

**RIGIDEZ E RESISTÊNCIA DE VIGAS ESTRUTURAIS DE MADEIRA LAMINADA COLADA
E COM PERFIL I COMPOSTAS POR DIFERENTES ADESIVOS**

**BENDING STIFFNESS AND RESISTENCE OF STRUCTURAL GLULAM BEAMS AND I – JOIST
COMPOSED OF DIFFERENT ADHESIVES**

Alexsandro Bayestorff da Cunha¹ Jorge Luis Monteiro de Matos²

RESUMO

A madeira sempre foi utilizada estruturalmente na construção civil na forma sólida, com baixo grau de processamento e inovação tecnológica e, muitas vezes, em outros componentes como em pisos, paredes e telhados. Entretanto, a mudança nos padrões adotados envolveu o aperfeiçoamento da tecnologia, bem como a mudança do conceito estético e funcional requerido nas construções. Dessa forma, surgiram as vigas estruturais em madeira como a Madeira Laminada Colada (MLC) e com Perfil em I que apresentam uma série de vantagens como à alta resistência em relação ao seu peso. O objetivo geral do presente estudo foi avaliar o efeito do tipo de adesivo sobre a resistência e rigidez de vigas estruturais de Madeira Laminada Colada (MLC) e com perfil em I de *Pinus taeda*. Os adesivos utilizados no experimento foram a Resorcina Fenol Formaldeído (RFF), a Melamina Uréia Formaldeído (MUF) e o Poliuretano (PUR). O processo de fabricação das vigas envolveu a classificação das peças, fabricação de emendas, junção, montagem e prensagem. Os ensaios envolveram a avaliação das propriedades estruturais sob flexão como Módulo de Elasticidade (MOE) e Ruptura (MOR). Na análise dos valores médios obtidos para as variáveis não foram encontradas diferenças significativas para as vigas de MLC, entretanto, nas vigas com perfil em I, verificou-se a superioridade do adesivo PUR no valor médio do MOR. Em relação aos tipos e gramaturas de adesivos utilizados, observou-se que o adesivo RFF necessita de maior quantidade do produto para atender ao mecanismo da adesão, 500 g/m². Dois parâmetros tornaram o adesivo PUR diferenciado em relação aos demais; o tempo de cura 24 vezes mais rápido, tornando-o mais vantajoso sob o ponto de vista de volume de produção e o tempo em aberto mais curto que requer procedimentos especiais. As vigas de MLC apresentaram valores médio superiores, mas a escolha do modelo de viga deve ser analisada cuidadosamente, levando-se sempre em consideração a resistência requerida e o custo do material a ser utilizado na confecção destas.

Palavras- chave: madeira laminada colada; viga com perfil em I; adesivos potenciais para vigas.

ABSTRACT

Wood has always been structurally used in solid form in civil construction, with a low degree of processing and technological innovation, and many times in other constituents such as floors, walls and roofs. However, changes in the adopted standards involve the refinement of technology, as well as, changes of the esthetic and functional concepts required in constructions. Thus, structural wood beams, such as glulam and I – joist, have emerged, presenting a series of advantages such as high resistance in relation to weight. The general objective of this study was to evaluate the effect of the type of adhesive on the strength and stiffness of beams of Glulam and I-joist of *Pinus taeda*. The adhesives used in the experiment were resorcinol-phenol-formaldehyde (RFF), melamine-urea-formaldehyde (MUF) and polyurethane (PUR). The process of

1. Engenheiro Florestal, Dr., Professor do Curso de Engenharia Florestal da Universidade do Contestado e do Centro de Ciências Agroveterinárias da Universidade do Estado de Santa Catarina, Av. Luiz de Camões, 2090, Bairro Conta Dinheiro, CEP 88520-000, Lages (SC). a2abc@cav.udesc.br

2. Engenheiro Florestal, Dr., Professor do Centro de Ciências Florestais e da Madeira, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Av. Lothário Meissner, 632, Jardim Botânico, Campus III, CEP 80210-170, Curitiba (PR). jmatos.ufpr@gmail.com.

Recebido para publicação em 01/10/2007 e aceito em 21/01/2010.

manufacturing the beams involved the classification of the parts, manufacturing of the finger joint, junction, assembly and pressing. The assays involved the assessment of structural properties of bending such as the Elasticity Model and Rupture. In the analysis of the average values for the variables, no significant differences were found for the glulam, however, for the I - joist, the superiority of the PUR adhesive was verified, based on the average value of the rupture model. In relation to the types and weights of the adhesives used, it was observed that the RFF adhesive needed a greater amount of the product to provide the mechanism of adherence, 500 g/m². Two parameters made the PUR adhesive different in relation to the others: a 24 times faster healing time, making it more advantageous from the point of view of volume of production; and the shorter open time, which requires special procedures. The glulam beams showed higher mean values, but the choice of the beam model must be analyzed carefully, always taking into consideration the required resistance and the cost of the material to be used in the confection.

Keywords: glulam; I – joist; potential adhesives for beams.

INTRODUÇÃO

Apesar da multiplicidade de recursos florestais, no Brasil, a questão da construção civil envolve interesses de grandes monopólios como o do aço, concreto e plástico. Produtos fabricados com esses materiais vão se consolidando e gradativamente substituindo a madeira. A pouca utilização da madeira de reflorestamento tem origem na falta de informação das possibilidades de uso da madeira de qualidade (LAROCA, 2002).

Em países como os Estados Unidos, Canadá, Austrália e Japão a madeira é muito utilizada na construção de habitações com resultados satisfatórios. A madeira como material de construção oferece vantagens que superam outros materiais tradicionais. Dentre as potencialidades da madeira, destacam-se, segundo Andrigueto e Szücs (2006): resistência mecânica elevada em relação à massa própria, facilidade de usinagem, resistência química apreciável, boas propriedades de isolamento térmico e elétrico, além de ser matéria-prima renovável na natureza e apresentar baixo consumo energético para a sua produção.

