisador.

A quantidade de resina isoftálica preparada era o suficiente para a impregnação de uma camada de fibra de vidro, pois quando catalisada e acelerada, a resina passa por dois estados, primeiro o de gel, e após, de endurecimento em poucos minutos (Figura 6.b).

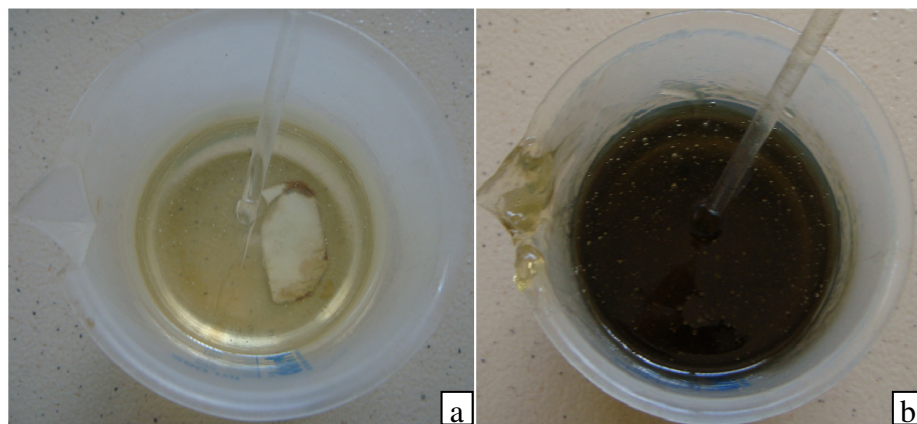


Figura 5 – Resinas para impregnação da fibra de vidro. Resina epóxi com endurecedor (a); resina isoftálica com NPG com catalisador e acelerador (b).

A resina isoftálica apresentou algumas desvantagens de manuseio em comparação à resina epóxi, como o forte cheiro característico da resina poliéster e o rápido endurecimento. Porém, a maior dificuldade encontrada foi o fato da resina isoftálica ser muito pegajosa, o que dificultava a impregnação da fibra de vidro, pois os fios da fibra, muitas vezes, grudavam no pincel e na luva. Por isso, foi necessário o uso de silicone em *spray* em todos os materiais que estivessem em contato com a resina, como as luvas, o cabo do pincel, o béquer e o bastão de vidro. O silicone facilitou e prolongou o uso dos materiais sem a necessidade de limpá-los periodicamente com *thinner*.

Tanto para a resina isoftálica, como para a resina epóxi, a bancada utilizada na montagem dos painéis foi toda revestida com plástico, pois uma característica comum das duas resinas é a não aderência a materiais plásticos.

3.4 Montagem dos painéis LVL

A montagem dos painéis LVL foi realizada em duas etapas, sendo a Etapa 1 a da confecção dos painéis LVL com a resina FF, e a Etapa 2 a de aplicação do reforço de fibra de vidro com a resina epóxi ou com a resina isoftálica, de acordo com o tratamento.

3.4.1 Etapa 1 – Confecção dos painéis LVL

A Etapa 1 consistiu na montagem dos painéis LVL com a resina FF. Seguindo as recomendações do fabricante da resina fenólica, o teor de umidade das lâminas foi controlado entre 4% e 6% no momento da aplicação da resina. Este valor foi obtido com a secagem das lâminas em estufa com temperatura de 35°C durante aproximadamente 12 horas. A montagem dos painéis foi realizada em uma sala climatizada a 25°C para que as propriedades da resina se mantivessem inalteradas.

As lâminas correspondentes a um único painel foram retiradas da estufa e pesadas para a confirmação da faixa do teor de umidade; após, e obedecendo a numeração das lâminas de madeira, a resina foi pesada sobre a lâmina, na proporção de 190 g/m² em linha simples, sendo espalhada em seguida com o auxílio de uma espátula de plástico (Figura 7).

Sobrepostas as lâminas, revestiu-se a parte superior e inferior do painel com folhas de papel manteiga e, na sequência, as lâminas foram prensadas a frio em uma prensa manual, durante um período de 45 minutos (recomendações do fabricante da resina fenol-formaldeído).

Transcorrido o tempo de montagem dos painéis, estes foram submetidos a uma prensagem à quente para a total cura do adesivo. Esta prensagem foi realizada em prensa acionada por pistão hidráulico da marca Omeco, com temperatura dos pratos fixada em 135°C, a uma pressão específica de 14 kgf/cm². O tempo de prensagem à quente foi definido por 1 minuto para cada lâmina acrescido de mais 2 minutos, resultando no total de 9 minutos de prensagem para painéis com 7 lâminas, e de 11 minutos para painéis com 9 lâminas de madeira.

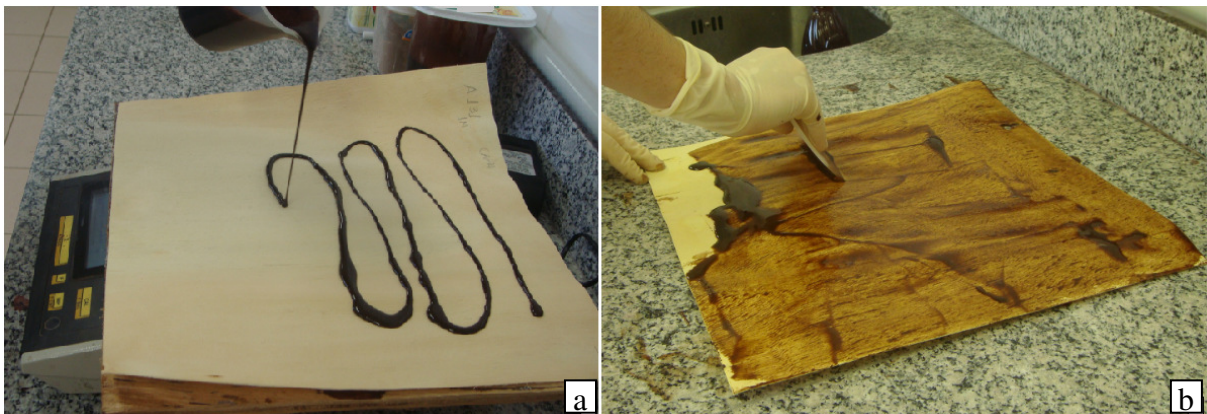


Figura 6 – Montagem dos painéis LVL. Pesagem da resina, 190 g/m² (a); aplicação da resina sobre a lâmina de madeira (b).

3.4.2 Etapa 2 – Aplicação dos reforços de fibra de vidro nos painéis LVL

A segunda etapa consistiu na aplicação dos reforços de fibra de vidro com resina epóxi e resina isoftálica sobre os painéis de LVL já prontos e climatizados.

Para o uso das resinas epóxi e isoftálica, realizava-se a limpeza da superfície do painel que receberia o reforço da fibra de vidro com acetona em pequenas quantidades espalhadas com pincel, com o objetivo de remover qualquer presença de gordura e resíduos que estivessem sobre o mesmo.

O procedimento da aplicação da resina sobre a fibra de vidro foi o mesmo para as duas resinas. Primeiro, uma fina camada de resina era espalhada com pincel sobre a face do painel, para uma leve fixação da manta de fibra de vidro. Em seguida, com auxílio do pincel, a manta era impregnada com resina na proporção de 1200 g/m^2 para a resina epóxi, e de 1600 g/m^2 para a resina isoftálica (Figura 8.a). Estas quantidades são as recomendadas pelos fabricantes e foram suficientes para total impregnação da fibra de vidro (Figura 8.b). Na sequência da impregnação da fibra de vidro para as duas resinas utilizadas, os painéis foram revestidos com plástico e prensados em prensa hidráulica com pressão específica de 8 kgf/cm^2 em temperatura ambiente, durante 24 horas (Figura 8.c), tempo suficiente para a total cura de ambas as resinas (Figura 8.d).



Figura 7 – Impregnação da fibra de vidro com resina isoftálica. Aplicação da resina sobre a fibra de vidro (a); fibra de vidro impregnada com a resina (b); prensagem dos painéis reforçados com fibra de vidro (c); painel após a prensagem (d).

3.5 Confeção dos corpos de prova

Finalizada a etapa de montagem dos painéis LVL e da aplicação dos reforços, os mesmos foram marcados como demonstrado na figura 9 e cortados com serra fita. Após, os corpos de prova foram acondicionados em câmara climatizada para a estabilização do teor de umidade.

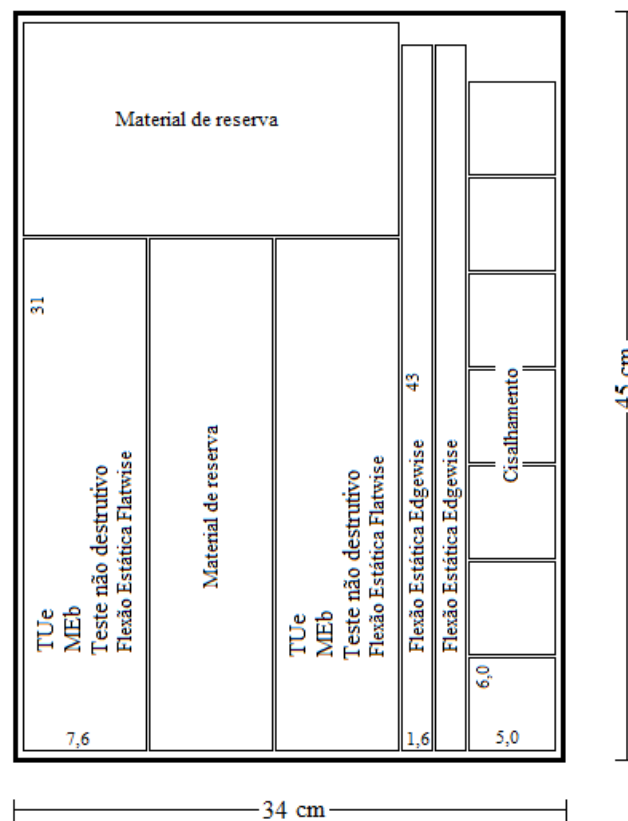


Figura 8 – Modelo para a marcação dos painéis LVL para posterior corte.

Foram confeccionados dois corpos de prova para a flexão estática na posição *flatwise*, mais dois para a flexão estática na posição *edgewise*, e corpos de prova para o cisalhamento. Além disso, partes do painel foram guardadas como material de reserva.

3.6 Propriedades físico-mecânicas

3.6.1 Teor de umidade e massa específica básica das lâminas e dos painéis LVL

O teor de umidade (TU) para as lâminas de madeira foi determinado a partir da seleção aleatória de algumas lâminas que foram dimensionadas em tamanhos menores, 15 cm x 15 cm, para facilitar sua pesagem. De acordo com as recomendações da norma ASTM D 4442, as amostras foram pesadas em balança eletrônica, e secas em estufa a 103°C até peso constante. Para cada corpo de prova, foi obtido o TU na condição de equilíbrio com o ambiente da câmara climatizada (TU_e), sendo, posteriormente, calculado TU_e médio das lâminas.

De acordo com a norma ASTM D 4442, foram determinados o TU_e dos painéis. Para isso, utilizaram-se os mesmos corpos de prova usados nos testes de flexão estática na posição *flatwise* e dureza Janka. O TU foi determinado para todos painéis, porém foi especificado o valor do TU_e para cada tratamento.

Segundo recomendações da ASTM D 2395, todas as lâminas utilizadas para a confecção dos painéis foram pesadas e medidas por régua e paquímetro digital para as determinações de massa e volume nos respectivos teores de umidade; determinando assim, a massa específica ao teor de umidade de equilíbrio (ME_e). Entretanto, para a classificação das lâminas e para a comparação e padronização dos dados, os valores de ME_e foram corrigidos para massa específica básica (ME_b), massa seca pelo volume ao TU_e , através da equação citada no item 2.1.2.

Nos painéis, a ME_e foi determinada para cada corpo de prova, independentemente do teste realizado, seguindo a norma ASTM D 2395. Através da equação citada no item 2.1.2 o valor de ME_e obtido nos painéis LVL também foi corrigido para valores de ME_b , nessa correção foi utilizado o TU_e calculado em cada tratamento.

3.6.2 Teste não destrutivo - Ultrassônico

A medição ultrassônica foi realizada nos corpos de prova de LVL com 31 cm x 7,6 cm x 1,08 cm, a saber, os mesmos corpos de prova que posteriormente foram utilizados para o

teste de flexão estática na posição *flatwise*, para o teste de dureza Janka e para a determinação do TU_e . O teste de ultrassom também foi realizado nos compósitos de fibra de vidro impregnados com resina isoftálica e com resina epóxi, de dimensões de 31 cm x 7,6 cm x 0,5 cm.

Nesse procedimento, o equipamento utilizado foi o aparelho de ultrassom da marca TICO (Figura 10) com dois pares de transdutores, um de ponto seco, com emissão de frequência de 45 kHz (Figura 10.a), e o outro de face plana com emissão de frequência de 54 kHz (Figura 10.b). Antes de iniciar cada série de ensaios, realizava-se a calibração do aparelho com os transdutores a serem usados no momento, seguindo o manual dos mesmos.

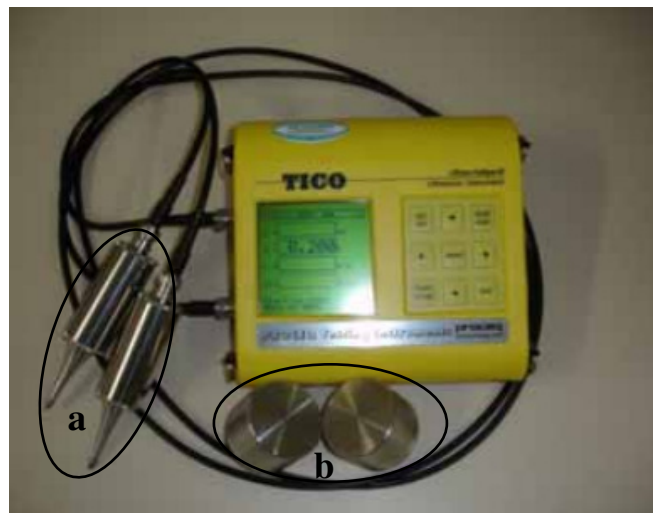


Figura 9 – Aparelho de ultrassom. Transdutores de ponto seco (a); transdutores de face plana (b).

Fonte: Scheid et al. (2011).

Primeiramente, foi realizada a leitura ultrassônica com os transdutores de ponto seco. Estes foram posicionados nos extremos do corpo de prova, medindo o tempo de propagação no sentido longitudinal. A velocidade de propagação da onda foi calculada através da razão entre a distância exata de cada corpo de prova pelo tempo de propagação da onda lida no aparelho.

Já os transdutores de face plana foram fixados em um molde de metal distantes 25 cm um do outro. A leitura da velocidade ultrassônica foi realizada nos corpos de prova de 31 cm de comprimento, em que o molde com os transdutores foi posto sobre a capa do painel. Na base dos transdutores foi utilizado um produto acoplante para facilitar a transmissão de ener-

gia ultrassônica. A leitura da velocidade de propagação da onda foi obtida diretamente no aparelho.

Com as leituras de velocidade de propagação de onda e com a ME_b (20° C de temperatura e 65 % de umidade relativa) de cada corpo de prova, calculou-se o módulo de elasticidade dinâmico (MOE_d), ou também chamada de constante elástica dinâmica (E_d) pelo método não destrutivo ou ultrassônico, com o uso da equação 2.

$$MOE_d = v^2 \cdot ME_b \cdot (9,8 \times 10^{-4}) \quad (2)$$

Onde:

MOE_d = Módulo de elasticidade dinâmico (kgf/cm²).

v = Velocidade de propagação da onda (m/s).

ME_b = Massa específica básica (kg/m³).

3.6.3 Flexão estática na posição *flatwise*

O termo posição *flatwise* ou posição de menor momento de inércia, refere-se à posição em que as lâminas que compõem os corpos de prova se encontram dispostas no plano horizontal.

Os ensaios de flexão estática na posição *flatwise* para painéis de lâminas paralelas seguiram as determinações da norma ASTM D 3043 – método D. Segundo as normas, o corpo de prova deve ser retangular; a altura do painel é a espessura do painel; a largura está entre 7,6 e 11,4 cm; e o comprimento é 24 vezes a espessura, mais 2 polegadas (5,08 cm).

De acordo com a norma, os corpos de prova dos painéis LVL foram confeccionados nas dimensões de 31 cm x 7,6 cm x 1,08 cm (espessura média). E os compósitos foram confeccionados nas dimensões de 17 cm x 7,6 cm x 0,5 cm (Figura 11.a e 11.b).

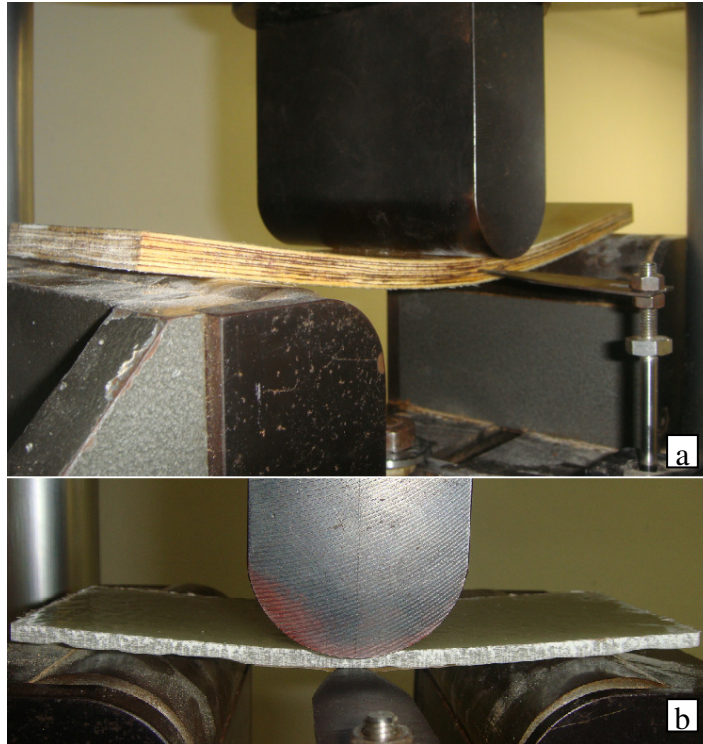


Figura 10 – Teste de flexão estática na posição *flatwise*. Ensaio com painéis LVL (a); ensaio com painéis de compósito (b).

De cada um dos 21 painéis confeccionados foram retirados dois corpos de prova destinados à flexão estática na posição *flatwise*, totalizando 42 corpos de prova. Estes, juntamente com os 4 painéis compósitos foram mantidos em câmara climatizada até o momento do ensaio de flexão estática. Os corpos de provas foram testados na máquina universal de ensaios, hidráulica, com capacidade de 20 toneladas, da marca Amsler, pertencente ao LPF da UFSM.

O vão entre os apoios foi de 24 vezes a espessura média dos corpos de prova, correspondendo a 26 cm para os painéis LVL e 12 cm para os compósitos. A velocidade de aplicação de carga foi calculada de acordo com a equação indicada na norma; tanto para o LVL como para o compósito, obteve-se valor de aproximadamente 8 mm/minuto para LVL e de 4 mm/minuto para os compósitos.

À medida que a carga era aplicada sobre o corpo de prova, os dados de carga e da deformação eram transferidos para o computador com software específico para os testes de flexão estática. Assim, os valores do módulo de elasticidade (MOE) e o módulo de ruptura (MOR) foram obtidos diretamente pelo programa computacional.

3.6.4 Flexão estática na posição *edgewise*

O termo posição *edgewise* significa que as lâminas que compõem os corpos de prova se encontram dispostas no plano vertical. Alguns autores descrevem essa posição como de maior momento de inércia, devido às dimensões de sua secção transversal (Figura 12).

Os ensaios de flexão estática na posição *edgewise* para painéis de lâminas paralelas reforçadas com fibra de vidro seguiram as determinações da norma ASTM D 3043 – método D, com algumas adaptações, como, por exemplo, a espessura do painel passou a ser a largura, determinada em 1,6 cm; a espessura média de 1,08 cm passou a ser a largura. E o comprimento manteve-se 24 vezes a espessura (1,6 cm) mais 2 polegadas (5,08 cm). Assim, os corpos de prova foram confeccionados nas dimensões de 43,5 cm x 1,08 cm x 1,6 cm. No total foram testados 42 corpos de prova.

O vão entre os apoios foi de 24 vezes a espessura média dos corpos de prova, correspondendo a 38 cm. A velocidade de aplicação de carga foi calculada de acordo com a equação indicada na norma, obteve-se valor aproximado de 12 mm/minuto.



