

## EMENDAS DENTADAS REFORÇADAS COM FIBRAS DE VIDRO E NATURAIS PARA UTILIZAÇÃO EM MADEIRA LAMINADA COLADA

### REINFORCEMENT OF FINGER JOINTS WITH GLASS AND NATURAL FIBERS APPLIED TO GLULAM

Antonio A. Dias <sup>(1)</sup>, Lucas Starguelin <sup>(2)</sup>

(1) Prof. Dr., Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Brasil

(2) Graduando em Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Brasil

Endereço de contato: dias@sc.usp.br

**Código de identificação: T4-01**

#### Resumo

A maioria das rupturas em elementos estruturais de madeira laminada colada tem início nas emendas dentadas posicionadas nas regiões mais solicitadas por tração. Uma das formas de melhorar o desempenho desses elementos é aumentar a resistência das emendas, o que pode ser conseguido com o reforço com fibras, utilizando-se lâminas com emendas reforçadas apenas nas regiões com maior solicitação à tração, por razões de economia. Neste trabalho foi realizada avaliação experimental da influência desse reforço na resistência à tração das emendas dentadas de lâminas com dimensões estruturais feitas com madeira de alta densidade (*Eucalyptus spp*). Foram ensaiadas lâminas sem emendas, lâminas com emendas sem reforço e lâminas reforçadas com compósitos de fibras com matriz epóxi, tendo sido utilizadas fibras de vidro e fibras naturais de curauá (*Ananas erectifolius*). Os resultados obtidos indicaram um ganho de resistência significativo (superior a 70%) para as emendas reforçadas com fibras em comparação com a resistência das lâminas que possuem emenda sem reforço.

**Palavras chave:** emenda dentada, compósitos de fibras, reforço de emendas dentadas

#### Abstract

*Most failures in glued laminated timber beams begin at the finger joints positioned in the most tensioned positions. A way to improve the performance of these beams is to increase the strength of the finger joints, which can be achieved with the reinforcement with fibers, using lumber with reinforced finger joints only in the regions with the highest tensions, for economic reasons. In this work, an experimental evaluation of the influence of this reinforcement in the tensile strength in lumber of high density wood (*Eucalyptus spp*) with finger joints was carried out. Lumber without finger joints, lumber with non-reinforced finger joints, and lumber reinforced with epoxy and fiber composites were tested, using glass fibers and natural fibers (*Ananas erectifolius*). The results indicated a significant strength increase (greater than 70%) for the reinforced finger joint with fibers in relation to the strength of the non-reinforced finger joint.*

**Keywords:** finger joints, fiber composites, finger joints reinforcement

## 1. INTRODUÇÃO E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Compósitos de fibras e resina epóxi vêm sendo pesquisados e utilizados em diversos setores relacionados às estruturas de madeira, como no reforço e recuperação de estruturas existentes, ou em elementos novos, como no caso da madeira laminada colada (MLC).

Na grande maioria dos casos, esses reforços são feitos por compósitos que utilizam fibras sintéticas (fibras de vidro, fibras de carbono, etc.). As fibras naturais, por sua vez, também vêm sendo pesquisadas, devido tanto às suas propriedades físicas, bem como por questões ambientais e econômicas, possuindo vários campos de aplicação.

Com relação a aplicação em madeira laminada colada, o reforço pode ser utilizado nas regiões externas das vigas, aumentando a sua resistência e a sua rigidez à flexão, ou nas emendas dentadas, que são o ponto crítico desses elementos. Nesse último caso, que foi o enfoque deste trabalho, a idéia é aplicar o reforço apenas nas emendas dentadas de lâminas dispostas nas regiões das vigas mais solicitadas por tensões de tração.

Assim, foi desenvolvida experimentação com o objetivo de avaliar a contribuição do reforço com fibras naturais (curauá) e fibras de vidro na resistência das emendas dentadas, utilizando peças em tamanho estrutural. Para efeito de comparação, também foram testadas peças sem emendas e peças com emendas dentadas sem reforço.

A Tabela 1 apresenta os possíveis modos de ruptura nos ensaios de resistência à tração em emendas dentadas, de acordo com a norma ASTM D 4688-99 - Standard Test Method for Evaluating Structural Adhesives for Finger Jointing Lumber [1].

Tabela 1: Modos de ruptura em ensaios de tração paralela. Fonte: ASTM D 4688: 1999.

