

PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICAS DE PAINÉIS DE LÂMINAS PARALELAS REFORÇADOS COM PRFV

PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF LAMINATED VENEER LUMBER REINFORCED GFRP

Ediane Andréia Buligon¹ Clovis Roberto Haselein² Darci Alberto Gatto³
Elio José Santini⁴ Renata Rauber⁵ Camila Berger⁶

RESUMO

O objetivo desta pesquisa foi avaliar as propriedades físico-mecânicas de painéis de lâminas paralelas (LVL) com camadas de Polímeros Reforçados de Fibra de Vidro (PRFV) impregnadas com dois tipos de matrizes. Primeiramente foi realizada a 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. Posteriormente, foi feita a aplicação do reforço de fibra de vidro impregnado com resinas epóxi ou poliéster isoftálica com NPG. Os tratamentos consistiram na aplicação de uma a quatro camadas de fibra de vidro impregnadas com resina epóxi ou isoftálica, totalizando 21 painéis. As propriedades avaliadas foram a massa específica, o teor de umidade, a flexão estática na posição *flatwise* e *edgewise* e a resistência ao cisalhamento na linha de cola. Em flexão estática na posição *flatwise*, uma camada de PRFV, em tratamentos com resina epóxi e isoftálica, foi suficiente para influenciar o módulo de elasticidade (MOE), enquanto para o módulo de ruptura (MOR), duas camadas de PRFV foram necessárias para tratamentos com resina isoftálica e uma camada para tratamentos com resina epóxi. Na posição *edgewise*, os valores de MOE e do MOR se mantiveram estáveis após a aplicação de duas camadas de PRFV. A resina epóxi apresentou maior resistência ao cisalhamento e maior percentual de falhas na madeira, enquanto 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. Portanto, a aplicação de uma camada de PRFV com resina epóxi na posição de tração seria o suficiente para melhorar as qualidades mecânicas (flexão estática e cisalhamento) 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

The aim of the present research was to evaluate the physical and mechanical properties of LVL reinforced with GFRP with two types of resins. At first, LVL panels were manufactured with nine layers of wood veneer

1 Engenheiro Florestal, Mestre em Engenharia Florestal, Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Av. Roraima, 1000, CEP 97105-900, Santa Maria (RS), Brasil. eabuligon@hotmail.com

2 Engenheiro Florestal, PhD., Professor Titular do Departamento de Ciências Florestais, Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Av. Roraima, 1000, CEP 97105-900, Santa Maria (RS), Brasil. clovis.haselein@ufsm.br

3 Engenheiro Florestal, Dr., Professor Adjunto do Curso de Engenharia Industrial Madeireira, Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Pelotas, Caixa Postal 354, CEP 96019-900, Pelotas (RS), Brasil. darcigatto@yahoo.com

4 Engenheiro Florestal, Dr., Professor Titular do Departamento de Ciências Florestais, Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Av. Roraima, 1000, CEP 97105-900, Santa Maria (RS), Brasil.

5 Engenheiro Florestal, Mestre em Engenharia Florestal, Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Av. Roraima, 1000, CEP 97105-900, Santa Maria (RS), Brasil. renata_rauber@yahoo.com.br

6 Engenheira Florestal, mestranda do Programa de Pós-graduação em Engenharia Florestal, Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Av. Roraima, 1000, CEP 97105-900, Santa Maria (RS), Brasil. camilaberger@live.com

glued with phenol-formaldehyde resin. After, they were reinforced with fiberglass impregnated with epoxy or isophthalic resin or with isophthalic resin. The treatments consisted on the application of one, two and four reinforced layers. The properties tested were density, moisture content, static bending in flatwise and edgewise position, modulus of elasticity (MOE) and modulus of rupture (MOR), glue line shear strength by compression loading. The epoxy and the isophthalic resin showed the same mechanical qualities among different treatments. MOE panel in flatwise position was influenced by one reinforcement layer and MOR was influenced by two reinforcement layers. In the edgewise position, MOE and MOR values remained stable among the treatments with two fiberglass reinforcement layers. The epoxy resin presented higher glue line resistance and higher percentage of wood failure. Isophthalic and phenolic resin presented similar values of glue line strength. However, the isophthalic resin had lower percentage of wood failure. Thus, the reinforcement with one layer of fiberglass with epoxy resin on the tensile side would be enough to boost the mechanical qualities of LVL.