A grande variabilidade das espécies de coníferas, bem como todas as peculiaridades do pinus reflorestado em relação às madeiras folhosas não deve ser entendida como inviabilização do uso dessa madeira como material estrutural e, sim, deve ser estudada e entendida para garantir sua boa aplicação. Stamato et al. (2006) citam que diversas são as aplicações da madeira de pinus em estruturas industrializadas, sobretudo pelo fato de que a grande maioria das tecnologias desenvolvidas para a industrialização de estruturas de madeira é voltada para o uso de coníferas como matéria-prima.

Nesse contexto, a madeira laminada colada

e vigas com perfil I apresentam-se como uma forma racional de emprego da madeira na construção de estruturas, obtida pela associação de peças. Essa técnica facilita a construção de grandes estruturas, com dimensões e formas variadas, limitadas, apenas, ao local onde serão fabricadas e ao meio de transporte utilizado. Como uma das vantagens principais, permite a redução dos defeitos observados em peças de madeira maciça com grandes dimensões.

De acordo com dados da UNECE/FAO (2006), a produção de madeira laminada colada bateu recorde nos Estados Unidos no ano de 2004, atingindo cerca de 17.500 m³; e as vigas com perfil em I aumentaram a participação no mercado de painéis estruturais, sendo que no ano mencionado representava nos Estados Unidos 46% dos painéis utilizados para estrutura de pisos comparada com o de madeira sólida que abrangia neste mesmo ano 39%, e 15% para outros produtos.

Denomina-se “Madeira Laminada Colada” o conjunto de peças de madeira reconstituídas partindo de lâminas (tábuas), de dimensões relativamente reduzidas se comparadas às dimensões da peça final assim constituída. Essas lâminas, que são unidas por colagem, ficam dispostas de tal maneira que as suas fibras estejam paralelas entre si (SZÜCS, 2006). A MLC tem seus usos mais frequentes em estruturas de cobertura, elementos estruturais principais para pontes, torres de transmissão, edifícios, embarcações, banzos de escadas e corrimão, equipamentos decorativos planos ou em relevos, esquadrias e móveis. Isso se deve ao fato da MLC adaptar-se a uma significativa variedade de formas e apresentar alta resistência a solicitações mecânicas em função de seu peso próprio relativamente baixo (ZANGIÁCOMO, 2003).

As vigas com perfil I são a segunda geração

de produtos engenheirados que envolve um painel estrutural que compõe a alma e outro tipo de painel ou madeira sólida nas flanges (GREEN e HERNANDEZ, 1998). As flanges podem ser de madeira sólida ou painéis de lâminas paralelas (PLP); Painéis compensados e *Oriented Strand Board* (OSB) são usados para a alma da viga (SMULSKI, 1997).

Para se construir vigas estruturais de grandes dimensões, é necessário a confecção das emendas longitudinais, transversais ou ambas. Essa técnica permite a construção de vigas com mais de 43 metros de vão livre. As emendas de topo e bisel, em nível industrial, caíram em desuso, pois representam um grande desperdício de madeira, sobretudo para menores inclinações, sendo substituídas por emendas denteadas (NASCIMENTO et al., 2002).

Dessa forma, o objetivo geral do presente estudo foi avaliar o efeito do tipo de adesivo sobre a resistência e rigidez de vigas estruturais de Madeira Laminada Colada (MLC) e com perfil em I (*I-joint*) de *Pinus taeda*, voltadas para a construção civil e habitacional.

MATERIAL E MÉTODO

O processo de confecção das vigas estruturais foi desenvolvido na Battistella Indústria e Comércio Ltda, em Lages, Santa Catarina. Já os ensaios

tecnológicos foram realizados no Laboratório de Tecnologia da Madeira da Universidade Federal do Paraná. Os ensaios de flexão estática foram desenvolvidos de acordo com a norma americana *American Society for Testing Materials* (ASTM D198-05a, 2007) e os cálculos das variáveis de interesse de acordo com a EN 789 (2004) e a ASTM D198-05a (2007).

Amostragem

Para a confecção das vigas estruturais foram utilizadas 1.088 peças de madeira serrada que apresentavam inicialmente 32 mm X 128 mm X 2050 mm de dimensões nominais e teor de umidade médio de 12%; tais peças foram utilizadas para Madeira Laminada Colada (MLC) e para as flanges das vigas em I. Já para a alma do segundo modelo de viga, foram utilizadas oito painéis estruturais de OSB (*Oriented Strand Board*) com dimensões de 18 mm X 1600 mm X 2500 mm. Os adesivos utilizados no processo foram: a Resorcina Fenol Formaldeído (RFF), a Melamina Uréia Formaldeído (MUF) e o Poliuretano (PUR). As vigas estruturais apresentavam 3.100 mm de comprimento, 122 mm de largura e 156 mm de altura (Figura 1). Desta forma, foram confeccionadas 55 vigas estruturais distribuídas em seis tratamentos, conforme apresentado na Tabela 1.

TABELA 1: Tratamentos utilizados no experimento com vigas estruturais.

TABLE 1: Treatments used in the experiment with structural beams.