Figura 11 – Posicionamento do corpo de prova no ensaio de flexão estática na posição *edgewise*.

Os dados de carga e da deformação eram transferidos para o computador com software específico à medida que a carga constante era aplicada sobre o corpo de prova. Assim, os valores do módulo de elasticidade (MOE) e o módulo de ruptura (MOR) foram obtidos diretamente pelo programa computacional através da interpretação gráfica da carga x deformação.

3.6.5 Dureza Janka

A dureza é a resistência que a madeira oferece à penetração de outro corpo. Trata-se de uma característica importante em termos de trabalhabilidade; também revela as potencialidades da madeira e pode ser utilizada como ferramenta na caracterização das espécies florestais (COLENCI, 2006).

Nesse sentido, a figura 13 apresenta o início do teste de dureza Janka, em que o ensaio era finalizado quando a esfera penetrasse por completo na madeira. Para a realização do teste, foi utilizada a máquina universal de ensaios, seguindo a norma ASTM D 1037. Esta norma foi adaptada, pois foram usados como corpo de prova os dois extremos dos corpos de prova utilizados no teste de flexão estática na posição *flatwise*. A velocidade do teste foi em conformidade com a norma, estipulada em 6 mm/minuto.

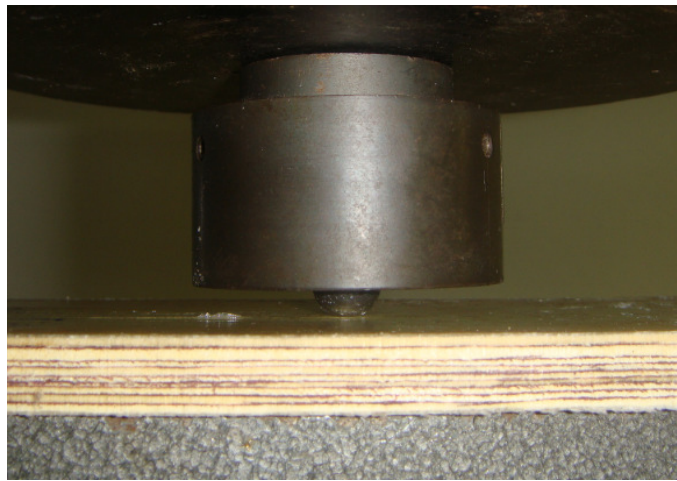


Figura 12 – Posicionamento do corpo de prova no teste de dureza Janka.

A dureza Janka foi expressa em kgf/cm^2 , que corresponde à força necessária para a penetração superficial (até metade do diâmetro) de uma esfera de aço, cuja secção diametral tem uma superfície de 1cm^2 .

3.6.6 Cisalhamento

O cisalhamento dos corpos de prova foi realizado de acordo com as recomendações da ASTM D 1037 e ASTM D 905. No entanto, foram necessárias algumas adaptações nos corpos de prova para a obtenção de espessuras maiores, já que os mesmos possuíam não mais do que 1,08 cm de espessura. Assim, foi necessária a colagem com resina epóxi em quatro painéis, para obter corpos de prova em torno de 5 cm de espessura.

Para a avaliação da resistência ao cisalhamento foram testadas três situações de colagem, ou seja:

- madeira x fibra de vidro com resina epóxi (FV + E);
- madeira x fibra de vidro com resina isoftálica (FV + I);
- madeira x resina fenol-formaldeído (FF).

A figura 14 apresenta o teste de cisalhamento na linha de cola de epóxi com fibra de vidro (FV + E), indicada pela seta.

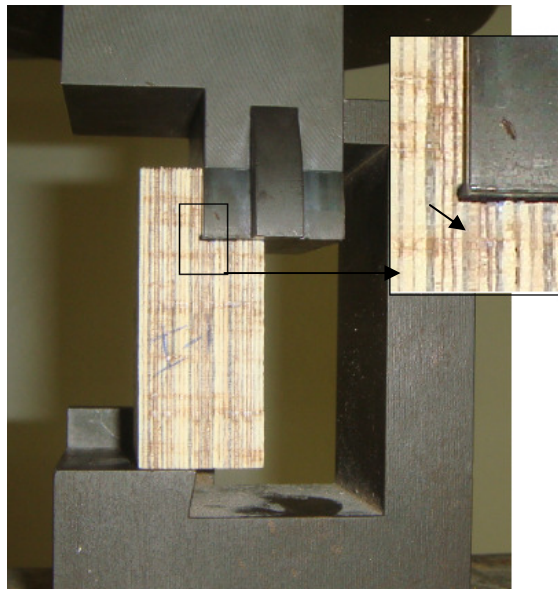


Figura 13 – Teste de cisalhamento a seco na linha de cola de fibra de vidro e resina epóxi (FV + E).

Os ensaios foram realizados na máquina universal de ensaios, e as leituras foram feitas diretamente na escala do seu registrador frontal. A carga aplicada foi de 4 toneladas e a velocidade de 0,6 mm/minuto.

A resistência ao cisalhamento (em kgf/cm²), para o teste a seco e para o teste após fervura, foi calculada por meio do quociente da carga máxima suportada (carga de ruptura, em kgf) pela área de madeira colada submetida ao cisalhamento (em cm²).

3.6.6.1 Cisalhamento na linha de cola a seco

Ao total, foram testados 12 copos de prova. Em 4 corpos de prova, testou-se a linha de cola na junta madeira x fibra de vidro + resina epóxi; em 4 corpos de prova, a linha de cola na junta madeira x fibra de vidro + resina isoftálica, e em mais 4, a linha de cola na junta madeira x madeira unidas com fenol-fomaldeído.

A porcentagem de falha na madeira foi determinada após a delaminação forçada dos corpos de prova, com o auxílio de uma película transparente quadriculada confeccionada para cobrir a área colada submetida ao cisalhamento. O uso desta película possibilitou dividir visualmente a área colada em 10 linhas x 10 colunas, em que cada quadricula cobria 1% de sua superfície durante a avaliação.

3.6.6.2 Cisalhamento na linha de cola após fervura

Da mesma maneira que no teste a seco, no teste na linha de cola após a fervura foram testados 12 copos de prova. Em 4 corpos de prova, testou-se a linha de cola na junta madeira x fibra de vidro + epóxi; em mais 4 corpos, a linha de cola na junta madeira x fibra de vidro + poliéster; e em mais 4, a linha de cola na junta madeira x madeira unidas com fenol-fomaldeído.

Esse ensaio foi realizado nos corpos de prova que passaram pelo seguinte procedimento: fervura por 4 horas; após secagem em estufa por 20 horas à temperatura de 63°C e novamente por um período adicional de 4 horas de fervura. Terminado o tempo de fervura os corpos de prova foram mantidos em água à temperatura ambiente sendo testados úmidos para a determinação das resistências ao cisalhamento por compressão.

A percentagem de falha foi determinada de acordo com a metodologia adotada para o cisalhamento na linha de cola a seco, com o uso de uma película transparente representando 100% da área que sofreu cisalhamento.

3.7 Resumo das normas utilizadas nos ensaios

O dimensionamento e a confecção dos corpos de prova para cada teste foram realizados de acordo com a determinação das normas ASTM. Alguns corpos de prova tiveram suas dimensões adaptadas à norma, como é o caso, por exemplo, dos corpos de prova de flexão estática na posição *edgewise*, do teste de cisalhamento que foi necessário a colagem dos corpos de prova para obter a espessura desejada e, ainda, do teste de dureza Janka, em que não foi necessária a confecção de um corpo de prova específico para o teste, mas sim a utilização do mesmo corpo de prova já usado no teste flexão estática na posição *flatwise*.

Na tabela 1, são apresentados os ensaios realizados com a respectiva norma ASTM utilizada e a dimensão dos corpos de prova, adaptados ou não adaptados.

Tabela 1 – Ensaios com as correspondentes normas e dimensões dos corpos de prova.

(continua)

Ensaio	Norma	Dimensões do corpo de prova
Teor de umidade das lâminas de madeira	ASTM D 4442	15 cm x 15 cm
Massa específica das lâminas de madeira	ASTM D 2395	45 cm x 34 cm x 0,15 cm
Teor de umidade dos painéis LVL	ASTM D 4442	31 cm x 7,6 cm x 1,08 cm
Massa específica dos painéis LVL	ASTM D 2395	31 cm x 7,6 cm x 1,08 cm e 43 cm x 1,08 cm x 1,6 cm
Flexão estática - <i>flatwise</i>	ASTM D 3043 Método D	31 cm x 7,6 cm x 1,08 cm
Flexão estática - <i>edgewise</i>	ASTM D 3043 Método D (adaptada)	43 cm x 1,08 cm x 1,6 cm

(conclusão)		
Cisalhamento a seco	ASTM D 905 e D 1037	6 cm x 5 cm x (3 x 1,08) Colagem do material
Cisalhamento após fervura	ASTM D 905 e D 1037	6 cm x 5 cm x (3 x 1,08) Colagem do material
Dureza Janka	ASTM D 1037 (adaptada)	10 cm do extremo direito e esquerdo do corpo de prova 31 cm x 7,6 cm x 1,08 cm
Ultrassom ¹	-----	31 cm x 7,6 cm x 1,08 cm

¹O ensaio de ultrassom foi realizado de acordo com informações encontradas na literatura.

3.8 Delineamento experimental

Os tratamentos consistiram na confecção de painéis de lâminas paralelas de madeira (LVL) reforçados com fibra de vidro impregnada com dois tipos de resina. Cada painel foi formado por 9 camadas de lâminas de madeira reforçadas com uma, duas ou quatro camadas de fibras de vidro de gramatura de 300 g/m² impregnadas com resina epóxi ou resina isoftálica com NPG (que será aqui nomeada apenas como isoftálica). As dimensões médias finais de comprimento, largura e espessura dos painéis foram de 45 cm x 34 cm x 1,08 cm, respectivamente. Além disso, foram confeccionados compósitos com nove camadas de fibra de vidro, cada uma delas sendo impregnadas com resina epóxi ou resina isoftálica (T0). As dimensões do compósito foram de 30 cm x 14 cm x 0,5 cm.

As camadas de reforço nos painéis LVL foram aplicadas da seguinte maneira: uma camada de fibra de vidro sobre a contracapa dos painéis (T1); duas camadas de fibra de vidro (T2), uma camada sobre a capa e outra sobre a contracapa dos painéis; e quatro camadas de fibra de vidro (T3), sendo uma camada abaixo da lâmina da capa e outra camada sobre a lâmina da capa e, uma camada abaixo da lâmina da contracapa e outra camada sobre a lâmina da contracapa dos painéis. Essa explicação pode ser melhor compreendida através da figura 14 que representa o esquema de como foram montados os painéis com as devidas camadas de reforço estrutural.

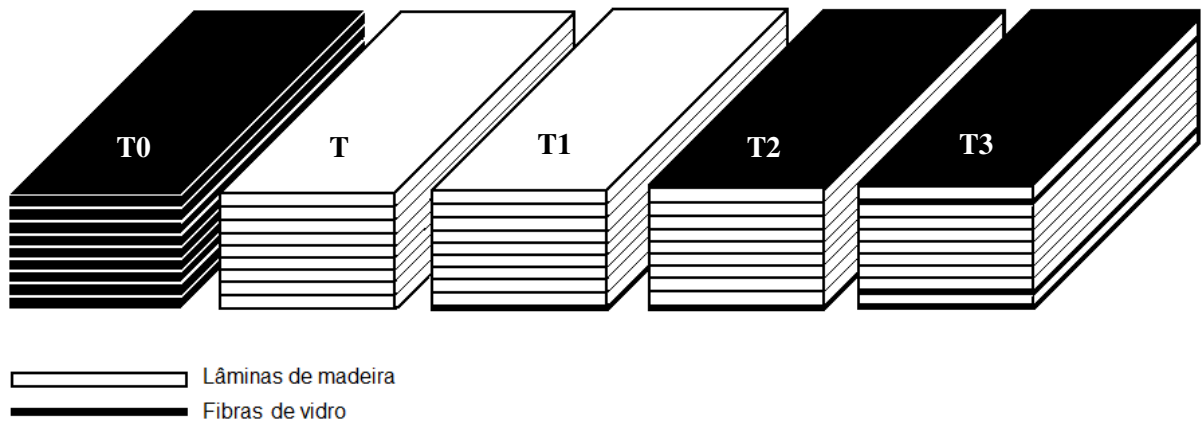


Figura 14 – Desenho ilustrativo dos tratamentos testemunhas (T0 e T) e dos painéis com uma, duas e quatro camadas de reforço de fibra de vidro (T1, T2 e T3).

¹Em que: T0 = painel testemunha composto; T = painel testemunha LVL; T1 = painel com uma camada de reforço; T2 = painel com duas camadas de reforço; T3 = painel com quatro camadas de reforço.

Na tabela 2 são apresentados os tratamentos e repetições utilizados na presente pesquisa. Foram realizadas três repetições por tratamento de LVL, totalizando 21 painéis, e 2 repetições para os painéis compostos, totalizando 4 painéis.

Tabela 2 – Tratamentos avaliados na presente pesquisa.

Tratamentos		Nº de camadas Madeira/fibra de vidro	Posição da camada de reforço	Nº Repetições (R)
T		9/0	-	3
Epóxi (E)	T0	0/9	-----	2
	T1	9/1	1 contracapa	3
	T2	9/2	1 capa e 1 contracapa	3
	T3	9/4	2 capa e 2 contracapa	3
Isoftálica (I)	T0	0/9	-----	2
	T1	9/1	1 contracapa	3
	T2	9/2	1 capa e 1 contracapa	3
	T3	9/4	2 capa e 2 contracapa	3
Total de painéis LVL				21
Total de painéis compostos				4

¹Em que: E = resina epóxi; I = resina isoftálica; T = painel LVL; T0 = composto de fibra de vidro; T1 = uma camada de reforço de fibra; T2 = duas camadas de reforço de fibra de vidro; T3 = quatro camadas de reforço de fibra de vidro.

3.9 Análise estatística

Os resultados obtidos foram interpretados com auxílio de um programa estatístico STATGRAPHICS *plus*, relacionando os dados obtidos com os tratamentos em estudo.

As análises estatísticas dos resultados foram realizadas por análise de variância (ANOVA), a 5% de probabilidade de erro. A comparação entre as médias obtidas para os diferentes tratamentos foi realizada pelo método *Fisher's least significant difference* (LSD) ao nível de 5% de probabilidade de erro.

Para verificar a relação entre alguns grupos de dados, foi necessário o uso da análise de regressão linear múltipla para intervalos de confiança de 95%.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Classificação e propriedades das lâminas de madeira

A primeira classificação submetida às lâminas de madeira após a secagem e o dimensionamento foi a classificação visual, em três classes: Classe A (livre de defeitos), Classe B (presença de nós) e Classe C (presença de nós e rachaduras).

A segunda classificação foi realizada em sequência à averiguação da estabilização do TU das lâminas, o qual foi determinado em 14%, de acordo com as condições da câmara climatizada. Nesta etapa, realizou-se a pesagem e as medidas de comprimento, largura e espessura das lâminas para a determinação da ME_e a qual foi corrigida para ME_b .

A figura 15 apresenta a dispersão dos valores de ME_b sem distinção das três classes (A, B e C), totalizando 207 valores, em que o o valor mínimo de ME_b foi de $0,34 \text{ g/cm}^3$ e valor máximo de $0,64 \text{ g/cm}^3$.

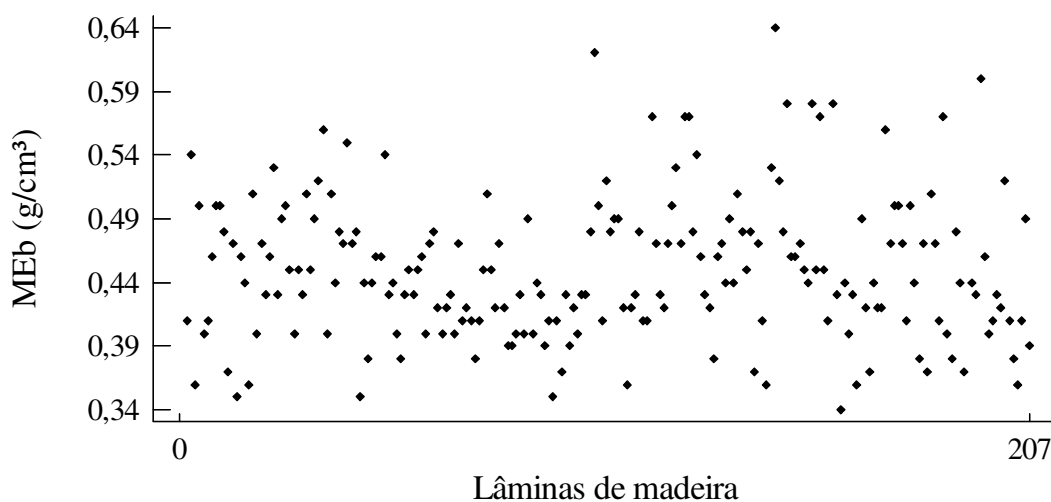


Figura 15 – Dispersão dos dados de ME_b das 207 lâminas de *Pinus elliotti*.

Na tabela 3 os valores máximo, médio e mínimo de ME_b para cada classe podem ser observados juntamente com os valores médios da espessura, largura e comprimento de todas as 207 lâminas.

Tabela 3 – ME_b das lâminas de madeira de *Pinus elliotti*.

	Classe A ME _b - g/cm ³	Classe B ME _b - g/cm ³	Classe C ME _b - g/cm ³	E cm	L cm	C cm	P g
Máximo	0,56	0,64	0,60	0,19	34,5	45,0	169,2
Médio	0,46	0,45	0,44	0,14	33,9	45,0	109,3
Mínimo	0,35	0,34	0,36	0,09	33,0	45,0	63,1
CV%	11,7	12,6	12,9	15,7	0,9	0	19,0
Nº de lâminas	50	132	25	207	207	207	207

¹ Em que: ME_b = Massa específica básica; E = Espessura; L = Largura; C = Comprimento; P = Peso; CV = Coeficiente de variação.

A terceira etapa da classificação das lâminas de madeira consistiu na separação dos valores da ME_b em faixas crescentes e decrescentes de valores, a partir de um valor médio conforme descrito no item 3.1.1.

A tabela 4 apresenta a distribuição da frequência das lâminas de madeira em faixas de ME_b pertencentes a Classe A (livre de defeitos).

Tabela 4 – Distribuição da frequência das lâminas de madeira da Classe A por faixa ME_b.

Classe de ME_b	Diferença da média %	Limite inferior ME _b - g/cm ³	Limite superior ME _b - g/cm ³	Nº de lâminas
4m	-20	0,35	0,38	6
3m	-15	0,40	0,40	4
2m	-10	0,41	0,43	6
1m	-5	0,44	0,45	7
Média	---	0,46		5
1M	+5	0,47	0,48	7
2M	+10	0,49	0,51	9
3M	+15	0,52	0,53	2
4M	+20	0,54	0,56	4
Total				50

A maior classe em número de lâminas (132) foi a Classe B, a qual apresentava pequenos nós. A distribuição da frequência em faixas de ME_b desta classe pode ser observada na tabela 5.

Tabela 5 – Distribuição da frequência das lâminas de madeira da Classe B por faixa ME_b.

Classe de ME _b	Diferença da média (%)	Limite inferior ME _b – g/cm ³	Limite superior ME _b – g/cm ³	Nº de lâminas
5m	-25	0,34	0,35	2
4m	-20	0,36	0,37	7
3m	-15	0,38	0,39	8
2m	-10	0,40	0,41	20
1m	-5	0,42	0,44	33
Média	---	0,45		8
1M	+5	0,46	0,47	17
2M	+10	0,48	0,49	13
3M	+15	0,50	0,52	10
4M	+20	0,53	0,54	3
5M	+25	0,56	0,64	10
Total				132

A menor classe em número de lâminas (25) foi a Classe C a qual apresentava nós maiores e rachaduras, estas últimas na grande maioria em consequência da secagem. Na tabela 6 a frequência está distribuída em faixas de ME_b, com o limite superior e inferior de cada classe.

Tabela 6 – Distribuição da frequência das lâminas de madeira da Classe C por faixa ME_b.

Classe de ME _b	Diferença da média %	Limite inferior ME _b – g/cm ³	Limite superior ME _b – g/cm ³	Nº de lâminas
3m	-15	0,34	0,36	2
2m	-10	0,37	0,38	3
1m	-5	0,39	0,40	3
Média	---	0,41		3
1M	+5	0,42	0,43	4
2M	+10	0,44	0,45	4
3M	+15	0,46	0,47	3
4M	+20	0,48	0,60	3
Total				25

Por meio da análise de variância comprovou-se que não houve diferença significativa entre os valores de ME_b nas Classes A, B e C ao nível de de 5% da probabilidade de erro (Tabela 7).