Keywords: LVL; fiberglass; epoxy resin; isophthalic resin.

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.

Devido às características de heterogeneidade do lenho, a transformação da madeira em lâminas e sua posterior colagem, originando painéis, é uma alternativa para obtenção de produtos mais homogêneos. 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 LVL (*Laminated Veneer Lumber*), conhecido nacionalmente como Painel de Lâminas Paralelas (PLP).

O LVL é 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. Além disso, 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 (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 outra grande vantagem diante da madeira maciça (LVL, 2009).

Eckelman (1993) comenta que o LVL, além de apresentar características únicas, agrega as características e propriedades de madeira sólida e de painéis compensados. 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 despertou interesse na pesquisa, sendo investigado por décadas na busca de aumentar suas propriedades tecnológicas, a fim de ampliar as opções de utilização e durabilidade deste material.

Uma nova linha de pesquisa está direcionada na aplicação de reforços sintéticos no LVL com o objetivo de aumentar suas propriedades físicas e mecânicas, ou como alternativa para substituir madeiras de alta qualidade por madeiras de menor qualidade. Uma opção de reforço sintético considerada tecnologicamente viável são os Polímeros Reforçados com Fibra de Vidro (PRFV) aplicados na linha de cola dos painéis de LVL. Pesquisas realizadas com esse reforço apresentaram resultados significativos de aumento da resistência e da rigidez de estruturas de madeira, baixo aumento do peso próprio do material e facilidade de manuseio.

Dagher et al. (1996) comentam que a fibra de vidro é um material com potencial para ser aplicado

na área de tração de vigas de madeiras de baixa densidade melhorando a rigidez e a resistência. Os mesmos autores concluem que o uso do reforço, em relação à resistência, pode substituir o uso de madeiras de alta densidade.

A maioria dos estudos já realizados com a aplicação de reforços sintéticos na madeira foi desenvolvida por pesquisadores estrangeiros. Wangaard (1964) e Biblis (1965) 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 desenvolvidas por Dagher et al. (1996) que estudaram o reforço de fibra de vidro em vigas de madeiras laminadas coladas (MLC) de baixa, média e alta densidade. A MLC também foi estudo por Gardner et al. (2000), em que compararam os reforçados de fibra de vidro com diferentes resinas: resorcinol formaldeído, éster vinil e éster vinil com hidroximetil resorcinol; com esta última, obtiveram os melhores resultados. Também é possível encontrar trabalhos, sobre o mesmo tema, desenvolvidos por Soltis (1998), Michael (2002), Richie (2003), Dagher e Altimore (2005).

Pesquisas no Brasil utilizando fibra de vidro como reforço em estruturas de madeiras são recentes. Fiorelli e Dias (2011) estudaram 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 à resina epóxi. Fiorelli (2005) introduziu em sua pesquisa critérios para a produção e dimensionamento de vigas de Madeira Laminada Colada (MLC) com e sem reforço de PRFV. Miotto e Dias (2006) apresentaram um estudo sobre as possibilidades de utilização de fibras como reforço e recuperação de estruturas. Já Miotto e Dias (2011) avaliaram, de forma experimental e numérica, o comportamento estrutural de vigas mistas de madeira MLC e concreto, reforçadas com PRFV. Foncesa et al. (2011) aplicaram PRFV com resina epóxi na parte de tração de painéis compensados. Em todas essas pesquisas, a aplicação do reforço se mostrou favorável.

Diante das possibilidades apresentadas em pesquisas anteriores, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a massa específica básica (ME_b), o módulo de elasticidade (MOE) e o módulo de ruptura (MOR) a partir do teste de flexão estática na posição *flatwise* e na posição *edgewise* de painéis LVL com e sem reforço de fibra de vidro.

Também, avaliar o cisalhamento na linha de cola da resina fenol-formaldeído; fibra de vidro com resina epóxi e fibra de vidro com resina isoftálica.

MATERIAIS E MÉTODOS

Classificação das lâminas de 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 em um povoamento formado por regeneração natural de *Pinus elliotti*, 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, as quais foram laminadas na própria FEPAGRO – Florestas.