Tratamento	Adesivo	Viga Estrutural	Número de Vigas
1	RFF	MLC	10
2	RFF	Viga em I	10
3	MUF	MLC	10
4	MUF	Viga em I	10
5	PUR	MLC	07
6	PUR	Viga em I	08

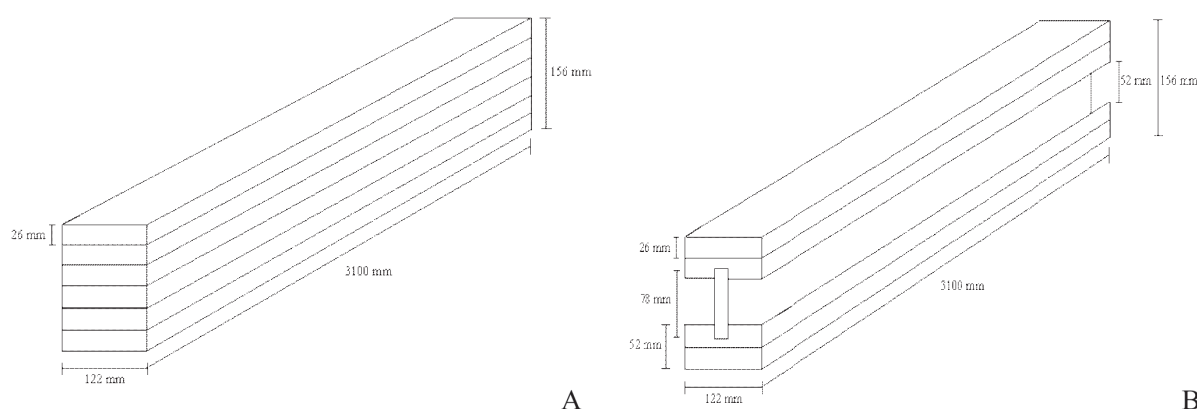


FIGURA 1: Esquema ilustrativo das vigas estruturais utilizadas no experimento. (A) madeira laminada colada; (B) viga com perfil I.

FIGURE 1: Schematic illustration of the structural beams used in the experiment. (A) Glulam; (B) I-joist.

As vigas de MLC foram compostas por seis peças de madeira serrada e aplainada com 26 mm de espessura, as quais foram coladas face e face e emendadas nos topos com encaixes dentados. Já as vigas com perfil I foram formadas por duas peças de madeira serrada e aplainada, sendo coladas e perfazendo a flange com 52 mm de espessura; a alma formada por três painéis de OSB com 1050 mm de comprimento, 78 mm de largura e 18 mm de espessura. A alma da viga foi fresada juntamente com a face da flange que estava voltada para dentro da peça.

Classificação das peças para as vigas estruturais de MLC e das flanges das vigas com perfil I

Todas as peças de madeira serrada passaram inicialmente pelo processo de pré-bitolamento em uma plaina de quatro faces. Esse procedimento objetivou facilitar a visualização dos defeitos na classificação visual das peças. As peças passaram a apresentar as seguintes dimensões: 30 mm X 126 mm X 2050 mm. Os processos de destopo e classificação foram feitos conjuntamente de acordo com a metodologia utilizada rotineiramente pela empresa para a classificação das peças, dessa forma, evitou-se que as peças fossem classificadas por métodos de difícil empregabilidade nas indústrias. Sendo assim, o colaborador classificou visualmente as peças observando as seguintes características:

a) densidade: as peças foram classificadas como densas quando apresentavam seis ou mais anéis de crescimento e mais de 1/3 da seção transversal contendo madeira de lenho tardio, ou quatro ou mais anéis de crescimento e mais de 1/2 da seção

transversal contendo madeira de lenho tardio; e Não Densa (ND) para as demais densidades (média e baixa). As peças classificadas como densas foram utilizadas nas duas lamelas da extremidade inferior e superior das vigas de MLC e nas duas lamelas das flanges das vigas em I; já as não densas foram utilizadas nas quatro lamelas internas das vigas de MLC;

b) presença de defeitos e a densidade das peças: na classe de madeira densa não eram permitidos defeitos como nó solto, nó tipo gravata, nó firme atravessando a peça em espessura, medula nos dois lados da peça, esmoado e rachaduras; já para a classe de madeira não densa não eram permitidos defeitos como nó gravata, nó atravessando a peça em espessura, rachaduras e esmoado.

c) Comprimento das peças: além da classificação visual, as peças a serem utilizadas nas extremidades não poderiam ter comprimento inferior a 800 mm e as do miolo inferior a 300 mm.

O processo de fabricação dos dentes nas peças de madeira serrada aplainadas e destopadas na classificação foi realizado por uma fresadeira Tochetto Modelo T-10 dotada de oito jogos de cinco facas cada um, com movimento giratório. As emendas dentadas verticais tipo *finger joint* foram efetuadas com dentes de 26 mm de profundidade, conforme recomendado pela norma DIN-68-140 (1972). Na confecção das emendas para o adesivo PUR, o equipamento, além de efetuar os cortes, realizava também a transferência do adesivo da bomba aplicadora até os dentes através de um pente aplicador colocado logo após o jogo de facas. Já os outros dois adesivos, a RFF e a MUF foram aplicados com auxílio de um pincel. O adesivo

MUF foi preparado na proporção cem partes de resina para vinte partes de catalisador e para a RFF, cem partes de resina para 15 partes de catalisador. O processo de junção das peças para a formação da lamela foi realizado em uma emendadeira automática Tochetto Modelo T-20 que aplicava pressão necessária no ponto de junção dos dentes de duas peças.

Caracterização do fresamento nas peças que compõem as vigas com perfil I

Para as vigas com perfil I, foi necessário a realização do fresamento nas lamelas internas das flanges e nas peças de OSB. As lamelas internas foram fresadas com três dentes e profundidade de 13 mm. Juntamente com a operação de fresamento, as peças foram aplainadas nas quatro faces, regularizando as dimensões em 122 mm e 26 mm para largura e espessura, respectivamente. As chapas de OSB foram inicialmente cortadas nas dimensões de utilização: 1.040 mm de comprimento e 78 mm de largura; e fresadas em espessura com 4 dentes e uma profundidade de 13 mm.

Aplicação do adesivo nas faces das lamelas de MLC e nas fresas das vigas com perfil I

Antes da aplicação do adesivo nas lamelas da MLC e das flanges das vigas em I, as vigas foram montadas sobre cavaletes para se distribuir as lamelas quanto ao distanciamento entre as emendas, que não deveria ser inferior a 20 cm, mas em virtude da madeira utilizada, a distância mínima utilizada no estudo entre as emendas foi de 12 cm.