Tabela 7 – Valores de ME_b , coeficiente de variação e comparação das médias das Classes A, B e C.

Classe	ME_b g/cm ³				CV %	Teste de médias
	Máximo	Médio	Mínimo			
A	0,56	0,46	0,35		11,1	A
B	0,58	0,45	0,34		11,8	A
C	0,60	0,43	0,34		13,4	A

¹Letras maiúsculas comparam as médias, sendo que pelo menos uma letra igual indica a não existência de diferença estatística ao nível de 5% de probabilidade de erro.

Mesmo que não tenham ocorrido diferenças estatísticas entre os valores de ME_b das lâminas de madeira, o que poderia resultar na opção por uma distribuição das lâminas apenas em função da qualidade das classes, optou-se por fazer uma distribuição de acordo com os valores de ME_b , obedecendo esta ordem durante a montagem dos painéis.

Dessa maneira, as primeiras lâminas distribuídas foram as da Classe A na ordem de ME_b média, 1M, 2M, 3M, 4M, 1m, 2m, 3m, 4m. Nessa sequência e no sentido horário distribuíram-se as 21 lâminas de capa, e no sentido anti-horário, a partir da última lâmina da capa, distribuíram-se as 21 lâminas de contracapa do painel. As remanecentes (8 lâminas) compuseram parte da segunda camada de lâminas abaixo da capa. Terminada a Classe A, do mesmo ponto iniciou-se a distribuição das lâminas da classe B, seguindo a mesma ordem da classe anterior. Por fim, algumas lâminas da Classe C integraram a parte da linha neutra do painel.

A ordem de distribuição das 9 lâminas com sua respectiva ME_b , em cada painel confeccionado, está descrita na tabela 8.

Tabela 8 – ME_b de cada lâmina nos diferentes tratamentos e a média da ME_b do painel.

(continua)

Repetição	T Testemunha									Média (g/cm ³)
	Nº de lâminas									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1	0,41	0,49	0,49	0,43	0,38	0,38	0,43	0,54	0,45	0,44
2	0,50	0,48	0,43	0,39	0,37	0,43	0,42	0,44	0,46	0,44
3	0,35	0,48	0,44	0,40	0,36	0,42	0,50	0,36	0,43	0,42

(conclusão)

E - T1										
1 camada fibra de vidro + epóxi										
Repetição	Nº de lâminas									Média (g/cm ³)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1	0,40	0,48	0,44	0,40	0,36	0,42	0,50	0,47	0,35	0,42
2	0,50	0,48	0,43	0,39	0,38	0,43	0,49	0,55	0,54	0,47
3	0,43	0,45	0,50	0,42	0,36	0,40	0,44	0,48	0,51	0,42

E - T2										
2 camada fibra de vidro + epóxi										
Repetição	Nº de lâminas									Média (g/cm ³)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1	0,49	0,47	0,44	0,40	0,35	0,42	0,51	0,45	0,45	0,44
2	0,46	0,47	0,52	0,41	0,41	0,42	0,53	0,45	0,45	0,46
3	0,44	0,47	0,44	0,40	0,37	0,42	0,50	0,45	0,50	0,42

E - T3										
4 camada fibra de vidro + epóxi										
Repetição	Nº de lâminas									Média (g/cm ³)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1	0,47	0,47	0,58	0,41	0,48	0,42	0,54	0,46	0,37	0,47
2	0,43	0,47	0,44	0,40	0,42	0,42	0,51	0,45	0,40	0,44
3	0,49	0,45	0,52	0,42	0,57	0,41	0,64	0,47	0,53	0,50

I - T1										
1 camada fibra de vidro + isoftálica										
Repetição	Nº de lâminas									Média (g/cm ³)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1	0,51	0,47	0,57	0,41	0,46	0,41	0,57	0,46	0,47	0,48
2	0,48	0,46	0,53	0,43	0,49	0,41	0,58	0,47	0,46	0,46
3	0,51	0,46	0,57	0,41	0,41	0,43	0,41	0,57	0,44	0,42

I - T2										
2 camada fibra de vidro + isoftálica										
Repetição	Nº de lâminas									Média (g/cm ³)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1	0,48	0,48	0,43	0,40	0,37	0,58	0,50	0,43	0,48	0,46
2	0,40	0,47	0,41	0,40	0,60	0,52	0,45	0,45	0,46	0,46
3	0,40	0,48	0,43	0,39	0,38	0,43	0,49	0,47	0,36	0,42

I - T3										
4 camada fibra de vidro + isoftálica										
Repetição	Nº de lâminas									Média (g/cm ³)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1	0,50	0,41	0,49	0,43	0,37	0,42	0,43	0,42	0,38	0,43
2	0,44	0,47	0,58	0,41	0,47	0,41	0,56	0,46	0,46	0,47
3	0,52	0,47	0,44	0,40	0,34	0,42	0,51	0,45	0,56	0,46

4.1.1 Teor de umidade de equilíbrio (TU_e) e massa específica básica dos painéis LVL

O TU_e dos painéis LVL foi determinada nos mesmos corpos de provas utilizados nos testes de flexão estática na posição *flatwise* e no teste de dureza Janka.

Após a realização destes testes, os corpos de prova foram colocados em estufa a 103°C até atingirem peso constante, sendo determinado TU_e de base seca dos corpos de prova de cada tratamento. O TU médio encontrado em cada tratamento foi utilizado para a correção da ME_e para ME_b .

O valor médio do TU_e de cada tratamento esta exposto na tabela 9. Foi encontrada diferença significativa entre os tratamentos ao nível de probabilidade de 5% de erro. Por esse motivo, a ME_e foi corrigida para ME_b com o TU_e correspondente a cada tratamento ou seja, não foi utilizado o valor médio total, como usualmente é realizado.

Tabela 9 – TU_e dos painéis LVL dos diferentes tratamentos

Tratamentos		Nº de observações	Teor de umidade de equilíbrio (TU_e) %	CV %	Teste de médias
T		6	11,6	3,0	E
Epóxi (E)	T1	9	9,8	4,9	D
	T2	6	8,9	3,6	C
	T3	6	6,9	7,7	A
Isoftálica (I)	T1	7	9,4	2,8	C D
	T2	6	7,8	7,1	B
	T3	6	6,4	11,7	A

¹ Em que: T = testemunha; E = resina epóxi; I = resina isoftálica; T1 = uma camada de reforço de fibra de vidro; T2 = duas camadas de reforço de fibra de vidro; T3 = quatro camadas de reforço de fibra de vidro.

² Letras maiúsculas comparam as médias, sendo que pelo menos uma letra igual indica a não existência de diferença estatística ao nível de 5% de probabilidade de erro.

Após a determinação do TU_e para cada tratamento, os valores de ME_e dos painéis foram corrigidos para ME_b . Na tabela 10, é possível observar os valores máximo, médio e mínimo de ME_b dos painéis LVL já consolidados nos diferentes tratamentos, bem como o coeficiente de variação e comparação das médias ao nível de 5% de probabilidade de erro.

Tabela 10 – Valores de ME_b, desvio padrão e comparação das médias entres os tratamentos.

		ME _b - g/cm ³				
Tratamentos		Máximo	Médio	Mínimo	CV %	Teste de médias
T		0,68	0,64	0,61	4,4	A
Epóxi (E)	T1	0,81	0,73	0,66	5,7	B
	T2	0,83	0,77	0,71	6,1	C
	T3	0,82	0,80	0,76	2,8	C D
Isoftálica (I)	T1	0,76	0,72	0,69	3,5	B
	T2	0,81	0,77	0,70	5,9	C D
	T3	0,87	0,82	0,78	3,6	D

¹ Em que: T = testemunha; E = resina epóxi; I = resina isoftálica; T1 = uma camada de reforço de fibra de vidro; T2 = duas camadas de reforço de fibra de vidro; T3 = quatro camadas de reforço de fibra de vidro.

² Letras maiúsculas comparam as médias, onde letras iguais indicam que os tratamentos não diferem estatisticamente ao nível de 5% de probabilidade pelo método LSD.

A tabela 10 mostra que, a partir da ME_b média entre os tratamentos após a prensagem, observa-se que existe diferença significativa entre as médias de ME_b, A, B, C e D.

Os valores de ME_b foram maiores nos tratamentos que receberam maior número de camadas de fibra de vidro. No entanto, quando comparados os valores de ME_b nos tratamentos com o mesmo número de camadas de reforços, mas com diferentes resinas utilizadas na impregnação da fibra de vidro, não foram encontradas diferenças significativas ao nível de 5% de probabilidade de erro.

Após a prensagem, os painéis sofreram influência das resinas e das camadas de reforço. O painel I – T3 (isofálticas com quatro camadas de fibra de vidro), I – T2 (isofáltica com duas camadas de fibra de vidro), E – T3 (epóxi com quatro camadas de fibra de vidro) e E – T2 (epóxi com duas camadas de fibra de vidro) apresentaram os maiores valores de ME_b, devido ao, maior peso do painel, consequência da maior quantidade de camadas de reforço e de resina aplicadas sobre estes.

Os painéis com duas e quatro camadas de reforço de fibra de vidro, tanto com a resina epóxi como com a resina isoftálica, apresentaram as médias, C e D, mesmo com uma maior quantidade de resina isoftálica aplicada nos reforços de fibra de vidro, em uma quantidade de 1600 g/m² em relação a 1200 g/m² de epóxi.

Os painéis com uma camada de reforço de fibra de vidro para as duas resinas em estudo (E – T1 e I – T1), foram enquadrados com valores em B. Já o tratamento testemunha (T) foi classificado com valores em A, apresentando o menor valor médio de ME_b entre os trata-

mentos ($0,64 \text{ g/cm}^3$), já que o mesmo não apresentava camadas de reforços, sendo composto apenas por lâminas de madeira e resina fenol-formaldeído.

Os intervalos de confiança para a média da ME_b de cada painel, ou seja, de cada tratamento, estão representados na figura 16.

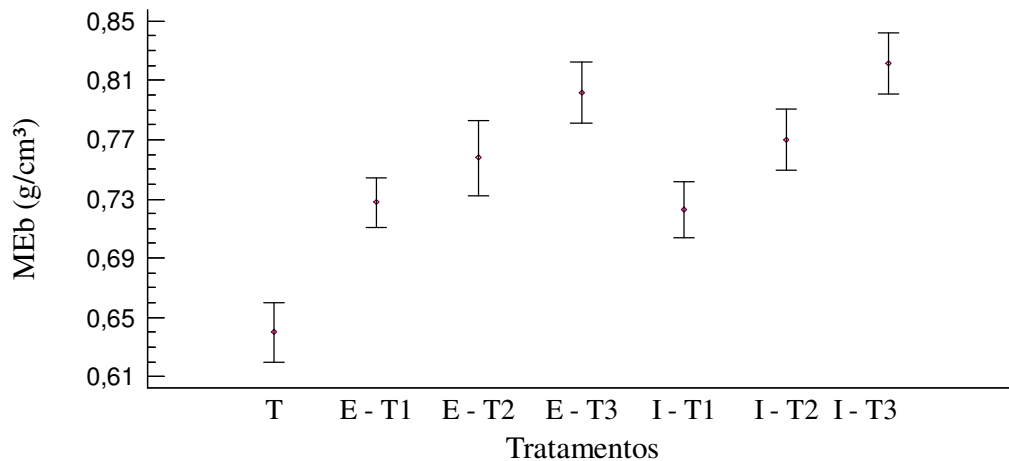


Figura 16 – Intervalo de confiança para as médias da ME_b dos diferentes tratamentos.

4.1.2 Comparação da ME_b antes e após a prensagem

Para melhor compreender o alto valor da massa específica dos painéis e também para um maior número de informações sobre estes, foi realizada uma comparação de massa específica antes e após a prensagem. Consideram-se três condições: soma do peso das lâminas de madeira (1); soma dos pesos das lâminas de madeira acrescido do peso da fibra de vidro mais os adesivos fenol-formaldeído, epóxi ou isoftálica (2); e peso final do painel após prensagem (3), lembrando que os valores das condições 2 e 3 são apenas teóricos, pois a pressão sobre os painéis durante a prensagem, o tempo e a temperatura de prensagem são fatores que influenciam na massa específica do painel.

Para os valores em gramas do adesivo fenol-formaldeído foi considerado apenas o peso do teor de sólidos, sendo este de 49%, segundo o boletim técnico do produto. Para as resinas, epóxi e isoftálica, considerou-se o teor de sólidos de 100%.

Os dados presentes na tabela 11 são a média da ME_b das três repetições de cada tratamento. Nas primeiras três colunas da esquerda, são apresentados os pesos médios, a 5% de

TU das nove lâminas de cada tratamento com sua respectiva $ME_{5\%}$ (teor de umidade das lâminas para a confecção dos painéis). Nas colunas do centro da tabela, estão descritos os componentes utilizados em cada tratamento em gramas (g); na sequência são apresentados o total do peso das lâminas mais os componentes, originando um valor nominal de ME_b (corrigidos para o TU_e de cada tratamento). Nas duas últimas colunas, são apresentados o peso final real dos painéis após a prensagem, e o valor real de ME_b média de cada tratamento.

Tabela 11 – Valores médios do peso e ME_b dos painéis antes e após a prensagem (nominal e real).

Tratamento		Antes da prensagem		Componentes adicionados às lâminas			Após a Prensagem (Nominal)		Após a Prensagem (Real)	
		Peso do painel g	$ME_{5\%}$ g/cm ³	FF G	Fibra de vidro g	Resina g	Peso do painel g	ME_b g/cm ³	Peso do painel g	ME_b g/cm ³
T		941,86	0,43	102,6	0	0	1175,88	0,73	1041,20	0,64
Eoóxi (E)	T1	1009,32	0,44	102,6	48	60	1351,50	0,80	1270,77	0,73
	T2	1018,96	0,44	102,6	96	120	1469,25	0,85	1404,03	0,77
	T3	1007,69	0,47	76,8	192	240	1615,90	0,87	1612,27	0,80
Isofáltica (I)	T1	1048,44	0,45	102,6	48	77	1407,59	0,79	1285,77	0,72
	T2	966,76	0,45	102,6	96	154	1415,07	0,88	1336,37	0,77
	T3	1009,50	0,45	76,8	192	308	1683,73	0,90	1586,13	0,82

¹ Em que: T = testemunha; E = resina epóxi; I = resina isofáltica; T1 = uma camada de reforço de fibra de vidro; T2 = duas camadas de reforço de fibra de vidro; T3 = quatro camadas de reforço de fibra de vidro.

O aumento da ME_b dos painéis LVL foi proporcional à adição dos componentes. Tratamentos que receberam maior número de camadas de fibra de vidro e resina de impregnação foram os que apresentaram maior aumento de ME_b . O tratamento testemunha com menor valor de ME_b entre os tratamentos, 0,64 g/cm³, apresenta valor que corresponde à massa específica dos painéis LVL de pinus encontrado na literatura.

Comparando o peso nominal com o peso real dos painéis, a diferença média entre estes pesos foi de 83 gramas, o que pode corresponder a perda de peso durante o processo de prensagem com uma perda de umidade das lâminas e das resinas utilizadas, pois considerou-se um valor aproximado de teor de sólidos destes.

Comparando a ME_b com os valores de ME_b após a prensagem (valor real), obteve-se uma diferença de porcentagem média de 10,9% como pode ser observado na tabela 12.

Tabela 12 – Comparação percentual entre a ME_b nominal e a ME_b real.

Tratamento		ME_b Nominal g/cm^3	ME_b real g/cm^3	Aumento da ME_b %
T		0,73	0,64	14,1
Eoóxi (E)	T1	0,80	0,73	9,6
	T2	0,85	0,77	10,4
	T3	0,87	0,80	8,6
Isoftálica (I)	T1	0,79	0,72	9,7
	T2	0,88	0,77	14,3
	T3	0,90	0,82	9,7

¹ Em que: T = testemunha; E = resina epóxi; I = resina isoftálica; T1 = uma camada de reforço de fibra de vidro; T2 = duas camadas de reforço de fibra de vidro; T3 = quatro camadas de reforço de fibra de vidro.

Para melhor visualização dos dados, foi elaborado o gráfico presente na figura 17, em que é possível observar e comparar os valores médios de $ME_{5\%}$ antes da prensagem com os valores médios nominais e valores médios reais da ME_b após a prensagem.

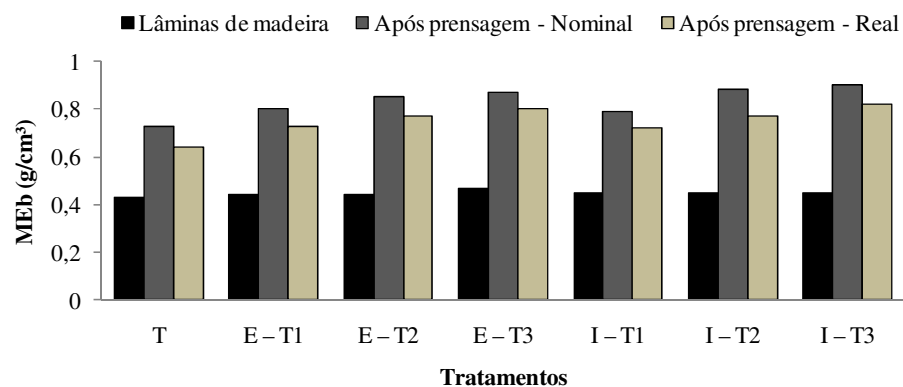


Figura 17 – ME_b das lâminas, dos painéis LVL após prensagem, nominal e real.

4.2 Flexão estática na posição *flatwise*

4.2.1 Módulo de elasticidade (MOE)

Os valores máximo, médio e mínimo do MOE na posição *flatwise* para os painéis LVL e para os compósitos são apresentados na tabela 13, juntamente com os valores do coeficiente de variação de cada tratamento, assim como a comparação das médias dos tratamentos pelo método LSD ao nível de 5% de probabilidade de erro.

Tabela 13 – Valores máximo, médio e mínimo do MOE, coeficiente de variação e comparação das médias dos tratamentos.

MOE						
Posição <i>flatwise</i>						
Tratamento		Máximo kgf/cm ²	Médio kgf/cm ²	Mínimo kgf/cm ²	CV %	Teste de médias
T		62666	50768	43675	13,7	A
Epóxi (E)	T0	102832	98021	93210	6,9	D
	T1	80945	61839	47929	18,2	B
	T2	84761	69749	58966	12,5	B C
	T3	70328	65065	55552	8,2	B
Isoftálica (I)	T0	93818	83062	72306	18,3	C D
	T1	77171	67225	59766	10,7	B
	T2	82882	71374	56470	14,5	B C
	T3	84923	69783	57964	14,1	B C

¹ Em que: T = testemunha; E = resina epóxi; I = resina isoftálica; T0 = compósito de fibra de vidro; T1 = uma camada de reforço de fibra; T2 = duas camadas de reforço de fibra de vidro; T3 = quatro camadas de reforço de fibra de vidro.

² Letras maiúsculas comparam as médias entre os tratamentos, onde letras iguais indicam que os tratamentos não diferem estatisticamente ao nível de 5% de probabilidade pelo método LSD.

Através da análise dos valores médios do MOE, pode-se classificar os tratamentos em A, B, C e D, em que o menor valor do MOE foi encontrado no tratamento testemunha (T) o qual se diferenciou dos demais tratamentos. O maior valor de MOE foi registrado no compósito de fibra de vidro com resina epóxi (E – T0) o qual também se diferenciou dos demais tratamentos de LVL, mas não se diferenciou do compósito de fibra de vidro com resina isoftálica (I – T0). Esse também não se diferenciou dos tratamentos E – T2, I – T2 e I – T3, os quais

se enquadraram nas médias C. No entanto, todos os tratamentos de LVL, com excessão do testemunha (T) não se diferenciaram estatisticamente ao nível de 5% de probabilidade de erro. O intervalo de confiança para os valores da média do MOE dos tratamentos LVL e dos compósitos estão representados em forma de gráfico na figura 18.