Após a secagem, as lâminas de madeira foram acondicionadas em câmara climatizada localizada no Laboratório de Produtos Florestais (LPF), da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Em seguida, foi realizada a classificação das lâminas 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). Posteriormente, as lâminas foram classificadas em faixas ME_b , ou seja, foi demarcado um percentual de variação em relação à média para cada classe (A, B e C). 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”).

Esta classificação foi necessária para formação dos painéis. Foram utilizadas 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.

Delineamento experimental

Os tratamentos consistiram na confecção de painéis de LVL, colados com fenol-formaldeído (190 g/m^2) e reforçados com fibra de vidro impregnada com dois tipos de resina. Cada painel possuía 9 camadas de lâminas de madeira reforçadas com uma, duas ou quatro camadas de fibras de vidro de gramatura de 300 g/m^2 impregnadas com resina epóxi na gramatura de 1200 g/m^2 , ou resina poliéster isoftálica insaturada com NPG – que será aqui nomeada apenas como isoftálica – na gramatura de 1600 g/m^2 . Os compósitos foram formados com 9 camadas de fibra de vidro impregnadas com resina epóxi na gramatura de 1.200 g/m^2 , ou resina poliéster isoftálica na gramatura de 1600 g/m^2 (Figura 1). As dimensões médias finais de comprimento, largura e espessura dos painéis LVL e dos compósitos foram de: $45 \text{ cm} \times 34 \text{ cm} \times \text{ESP}$ (aproximadamente $1,08 \text{ cm}$) e $31 \text{ cm} \times 7,6 \text{ cm} \times 0,5 \text{ cm}$, respectivamente.

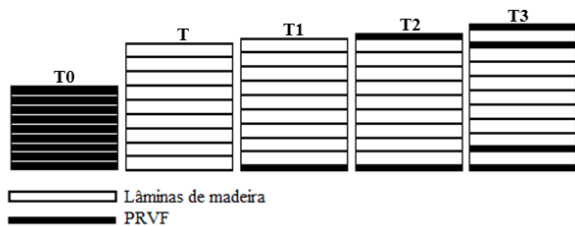


FIGURA 1: Desenho ilustrativo do compósito de fibra de vidro (T0), do tratamento testemunha (T) e dos painéis com uma, duas e quatro camadas de PRFV (T1, T2 e T3).

FIGURE 1: Composite panels (T0); panel control (T); panel reinforced with one fiberglass layer (T1); panel reinforced with two fiberglass layers (T2); panel reinforced with four fiberglass layers (T3).

Na Tabela 1 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 compósitos, totalizando 4 painéis.

Montagem dos painéis

A montagem dos painéis LVL foi realizada em duas etapas.

A primeira etapa consistiu na montagem dos painéis LVL com a resina estrutural fenol-formaldeído. 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.

Os painéis foram prensados a frio durante 45 minutos, após, foram submetidos a uma prensagem a 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 (tempo de cura do adesivo), a uma pressão específica de 14 kgf/cm^2 . O tempo de prensagem a quente foi calculado em função da distância entre a linha de cola mais profunda e a superfície dos pratos da prensa. Determinada esta distância, para cada milímetro, foram acrescidos dois minutos. Esses parâmetros foram ajustados às recomendações do fabricante da resina fenólica (HEXON, 2006).

A segunda etapa consistiu na aplicação dos reforços de fibra de vidro com resina epóxi ou resina isoftálica (dependendo do tratamento) sobre os painéis de LVL fabricados na etapa anterior e armazenados em câmara climatizada.

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 foi impregnada com resina na proporção de 1200 g/m^2 para a resina epóxi e de 1600 g/m^2 para a resina isoftálica. Estas quantidades são as recomendadas pelos fabricantes e foram suficientes para total impregnação da fibra de vidro. 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 de 8 kgf/cm^2 em temperatura ambiente, durante 24 horas, tempo suficiente para a total cura das resinas. Já os compósitos foram prensados em prensa manual

TABELA 1: Número de PRFV aplicados nos painéis LVL com indicação da posição e tipo de resina de impregnação.

TABLE 1: Reinforcement number applied on the LVL with position indication of reinforcement and type of impregnation resin.