O equipamento para a aplicação dos adesivos RFF e MUF nessas lamelas foi o sistema de rolos, aplicando gramatura dupla de 400g/m² para a MUF e 500 g/m² para a RFF respectivamente. Na formulação do adesivo MUF foram utilizadas cem partes de resina para vinte partes de catalisador. Quanto ao adesivo RFF foram preparadas cem partes de adesivo para 15 partes de catalisador.

Nas vigas com perfil I, a aplicação do adesivo (mesma proporção do utilizado nas vigas de MLC) foi feita na fresa da peça interna da flange

com auxílio de um pincel para se ter o direcionamento do adesivo no local desejado, ou seja, na junção da alma com a flange.

O sistema de aplicação do adesivo poliuretano foi diferenciado em ambos os modelos de viga, em função da sua rápida cura; dessa forma, para as lamelas de MLC e para as flanges das vigas com perfil I, foi utilizado aplicador de cortina, sem necessidade de mistura. Já nas partes fresadas da viga em I, foi utilizada uma mangueira que direcionava o adesivo ao local desejado. A gramatura utilizada para esse adesivo foi de 200 g/m².

O processo de prensagem das vigas estruturais foi efetuado em uma prensa Baioni Press Modelo BP/TR. Na prensa, as vigas foram dispostas separadamente por tratamento, utilizando temperatura ambiente e uma pressão superior de 14 MPa e lateral 12 MPa. Dessa forma, o processo foi concluído após 12 horas de prensagem.

Ensaio de resistência estrutural

Na realização dos ensaios das vigas para a obtenção dos valores de MOE e MOR foi utilizado como referência o método descrito pela seção 4 da ASTM D 198-05a (2007), o qual visa à determinação das propriedades de flexão para vigas estruturais feitas de madeira sólida ou laminada, ou ainda componentes estruturais. Para a realização dessa atividade, foi utilizada uma máquina universal de ensaios (Emic DL – 30000).

A distância entre os pontos de apoio foi de 2700 mm, sendo que a distância entre o ponto de reação até o ponto de aplicação de carga foi de 900 mm (metade do vão de cisalhamento), conforme prescrito na norma ASTM D198-05a (2007); que determina para a avaliação das propriedades de flexão estática uma relação entre a metade do vão de cisalhamento pela altura da viga (a/h) um intervalo de 4 a 6. Para a determinação da deformação da viga ao longo do ensaio, utilizou-se um extensômetro com capacidade de variação de deformação de 2,5 cm partindo do ponto inicial do ensaio. O extensômetro foi posicionado na linha neutra da viga, sendo fixado em uma barra Yoke.

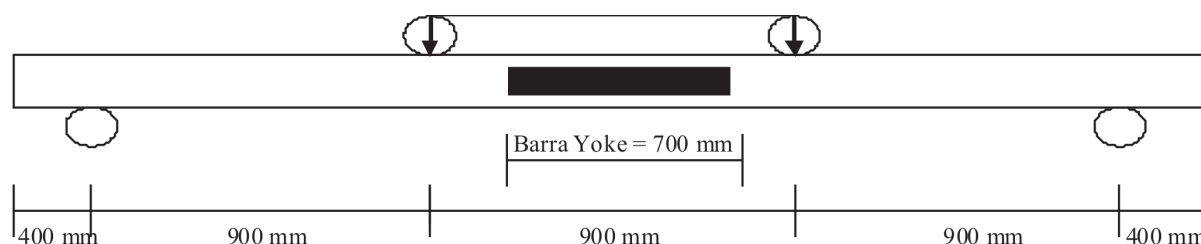


FIGURA 2: Esquema estático do ensaio para obtenção da resistência e rigidez das vigas.

FIGURE 2: Static scheme of the test to obtain the strength and stiffness of beams.

O início dos ensaios consistiu na determinação da velocidade de aplicação da carga, que deveria ser suficiente para obter-se a ruptura em 10 minutos de acordo com a norma, não menos que 6 minutos e não mais que 20 minutos. Sendo assim, determinou-se uma velocidade de 0,6 mm / minuto.

O módulo de elasticidade da viga no ensaio destrutivo foi calculado levando-se em consideração o incremento da relação força e deformação no intervalo de 10 e 40% da força máxima, adotando-se para obtenção desses parâmetros como referência a Norma Europeia EN 789 (2004). A equação utilizada para cálculo do Módulo de Elasticidade (MOE) com correção do efeito do cisalhamento foi:

$$MOE = \frac{3 \times (F_{40\%} - F_{10\%}) \times L_b^2 \times a}{4 \times (def_{40\%} - def_{10\%}) \times b \times h^3}$$

Em que: MOE = Módulo de Elasticidade (MPa); (com correção do efeito cisalhamento); $F_{40\%}$ = Carga correspondente a 40% da carga máxima (N); $F_{10\%}$ = Carga correspondente a 10% da carga máxima (N); L_1 = Distância entre os pontos de apoio do Yoke (mm); a = Metade do comprimento do vão de cisalhamento (mm); $def_{40\%}$ = Deformação

correspondente a 40% da carga máxima (mm); $def_{10\%}$ = Deformação correspondente a 10% da carga máxima (mm); b = Largura da viga (mm); h = Altura da viga (mm).