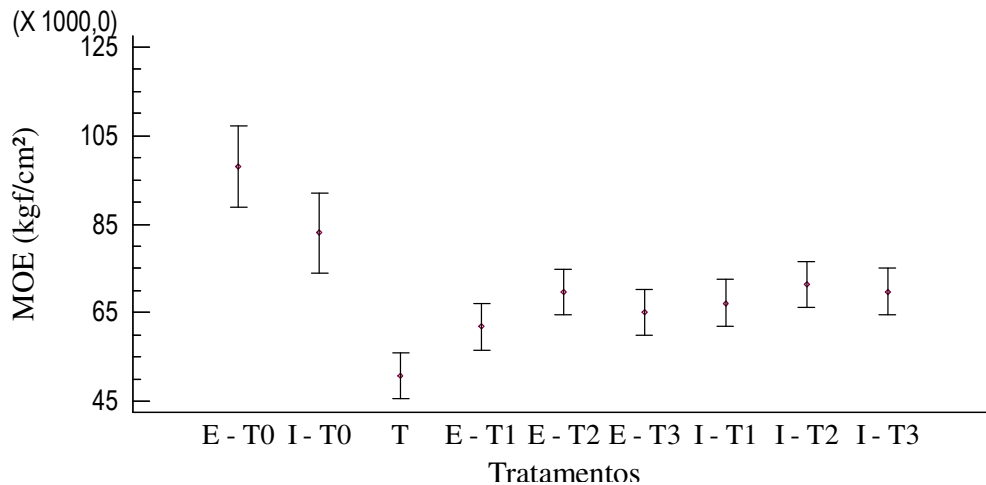


Figura 18 – Intervalo de confiança para as médias do MOE dos compósitos e dos painéis LVL.

Esperava-se como resultado desta pesquisa um aumento significativo do valor do MOE com o acréscimo do número de camadas de reforço. Porém, este resultado não foi observado na análise dos dados, sendo que os tratamentos que se diferenciaram, ao nível de 5% de probabilidade de erro, foram o testemunha, o qual não recebeu camadas de reforço, e os compósitos que possuíam apenas camadas de fibra de vidro e resina.

Outro resultado que era esperado, mas contrapôs-se à previsão, foi o de que as resinas utilizadas na impregnação da fibra de vidro fossem se diferenciar na rigidez do LVL, pelo fato de a resina epóxi ter como característica uma maior rigidez se comparada à resina isoftálica. No entanto, uma maior quantidade de resina isoftálica foi utilizada na impregnação da fibra de vidro, valor 25% superior ao peso da resina epóxi, o que pode ter favorecido a igualdade da rigidez.

Como não houve uma seleção criteriosa na escolha das árvores para a laminação, o baixo valor do MOE pode ter sofrido influência da presença do lenho juvenil, já que foram laminadas três árvores com idade em torno de 12 anos. Outro fator que pode ter influenciado na qualidade da lâmina de madeira é o fato de as árvores laminadas não serem provenientes

de plantios homogêneos, em sua condução não foram aplicados métodos silviculturais e o crescimento não sofreu influência do manejo, importante para a obtenção de madeiras de qualidade.

4.2.2 MOE em função da ME_b na posição *flatwise*

A relação entre MOE e ME_b dos tratamentos foi analisada em três partes: uma análise apenas com os corpos de prova que receberam reforço de fibra de vidro com resina epóxi, outra análise para os corpos de prova reforçados com fibra de vidro e resina isoftálica, e uma última análise com todos os tratamentos, ou seja, LVLs com reforço de fibra de vidro e resina epóxi, LVLs com reforço de fibra de vidro e resina isoftálica e os LVLs testemunha, composto apenas por lâminas de madeira.

A figura 19 apresenta o gráfico da relação do MOE x ME_b dos tratamentos reforçados com fibra de vidro com resina epóxi (E – T1, E – T2 e E – T3) e com resina isoftálica (I – T1, I – T2 e I – T3). Na mesma figura, é mostrada a equação do modelo de regressão linear e o coeficiente de determinação (R^2) para os tratamentos que foram significativos ao nível de 5% de probabilidade de erro.

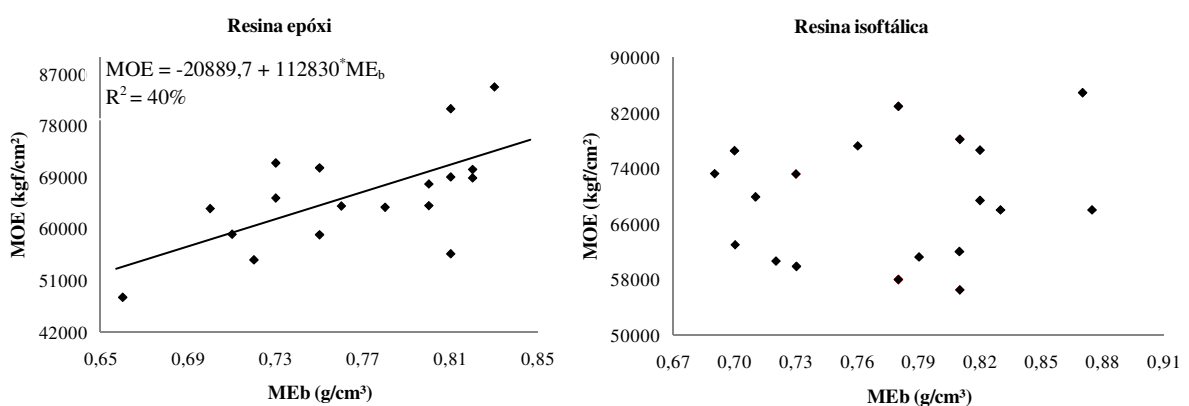


Figura 19 – MOE em função da ME_b dos painéis LVL reforçados com fibra de vidro com resina epóxi e com resina isoftálica na posição *flatwise*.

Nos três tratamentos utilizando a resina epóxi como agente impregnante da fibra de vidro encontrou-se relação entre MOE e a ME_b . No entanto, essa relação foi baixa

($R^2 = 40\%$), mas de forma significativa. Pode-se entender que houve um aumento do MOE proporcional ao aumento da ME_b . Os tratamentos com resina isoftálica não apresentaram relação do MOE com a ME_b . A dispersão dos valores para os tratamentos com resina isoftálica, mostra claramente que não houve um aumento no MOE proporcional ao aumento na ME_b .

Já no caso dos valores dos tratamentos com resina epóxi e resina isoftálica quando analisados juntamente com os dados do tratamento testemunha foi possível encontrar relação entre MOE e a ME_b ($R^2 = 36,5\%$), de forma significativa ao nível de probabilidade de erro de 5%.

A figura 20 mostra graficamente a relação entre o MOE x ME_b de todos os tratamentos. Juntamente com o gráfico estão a equação de ajuste da regressão e seu coeficiente de determinação. Para identificar a dispersão dos valores de cada tratamento, estes foram representados com formas geométricas e com cores diferentes.

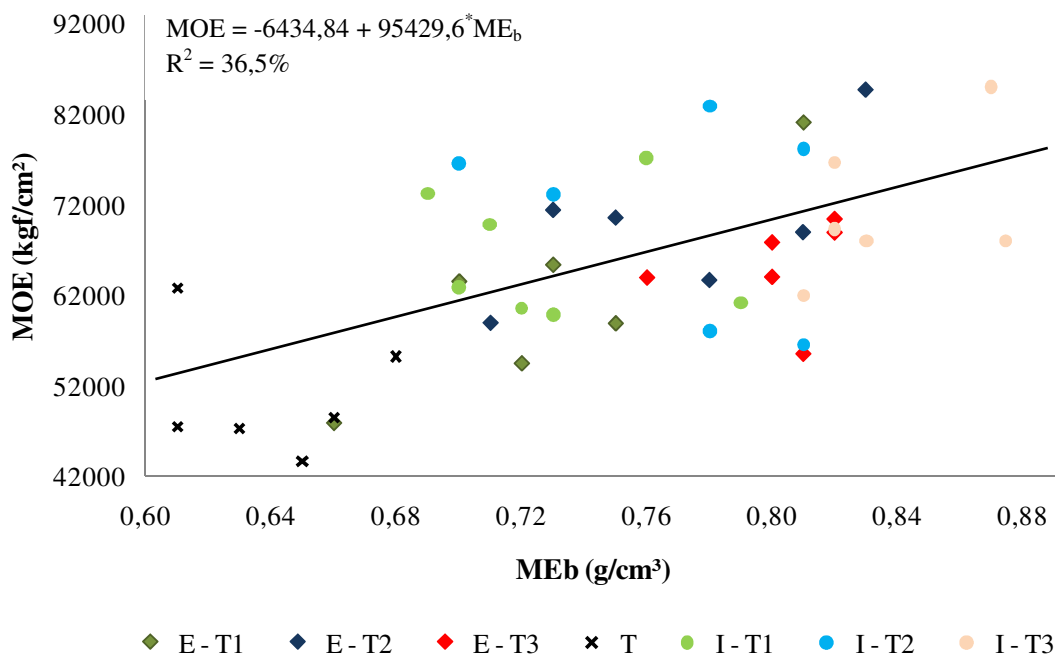


Figura 20 – MOE em função da ME_b para os sete tratamentos em estudo na posição *flatwise*.

Para explicar a dificuldade de localização dos dados, pode ser tomado como exemplo o tratamento I – T2, em que seus valores estão presentes em diferentes pontos do gráfico. Esse comportamento se estende aos demais tratamentos presentes no gráfico, explicando o baixo

coeficiente de determinação (36,5%) visto que este parâmetro expressa a relação entre o MOE e a ME_b dos tratamentos.

4.2.3 Módulo de ruptura (MOR)

Os valores máximo, médio, mínimo do MOR obtidos no teste de flexão estática na posição *flatwise* são apresentados na tabela 14. Na mesma tabela, foram adicionados o coeficiente de variação e a comparação das médias de cada tratamento (LVL e compósito) pelo método LSD ao nível de 5% de probabilidade de erro. Os valores das médias e as amplitudes entre máximo e mínimo dos tratamentos LVL e dos compósitos são apresentados na figura 21.

Tabela 14 – Valores máximo, médio e mínimo do MOR, coeficiente de variação e comparação das médias dos tratamentos.

MOR						
Posição <i>Flatwise</i>						
Tratamento		Máximo kgf/cm ²	Médio kgf/cm ²	Mínimo kgf/cm ²	CV %	Teste de médias
Resina	T	897	776	668	11,2	A
Epóxi (E)	T0	2489	2428	2367	3,5	E
	T1	1186	1003	876	10,4	B C
	T2	1203	1060	903	11,1	B C D
	T3	1228	1118	997	8,1	C D
Isoftálica (I)	T0	2289	2097	1905	12,9	F
	T1	1095	947	831	11,1	B
	T2	1284	1174	1113	5,6	D
	T3	1195	1130	1070	5,0	D

¹ Em que: T = testemunha; E = resina epóxi; I = resina isoftálica; T0 = compósito de fibra de vidro; T1 = uma camada de reforço de fibra; T2 = duas camadas de reforço de fibra de vidro; T3 = quatro camadas de reforço de fibra de vidro.

² Letras maiúsculas comparam as médias entre os tratamentos, onde letras iguais indicam que os tratamentos não diferem estatisticamente ao nível de 5% de probabilidade pelo método LSD.

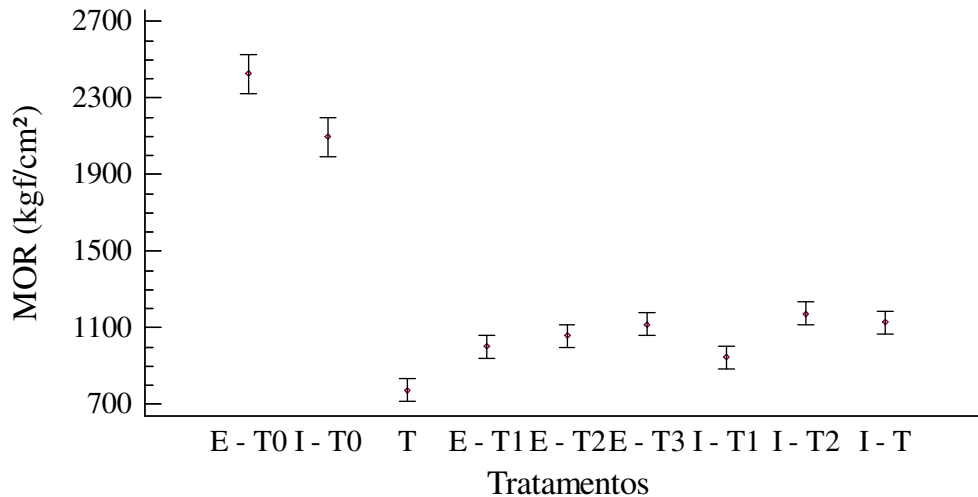


Figura 21 – Intervalo de confiança para as médias do MOR na posição *flatwise*.

Os valores médios do MOR dos tratamentos foram classificados em A, B, C, D, E e F. Como no caso do MOE, o menor valor do MOR foi encontrado no tratamento testemunha (T), que se diferenciou dos demais tratamentos. Os maiores valores de MOR foram encontrados para os compósitos de fibra de vidro com resina epóxi (E – T0) e com resina isoftálica (I – T0) os quais pertenceram a grupos distintos (E e F), diferenciando-se dos tratamentos de L-VL. Os tratamentos E – T1, E – T2 e I – T1 não se diferenciaram estatisticamente entre si, no entanto seus valores se diferenciaram dos tratamentos E – T3, I – T2 e I – T3. Esses formaram as médias CD e D os quais não se diferenciaram estatisticamente ao nível de 5% de probabilidade do erro.

Os tipos de resina utilizados na impregnação do reforço não se diferenciaram, estatisticamente, ao nível de 5% de probabilidade de erro entre os tratamentos. Já o número de camadas de reforço de fibra de vidro influenciou nos valores do MOR, tratamentos com duas e quatro camadas de fibra de vidro tiveram valores maiores e se diferenciaram estatisticamente.

Fiorelli (2002) estudou a influência do reforço de fibra de vidro em vigas de madeira laminada colada (MLC) e concluiu que a percentagem máxima de fibra que deve ser utilizada em MLC é de 3,3% em relação à altura da peça, pois, a partir desse limite, o autor comenta que o aumento de resistência e de rigidez não é significativo.

Miotto e Dias (2006) comentam, em pesquisa sobre reforços e recuperação de estruturas de madeira, que o reforço de fibra de vidro faz com que haja uma grande plastificação da região comprimida das vigas, causando grandes deslocamentos verticais na fase de ruptura. Assim, viga composta apenas por madeira é tipicamente frágil, se comparada com a ruptura

de uma viga de madeira apropriadamente reforçada com fibras no lado tracionado, a qual suporta um maior grau de deformação até o momento de sua fratura.

Os painéis reforçados com uma camada de fibra de vidro, tanto com resina epóxi quanto com resina isoftálica, apresentaram um acréscimo de 35% no valor da resistência da quando comparados com a testemunha sem reforço. Os tratamentos com duas camadas de reforço, com ambas as resinas de impregnação, apresentaram um aumento de resistência de 44% em relação ao tratamento testemunha. Aumento da resistência de 45% foi encontrado para os tratamentos com quatro camadas de reforço impregnadas com resina epóxi e resina isoftálica.

Miotto (2009) encontrou acréscimo nos valores do MOR de 28% para vigas de madeira e concreto reforçadas com fibra de vidro e resina epóxi, e acréscimo de 42% para vigas de MLC reforçadas com fibra de vidro impregnadas com resina epóxi. O autor comenta que a inserção do reforço de fibras de vidro apresenta a vantagem de redução nas tensões de tração das lâminas inferiores da MLC que, segundo o pesquisador, traduz-se em economia de madeira.

4.2.4 MOR em função da ME_b na posição *flatwise*

A relação do MOR com a ME_b também foi analisada separadamente para os tratamentos com reforço de fibra de vidro e resina epóxi, para os tratamentos reforçados com fibra de vidro e resina isoftálica e para o conjunto de dados de todos os sete tratamentos estudados.

O gráfico da análise de regressão linear múltipla dos dados do MOR x ME_b dos tratamentos reforçado com fibra de vidro e resina epóxi (E – T1, E – T2 e E – T3) e fibra de vidro com resina isoftálica (I – T1, I – T2 e I – T3), juntamente com a equação do modelo ajustado que melhor representa a dispersão dos dados, e o coeficiente de determinação (R^2), são apresentados na figura 22.

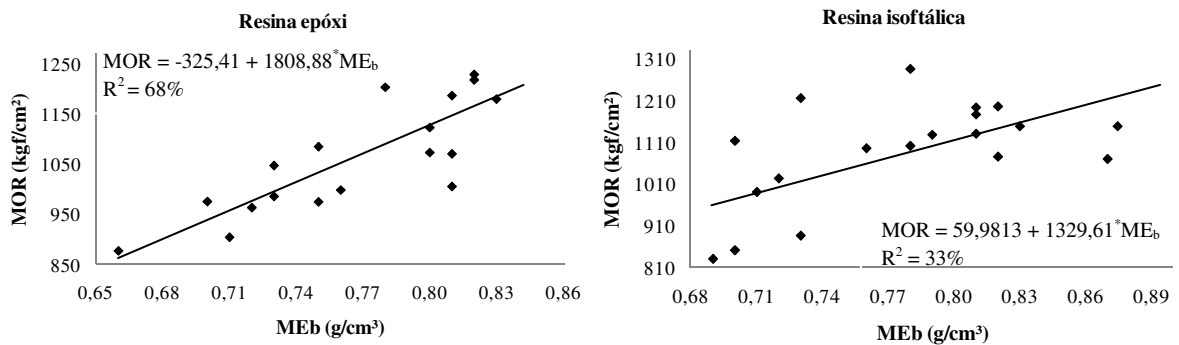


Figura 22 – MOR em função da ME_b dos painéis LVL reforçados com fibra de vidro com resina epóxi e com resina isoftálica na posição *flatwise*.

O coeficiente de determinação foi de 68% de forma significativa para os tratamentos com resina epóxi. Este valor de R^2 explica melhor a relação entre o MOR e a ME_b quando comparado aos valores de MOE em relação a ME_b de 40% (Figura 19).

Quando os tratamentos de resina isoftálica como impregnante da fibra vidro foram analisados, no teste média para valores de MOR, estes não mostraram diferença significativa ao nível de 5% de probabilidade de erro em relação às médias dos tratamentos com resina epóxi. Porém, quando o MOR foi analisado em relação à ME_b nos tratamentos com resina epóxi, estes apresentaram uma melhor relação quando comparada com o coeficiente de determinação da resina isoftálica, explicado pelo coeficiente de determinação de 33%.

Os valores de MOR foram mais estáveis, quando comparados com os valores anteriormente apresentados do MOE x ME_b para os tratamentos que utilizaram a resina isoftálica como agente impregnante, em que não foi detectada diferença significativa ao nível de 95% de confiança. Esta explicação é melhor compreendida quando observada a representação gráfica do MOR x ME_b apresentada na figura 23. Neste gráfico, diferentemente da figura 20, os grupos de valores dos tratamentos estão mais agrupados. Essa menor dispersão pode ser comprovada pelo coeficiente de determinação de 66,5%.

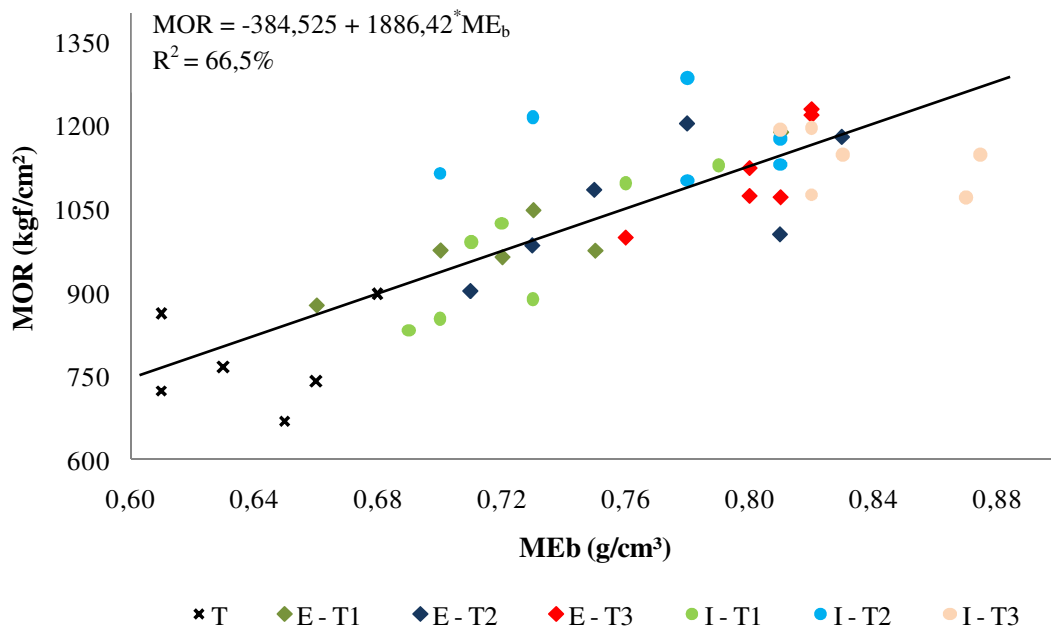


Figura 23 – MOR em função da ME_b para os sete tratamentos em estudo na posição *flatwise*.