Tratamentos	Nº de camadas Madeira/PRFV	Posição da camada de PRFV	Repetições (R)
T	9/0	-	3
E - T0	0/9	-	2
E - T1	9/1	1 contracapa	3
E - T2	9/2	1 capa e 1 contracapa	3
E - T3	9/4	2 capas e 2 contracapas	3
I - T0	0/9	-	2
I - T1	9/1	1 contracapa	3
I - T2	9/2	1 capa e 1 contracapa	3
I - T3	9/4	2 capas e 2 contracapas	3

Em que: PRFV = Polímero Reforçado com fibra de vidro; E = resina epóxi; I = resina isoftálica; T = testemunha – LVL; T0 = testemunha compósito; T1 = uma camada de PRFV; T2 = duas camadas de PRFV; T3 = quatro camadas de PRFV.

durante 24 horas.

Finalizada a etapa de montagem dos painéis LVL e da aplicação dos reforços, os mesmos foram marcados e cortados com serra fita. Em seguida, os corpos de prova foram acondicionados em câmara climatizada para a estabilização do teor de umidade e posterior realização dos testes. O teor de umidade dos painéis foi determinado pela norma ASTM D 4442, a massa específica ao teor de umidade de equilíbrio dos painéis, nos diferentes tratamentos, foi determinada pela norma ASTM D 2395 e em seguida corrigida para ME_b através da Equação 1.

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

Em que: ME_b = Massa específica básica, em g/cm^3 ; ME_e = Massa específica ao teor de umidade de equilíbrio, em g/cm^3 ; TU_e = Teor de umidade de equilíbrio médio dos painéis LVL.

O MOE e o MOR do teste de flexão estática na posição *flatwise* e na posição *edgewise* foi determinado seguindo as recomendações da norma ASTM D 3043 método D. A determinação do cisalhamento na linha de cola utilizando resina fenol-formaldeído, fibra de vidro laminada com resina epóxi e fibra de vidro laminada com resina isoftálica foi realizada seguindo as recomendações da norma ASTM D 905 e 1037.

As análises estatísticas dos resultados foram

realizadas por análise de variância (ANOVA), a 5% de probabilidade de erro, como meio de constatar a existência ou não de diferenças significativas entre os valores das médias. 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%. O programa estatístico empregado para interpretação dos resultados foi o STAGRAPHICS *plus*.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Teor de umidade de equilíbrio (TU_e) e massa específica básica (ME_b)

O valor médio do TU_e de cada tratamento esta exposto na Tabela 2. 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. O menor valor de TU_e foi encontrado nos tratamentos que receberam maior número de camadas de PRFV, por exemplo, os tratamentos E – T3 e I – T3. Aparentemente as camadas de PRFV impediram a adsorção de umidade, apresentando menor TU_e em relação aos tratamentos sem revestimento.

Já o maior TU_e foi encontrado no tratamento testemunha, composto apenas por lâminas de madeira, o que reforça a teoria de que o PRFV age como impermeabilizante.

Fonseca et al. (2011) também encontraram menor teor de umidade para os tratamentos com PRFV e concluíram que o resultado foi devido à proteção do PRFV sobre a madeira, já que a madeira apresenta característica higroscópica, ou seja, ela libera ou recebe umidade para o ambiente, dependendo das condições climáticas a que está exposta.

Na mesma tabela ainda é possível analisar os valores de ME_b , os quais foram maiores nos tratamentos que receberam maior número de camadas de PRFV. 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.

Os painéis com duas e quatro camadas de PRFV, tanto com a resina epóxi como com a resina isoftálica, não apresentaram variação estatística quanto à ME_b , mesmo que a quantidade de resina isoftálica aplicada nos reforços de fibra de vidro foi maior, em uma aplicação de 1600 g/m^2 em relação a 1200 g/m^2 de epóxi.

Os painéis com uma camada de PRFV para as duas resinas em estudo (E – T1 e I – T1), foram enquadrados com valores em B. Já o tratamento testemunha (T) foi classificado como valores em

A, apresentando o menor valor médio de ME_b entre os tratamentos ($0,64 \text{ g/cm}^3$), já que o mesmo não apresentava camadas de PRFV, sendo composto apenas por lâminas de madeira e resina fenol-formaldeído.