O módulo de ruptura foi calculado com base na força máxima aplicada durante a realização do ensaio de flexão estática, conforme a seguinte fórmula:

$$MOR = \frac{3 \times F_{MAX} \times a}{b \times h^2}$$

Em que: MOR = Módulo de Ruptura (MPa); a = Metade do comprimento da zona de cisalhamento (mm); b = Largura da viga (mm); h = Altura da viga (mm).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Madeira laminada colada

Os valores obtidos para Módulo de Elasticidade das vigas estruturais de MLC compostos pelos três adesivos são apresentados na Tabela 2. Observa-se o maior valor médio para vigas produzidas com adesivo poliuretano (15.795 MPa) em relação às médias obtidas para o resorcinol

TABELA 2: Valores de MOE e MOR das vigas de MLC.

TABLE 2: Values of static MOE and MOR of the Glulam beams.

Viga	RFF		MUF		PUR	
	MOE (MPa)	MOR (MPa)	MOE (MPa)	MOR (MPa)	MOE (MPa)	MOR (MPa)
1	14.021	17	16.023	18	14.387	25
2	17.147	24	13.115	37	19.258	23
3	14.804	26	13.713	20	14.978	21
4	15.593	23	17.057	28	14.408	24
5	13.999	32	13.656	31	17.622	28
6	16.748	21	14.682	30	16.511	32
7	13.883	23	15.283	30	13.401	28
8	14.088	28	16.545	19	-	-
9	17.038	29	14.116	30	-	-
10	15.551	33	17.449	34	-	-
Média	15.287	26	15.164	28	15.795	26

(15.287 MPa) e ao melamínico (15.164 MPa). Isso pode ser atribuído à grande dispersão relativa a fatores não controláveis do experimento, sobretudo a madeira. A dispersão dos resultados pode ser verificada, por exemplo, dentro do tratamento que é caracterizado pelo adesivo MUF, em que o menor valor representa 75% do maior valor. Observa-se pela análise de variância apresentada na Tabela 3 que o valor de F calculado é menor que o F crítico indicando a inexistência de diferença estatística entre a média dos tratamentos. Nesse caso, para as vigas de MLC, a escolha do adesivo mais adequado dependerá das características econômicas de manuseio, preço e volume de produção. Outro parâmetro para decisão do adesivo a ser utilizado refere-se a questões ambientais com requisitos de baixos níveis de emissão de formaldeído dos produtos. Esse parâmetro tem sido recentemente utilizado como barreira comercial e limitador de uso por alguns países.

Recentemente foram incorporados o adesivo melamínico e o poliuretano. O PUR tem um grande poder de ligação a um reduzido tempo de cura; mas, em contrapartida, pouco tempo em aberto, o que vem a dificultar o manuseio desse produto, necessitando-se de equipamentos especiais para a sua aplicação e uma logística precisa para a prensagem.

Para o incremento dos valores de MOE das vigas, deve-se realizar a classificação das lamelas por meio de ensaios não destrutivos, selecionando-se as

peças com maiores valores de MOE para serem alocadas nas regiões mais exigidas da viga, ou seja, nas zonas de tração e compressão.

O valor do módulo de ruptura é apenas comparativo, não sendo influenciado pela relação vão e altura da viga. A análise dos valores do MOR está apresentada na Tabela 2, na qual se observa que os maiores valores médios se encontram nas vigas com adesivo melamínico (28 MPa), enquanto que os resultados menos expressivos são das vigas unidas com o resorcinólico, invertendo a situação encontrada na determinação do MOE. Mesmo assim, não houve diferenças estatísticas significativas entre as médias dos tratamentos, como pode ser observado na Tabela 4.

Os valores de carga máxima e MOR são influenciados por fatores relacionados à madeira e a fatores externos com o processo de composição da viga. Entre esses fatores estão os encaixes, seja no comprimento dos dentes, nas distâncias entre os dentes na viga ou na falta de pressão durante a efetivação da junção.

No presente estudo, foram observados três tipos de rupturas nas vigas: por tração na camada inferior da viga, região oposta a aplicação da carga; nas regiões com a presença de agentes redutores de resistência como nos encaixes e na presença de nós; e em menor escala na região de cisalhamento na linha de cola ao longo do eixo longitudinal da viga, onde

TABELA 3: Análise da variância para MOE das vigas de MLC.

TABLE 3: Analysis of variance for MOE of the glulam beams.

Fonte de variação	GL	SQ	QM	F	Valor- <i>P</i>	F – crítico
Entre grupos	2	1757431,5741	878715,7870	0,3334	0,7197	3,4028
Resíduo	24	63247542,5000	2635314,2708			
Total	26	65004974,0741				

Em que: SQ = soma de quadrados; GL = grau de liberdade; QM = quadrado médio; F = valor de F calculado.

TABELA 4: Análise da variância para MOR das vigas de MLC.

TABLE 4: Analysis of variance for MOR of the glulam beams.

Fonte de variação	GL	SQ	QM	F	Valor – <i>P</i>	F – crítico
Entre grupos	2	26,7873	13,3936	0,4752	0,6275	3,4028
Resíduo	24	676,4171	28,1840			
Total	26	703,2044				

Em que: SQ = soma de quadrados; GL = grau de liberdade; QM = quadrado médio; F = valor de F calculado.

se tem a presença do adesivo.

Andrigheto e Szücs (2006) realizaram ensaios de flexão estática em MLC de *Pinus spp* com 3.150 mm de comprimento e 315 mm de altura, sendo composta por 12 lâminas classificadas de acordo com análise visual e propriedades físicas/mecânicas da madeira. Os resultados do experimento demonstraram nas vigas com ¼ de lâminas com qualidade superior nas camadas mais externas, MOE médio de 12.449 MPa e MOR de 40 MPa; para as vigas com 1/6 de lâminas com qualidade superior MOE de 10.054 MPa e MOR de 38 MPa; já quando foram utilizadas lâminas invertidas (lâminas das camadas externas no sentido perpendicular as do miolo) nas regiões de maior esforço, o MOE foi de 11.459 MPa e o MOR de 32 MPa.