O modelo explica melhor a relação entre MOR em relação a ME_b quando comparada com o modelo do MOE em relação a ME_b para os painéis LVL com epóxi.

Os tratamentos E – T3 e I – T3 apresentam, pelo que pode ser observado no gráfico, o melhor agrupamento dos dados, maiores valores de MOR para maiores valores de ME_b, o que caracteriza uma forte influência das camadas de reforço na resistência do painel LVL. A importância do reforço de fibra de vidro é confirmada, principalmente, quando os valores destes dois grupos são comparados com os valores do tratamento testemunha, que formou um grupo disperso, afastado dos grupos de dados dos demais tratamentos. Tal resultado está de acordo com o referido por Miotto (2009), que cita como outra vantagem do uso da fibra de vidro como refoço de estruturas, a diminuição na dispersão dos resultados do MOR.

4.2.5 Relação do MOR com o MOE na posição *flatwise*

A relação entre os valores do MOR em função do MOE, obtida dos corpos de prova LVL nos quais foram realizados os testes de flexão estática na posição *flatwise*, está apresentada na figura 24.

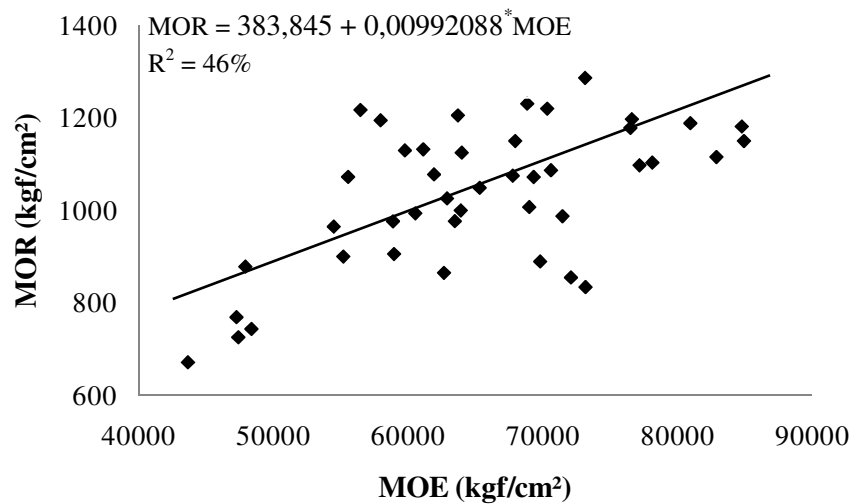


Figura 24 – MOR em função do MOE para os sete tratamentos em estudo na posição *flatwise*.

Através da análise de regressão dos valores do MOR em função do MOE foi encontrada a relação significativa a 95% de probabilidade cujo modelo apresentou R² de 46%.

Esta relação já era um resultado esperado, pois, teoricamente, deve ocorrer uma certa proporcionalidade: à medida que aumenta o valor de MOE, conseqüentemente, haverá aumento do valor do MOR.

Porém, observando a dispersão dos dados dos sete tratamentos, nota-se certa desproporcionalidade entre os dados do MOE x MOR. Em alguns valores, o MOE foi maior para baixos valores de MOR e, em outros casos, ocorreu um baixo valor de MOE para altos valores de MOR. Por esse motivo, o modelo ajustado pode explicar apenas 46% (R²) da variabilidade do MOE, de forma estatisticamente significativa ao nível de 5% de probabilidade de erro.

4.3 Flexão estática na posição *edgewise*

4.3.1 Módulo de elasticidade (MOE)

Os valores máximo, médio e mínimo do MOE na posição *edgewise* estão representados na tabela 15. Nesta tabela, também é apresentado o coeficiente de variação de cada trata-

mento, assim como a comparação das médias dos tratamentos pelo método LSD ao nível de 5% de probabilidade do erro. A representação gráfica dos valores máximo, médio e mínimo do MOE está ilustrada na figura 25.

Tabela 15 – Valores máximo, médio e mínimo do MOE, coeficiente de variação e comparação das médias dos tratamentos.

		MOE				
		Posição <i>edgewise</i>				
Tratamento		Máximo kgf/cm ²	Médio kgf/cm ²	Mínimo kgf/cm ²	CV %	Teste de médias
T		45133	43417	40426	4,3	A
Epóxi (E)	T1	51477	47856	40421	8,8	A B
	T2	54478	51085	46398	7,5	B C
	T3	56081	49923	44492	10,2	B C
Isoftálica (I)	T1	57580	51386	43283	11,2	B C
	T2	54257	49566	39749	11,1	B
	T3	59247	55319	49521	7,0	C

¹ Em que: T = testemunha; E = resina epóxi; I = resina isoftálica; T1 = uma camada de reforço de fibra; T2 = duas camadas de reforço de fibra de vidro; T3 = quatro camadas de reforço de fibra de vidro.

² Letras maiúsculas comparam as médias entre os tratamentos, onde letras iguais indicam que os tratamentos não diferem estatisticamente ao nível de 5% de probabilidade pelo método LSD.

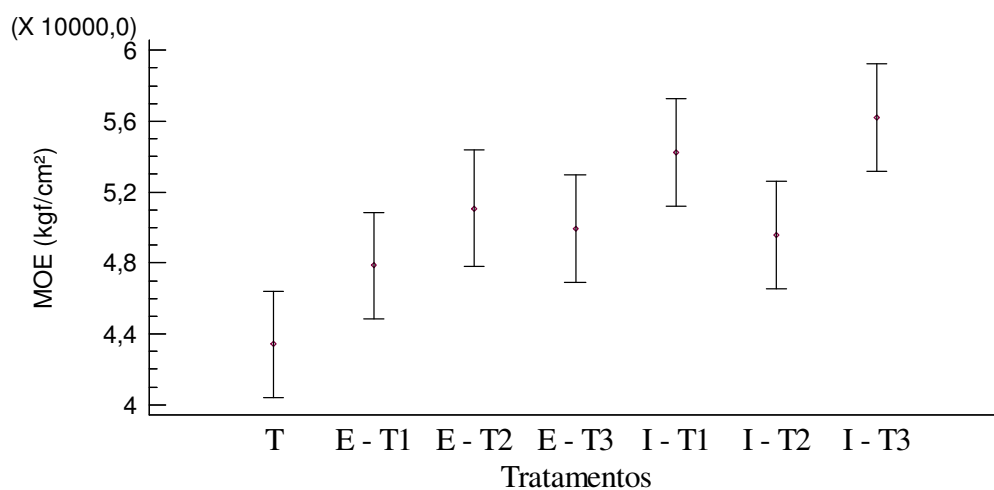


Figura 25 – Intervalo de confiança dos valores médios do MOE dos painéis LVL na posição *edgewise*.

As médias do MOE se classificaram em A, B e C. Nas médias “A” se enquadraram os tratamentos testemunha e o tratamento E – T1, este último não se diferenciou estatisticamente ao nível de 5% de probabilidade de erro dos tratamentos E – T2, E – T3, I – T1 e I – T2. O tratamento I – T3 apresentou a maior média, no entanto, não se diferenciou dos tratamentos I – T1, E – T3 e E – T2.

Nos valores de MOE na posição *edgewise*, assim como nos valores na posição *flatwise*, não foi observada a ideia de que quanto maior o número de camadas de reforço, maior será o valor do MOE. Por exemplo, tratamentos que receberam quatro camadas de fibra de vidro e, conseqüentemente, quatro camadas de resina, não se diferenciaram estatisticamente de tratamentos que receberam apenas uma camada de fibra de vidro.

Teoricamente, o reforço de fibra de vidro, assim como o tipo de resina utilizada na sua impregnação, não teriam influência sobre o MOE nos diferentes tratamentos, pois a carga, durante o teste, é aplicada nos corpos de prova posicionados no sentido vertical das lâminas de madeira. Assim, a variável que poderia influenciar nos valores do MOE seria a massa específica dos corpos de prova.

Müller (2009) explica que na posição *edgewise*, para uma determina faixa ortogonal às camadas, todas as porções das lâminas e reforços utilizadas no painel apresentam igual distância da linha neutra, independentemente das posições que a lâmina ou reforço ocupam, todas elas estão submetidas a uma mesma tensão de tração. Assim, segundo o autor, a resistência à tração do conjunto, na referida faixa ortogonal, é determinada por meio da somatória das resistências das lâminas e dos reforços componentes do painel LVL, relativa às áreas de seção transversal dessas lâminas e à distância dessa faixa em relação à linha neutra.

4.3.2 MOE em função da ME_b na posição *edgewise*

Nas figuras 26 estão apresentados os gráficos da dispersão dos dados dos tratamentos com resina epóxi (E – T1, E – T2 e E – T3) e dos tratamentos com resina isoftálica (I – T1, I – T2 e I – T3).

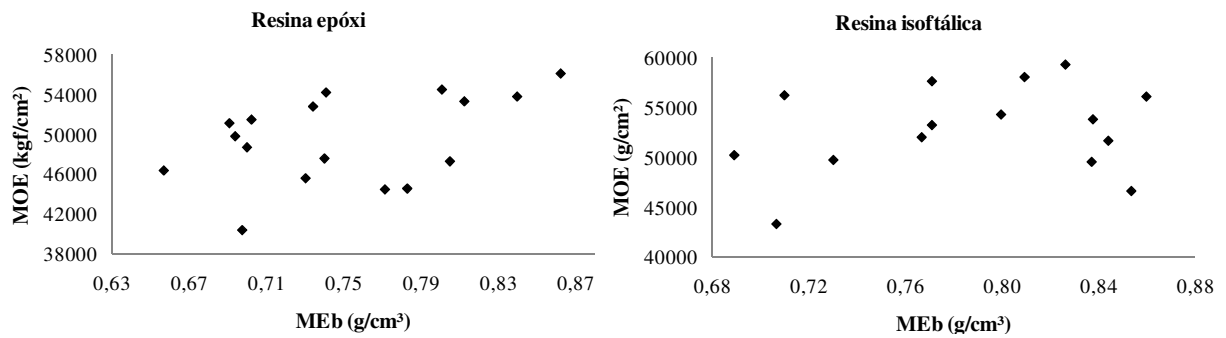


Figura 26 – Dispersão dos valores de MOE em função da ME_b dos painéis LVL reforçados com fibra de vidro com resina epóxi e com resina isoftálica testados na posição *edgewise*.

Não foi encontrada relação entre os valores de MOE em função da ME_b para os tratamentos utilizando reforço de fibra de vidro com resina epóxi e com resina isoftálica no ensaio de flexão estática na posição de maior momento de inércia (*edgewise*), em que as lâminas estão posicionadas verticalmente na máquina universal de ensaios.

A teoria de que o aumento dos valores do MOE na posição *edgewise* seria proporcional ao aumento dos valores de massa específica não foi confirmada para o conjunto de dados de MOE dos tratamentos que receberam os reforços de fibra de vidro com resinas em diferentes camadas e quantidades.

No entanto, analisando o conjunto de todos os dados de MOE e ME_b do tratamento testemunha, dos tratamentos com camadas de fibra de vidro com resina epóxi e dos tratamentos com camadas de fibra de vidro com resina isoftálica, pode-se encontrar relação entre o MOE e ME_b. A dispersão dos dados, o modelo ajustado e coeficiente de determinação ajustado são apresentados na figura 27.

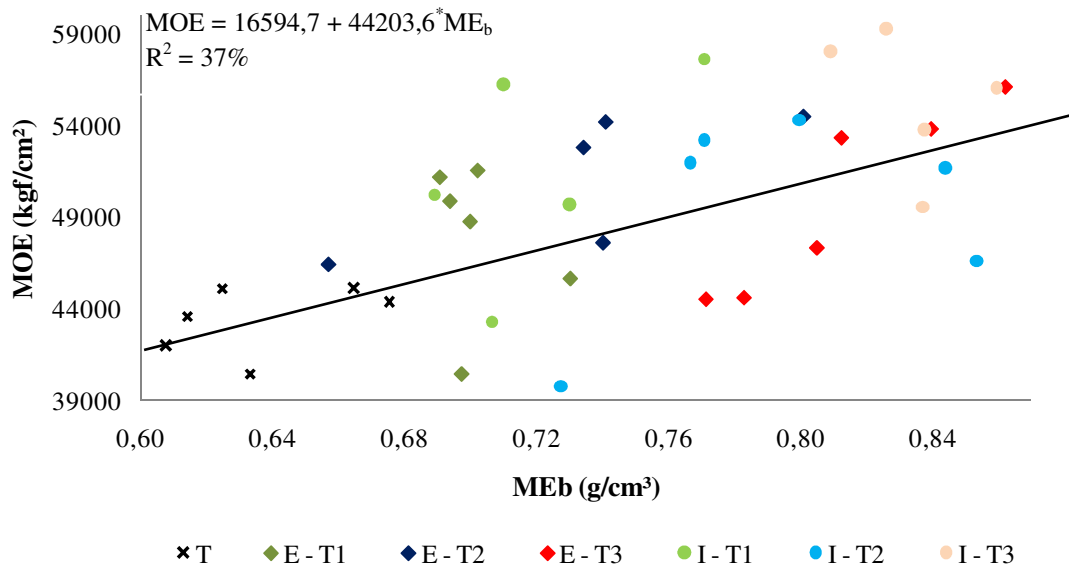


Figura 27 – MOE em função da ME_b para os sete tratamentos em estudo na posição *edgewise*.

Os valores do MOE em relação aos valores da ME_b foi significativa para a probabilidade de confiança de 95%. Quando separados em grupos de tratamento, não ocorreu relação entre a resina epóxi e a resina isoftálica. Porém, quando esses foram analisados em conjunto, encontrou-se relação entre os dados, confirmando a teoria de que há relação entre o MOE obtido pelo teste de flexão na posição *edgewise* com a massa específica dos corpos de prova.

Analisando visualmente os tratamento expostos no gráfico, pode-se observar que nenhum dos tratamentos apresentou característica; por exemplo, ao analisar os tratamentos I – T2 e E – T2, nota-se que estes apresentam valores dispersos, o que contribuiu para o baixo coeficiente de determinação encontrado.

4.3.3 Módulo de ruptura (MOR)

A tabela 10 mostra os valores máximo, médio, mínimo, o coeficiente de variação e a comparação das médias dos tratamentos pelo método LSD do MOR, obtidos no teste de flexão estática na posição *edgewise*. Na figura 28 está a representação gráfica das médias, mostrando a amplitude dos valores de MOR nos sete tratamentos estudados.

Tabela 16 – Valores máximo, médio e mínimo do MOR, coeficiente de variação e comparação das médias dos tratamentos.

MOR						
Posição <i>edgewise</i>						
Tratamento		Máximo kgf/cm ²	Médio kgf/cm ²	Mínimo kgf/cm ²	CV %	Teste de médias
T		827	738	639	10,5	A
Epóxi (E)	T1	916	773	654	13,8	B
	T2	998	888	750	12,0	C
	T3	980	886	795	9,5	C
Isoftálica (I)	T1	1047	945	872	9,1	C
	T2	1019	901	837	8,2	C
	T3	1086	995	899	8,5	C

¹ Em que: T = testemunha; E = resina epóxi; I = resina isoftálica; T1 = uma camada de reforço de fibra; T2 = duas camadas de reforço de fibra de vidro; T3 = quatro camadas de reforço de fibra de vidro.

² Letras maiúsculas comparam as médias entre os tratamentos, onde letras iguais indicam que os tratamentos não diferem estatisticamente ao nível de 5% de probabilidade pelo método LSD.

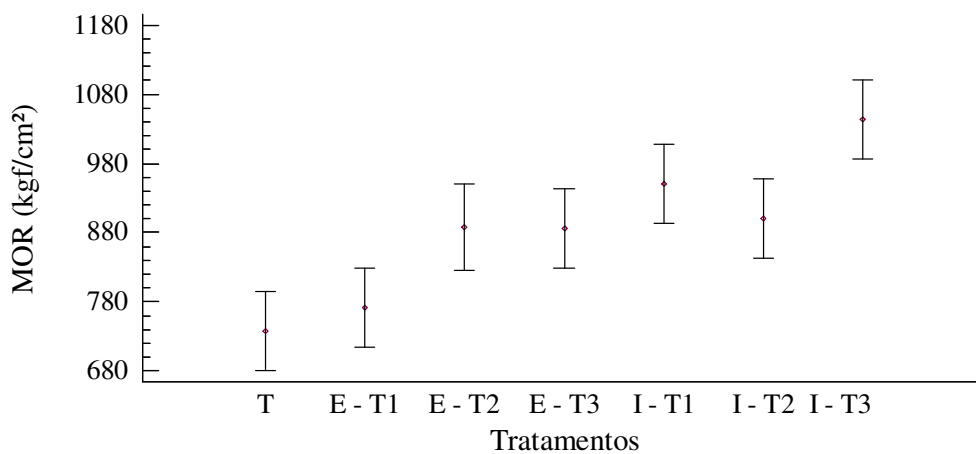


Figura 28 – Intervalo de confiança para os valores médios do MOR para cada tratamento em estudo na posição *edgewise*.

A partir da análise de variância, obtiveram-se os valores médios do MOR dos sete tratamentos, os quais foram classificados em A, B e C. O tratamento testemunha (T) apresentou a menor média de MOR e foi enquadrado como A, diferenciando-se dos demais tratamentos. O B foi representado pelo tratamento E – T1, que também se diferenciou dos demais tratamentos. Os tratamentos que receberam reforço de fibra de vidro com resina epóxi ou isoftá-

lica, com excessão do tratamento E – T1, formaram as médias wue não se diferenciaram estatisticamente ao nível de 5% de probabilidade de erro.

4.3.4 MOR em função da ME_b na posição *edgewise*

Na figura 29, estão representados os dados de MOR x ME_b obtidos no teste de flexão estática na posição *edgewise* para os tratamentos em que utilizou-se reforços com fibra de vidro impregnada com resina epóxi ou isoftálica.

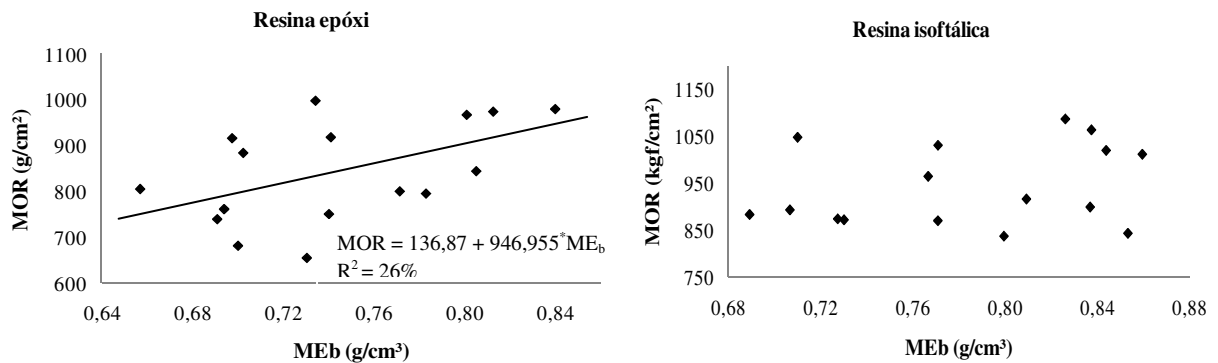


Figura 29 – MOR em função da ME_b dos painéis LVL reforçados com fibra de vidro com resina epóxi e com resina isoftálica na posição *edgewise*.

Quando os dados são analisados em conjunto (epóxi e isoftálica) foi possível encontrar modelo significativo entre o MOR e a ME_b com R^2 de 39% (Figura 30).