Os painéis sofreram influência das resinas e das camadas de reforço. O painel I – T3 (isofálticas com quatro camadas de PRFV), I – T2 (isofáltica com duas camadas de PRFV), E – T3 (epóxi com quatro camadas de PRFV) e E – T2 (epóxi com duas camadas de PRFV) 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.

Flexão estática na posição *flatwise* e na posição *edgewise*

Os valores médios do MOE e do MOR na posição *flatwise* e na posição *edgewise* para os painéis LVL e para os compósitos são apresentados na Tabela 3, juntamente com os valores do coeficiente de variação (CV) de cada tratamento, assim como a comparação das médias dos tratamentos pelo método LSD ao nível de 5% de probabilidade de erro. A Figura 2 expõe o momento do rompimento do corpo de prova durante o teste de flexão estática – posição *flatwise* – para o tratamento I – T1.

A Figura 3 complementa a Tabela 2, permitindo a visualização das curvas de carregamento-elongação dos corpos de prova submetidos à flexão estática. Nota-se que a aplicação

TABELA 2: Valores de teor de umidade de equilíbrio e massa específica básica dos painéis LVL.

TABLE 2: Equilibrium moisture content and density values of LVL panels.

Tratamentos	Teor de umidade de equilíbrio (TU_e) %	ME_b g/cm ³
T	11,6 ^{3,0}	0,64 ^A
E - T0	--	1,42 ^E
E - T1	9,8 ^{4,9}	0,73 ^B
E - T2	8,9 ^{3,6}	0,77 ^C
E - T3	6,9 ^{7,7}	0,80 ^{CD}
I - T0	--	1,35 ^E
I - T1	9,4 ^{2,8}	0,72 ^B
I - T2	7,8 ^{7,1}	0,77 ^{CD}
I - T3	6,4 ^{11,7}	0,82 ^C

Em que: T = testemunha; E = resina epóxi; I = resina isoftálica; T0 = compósito fibra de vidro e resina; T1 = uma camada de PRFV; T2 = duas camadas de PRFV; T3 = quatro camadas de PRFV. Letras diferentes entre linhas representam diferenças significativas a 95% de probabilidade, o número central é o valor médio, acima e à direita tem-se o coeficiente de variação (CV).

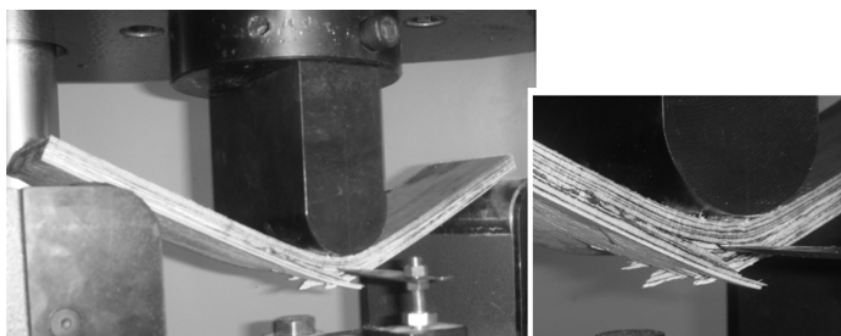


FIGURA 2: Teste de flexão estática; tratamento com uma camada PRFV.

FIGURE 2: Static bending; panel reinforced with one GFRP layer.

TABELA 3: Valores médios do MOE e do MOR para o teste de flexão estática na posição *flatwise* e *edgewise*.
TABLE 3: MOE and MOR medium values from static bending in flatwise and edgewise position.

Tratamentos	Posição <i>flatwise</i>				Posição <i>edgewise</i>			
	MOE Kgf/cm ²		MOR Kgf/cm ²		MOE Kgf/cm ²		MOR Kgf/cm ²	
T	50.768	13,7 A	776	11,2 A	43.417	4,3 A	738	10,5 A
E - T0	98.021	6,9 D	2.428	3,5 E	--	--	--	--
E - T1	61.839	18,2 B	1.003	10,4 BC	47.856	8,8 AB	773	13,8 AB
E - T2	69.749	12,5 BC	1.060	11,1 BCD	53.591	13,1 BC	934	15,9 CD
E - T3	65.065	8,2 B	1.118	8,1 CD	49.923	10,2 ABC	886	9,5 BC
I - T0	83.062	18,3 CD	2.097	12,9 F	--	--	--	--
I - T1	66.354	10,7 B	972	11,1 B	54.220	15,9 BC	951	8,2 CD
I - T2	70.847	14,5 BC	1.170	5,6 D	49.566	11,1 AB	901	8,2 C
I - T3	71.448	14,1 BC	1.139	5,0 D	56.216	7,3 C	1.043	13,5 D