Em estudo realizado por Nielsen (1998) com vigas laminadas coladas de *Eucalyptus spp*, com seção retangular de 10 X 23 cm e adesivo Resorcinol Formaldeído, demonstrou que as vigas formadas com peças de material genético de *Eucalyptus grandis* de árvores com idade média de 9 anos, de duas procedências distintas, um MOE de 10.674 MPa e MOR de 41 MPa para densidade média de 0,63 g/cm³; 11.383 MPa e 35 MPa para densidade média de 0,68 g/cm³. Já o material da segunda procedência apresentou MOE e MOR de 9.974 MPa e 34 MPa respectivamente para a primeira densidade e para a segunda densidade 12.484 MPa e 48 MPa.

Relacionando-se os estudos, verifica-se que

quando comparado com os ensaios em MLC tanto de *Pinus spp* como de *Eucalyptus spp*, os resultados foram superiores na variável MOE, sendo que o menor valor de 13.115 MPa, obtido com o adesivo MUF, foi superior aos encontrados pelos pesquisadores relacionados. Já o MOR foi inferior, com média entre os três adesivos de 26 MPa, representando somente 81% do menor valor do estudo com madeira de *Pinus spp*. Essa inversão indica que as cargas necessárias para romper as vigas foram menores, refletindo diretamente nos valores da variável. Quanto ao MOE, pode-se dizer que as vigas apresentaram menor deformabilidade e maior resistência, consequentemente, melhores as características da madeira para uso estrutural. Assim, mesmo com os expressivos resultados, deve-se enfatizar que os valores de MOE encontrados para vigas de MLC podem ser aumentados com o efetivo controle dos defeitos da madeira admitidos para a classificação e distribuição correta das lamelas.

Vigas com perfil em I

Nesse perfil de viga estrutural, foram repetidos os mesmos ensaios aplicados a vigas MLC. A Tabela 5 apresenta os valores de MOE, observando-se novamente a superioridade das vigas que utilizaram o poliuretano como adesivo com 15.499 MPa, seguido das vigas com o adesivo MUF e RFF. Essa superioridade não foi significativa dentro

TABELA 5: Valores de MOE e MOR das vigas com perfil I.

TABLE 5: Values of MOE and MOR of the I – joist beams.

Viga	RFF		MUF		PUR	
	MOE (MPa)	MOR (MPa)	MOE (MPa)	MOR (MPa)	MOE (MPa)	MOR (MPa)
1	13.669	17	15.627	11	15.483	17
2	17.505	18	11.069	18	15.613	31
3	14.447	18	17.408	11	18.848	23
4	18.456	11	14.284	15	16.876	21
5	15.710	9	14.677	10	10.991	11
6	14.985	15	11.308	13	15.010	27
7	17.554	12	20.698	14	16.264	23
8	12.259	10	11.726	14	14.909	26
9	10.549	9	18.296	12	-	-
-	13.920	11	20.123	14	-	-
Média	14.905	13 a	15.522	13 a	15.499	23 b

Em que: *Letras diferentes nos valores médios representam diferença estatística entre as variáveis pelo Teste de Tukey.

e entre os tratamentos, Tabela 6.

Em estudo realizado por Pedrosa (2003) com vigas com perfil I constituídas por PLP, Compensado de *Pinus taeda* e *Eucalyptus dunnii*, e OSB de *Pinus spp*, encontrou como melhores resultados as vigas formadas com chapas de OSB como alma, e PLP de *Pinus sp* e *Eucalyptus sp* como flanges, com valores de MOE de 13.739 MPa e 19.613 MPa. Enquanto que o valor de médio de MOE entre os três tratamentos do presente estudo foi de 15.309 MPa, mesmo as flanges sendo compostas por duas peças de madeira serrada coladas face a face; sendo que segundo especificações de fabricantes o material mais indicado para esse fim seriam chapas de PLP. Quanto ao emprego de chapas de OSB em vigas com perfil I, pode-se afirmar que é o material mais adequado para a composição da alma, pois, durante a confecção das vigas, se tentou o emprego de painéis compensados estruturais, mas em virtude da necessidade de fresamento para a melhoria do desempenho dos encaixes, todos apresentaram deficiências.

A fabricação das vigas estruturais com perfil I exige uma maior atenção dos colaboradores, tendo em vista que necessitam da implementação de encaixes. Outro fator que dificulta a fabricação dessas vigas é a falta de equipamento específico para tal fim, como aplicadores de adesivo. Caso o adesivo utilizado na composição seja o PUR, os cuidados devem ser redobrados, tendo em vista o pouco tempo em aberto, seu alto poder corrosivo e seu alto poder de adesão, podendo ficar aderido aos pratos da prensa.

Da mesma forma que nos valores de MOE da madeira laminada colada, evidencia-se uma grande dispersão dos valores dentro dos tratamentos como, por exemplo, no tratamento com adesivo melamínico

que tem seu maior valor em 20.698 MPa e o menor valor em 11.069 MPa, correspondendo a quase a metade do primeiro valor de MOE mencionado. Essa dispersão é devido a constituição das flanges, pois o material utilizado na alma do composto, painéis de OSB, apresenta-se como um material com grande homogeneidade em sua estrutura.

Os valores encontrados para MOR em Vigas com Perfil I são apresentados na Tabela 5, na qual se verifica que as vigas coladas com adesivo RFF e MUF apresentaram 13 MPa de resistência, enquanto as vigas que utilizaram o adesivo PUR, 23 MPa; cerca de 44% superior. Esse fato fez com que houvesse uma diferença estatística entre os valores médios dos tratamentos neste ensaio. Essa diferenciação foi comprovada pela Análise da Variância e pelo Teste de Tukey a 5% de significância (Tabela 5 e 7).

Na análise da variância, observa-se que o F calculado (14,4119) foi superior ao F crítico (3,3852), caracterizando a diferenciação entre os tratamentos. No teste de Tukey, evidenciou-se que a diferença está entre os tratamentos que utilizaram os adesivos RFF e MUF em relação ao PUR que foi superior.