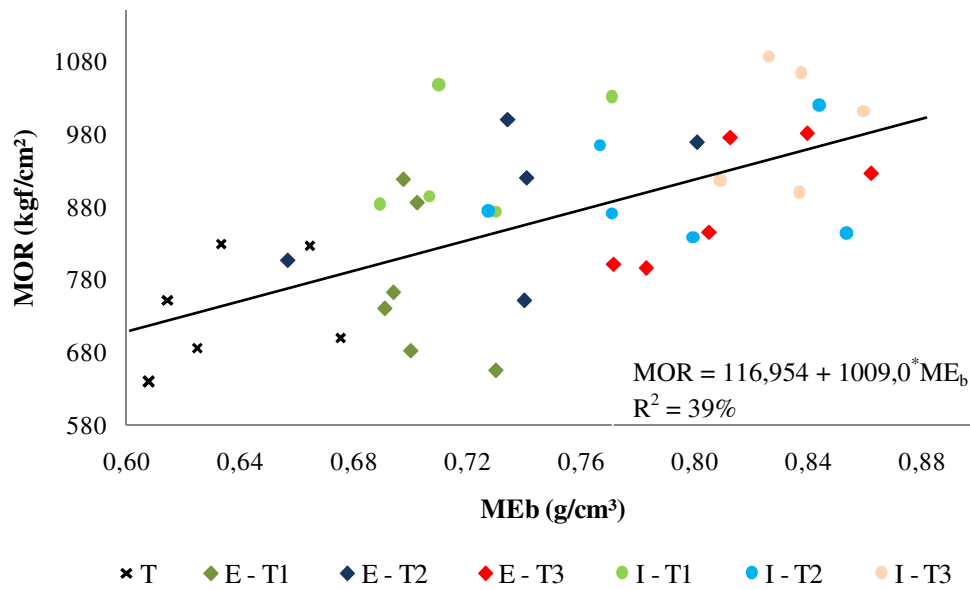


Figura 30 – MOE em função ME_b para os sete tratamentos em estudo testados na posição *edgewise*.

4.3.5 Relação do MOR em função do MOE para a posição *edgewise*

A relação entre os valores do MOE x MOR obtida para os corpos de prova LVL é apresentada graficamente na figura 31.

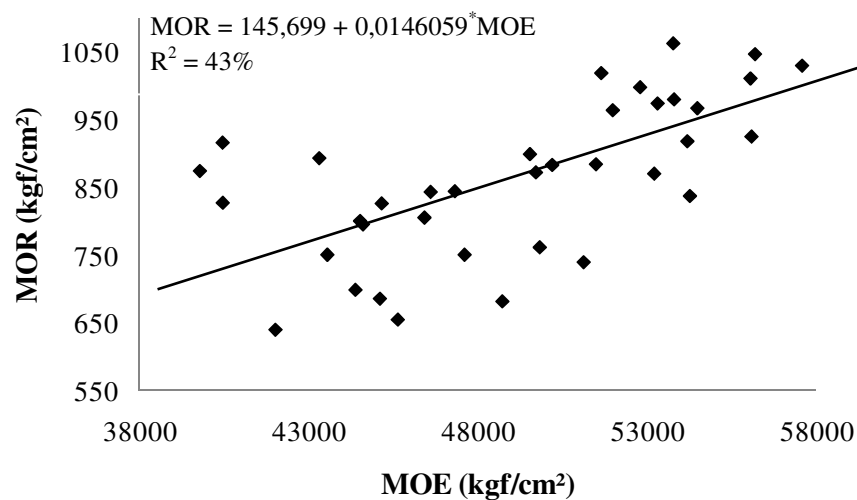


Figura 31 – MOR em função do MOE para a posição *edgewise*.

Comparando-se os modelos de MOR em função do MOE para as posições *flatwise* (Figura 24) e *edgewise* (Figura 31), nota-se que ambos apresentaram valores de coeficiente de determinação próximos, 46% e 43%, respectivamente, indicando proporcionalidade entre o aumento dos valores.

O aumento dos valores do MOE e do MOR nas posições de ensaio *edgewise* ocorreu com o acréscimo de uma camada de reforço de fibra de vidro, independentemente da resina utilizada. A análise de médias comprovou que o aumento do número de camadas de reforço e o uso de diferentes resinas para impregnação da fibra de vidro não alterou a rigidez e a resistência dos painéis. Dessa forma, o uso de apenas uma camada de reforço na contracapa do painel, tanto com resina epóxi como com resina isoftálica, é suficiente para aumentar os valores do MOE e do MOR do painel quando este for utilizado na posição *edgewise*.

4.4 Comparação do MOE e MOR nas posições de ensaio *flatwise* e *edgewise*

A tabela 17 apresenta a comparação entre os valores do MOE e do MOR para as duas posições de ensaio de flexão estática, *flatwise* e *edgewise*. Na mesma tabela apresenta-se a diferença entre as médias e o percentual das diferenças.

Tabela 17 – Valores médios, diferença entre os valores médios e percentual da diferença do MOE e do MOR nas posições de ensaio *flatwise* e *edgewise*.

Tratamento		Flexão estática				Flexão estática			
		MOE - kgf/cm ²				MOR - kgf/cm ²			
		<i>Flatwise</i> (A)	<i>Edgewise</i> (B)	(A - B)	% (A-B)/B	<i>Flatwise</i> (A)	<i>Edgewise</i> (B)	(A - B)	% (A-B)/B
T		50768	43417	7351	16,9	776	738	38	5,1
Epóxi (E)	T1	61839	47856	13983	29,2	1003	773	230	29,8
	T2	69749	51085	18664	36,5	1060	888	172	19,4
	T3	65065	49923	15142	30,3	1118	886	232	26,2
Isoftálica (I)	T1	67225	51386	15839	30,8	947	945	2	0,2
	T2	71374	49566	21808	44,0	1174	901	273	30,3
	T3	69783	55319	14464	26,1	1130	995	135	13,6

¹ Em que: T = testemunha; E = resina epóxi; I = resina isoftálica; T1 = uma camada de reforço de fibra; T2 = duas camadas de reforço de fibra de vidro; T3 = quatro camadas de reforço de fibra de vidro.

Os valores, tanto do MOE quanto do MOR, para a posição *edgewise*, foram menores do que os apresentados na posição *flatwise*. As maiores diferenças relativas ao MOE foram encontradas nos tratamentos que receberam duas camadas de reforço para as duas resinas testadas, ou seja, E – T2 e I – T2, com diferenças de 36,5% e 44%, respectivamente. Para o MOR, as maiores diferenças foram encontradas nos tratamentos de uma camada de fibra de vidro com resina epóxi, E – T1 com 29,8% de diferença, e para o tratamento com duas camadas de fibra de vidro com resina isoftálica, I – T2, com diferença percentual de 30,3. O tratamento I – T1 apresentou a menor diferença percentual (0,2) para o valor de MOR na posição *flatwise* subtraído pelo valor do MOR na posição *edgewise*.

Müller (2009) estudou as propriedades físico-mecânicas de painéis LVL confeccionados com 5 lâminas de *Eucalyptus saligna* e *Pinus taeda* em duas composições homogêneas e quatro composições mistas das duas espécies, totalizando seis tratamentos. O pesquisador encontrou médias de MOE e de MOR superiores na posição *flatwise* para os dois processos de fabricação, exceto para o MOE, quando utilizou lâminas de pinus na capa e contracapa com lâminas de eucalipto no interior do painel. A diferença percentual das médias entre os tratamentos variou de 4,47 a 66,75%, para as diferenças do MOE; e de 7,51 a 41,79% para as diferenças do MOR.

O mesmo autor explica que as maiores diferenças percentuais foram encontradas nos tratamentos que usaram como capa e contracapa as lâminas de eucalipto, aumentando consideravelmente as propriedades testadas, já que na posição *edgewise* a posição das lâminas não influenciaram na resistência do painel.

Não ocorreu grande variação percentual das médias dos valores do MOE observadas para os tratamentos que receberam o reforço de fibra de vidro, em que o menor valor registrado foi de 26,1%; e o maior, de 44%. Quando os mesmos tratamentos foram avaliados em função dos valores do MOR, a variação foi maior, com índice mínimo de 0,2% e máximo de 30,3%.

Bortolletto Junior (2009) determinou os valores das principais propriedades físico-mecânicas da madeira e do LVL de *Pinus merkussi*. O autor encontrou médias de MOE superior na posição *flatwise*, com percentual de 9,85% para os painéis de LVL. Para madeira sólida, o autor não encontrou diferença percentual entre as duas posições do ensaio de flexão estática.

4.5 MOE pelo método dinâmico - Ultrassom

A tabela 18 apresenta os valores médios de ME_b dos tratamentos, da velocidade de propagação do som obtida através da leitura com transdutores de ponto seco e transdutores de face plana, e o correspondente valor do MOE dinâmico dos corpos de prova dos diferentes tratamentos.

Tabela 18 – Valores da ME_b , velocidade ultrassonora, MOE dinâmico pelo ponto seco e face plana, teste de média e coeficiente de variação.

Tratamento		ME_b kg/m ³	Transdutor Ponto seco (s)		Transdutor Face plana (p)	
			Vsom m/s	MOE _s kgf/cm ²	V som m/s	MOE _p kgf/cm ²
T		713	2576	48422 _A ^{11,7}	3517	90147 _A ^{9,7}
Epóxi (E)	T0	1410	2384	81792 _C ⁻⁻	2851	116916 _{CD} ⁻⁻
	T1	798	2570	53844 _B ^{7,2}	3573	104289 _{BC} ^{10,3}
	T2	834	2606	57838 _B ^{8,2}	3799	122873 _D ^{7,3}
	T3	875	2479	53729 _B ^{3,8}	3502	107192 _{BC} ^{6,8}
Isoftálica (I)	T0	1420	2304	76886 _C ⁻⁻	2577	96250 _{ABC} ⁻⁻
	T1	792	2601	54515 _B ^{5,2}	3492	98165 _{AB} ^{3,8}
	T2	831	2560	55573 _B ^{5,7}	3485	103051 _{BC} ^{8,2}
	T3	875	2534	57401 _B ^{9,0}	3407	103617 _{BC} ^{6,1}

¹ Em que: T = testemunha; E = resina epóxi; I = resina isoftálica; T0 = compósito de fibra de vidro; T1 = uma camada de reforço de fibra; T2 = duas camadas de reforço de fibra de vidro; T3 = quatro camadas de reforço de fibra de vidro.

² Letras maiúsculas comparam as médias dos tratamentos, onde letras iguais indicam que os tratamentos não diferem estatisticamente ao nível de 5% de probabilidade de erro. Acima das letras encontra-se o coeficiente de variação (CV), onde E – T0 e I – T0 não apresentaram CV pois foram testado apenas um corpo de prova.

Com base nos resultados do MOE_s as médias foram enquadradas em A, B e C. O tratamento T com os menores valores médios de MOE foi enquadrado como A, e os demais tratamentos de LVL não se diferenciaram, estatisticamente, ao nível de 5% de probabilidade de erro. Os compósitos apresentaram as maiores médias de MOE_s, diferenciando-se de todos os demais tratamentos.

O MOE_p foi classificado nos valores médios: A, B, C e D. O menor valor foi registrado para o tratamento T, o qual não se diferenciou dos tratamentos I – T0 e I – T1, ao nível de 5% de probabilidade de erro. O maior valor foi encontrado para o tratamento E – T2, que não

se diferenciou estatisticamente do tratamento E – T0, e este último não se diferenciou dos demais tratamentos.

Como pode ser observado, obtiveram-se valores diferentes do MOE quando realizada a leitura com ponto seco e a leitura na face plana, pois cada transdutor utiliza um comprimento de onda diferente. Outro fator que pode ter influenciado foi o posicionamento dos transdutores, uma vez que o transdutor de ponto seco foi posicionado nos extremos dos corpos de prova, sem interferência dos reforços de fibra de vidro, apenas nas camadas de lâminas de madeira no sentido longitudinal, unidas com fenol-formaldeído.

O transdutor de face plana foi posicionado sobre a capa do painel no sentido transversal às lâminas de madeira e leitura superficial, sofrendo influência das camadas de reforços de fibra de vidro e da resina impregnante. Além disso, a variação dos valores do MOE_p entre os tratamentos pode ter sofrido influência do acabamento superficial dos painéis, em que a resina isoftálica apresentou rugosidades, influenciando na propagação da onda (Figura 32.a), já a resina epóxi apresentou um acabamento mais liso sobre o painel (Figura 32.b).

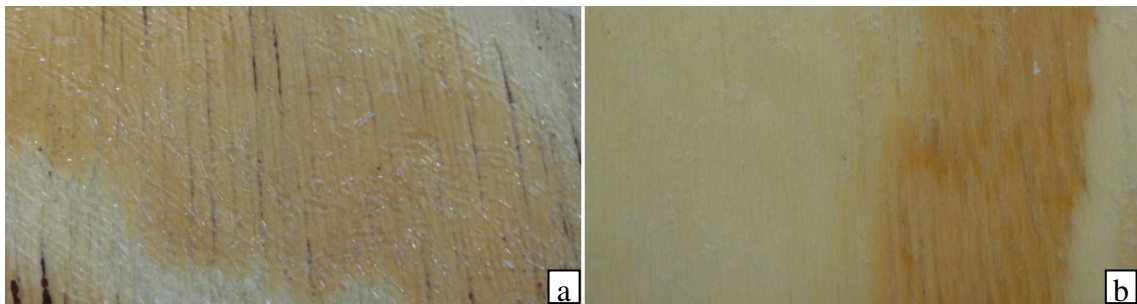


Figura 32 – Superfície do painel impregnado com resina. Resina isoftálica (a); Resina epóxi (b).

Calegari et al. (2008) afirmaram que a velocidade de propagação das ondas ultrassônicas está intrinsecamente relacionada com as propriedades elásticas dos materiais sólidos da madeira. O mesmo autor observa que, em relação à madeira sólida, muitos são os fatores que influenciam na propagação das ondas ultrassônicas, tais como: características anatômicas, teor de umidade, massa específica, inclinação e distorção da grã, nós, bem como tipo de transdutores e tamanho de amostra.

Mesmo com as diferenças entre os valores, a relação entre o MOE de ponto seco (MOE_s) e o MOE na face plana (MOE_p) foi significativa ao nível de 95% de confiança como pode ser observado no gráfico do modelo ajustado apresentado na figura 33.

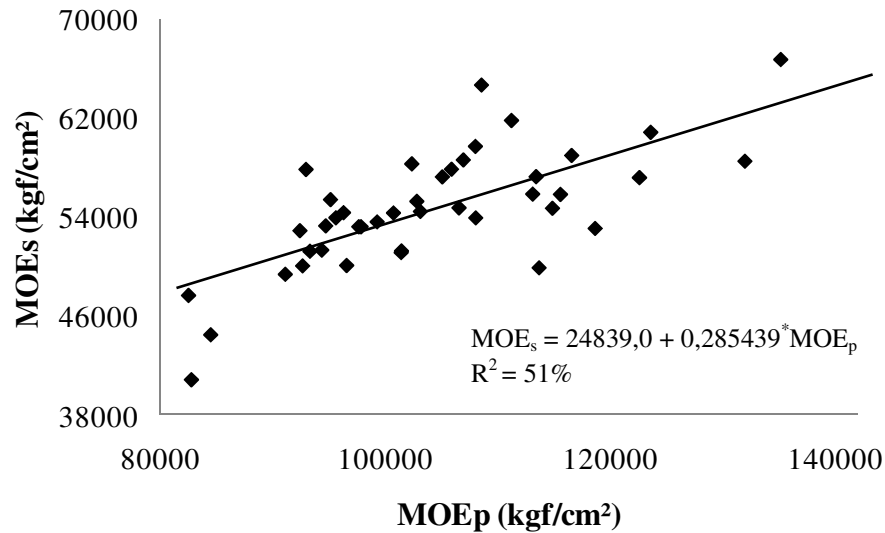


Figura 33 – MOEs em função do MOE_p dos painéis LVL reforçados com fibra de vidro e resina epóxi, e resina isoftálica.

Nesvijski (2003) afirma que transdutores de ponto seco não geram ondas direcionais, fazendo com que a velocidade de propagação diminua em relação aos transdutores de face plana. Além desse fator, Schneid et al. (2011) comentam que a forma, o material de fabricação e/ou o ângulo de inclinação do extensor de ondas também contribuem para a alteração do tipo de onda gerada pelo transdutor, alterando, com isso, sua velocidade.

Oliveira et al. (2003) citam que na vibração de uma espécie de madeira, a força elástica restaurada é proporcional ao deslocamento e a força dissipativa é proporcional à velocidade. Os autores ainda explicam que quando a força é aplicada com curta duração, o material se comporta como um sólido elástico, enquanto que para uma longa duração o comportamento é igual ao de um líquido viscoso.

Stangerlin et al. (2010) avaliam que o comportamento citado acima é mais proeminente no ensaio de flexão estática, que apresenta longa duração, se comparado ao ensaio de ultrassom. Dessa forma, os autores concluem que, em consequência de tal comportamento, a constante elástica dinâmica obtida em ensaio de ultrassom é, em geral, maior que o módulo de elasticidade em flexão estática.

A avaliação não destrutiva da madeira para os dois tipos de transdutores não é totalmente livre de erros, pois, segundo Carreira et al. (2006), as equações que regem o comportamento de cada uma destas técnicas consideram o material como sendo homogêneo, isotrópico e contínuo. Entretanto, a madeira apresenta descontinuidade das fibras devido ao processo de desdobro e por causa da presença de nós, é um material heterogêneo e anisotrópico.

4.5.1 Relação entre MOE estático x MOE dinâmico

O MOE estático obtido nos testes destrutivos de flexão estática na posição *flatwise* foi analisado em relação ao MOE dinâmico dos valores obtidos com transdutor de ponto seco e com transdutor de face plana. Estes valores estão expostos na tabela 19.

Tabela 19 – Valores do MOE estático e do MOE dinâmico do ponto seco e da face plana, teste de média e coeficiente de variação.

Tratamentos		MOE (kgf/cm ²)	MOE _s (kgf/cm ²)	MOE _p (kgf/cm ²)
Resina	T	50768 _A ^{13,7}	48422 _A ^{11,7}	90147 _A ^{9,7}
Epóxi (E)	T0	98021 _D ^{6,9}	81792 _C ⁻⁻	116916 _{CD} ⁻⁻
	T1	61839 _B ^{18,2}	53844 _B ^{7,2}	104289 _{BC} ^{10,3}
	T2	69749 _{BC} ^{12,5}	57838 _B ^{8,2}	122873 _D ^{7,3}
	T3	65065 _B ^{8,2}	53729 _B ^{3,8}	107192 _{BC} ^{6,8}
Isoftálica (I)	T0	83062 _{CD} ^{18,3}	76886 _C ⁻⁻	96250 _{ABC} ⁻⁻
	T1	67225 _B ^{10,7}	54515 _B ^{5,2}	98165 _{AB} ^{3,8}
	T2	71374 _{BC} ^{14,5}	55573 _B ^{5,7}	103051 _{BC} ^{8,2}
	T3	69783 _{BC} ^{14,1}	57401 _B ^{9,0}	103617 _{BC} ^{6,1}

¹ Em que: T = testemunha; E = resina epóxi; I = resina isoftálica; T0 = compósito de fibra de vidro; T1 = uma camada de reforço de fibra; T2 = duas camadas de reforço de fibra de vidro; T3 = quatro camadas de reforço de fibra de vidro. MOE = Módulo de elasticidade estático; MOE_s = Módulo de elasticidade dinâmico (ponto seco); MOE_p = Módulo de elasticidade dinâmico (face plana).

² Letras maiúsculas comparam as médias dos tratamentos, onde letras iguais que os tratamentos não diferem estatisticamente ao nível de 5% de probabilidade de erro; acima das letras encontra-se o coeficiente de variação (CV), onde E – T0 e I – T0 não apresentaram CV pois foi testado apenas um corpo de prova.

A figura 34 apresenta a relação entre o MOE estático, definido apenas como MOE, e o MOE_p (face plana). A análise de regressão mostrou que há correlação entre as duas variáveis, ao nível de 5% de probabilidade de erro.

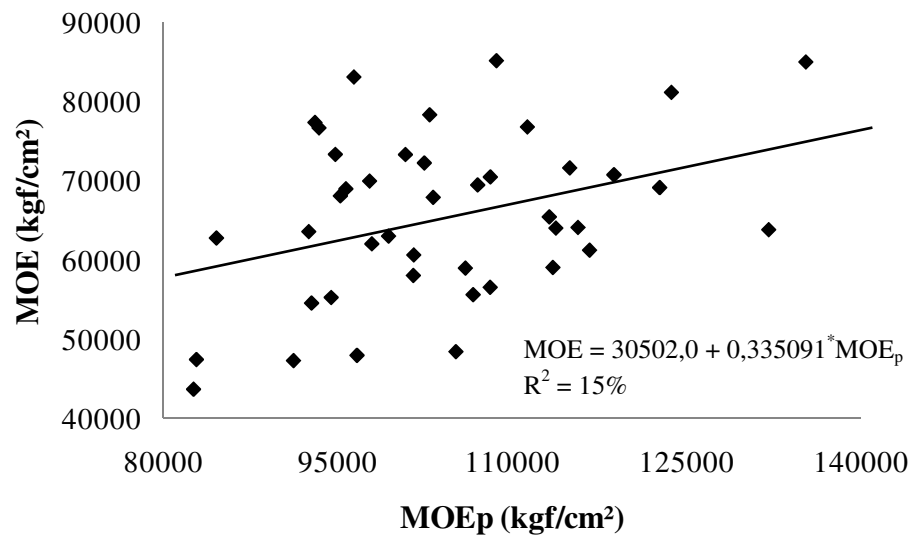


Figura 34 – MOE em função do MOE_p para os sete tratamentos em estudo.