Em que: E = resina epóxi; I = resina isoftálica; T = testemunha; T0 = compósito fibra de vidro e resina; T1 = uma camada de PRFV; T2 = duas camadas de PRFV; T3 = quatro camadas de PRFV. Letras diferentes entre linhas representam diferenças significativas a 95% de probabilidade, o número central é o valor médio, acima e à direita tem-se o coeficiente de variação (CV).

de PRFV favorece a resistência do painel. Quanto ao tipo de resina utilizada no PRFV, epóxi ou isoftálica, os diferentes tratamentos tiveram valores de ruptura muito semelhantes, porém, a PRFV com resina isoftálica apresentou uma menor elongação até a ruptura quando comparado com os tratamentos em que se utilizou resina epóxi. O PRFV aplicado na face de tração e nas faces de tração e compressão contribuiu para uma maior rigidez em tratamentos com resina epóxi (E – T1 e E – T2).

Observando os dados da Tabela 3, nota-se que houve um ganho na resistência do LVL com a aplicação de PRFV. Os valores de MOR na posição *flatwise*, comparando os dois tipos de resina utilizados na impregnação do PRFV, não se diferenciaram estatisticamente ao nível de 5% de probabilidade de erro. O número de camadas de

PRFV com resina epóxi não influenciou nos valores do MOR para tratamentos com mais de uma camada de PRFV. Já os tratamentos de PRFV e resina isoftálica, com duas e quatro camadas, tiveram valores maiores e se diferenciaram estatisticamente do tratamento com apenas uma camada de reforço.

Miotto e Dias (2006), em um estudo com MLC, comentam que uma das soluções para se obter uma maior resistência à flexão, assim como modificar o seu MOR, consiste na utilização de reforços na face tracionada das peças. O mesmo foi confirmado com os resultados da presente pesquisa, em que se obteve o aumento do MOR após a aplicação de PRFV na posição de tração, representando um ganho na resistência em aproximadamente 30% em relação ao tratamento testemunha. Segundo os autores, o emprego dos

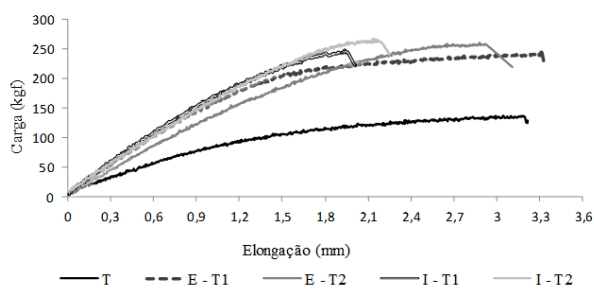


FIGURA 3: Curvas-carga versus alongação-ensaios de flexão estática.

FIGURE 3: Load-displacement relation - static bending.

PRVF para reforço de elementos estruturais de madeira é uma alternativa promissora, por se tratar de um material resistente à corrosão, que proporciona um pequeno aumento do peso próprio e aumenta a confiabilidade em relação ao MOR.

Dagher et al. (1996) aplicaram PRFV na face tracionada de vigas laminadas coladas de baixa, média e alta densidade. De maneira geral, concluíram que as vigas confeccionadas com 1-3% de PRFV apresentaram ganhos representativos em resistência, cujos valores foram superiores a 56%, e de rigidez, com valores superiores a 37% em comparação com o tratamento sem PRFV.

As resinas utilizadas na impregnação da fibra de vidro não influenciaram na rigidez do LVL, mesmo a resina epóxi tenha 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 explicar esse comportamento.

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 PRFV e, conseqüentemente, quatro camadas de resina, não se diferenciaram estatisticamente de tratamentos que receberam apenas uma camada de PRFV.

Na posição *edgewise*, o reforço de fibra de vidro, assim como o tipo de resina utilizada na sua impregnação, não teria 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 determinada 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 secção transversal dessas lâminas e à distância dessa faixa em relação à linha neutra.