A superioridade das vigas em que foi utilizado o adesivo poliuretano estava evidenciada na obtenção de todas as variáveis (MOE e MOR), mas nunca de forma significativa. Esse fato é decorrente das características da madeira utilizada nas flanges, que apresentaram vários fatores redutores de resistência como a presença de defeitos naturais, que pode ser eliminado durante a fase de classificação das peças e em razão das junções por meio de dentes colados com os adesivos utilizados; nesse caso, destaca-se o adesivo PUR; tendo em vista que defeitos nas peças todas as vigas possuíam e os dentes das junções foram implementados de forma uniforme na fresadeira.

TABELA 6: Análise da variância para MOE das vigas com perfil I.

TABLE 6: Analysis of variance for MOE of the I – joist beams.

Fonte de variação	GL	SQ	QM	F	Valor – P	F – crítico
Entre grupos	2	2365101,1286	1182550,5643	0,1451	0,8657	3,3852
Resíduo	25	203811216,3000	8152448,6520			
Total	27	206176317,4286				

Em que: SQ = soma de quadrados; GL = grau de liberdade; QM = quadrado médio; F = valor de F calculado.

TABELA 7: Análise da variância para MOR das vigas com perfil em I.

TABLE 7: Analysis of variance for MOR of the I – joist beams.

Fonte de variação	GL	SQ	QM	F	Valor- <i>P</i>	F – crítico
Entre grupos	2	503,5703	251,7852	14,4119	0,00007	3,3852
Resíduo	25	436,7668	17,4707			
Total	27	940,3372				

Em que: SQ = soma de quadrados; GL = grau de liberdade; QM = quadrado médio; F = valor de F calculado.

Relações entre matéria-prima e a resistência das vigas estruturais

Na tabela 8, observa-se que a área a ser colada é sempre a mesma, ou seja, entre os encaixes e nas faces das peças, mantendo sempre as mesmas condições de classificação; tendo em vista que pode variar o número de junções dependendo da qualidade da madeira utilizada. A gramatura utilizada para o adesivo PUR é de 200 g/m² em linha simples, cerca de 50% menor que o adesivo MUF e 40% menor que o RFF, isso representa uma diminuição da quantidade de adesivo a ser utilizado por unidade de área.

Para Madeira Laminada Colada, utilizando-se as características das vigas do presente estudo, tem-se para o adesivo PUR 378,20 g de adesivo para a colagem face a face e 15,22 g para a colagem das 24 junções necessárias no composto, totalizando 383,42 g; quando se faz um comparativo com as vigas coladas com o adesivo resorcinólico, tem-se aproximadamente 256% a mais de adesivo para se produzir o mesmo composto. Quando se compara com o adesivo melamínico, 205% de acréscimo na quantidade de cola. Essas variações estão relacionadas diretamente à gramatura utilizada na aplicação dos adesivos, segundo as recomendações dos catálogos das empresas fornecedoras. Quando

se analisam as vigas com perfil I, a situação não é diferenciada da madeira laminada colada, o adesivo poliuretano permanece com a aplicação de menores quantidades do produto, refletindo na diminuição dos custos de produção.

Outro fator que coloca o adesivo PUR em posição de destaque diante dos dois outros tipos de adesivos utilizados é o reduzido tempo de cura em temperatura ambiente; enquanto os adesivos tradicionais atingem o tempo de cura em aproximadamente 12 horas, o PUR atinge em minutos, aumentando a produtividade.

Dessa forma, destaca-se a utilização do PUR para a fabricação de vigas estruturais, salientando que devem ser tomados alguns cuidados na sua aplicação como na sua grande velocidade de cura e no poder corrosivo quando em contato com roupas e com a pele. Outro fator importante a destacar é a necessidade de equipamento específico para a aplicação do adesivo e a distribuição de desmoldante na prensa.

O tempo em aberto, ou seja, o tempo desde a aplicação do adesivo até o momento da prensagem deve ser o menor possível para que não ocorra um aumento na viscosidade, passando do momento elástico máximo de aplicação, tendo como consequência a falha penetração do adesivo na madeira e a queda na qualidade da colagem.

TABELA 8: Quantificação da matéria-prima utilizada para fabricação das vigas estruturais.

TABLE 8: Quantification of the raw material used for manufacturing the structural beams.

Vigas	Formulação	Adesivo/viga			Madeira/viga	
		Emenda (g)*	Face (g)	Fresa (g)	Madeira Serrada (m ³)	Painel OSB (m ³)
MLC	RFF	38,06	945,50	-	0,059	-
	MUF	30,45	756,40	-	0,059	-
	PUR	15,22	378,20	-	0,059	-
<i>I-joist</i>	RFF	25,38	378,20	56,00	0,039	0,0043
	MUF	20,30	302,56	44,80	0,039	0,0043
	PUR	10,15	151,28	22,40	0,039	0,0043

Em que: *4 junções por lamela, totalizando 24 junções para MLC e 16 para I-joist.

Exemplifica-se que, em condições de temperatura de 20°C, e a madeira com 12% de umidade, tem-se como tempo de início do processo da solidificação cerca de 8 minutos para o adesivo PUR, o que pode ser uma grande vantagem em processos que contam com equipamentos adequados e grande velocidade de produção, ou desvantagem em outros, pois deve-se aplicar o adesivo e na sequência realizar a prensagem, caso contrário, perde-se todo o material que está sendo trabalhado. O tempo citado pode ser diminuído ainda mais com o aumento da temperatura ambiente.