A relação entre o MOE x MOE_s (ponto seco) também foi significativa a 5% de probabilidade de erro. A figura 35 apresenta o gráfico da análise de regressão, com a correspondente equação de ajustamento da reta e o coeficiente de determinação ajustado.

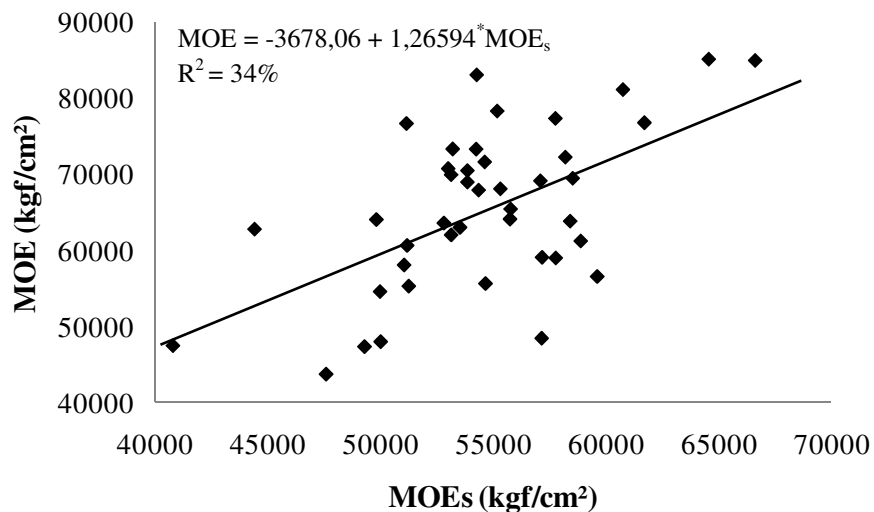


Figura 35 – MOE em função do MOE_s para os sete tratamentos em estudo.

4.6 Dureza Janka dos painéis LVL

O teste de dureza Janka foi realizado em todos os tratamentos, sendo estes comparados entre si. No entanto, o tratamento E – T1, que recebeu uma camada de reforço sobre a lâmina de tração, e E – T2, que recebeu uma camada de reforço na lâmina de tração e outra na lâmina de compressão do painel, poderiam ser considerados um mesmo tratamento quando submetidos ao teste de dureza Janka, pois este ensaio testou a dureza das primeiras lâminas do painel até uma certa profundidade, ou seja, em ambos os tratamentos o teste foi aplicado sobre uma camada de reforço. A mesma lógica pode ser seguida para os tratamentos I – T1 e I – T2, confirmada na análise estatística.

Os valores máximo, médio e mínimo da dureza Janka dos LVLs são mostrados na tabela 20. Na mesma tabela, também está o coeficiente de variação de cada tratamento, assim como a comparação das médias dos tratamentos pelo método LSD, ao nível de 5% de probabilidade de erro. O gráfico que representa as médias da dureza Janka pode ser verificado na figura 36.

Tabela 20 – Valores máximo, médio e mínimo da dureza Janka, coeficiente de variação e comparação das médias dos tratamentos.

Dureza Janka						
Tratamento		Máximo kgf/cm ²	Médio kgf/cm ²	Mínimo kgf/cm ²	CV %	Comparação das médias
Resina	T	640	476	335	24,3	A
Epóxi (E)	T1	735	629	557	9,7	B
	T2	786	622	516	15,9	B
	T3	990	797	674	14,9	D
Isoftálica (I)	T1	784	665	522	15,9	B C
	T2	735	615	510	12,3	B
	T3	948	743	621	15,4	C D

¹ Em que: T = testemunha; E = resina epóxi; I = resina isoftálica; T1 = uma camada de reforço de fibra; T2 = duas camadas de reforço de fibra de vidro; T3 = quatro camadas de reforço de fibra de vidro.

² Letras maiúsculas comparam as médias entre os tratamentos, onde letras iguais indicam que os tratamentos não diferem estatisticamente ao nível de 5% de probabilidade pelo método LSD.

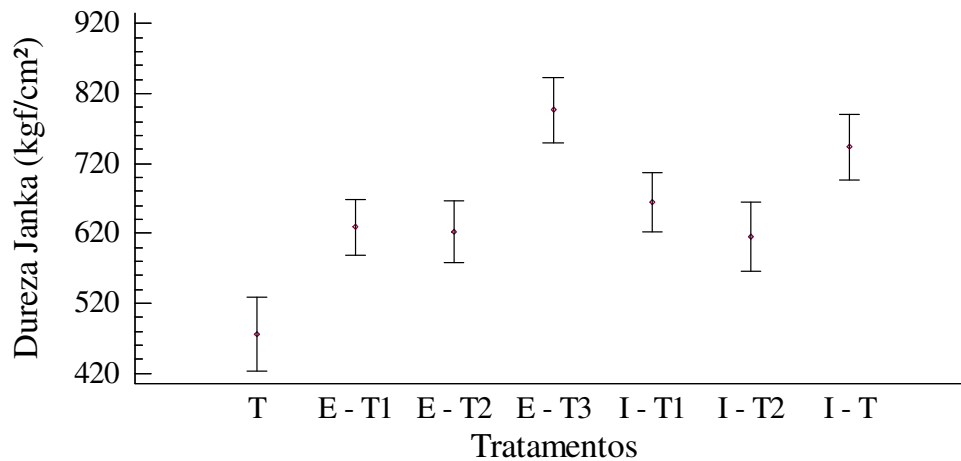


Figura 36 – Intervalo de confiança entre as médias de dureza Janka.

Com relação aos resultados de dureza Janka, os valores médios puderam ser classificados em A, B, C e D. A lógica de que os tratamentos E – T1 e E – T2 poderiam ser considerados o mesmo tratamento se confirmou no teste médias, pois os mesmos não apresentaram diferenças significativas ao nível de 5% de probabilidade de erro. Nas médias B enquadraram-se os tratamentos I – T1 e I – T2, e, apesar de a impregnação do reforço ser outra, resina isoftálica, seu comportamento não se diferenciou da resina epóxi.

As maiores médias foram registradas nos tratamentos com duas camadas de reforço na capa, independentemente da resina de impregnação utilizada na fibra de vidro, a saber, tratamentos E – T3 e I – T3, respectivamente. A menor média foi encontrada para o tratamento testemunha, o qual não possuía nenhuma camada de reforço, apenas as lâminas de madeira unidas com fenol-formaldeído.

Dentro da classificação de baixo, médio e alto valor de dureza Janka, segundo Remade (2011), os painéis em estudo possuem valor médio de dureza Janka, incluindo-se nessa classe valores de 350 a 850 kgf/cm².

Iwakiri et al. (2006) testaram a dureza de Janka de compensados com diferentes composições de espécies. Porém, avaliando apenas a composição homogênea de lâminas de pinus de 2 mm de espessura, formando um painel com 0,88 cm de espessura, o valor de dureza Janka foi de 780 kgf/cm². Esse valor aproxima-se do valor médio encontrado nos tratamentos com duas camadas de fibra de vidro com resina epóxi e isoftálica (E – T3 e I – T3).

Milagres et al. (2006) testaram a dureza Janka de painéis compósitos de partículas de madeira (aglomerados) de *Eucalyptus grandis* com diferentes proporções de polipropileno e de polietileno de alta e baixa densidades; e como agente ligante os autores testaram ureia-

formaldeído pura e ureia-formaldeído com 0,5% de resina epóxi. Os autores encontraram redução no valor de dureza Janka, quando foi adicionado o adesivo epóxi ao adesivo ureia-formaldeído, testado em painel apenas com partículas de madeira, cujo valor foi de 376 kgf/cm². Nos demais painéis, com madeira e adesivo termoplástico, houve um aumento significativo dos valores de dureza Janka.

Pogetto et al. (2006) assinalam que a dureza Janka vem ganhando destaque no conjunto das informações essenciais usadas para se avaliar a qualidade da madeira e seu potencial tecnológico.

4.7 Cisalhamento na linha de cola

4.7.1 Teste a seco

O ensaio seco do cisalhamento foi realizado na linha de cola de fibra de vidro com resina epóxi (FV + E), na linha de cola de fibra de vidro com resina isoftálica (FV + I) e na linha de cola unindo lâminas de madeira com resina fenol-formaldeído (FF).

A tensão de ruptura, o percentual médio de falhas na madeira, o coeficiente de variação (CV), e a comparação dos tratamentos pelo método LSD ao nível de 5% de probabilidade de erro, estão representados na tabela 21.

Tabela 21 – Tensão de ruptura na linha de cola e falha na madeira – teste a seco.

Cisalhamento na linha de cola			
Teste a seco			
	FV + E	FV + I	FF
Tensão de ruptura kgf/cm ²	110,32 _B ^{8,8}	70,84 _A ^{11,2}	73,04 _A ^{12,9}
Falha na madeira %	92,0 _B ^{7,3}	4,0 _A ^{28,9}	96,7 _B ^{6,0}

¹ Em que: FV + E = Fibra de vidro com resina epóxi; FV + I = Fibra de vidro com resina isoftálica; FF = Fenol formaldeído.

² Valor central corresponde as médias; Letras iguais entre colunas indicam tratamentos que não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade de erro.; Acima das letras estão os coeficientes de variação (CV).

A análise das médias de valores de resistência na linha de cola indicaram que a colagem da fibra de vidro com resina isoftálica foi equivalente, estatisticamente, ao valor médio de resistência na linha de cola da resina fenol-formaldeído. A fibra de vidro com resina epóxi apresentou os maiores valores de resistência ao cisalhamento, diferenciando-se dos demais tratamentos.

Fiorelli e Dias (2007) testaram a eficiência da resina epóxi junto à madeira pelo teste de cisalhamento por tração. Com o teste, os autores conseguiram medir o valor da força máxima necessária para que ocorresse cisalhamento na linha de cola entre a fibra de vidro colada com epóxi e as madeiras de pinus e eucalipto. Os autores chegaram ao resultado de que o pinus suportou uma força máxima média de $89,4 \text{ kgf/cm}^2$ interface fibra-madeira, enquanto a madeira de eucalipto resistiu até uma carga máxima de $139,7 \text{ kgf/cm}^2$. O autor justifica essa diferença de força por se tratar de madeiras com densidade diferentes; usualmente madeiras menos densas são mais aptas à colagem.

A resina isoftálica e a resina fenólica apresentaram valores semelhantes de resistência ao cisalhamento, que não se diferenciaram a 5% de probabilidade de erro, valor muito próximo ao encontrado por Müller (2009) para as mesmas condições de ensaio de cisalhamento. O autor determinou o valor de resistência de $87,58 \text{ kgf/cm}^2$ para madeira de *Pinus taeda* colada com fenol-formaldeído.

Müller (2009) comenta que a eficaz colagem da madeira com adesivo sintético termorrígido à prova d'água, próprio para uso estrutural, como a resina fenólica, fez pressupor que nem as interfaces, nem o adesivo são os elos mais fracos, por causa da penetração seguida da solidificação do adesivo nas porosidades da madeira.

Segundo USDA (1999), espera-se que com a colagem entre os painéis estruturais, a resistência do adesivo exceda à resistência da madeira, de modo que a resistência do adesivo possa ser ignorada. Adesivos menos resistentes que a madeira simplesmente não devem ser usados.

Porém, mesmo com uma força de ruptura elevada, a resistência da linha de cola não excedeu a resistência da madeira nos corpos de prova colados com a resina isoftálica, essa conclusão foi alcançada após avaliar o percentual de falhas na madeira. O percentual de falhas na madeira para cisalhamento a seco nos três tratamentos é apresentado na figura 37.

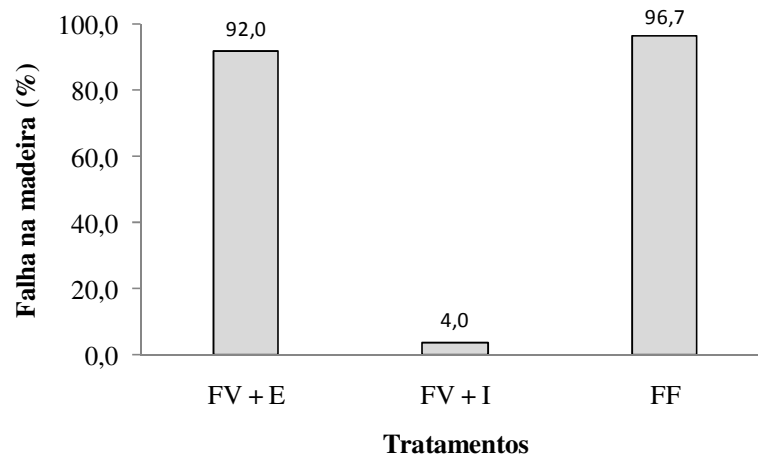


Figura 37 – Intervalo de confiança entre as médias de dureza Janka.

O elevado percentual de falhas na madeira nos tratamentos FF e FV + E, indicou a facilidade de adesão da resina à madeira, ao contrário do que foi observado no tratamento com resina isoftálica, em que ocorreram apenas pequenas perdas de madeira na linha de cola, sem causar falhas na madeira. Na figura 38, são apresentados exemplos do rompimento na linha de cola, com as respectivas falhas na madeira.



Figura 38 – Corpos de prova após o teste de cisalhamento a seco. Tratamento FV + E (a); tratamento FV + I (b); tratamento FF (c).

O baixo percentual de falha na madeira da resina isoftálica é explicado pela baixa adesão desta resina à materiais como a madeira. Essa tem como característica ser uma resina “pesada”, que se contrai bastante na cura. Outra característica que causa uma falsa ideia de que a resina isoftálica adere à madeira é o fato de ela ficar mecanicamente fixa à madeira, porém, com riscos de delaminação, agravados quando há impactos que provocam deformação do material.

Dantas (2011) acredita que substâncias presentes na madeira interfiram na cura da resina isoftálica que está diretamente em contato com esta. Assim, embora a resina, por fora,

esteja curada, sua parte interna não aderiu à madeira. O mesmo autor comenta que a resina epóxi, ao contrário da resina isoftálica, tem como característica a ótima adesão a diversos materiais como metais e madeira, devido às suas excelentes qualidades mecânicas e a sua estabilidade química. A resina epóxi é a mais indicada para a colagem de peças de madeira, justamente para impregnar fibra de vidro sobre madeiras.

Comparando-se a percentagem de falha na madeira dos tratamentos FV + E, FV + I e FF, quando submetidos ao teste de cisalhamento na linha de cola a seco, pode-se verificar a qualidade de adesão das resinas à madeira, concluindo que a resina epóxi e a resina fenólica apresentaram ótima adesão ao material, ao passo que a resina isoftálica não é adequada nem indicada para uso em madeiras, devido a pouca aderência ao material.

4.7.2 Teste após fervura

O ensaio de cisalhamento após fervura foi realizado na linha de cola da fibra de vidro com resina epóxi (FV + E), na linha de cola da fibra de vidro com resina isoftálica (FV + I) e na linha de cola da resina fenol-formaldeído (FF).

A tabela 22 apresenta a tensão de ruptura, o percentual médio de falhas na madeira, o coeficiente de variação (CV), e a comparação dos tratamentos pelo método LSD ao nível de 5% de probabilidade de erro.

Tabela 22 – Tensão de ruptura na linha de cola e falha na madeira – teste após fervura.

Cisalhamento na linha de cola			
Teste após fervura			
	FV + E	FV + I	FF
Tensão de ruptura kgf/cm ²	54,44 _B ^{7,4}	32,47 _A ^{22,2}	31,10 _A ^{8,8}
Falha na madeira %	79,0 _B ^{17,0}	35,0 _A ^{11,7}	97,5 _B ^{3,0}

¹ Em que: FV + E = Fibra de vidro com resina epóxi; FV + I = Fibra de vidro com resina isoftálica; FF = Fenol formaldeído;

² Valores centrais correspondem as médias; Letras iguais entre colunas indicam tratamentos que não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade de erro.; Acima das letras estão os coeficientes de variação (CV).

Os resultados da comparação de médias de resistência encontrados no teste após fervura seguiram a mesma tendência dos testes a seco, onde o tratamento com resina epóxi apresentou a maior resistência a força aplicada se diferenciando dos outros dois tratamentos ao nível de 5% de probabilidade de erro. Os tratamentos FV + I e FF apresentam valores muito próximos de resistência ao cisalhamento, confirma que as duas colagens se equivalem estatisticamente.

Segundo Müller (2009), mais importante do que avaliar a resistência ao cisalhamento na linha de cola é avaliar o percentual de falhas na madeira. Nesse sentido, quanto maior for o percentual, e mais profundas forem as falhas no interior da grã da madeira, mais forte e mais durável será a colagem, principalmente quando se faz uso de adesivos de alta durabilidade como os adesivos estruturais.

De acordo com a importância de se avaliar as falhas que ocorrem na madeira, estas foram calculadas, em cada corpo de prova, com auxílio de um gabarito, após o teste de cisalhamento pós-fervura, nos três tratamentos em estudo. A representação gráfica dos valores percentuais pode ser visualizada na figura 39.

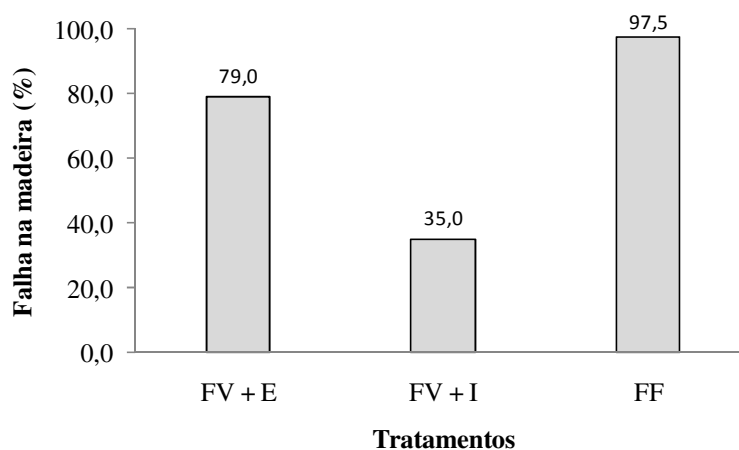


Figura 39 – Percentual de falha na madeira para o teste de cisalhamento na linha de cola após fervura.

Lima et al. (2011) comentam que a linha de cola só apresentará problemas, podendo gerar falhas no produto final, se, durante o processo de colagem, não forem levados em consideração fatores como a qualidade e viscosidade do adesivo, o teor de umidade das lâminas e o grau de limpeza da superfície.

A resina isoftálica, diante dos resultados, apresentou alta resistência ao cisalhamento, mas pouca aderência à madeira. No entanto, essa resina apresenta um baixo custo de aquisição em comparação a outras resinas, como a epóxi. Assim, a resina é utilizada na fabricação, por exemplo, de barcos, que estão constantemente em contato com a umidade. No entanto, para que não ocorra delaminação sobre a resina isoftálica é aplicado o gelcoat, que mantém a resina isolada da água; e, com boa resistência, a pintura mantida em bom estado é outro fator que ajuda a conservar a resina isoftálica.

A resina epóxi possui maior resistência mecânica, maior flexibilidade, melhor rendimento quando aplicada com fibra de vidro. Este conjunto de qualidades da resina epóxi se refletiu nos testes de cisalhamento, pois a interface madeira – fibra de vidro e resina apresentou maior resistência e maiores falhas na madeira do que a resina fenol-formaldeído.

A resina fenol-formaldeído apresentou, tanto no teste a seco como no teste após a fervura, alta percentagem de falhas na madeira. Este era um resultado esperado devido às características já bem conhecidas da resina fenólica em combinação com a madeira. Assim, rompimento ocorreu em 97,5% dos casos na madeira.

Essa fina espessura causou algumas dificuldades, especialmente quando foi necessário localizar a linha de cola para a confecção dos corpos de prova, porque alguns tiveram que ser descartados, visto que não havia continuidade da espessura entre os lados do corpo de prova, inviabilizando o ensaio.

No gráfico apresentado na figura 40 está a comparação dos valores de resistência ao cisalhamento a seco e após fervura e o decréscimo da resistência com a fervura em dados percentuais.