Também, como não houve uma seleção criteriosa na escolha das árvores para a laminação, o baixo valor do MOE pode ter sofrido influência 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 germinação não foram aplicados métodos silviculturais e no crescimento não foram aplicadas técnicas de manejo, importante para a obtenção de madeiras de qualidade.

Ao contrário dos resultados obtidos pelo MOE, os valores do MOR apresentaram diferenças significativas quanto à aplicação de camadas de PRFV na posição de ensaio *edgewise*. A análise de médias comprovou que são necessárias duas camadas de PRFV com resina epóxi para ocorrer o aumento da resistência do LVL. Já o uso de apenas uma camada de reforço na contracapa do painel com resina isoftálica é suficiente para aumentar os valores do MOR.

Cisalhamento na linha de cola

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 apenas da resina fenol-formaldeído (FF) a seco e após fervura.

No teste a seco, 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 4. O teste de cisalhamento e as falhas na madeira estão apresentados na Figura 4.

TABELA 4: Tensão de ruptura na linha de cola e falha na madeira – teste a seco.

TABLE 4: Glue line shear test and wood failure – dry test.

	Cisalhamento na linha de cola - Teste a seco					
	FV + E		FV + I		FF	
Tensão de ruptura MPa	10,81	^{8,8} _B	6,94	^{11,2} _A	7,16	^{12,9} _A
Falha na madeira %	92,0	^{7,3} _B	4,0	^{28,9} _A	96,7	^{6,0} _B

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

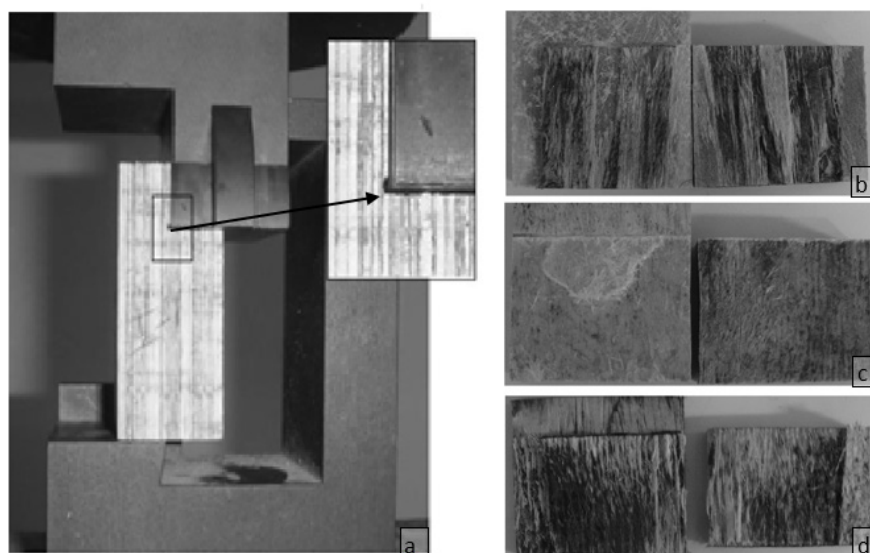


FIGURA 4: Teste de cisalhamento a seco (a) para os tratamentos FV + E (b), FV + I (c) e FF (d).

FIGURE 4: Glue line shear test and wood failure (a) – dry test: FV + E (b); FV + I (c) and FF (d) treatments.

TABELA 5: Tensão de ruptura na linha de cola e falha na madeira – teste após fervura.

TABLE 5: Glue line shear test and wood failure – wet test.

	Cisalhamento na linha de cola - Teste após fervura					
	FV + E		FV + I		FF	
Tensão de ruptura MPa	5,34	^{7,4} _B	3,18	^{22,2} _A	3,04	^{8,8} _A
Falha na madeira (%)	79,0	^{17,0} _B	35,0	^{11,7} _A	97,5	^{3,0} _B

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

A análise das médias de valores de resistência na linha de cola indicou 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.

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 ao cisalhamento de 8,58 MPa 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.

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 baixo percentual de falha na madeira da resina isoftálica é explicado pela baixa adesão desta resina a 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 interferiram 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 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 porcentagem 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 à pouca aderência ao material.

A Tabela 5 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, obtidos no teste de cisalhamento após fervura. A exposição à fervura tem por objetivo causar o envelhecimento acelerado da colagem da madeira.