Em termos de diferença de resistência entre os dois modelos de viga, não foram evidenciadas diferenças significativas para o MOE, somente para MOR que apresentou valores médios de 26,67 MPa para MLC e 16,33 MPa para Perfil I; sendo assim, as vigas com perfil I apresentam algumas características de destaque diante da MLC como o seu peso em relação à resistência, a quantidade de madeira serrada utilizada, a utilização de chapas de partículas reconstituídas (OSB) e a menor quantidade de adesivo a ser utilizado na sua composição; em contrapartida, tem-se a necessidade de adotar maiores cuidados no decorrer do processamento das vigas como na montagem e o acréscimo de algumas operações como o fresamento das flanges e das chapas.

CONCLUSÕES

O módulo de elasticidade das vigas demonstrou que as vigas estruturais de Madeira Laminada Colada com adesivo poliuretano apresentou os melhores índices de resistência média numérica, mas essa diferença de resistência entre os três tratamentos não foi evidenciada na Análise da Variância. O módulo de ruptura apresentou a mesma tendência sem diferença estatística significativa entre os resultados dentro e entre os tratamentos; estando as rupturas localizadas nas regiões tracionadas da viga, nas regiões que contêm redutores de resistência e na área de cisalhamento na linha de cola.

As vigas com perfil I apresentaram diferenças estatísticas entre os valores médios de módulo de ruptura entre os tratamentos que utilizaram adesivo resorcinólico e melamínico em relação ao poliuretano, que obteve coeficiente superior aos dois tradicionalmente utilizados pela indústria. Os valores médios encontrados para o adesivo poliuretano nos ensaios foram aproximadamente 44% maiores.

Como a variável para a classificação das vigas estruturais é o módulo de elasticidade, deve-se

adotar como parâmetro de escolha entre os tratamentos o custo do material a ser utilizado no composto e a facilidade de emprego do adesivo no processo industrial.

A quantidade de material utilizado para a produção das vigas de Madeira Laminada Colada foi de 0,059 m³ de madeira serrada, enquanto que para as vigas com perfil I teve-se 0,043 m³.

Em virtude da diferenciação das gramaturas utilizadas para cada adesivo, observou-se que o adesivo resorcinólico necessita de maiores quantidades de adesivo; sendo assim, tem-se como consequência o maior custo de aquisição entre os adesivos estudados. Quanto ao adesivo melamínico, mesmo apresentando gramatura de 400 g/m², acabou se aproximando muito em custos quando comparado com o adesivo poliuretano que apresenta gramatura em linha simples de 200 g/m².

O fator de diferenciação entre os adesivos melamínico e o poliuretano além da pequena diferença de custo é o tempo de cura e em aberto. O tempo em aberto é maior para o adesivo MUF, podendo ficar aproximadamente uma hora para ser aplicado; já o PUR em condições normais de trabalho, tem-se 8 minutos. Quanto ao tempo de cura o PUR apresentou considerável diferença, cerca de 24 vezes mais rápido; enquanto que o RFF e o MUF curam em 12 horas, o PUR atinge o ponto em meia hora.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRIGHETO, R.; SZÜCS, C. A. Estudo Comparativo entre Madeira Laminada Colada e Madeira Laminada Colada Multicolada. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 10., 2006, São Pedro (SP). **Anais...** São Carlos (SP): IBRAMEN – Instituto Brasileiro da Madeira e das Estruturas de Madeira, 2006, CD-ROM.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM D 198-05a - Standard Test Methods of Static Tests of Lumber in Structural Sizes**, West Conshohocken (PA), 2007, p. 20.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN 68 140 - Wood Finger-Jointing**. Berlim, 1972, 03 p.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 789 - Timber Structures. Test Methods. Determination of Mechanical Properties of Wood Based Panels**. Brussels, 2004, p. 36.
- GREEN, D. W.; HERNANDEZ, R. Codes and

- standards for structural wood products and their use in the United States. **Forest Products Society Annual Meeting**. Mérida, Yucatán, México, Jun. 1998. Disponível em: < <http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/pdf2000/green00d.pdf>>. Acesso em 04 dez. 2006.
- LAROCA, C. **Habitação Social em Madeira: uma Alternativa Viável**. 2002, 83 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, 2002.
- NASCIMENTO, A. M.; DELLA LÚCIA, R. M.; BAETA, F. C. Comportamento de Vigas Retas em MLC com Emendas de Topo e Bisel – Parte 1. **Revista Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 9, n. 1, p. 63 – 71, jan./dez. 2002.
- NIELSEN, I. R.. **Utilização da Madeira Comercial do Híbrido de *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake X *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden na Confecção de Vigas Laminadas Coladas**. 1998, 109 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná. 1998.
- PEDROSA, A. L. **Desempenho Estrutural de Vigas “I” Constituídas por PLP e Compensado de *Pinus taeda* L. e *Eucalyptus dunnii* Maiden e OSB de *Pinus spp.*** 2003, 104 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, 2003.
- SMULSKI, S. **Engineers Wood Products: A Guide for Specifiers Designers and Users**. **PFS Foundation**, Madison (Wisconsin), p. 356, 1997.
- STAMATO, G. C. et al. Cuidados com a Utilização de Coníferas nas Estruturas de Madeira. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 10., 2006, São Pedro. **Anais...** São Carlos: IBRAMEN – Instituto Brasileiro da Madeira e das Estruturas de Madeira, 2006, 1 CD-ROM.
- SZÜCS, C. A. **Madeira Laminada Colada (MLC). Portal Remade**. Curitiba, 2006. Disponível em <http://www.remade.com.br/madeiras/paineis_mlc.php>. Acesso em: 07 mar. 2006.
- TIMBER BULLETIN: Forest Products Annual Market Review. Geneva, Suíça: United Nations Economic Commission For Europe / Food And Agriculture Organization of United Nations.- UNECE / FAO, v. 58, p. 95 – 106.
- ZANGIÁCOMO, A. L. **Emprego de Espécies Tropicais Alternativas na Produção de Elementos Estruturais de Madeira Laminada Colada**. 2003, 82 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2003.