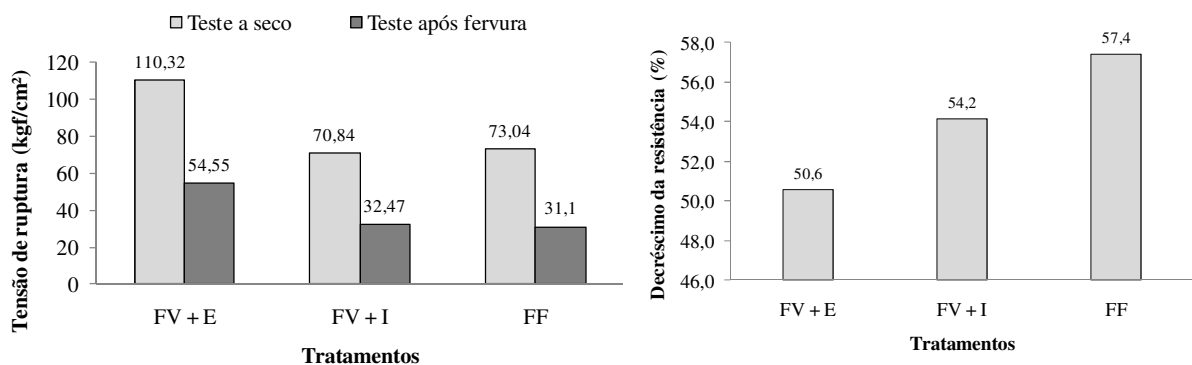


Figura 40 – Comparação da tensão de ruptura nos testes a seco e após fervura e decréscimo dos valores de resistência com a após fervura.

Em algumas literaturas encontrou-se referência de que a resina poliéster isoftálica é permeável, não sendo resistente à água. Optou-se, então, pela resina poliéster isoftálica com NPG, devido à maior resistência à umidade. Temeu-se que durante as 8 horas de fervura e 20 horas de secagem a 63°C dos corpos de prova, a linha de cola entre madeira e fibra de vidro impregnada com resina isoftálica não fosse resistir. Porém, provou-se o contrário, pois a resina isoftálica, além de resistir à fervura, manteve valores de resistência igual ou próximos ao corpo de prova com linha de cola com fenol-formaldeído submetido ao mesmo teste.

A resina epóxi possui como principal característica o fato de ser altamente resistente à água. Além disso, no local em que o epóxi adere à madeira, a resina não permite que aconteça a microinfiltração de água. Dessa forma, a diminuição da resistência de colagem pode ter sido provocada pela diminuição da resistência da madeira, já que o percentual de falhas na madeira manteve-se elevado.

O tratamento com resina fenol-formaldeído apresentou maiores perdas de resistência (57,4%), no entanto, a resina fenólica possui características de conservar seu estado físico e fortes ligações químicas em contato com água. Mas, o fato de ocorrer a diminuição da resistência deste tratamento está em concordância com Müller (2009), que descreve a madeira como sensível à perda da resistência mecânica com o acréscimo do teor de água de impregnação até o ponto de saturação das fibras. Parte dessa resistência é recuperada após a secagem do corpo de prova, todavia, madeiras menos densas, como o pinus, mantêm-se menos resistentes.

CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos neste estudo, as conclusões são apresentadas a seguir.

Os valores de ME_b dos painéis densificados foram maiores nos tratamentos que receberam maior número de camadas de fibra de vidro. No entanto, os valores de ME_b foram indiferentes para as resinas de impregnação, epóxi e isoftálica.

O MOE em flexão estática na posição *flatwise* aumentou com o acréscimo de uma camada de fibra de vidro para ambas resinas de impregnação, epóxi e isoftálica. O MOR aumentou com o acréscimo de duas camadas de reforços impregnadas com resina isoftálica e resina epóxi.

O MOE e o MOR em flexão estática na posição *edgewise*, foram influenciados pelo acréscimo de duas camadas de fibra de vidro para as duas resinas de impregnação. O aumento do número de camadas não alterou os valores de rigidez e resistência dos painéis nessa posição.

O MOE dinâmico, obtido pelo método ultrassônico com ponto seco, revelou que o uso de uma camada de fibra de vidro impregnada com resina epóxi ou com resina isoftálica é suficiente para aumentar os valores de rigidez da madeira. Já o MOE dinâmico obtido pelas leituras com o transdutor de face plana, mostrou que é necessária a aplicação de duas camadas de fibra de vidro para aumentar a rigidez dos painéis, independentemente da resina de impregnação utilizada.

A dureza Janka foi maior para painéis reforçados com duas camadas de fibra de vidro na capa do painel, e não foram encontradas diferenças entre as resinas utilizadas.

A resina epóxi com fibra de vidro apresentou maior resistência ao cisalhamento e um elevado percentual de falhas na madeira. Painéis colados com fenol-formaldeído apresentaram resistência semelhante aos painéis colados com resina isoftálica com fibra de vidro, no entanto, este último apresentou baixa percentagem de falhas na madeira.

De acordo com os resultados mecânicos obtidos nos diferentes tratamentos, pode-se concluir que a aplicação de duas camadas de reforço de fibra de vidro com resina epóxi na posição de tração seria o suficiente para melhorar as qualidades mecânicas dos painéis LVL fabricados com lâminas de madeira de pinus unidas com fenol-formaldeído.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, D.D et al. **Vigas de madeira e concreto reforçadas com fibra de vidro**. 2009 Disponível em: <http://www.unilestemg.br/pic/sic_10/resumos/pes/engenharia_tecnologia/vigas_de_madeira_e_concreto_reforcadas_com_fibra_de_vidro.pdf>. Acesso em: 15 jun. 2011.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – **ASTM D 905**. Standard test method for strength properties of adhesive bonds in shear by compression loading. Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, Section 15 General Products, Chemical Specialties, And End Use Products, Volume 15.06 - Adhesives, 1999.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – **ASTM D 1037**: Standard test methods for evaluating properties of wood-base fiber and particle panel materials, Philadelphia, Pa, 1999.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – **ASTM D 2395**. Standard test methods for specific gravity of wood and wood-based materials. Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, Section 4 Construction, Volume 04.09 - Wood, 2001.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – **ASTM D 3043**. Standard test methods for structural panels in flexure. Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, Section 4 Construction, Volume 04.09 - Wood, 2001.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – **ASTM D 4442**. Standard test methods for direct moisture content measurement of wood and wood-base materials. Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, Section 4 Construction, Volume 04.09 - Wood, 2001.

BAGGIO, A. **Aproveitamento dos resíduos de compósitos à base de resina poliéster e fibra de vidro**. 2005. 92 f. Dissertação (Mestre em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2005.

BALSEIRO, A.M.R. **Reforço e reabilitação de vigas de madeira por pré-esforço com laminados FRP**. 2007. 162 f. Dissertação (Mestrado em Reabilitação do Patrimônio Edificado) – Universidade de Coimbra, Coimbra, 2007.

BIAGINI, A.B. et al. **Avaliação de propriedades físicas, térmicas e mecânicas de formulações epóxi em diferentes condições de cura**. 2006. Disponível em: <<http://www.metallum.com.br/17cbecimat/resumos/17Cbecimat-410-008.pdf>>. Acesso em: 15 jun. 2011.

BIBLIS, E.J. Analysis of wood-fiberglass composite beams within and beyond the elastic region. **Forest Products Journal**. Vol. 15, n° 2, p. 81-88, 1965.

BIS SHRAPNEL (BUSINESS RESEARCH AND FORECASTING), 2011. **Structure engineered wood products in the pacific rim and europe: 2012 – 2016**. Disponível em: <http://www.bis.com.au/verve/_resources/SEWP_PacRim_2011_Brochure.pdf>. Acesso em: 15 jun. 2011.

BORTOLLETO JUNIOR, G. Estudo comparativo das propriedades físicas e mecânicas da madeira e do LVL de *Pinus merkusii*. **Revista Forestal Venezuelana**, Vol. 53, n° 2, p. 191-195, 2009.

BRAGA, R.A. **Análise da utilização de fibras naturais aglutinadas com resina epóxi, para fabricação de uma cobertura central do porta-malas de um automóvel de passageiros**. 2010. 188 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

CALEGARI, L. et al. Avaliação de alguns fatores influentes na velocidade ultra-sônica na madeira. **Floresta**, Curitiba, v. 38, n. 4, p. 607-615, 2008.

CARNEIRO, R.P. **Colagem de junta de madeira com adesivo epóxi**. 2010. 89 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2010.

CARREIRA, M.R et al. Classificação de peças estruturais de pinus sp por ultra-som. 2006. Disponível em: <<http://www.metallum.com.br/17cbecimat/resumos/17Cbecimat-402-042.pdf>>. Acesso em: 15 jun. 2011.

COLENCI, R.A. **Desenvolvimento de equipamento para avaliação em campo da dureza de madeiras para dormente ferroviário**. 2006, 83 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2006.

COLENCI, R.A.; BALLARIN, A.W. Correlações entre a dureza Janka e a compressão paralela às fibras em madeiras para dormente ferroviário. **Energia na Agricultura**, Vol. 18, n.2, p.01-11, 2003.

CUNHA, A.B; MATOS, J.L.M. Estimativa do módulo de elasticidade em vigas laminadas coladas pelos métodos estático e dinâmico. **Floresta**, Vol. 41, n° 1, p. 97-112, 2011.

DAGHER, H.J. et al. **Effect of FRP Reinforcement on Low Grade Eastern Hemlock Glulams**. 1996. Disponível em: <<http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/pdf1996/daghe96b.pdf>>. Acesso em: 15 jun. 2011.

DAGHER, H.J.; ALTIMORE, M.A. Use of glass-fiber reinforced polymer tendons for stress-laminating timber bridge decks. **Journal of Bridge Engineering**. Vol. 10, nº 1, p. 21-27, 2005.

DANTAS, G. **Adesivos estruturais (resina epóxi)**. 2011. Disponível em: <<http://gustavodantas.wordpress.com/materiais/adesivos-estruturais-resina-epoxi/>>. Acesso em 01 jun. 2011.

DAVALOS, J. F.; QIAO, P. Z.; TRIMBLE, B. S. Fiber-Reinforced Composite and Wood Bonded Interfaces: Part 1. Durability and Shear Strength. **Journal of Composites Technology & Research**. Vol. 22, nº 4, p. 224-231, 2000.

ECKELMAN, C.A. Potential uses of laminated veneer lumber in furniture. **Forest Product Journal**. Vol. 43, nº4, p. 19-24, 1993.

ELEKEIROZ. **Manual básico do poliéster insaturado**. 2004. Disponível em: <<http://www.elekeiroz.com.br/Resinas/manualbasicopoliesterinsaturado.pdf>>. Acesso em: 10 set. 2010.

FARIA, P.E. **Estudo sobre a furação de compósito de resina epóxi reforçado com fibras de vidro**. 2007. 231 f. Tese (Doutor em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

FIORELLI, J. **Utilização de fibras de carbono e de fibras de vidro para reforço de vigas de madeira**. 2002. 168 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

FIORELLI, J. **Estudo teórico e experimental de vigas de madeira laminada colada reforçadas com fibra de vidro**. 2005. 108 f. Tese (Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

FIORELLI, J. ; DIAS, A. A. . Avaliação da influência do reforço de fibra de vidro na resistência e rigidez de vigas de madeira laminada colada. **E-Mat (Porto Alegre)**. Vol. 01, p. 01-06, 2007.

FREIRE, E. et al. Propriedades mecânicas de compósitos de polipropileno com fibra de vidro. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**. p. 25-32, 1994.

GABRIEL, M.S.C. **Desempenho físico-mecânico de painéis LVL de pinus tropicais da região de São Paulo**. 2007. 171 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2007.

GARDNER, D. **Adhesive bonding of estern hemlock glulam panels with e-glass/vinyl ester reinforcement**. 2000. Disponível em: <<http://www.entrepreneur.com/tradejournals/article/print/71326061.html>>. Acesso em: 15 jun. 2011.

GONÇALVES, S.L.F. **Análise da indústria do segmento laminados e compensados do estado do Amazonas, 1996**. 1998. 108 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1998.

GRIGOLLETI JÚNIOR, A. et al. **Cultivo de pinus**. Embrapa Florestas. 2005. Disponível em:<<http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Pinus/CultivodoPinus/apresentacao.htm>>. Acesso em: 15 jun. 2011.

HASELEIN, C.R.; PAULESKI, D.T. **Caderno didático da disciplina de Tecnologia da Madeira II – Parte I**. Santa Maria: Imprensa Universitária – UFSM, 2003. 73 p.

HEXION. **Boletim Técnico CASCOPHEN HL – 2080**. Resina fenólica líquida para colagens à prova d'água. DOC 55, Emissão B, Rev. 5, 2006. 4 p.

IWAKIRI, S. Produção de compensados de *Pinus taeda* L. e *Pinus oocarpa* Schiede com diferentes formulações de adesivo uréia formaldeído. **R. Árvore**. Vol. 26, nº3, p. 371-375, 2002.

IWAKIRI, S. et al. Utilização de lâminas de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus maculata* como alternativas para produção de piso laminado com montagem direta. **Floresta**, Vol. 36, nº 3, p. 425-430, 2006.

IWAKIRI, S.; NIELSEN, I.R.; ALBERTI, R.A.R. Avaliação da influência de diferentes composições de lâminas em compensados estruturais de *Pinus elliottii* e *Eucalyptus saligna*. **Cerne**, Vol.6, nº 2, p. 019-024, 2000.

JANKOWSKY, I.P. Qualidade das lâminas de *Pinus strobus* (martinez) var. chiapensis obtidas por desenrolamento. **IPEF**, nº16, p. 50-59, 1978.

JAIGOBIND, A.G.; AMARAL, L.; JAISING, S. **Dossiê técnico: Fabricação de peças em fibra de vidro (compósitos).** Serviço Brasileiro de Respostas Técnicas – SBR. Instituto de Tecnologia do Paraná. 2007. 45 p.

KARPOVAS, T. **Resinas termofixas: Novas aplicações, velhos mercados.** 2005. Disponível em: < http://www.latinchemical.com.br/edicao21_resinas.asp>. Acesso em: 16 jun. 2011.

LAHR, F.A.R., et al. Influência da densidade na dureza paralela e na dureza normal às fibras para algumas espécies tropicais brasileira. **Sci. For.** Vol. 38, nº 86, p. 153-158, 2010.

LIMA, N.N. et al. Influência da gramatura na resistência da linha de cola aos esforços de cisalhamento em painéis compensados de *Copaifera duckei* Dawyer e *Eperua oleifera* Duck. **Acta amazônica.** Vol 41, nº1, p. 83-90, 2011.

LVL – Lamenated Veneer Lumber. **PORTAL da Madeira: Aspectos e curiosidades.** 2009. Disponível em: < <http://portaldamadeira.blogspot.com/2009/11/lvl-laminated-venner-lumber.html>>. Acesso em: 17 fev. 2011.

MACIEL, A.S.; **Chapas de partículas aglomeradas de madeira de *Pinus elliottii* ou *Eucalyptus grandis*, em mistura com poliestireno e polietileno tereftalato.** 2001. 115 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2001.

MALONEY, T.M. The family of wood composite materials. **Forest Products Journal.** Vol. 46, nº 2, p. 19-26, 1996.

MATTOS, R.L.G.; GONÇALVES, R.M.; CHAGAS, F.B. Painéis de madeira no brasil: panorama e perspectivas. **BNDES Setorial,** Rio de Janeiro, nº 27, p. 121-156, 2008.

MICHAEL, A.P. **Repair of wood piles with fiber reinforced Composites.** 2002. 197 f. Master's Thesis (Master of Science in Civil Engineering) – University of Maine, Maine, 2002.

MILAGRES, E.G. et al. Compósitos de partículas de madeira de *Eucalyptus grandis*, polipropileno e polietileno de alta e baixa densidades. **Rev. Árvore.** Vol. 30, nº 3, p. 463-470, 2006.

MIOTTO, J.L. **Estruturas mistas de madeira-concreto: avaliação das vigas de madeira laminada colada reforçadas com fibra de vidro.** 2009. 357 f. Tese (Doutor em Engenharia de Estruturas) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

MIOTTO, J.L.; DIAS A.A. Reforço e recuperação de estruturas de madeira. **Ciências Exatas e Tecnológicas**. Vol. 27, n. 2, p. 163-174, 2006.

MÜLLER, M.T. **Influência de diferentes combinações de lâminas de *Eucalyptus salign* e *Pinus taeda* em painéis estruturais LVL**. 2009. 164 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.

NASSEH, J. **Selecionando fibras de vidro. Guia do Construtor**. 2010. Disponível em <www.acobar.com.br>. Acesso em: 25 mai. 2010.

NESVIJSKI, E. G. Dry point contact transducers: design for new applications. In: **The e-Journal of Nondestructive Testing**. Vol. 9, nº 9, p. 10-13, 2003.

OLIVEIRA, F.G.R. et al. Avaliação de propriedades mecânicas de madeira por meio de ultrassom. In: PAN AMERICAN CONFERENCE FOR NONDESTRUCTIVE TESTING, 3., 2003, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Pan American Conference for Nondestructive Testing, 2003. 5p.

POGETTO, M.H.F.A.; BALLARIN, A.W.; COLENCI, R.A. Relações entre a dureza paralela e normal às fibras em madeiras. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRA E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 10., 2006, Águas de São Pedro. **Anais...** Botucatu: UNESP, 2006. CD-ROM.

POLIRESINAS. **Dicas e notícias de resina poliéster**. 2011. Disponível em: <<http://www.poliresinas.com.br/blog/category/noticias-e-novidades/>>. Acesso em: 15 jun. 2011.

REIS, A. **Fibra de vidro: laminação e consertos na prática**. 2008. Disponível em <<http://www.scribd.com/doc/3159263/Apostila-Fibra-de-Vidro>>. Acesso em: 15 jul. 2010.

REMADE. **Propriedades físicas e mecânicas**. 2011. Disponível em: <http://www.remade.com.br/br/madeira_serrada.php?num=4&title=Propriedades%20F%C3%ADsicas%20e%20Mec%C3%A2nicas>. Acesso em: 10 mai. 2011.

RESINFIBER. **Boletim Técnico Resina Poliéster**. 2010. Disponível em: <<http://www.fibercenter.com.br/Produtos/RESINAS%20POLIESTERS.pdf>>. Acesso em: 16 jun. 2011.

RICHIE, M.C. **Fatigue behavior of frp-reinforced *Douglas-fir* glued Laminated bridge girders**. 2003. 168 f. Master's Thesis (Master of Science in Civil Engineering) – University of Maine, Maine, 2003.

RITTER, M.A.; DUWADI, S.R.; LEE, P.D.H. **Evaluation of Stress-Laminated T-Beam Bridges Constructed of Laminated Veneer Lumber**. 1996. Disponível em: <<http://woodcenter.org/docs/ritte96a.pdf>>. Acesso em: 14 jun. 2011.

SANTOS, A.M.L. **Avaliação teórica e experimental de viga em “T” pré-fabricadas de madeira com flanges de painéis de lâminas paralelas (LVL) e alma de painéis de partículas orientadas (OSB) e compensados**. 2008. 79 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

SELLERS, T. Adhesives: Growing markets for engineered products spurs research. **Wood Technology**. Vol. 127, nº 3, p. 40-43, 2000.

SOARES, M.S. **Processamento de polímeros reforçados por fibra de vidro**. 2009. Disponível em: <<http://www.scribd.com/doc/48714200/FIBRA-DE-VIDRO>>. Acesso em: 16 jun. 2011.

SOLTIS, L.A.; ROSS, R.J.; WINDORSKI, D.F. Fiberglass-reinforced bolted wood connections. **Forest Products Journal**, Vol. 48, nº 9, p. 63-67, 1998.

SCHNEID, E. et al. Avaliação não destrutiva de postes de madeira utilizados na rede elétrica na região metropolitana de Porto Alegre. **Ciência da Madeira**. Vol. 02, nº 01, 2011.

SCHULT, A.C.P. **Avaliação da colagem e da variação de umidade na produção de painéis compensado com mistura de espécie**. 2008. 70 f. Monografia (Engenharia Industrial Madeireira) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

STANGERLIN, D.M. et al. Uso do ultrassom para estimativa das propriedades mecânicas da madeira de *Peltophorum dubium*. **Ciência da Madeira**. Vol. 01, nº 02, p. 44-53, 2010.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE (USDA). **Wood Handbook: wood as an engineering material**. Madison, WI: United States Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1999. 463 p.

WANGAARD, F. Elastic deflection of wood-fiberglass composites beams. **Forest Products Journal**. Vol. 14, nº 6, p. 256-260, 1964.