Os resultados da comparação de médias da força de resistência encontrados no teste após fervura seguiram a mesma tendência dos testes

a seco, nos quais o tratamento com resina epóxi apresentou a maior resistência à força aplicada se diferenciando dos outros dois tratamentos ao nível de 5% de probabilidade de erro. Os tratamentos FV + I e FF apresentando valores muito próximos de resistência ao cisalhamento, o que se pode confirmar que as duas colagens se equivalem estatisticamente.

Segundo o mesmo autor, 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 estruturais.

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 às 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.

As colagens com resina fenol-formaldeído apresentaram tanto no teste a seco como após fervura, alta porcentagem de falhas na madeira, o que era esperado. Em 97,5% dos casos o rompimento ocorreu na madeira.

CONCLUSÕES

Para esforços de flexão estática nas posições

flatwise e *edgewise*, a aplicação de uma camada de reforço de fibra de vidro com resina epóxi na posição de tração é suficiente para melhorar a rigidez e resistência dos painéis LVL. Com resina isoftálica é necessária uma camada na área de tração para aumentar o MOE e duas camadas, tração e compressão, para aumentar os valores de MOR. O teste de cisalhamento na linha de cola revelou que a resina isoftálica, apesar de possuir boa resistência à tensão de ruptura, não possui boa adesão à madeira, não sendo recomendado seu uso para materiais estruturais que ficarão expostos às intempéries.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BIBLIS, E. J. Analysis of wood-fiberglass composite beams within and beyond the elastic region. **Forest Products Journal**. v. 15, n. 2, p. 81-88, 1965.
- DAGHER, H. J. et al. **Effect of FRP Reinforcement on Low Grade Eastern Hemlock Glulams**. 1996. Disponível em: <<http://www.fpl.fs.fed.us/documents/pdf1996/daghe96b.pdf>>. Acesso em: 15 jun. 2011.
- DAGHER, H. J.; ALTIMORE, M. A. Use of glass-fiber reinforced polymer tendons for stresslaminating timber bridge decks. **Journal of Bridge Engineering**. v. 10, n. 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.
- ECKELMAN, C. A. Potential uses of laminated veneer lumber in furniture. **Forest Product Journal**. v. 43, n. 4, p. 19-24, 1993.
- FIORELLI, J.; DIAS, A. A. Glulam beams reinforced with FRP externally-bonded: theoretical and experimental evaluation. **Materials and Structures**. v. 44, p. 1431-1440, 2011.
- FONSECA, C. B.; COSTAG, F.; DIAS, F. M. Reforço com fibras de vidro em painéis compensados – uma alternativa ecológica. In: SEGET: SIMPÓSIO DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO E TECNOLOGIA, 8., 2011.
- GARDNER, D. **Adhesive bonding of estern hemlock glulam panels with e-glass/vinyl ester reinforcement**. 2000. Disponível em: <<http://www.thefreelibrary.com/ADHESIVE+BONDING+OF+ESTERN+HEMLOCK+GLULAM+PANELS+WITH+E-GLASS%2FVINYL...-a071325061>>. Acesso em: 06 ago. 2013.
- HEXON. **Boletim Técnico CASCOPHEN HL-2080**. Resina fenólica líquida para colagens à prova d'água. DOC 55, Emissão B, Rev. 5, 2006, 4 p.
- 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**. v. 41, n. 1, p. 83-90, 2011.
- LVL – Laminated 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.
- 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.
- MIOTTO, J. L.; DIAS, A. A. Avaliação experimental de vigas mistas de MLC-Concreto reforçadas com fibras de vidro. **Mecânica Experimental**. v. 19, p. 121-131, 2011.
- MIOTTO, J. L.; DIAS A. A. Reforço e recuperação de estruturas de madeira. **Revista Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas**. Londrina, v. 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.
- 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.
- SOLTIS, L. A.; ROSS, R. J.; WINDORSKI, D. F. Fiberglass-reinforced bolted wood connections. **Forest Products Journal**, v. 48, n. 9, p. 63-67, 1998.
- WANGAARD, F. Elastic deflection of wood-fiberglass composites beams. **Forest Products Journal**. v. 14, n. 6, p. 256-260, 1964.