Modo	Descrição
1	Na maioria das vezes rompe ao longo das superfícies da linha de cola com poucas falhas de qualquer tipo (ruptura < 70%).
2	Na maioria das vezes rompe ao longo das superfícies da linha de cola com considerável ruptura por cisalhamento (ruptura > 70%).
3	Na maioria das vezes rompe ao longo do perfil da emenda, mas com alguma ruptura na base dos dentes. Considerável ruptura por cisalhamento em toda a superfície do perfil.
4	Na maioria das vezes rompe na base das emendas. Poucas falhas ao longo do perfil.
5	A ruptura começa na emenda possivelmente devido a um concentrador de tensão, e prossegue fora da emenda. Praticamente 100% das rupturas são na madeira.
6	Ruptura fora da emenda e não influenciada por ela- a ruptura é totalmente na madeira.

Carvalho (2005) avaliou as propriedades mecânicas de tração de compósitos de tecidos de sisal com resina epóxi e poliuretana derivada do óleo de mamona; os resultados mostraram o melhor desempenho para os compósitos com resina epóxi. Também avaliou corpos-de-prova com tecidos de sisal impregnados com resinas poliméricas no reforço de estruturas de madeira para reabilitação estrutural, observando aumento na rigidez à flexão [2].

Bui; Milner e Williams (1996) utilizaram compósitos de fibra de vidro e resina epóxi para aumentar a resistência à tração das emendas dentadas, os resultados da resistência à tração mostraram aumentos entre 40% e 60% com 400 g/m<sup>2</sup> e 800 g/m<sup>2</sup> de tecido de fibra de vidro, respectivamente. Descreveram dois modos de falha para as lâminas com emendas dentadas reforçadas:

- modo I: A ruptura inicia pela emenda dentada, isto é, assumindo falha inicial na emenda seguida da falha no reforço;

- modo II: Ruptura por cisalhamento na linha de cola; a resistência do reforço da fibra de vidro é limitada pela ligação entre o adesivo epóxi e a madeira [3].

Yingcheng H. et al. (2009) realizaram experimentos para mostrar o efeito da posição da emenda dentada, e o comprimento e posição do reforço FRP (Fiber Reinforced Plastic) nas propriedades das vigas de MLC reforçadas. Avaliaram vigas laminadas sem emendas dentadas e com emendas dentadas na última lâmina da viga variando as distâncias entre a extremidade da viga e as emendas para 300 mm, 400 mm, 500 mm e 600 mm. Os comprimentos do FRP foram 200 mm, 400 mm, 600 mm e 1200 mm. Concluíram que o reforço aumentou o valor de MOE e MOR da viga de MLC de Álamo de 5% - 15% e 5% - 12% respectivamente. A emenda dentada na posição 300 mm foi a ideal, o comprimento do FRP mais econômico e ideal foi de 600 mm. A influência da posição do FRP (inferior ou superior à emenda) nas propriedades mecânicas da MLC foi pequena [4].

Szücs (1992) apresentou uma opção de reforço com um tecido de fibra de vidro de fios orientados, posicionado cruzado com as fibras da madeira, para vigas de MLC. O intuito desse reforço foi aumentar a resistência da madeira à tração na direção transversal às fibras, que possui maior fragilidade quanto aos esforços de tração. Foi possível aumentar a resistência à tração nessa direção em torno de seis vezes [5].

Estudos realizados empregando-se MLC reforçada com fibra de vidro são descritos por Dagher et al. (2002), relatando que as aplicações dos FRP como reforço na região tracionada, em uma razão de 2% a 3% da seção transversal, podem aumentar a resistência à flexão de vigas de madeira laminada colada em mais de 100% e a rigidez em torno de 10% a 15% [6].

Outro aspecto importante refere-se ao tipo de ruptura apresentado pelas vigas de madeira reforçada com fibras. O reforço faz com que haja uma grande plastificação da região comprimida da viga, causando grandes deslocamentos verticais na fase de ruptura. Dagher (2000) observou que, enquanto a ruptura à flexão de uma viga de madeira é tipicamente frágil, a correspondente ruptura de uma viga de madeira, apropriadamente reforçada com fibras no lado tracionado, é dúctil [7].

Fiorelli (2005) estudou a aplicação de reforço de fibra de vidro na região tracionada de vigas de MLC; o trabalho envolveu parte teórica e experimental de vigas em tamanho estrutural, e evidenciou o grande aumento na resistência da viga, proporcionado pelo reforço. Os resultados teóricos da rigidez à flexão determinados pelo método da seção transformada tiveram boa aproximação com os resultados experimentais. Foi desenvolvido programa computacional para avaliação da rigidez e da resistência das vigas de MLC reforçadas com fibras, que permite variar as dimensões e as propriedades de resistência e de elasticidade de cada lâmina, bem como do reforço de fibra de vidro [8]. Fiorelli & Dias (2011) apresentaram os principais aspectos quanto aos modelos teóricos empregados e os resultados experimentais obtidos nesse trabalho [9].

Mascia et. al. (2009) desenvolveram trabalho teórico a respeito da utilização de fibras de sisal no reforço de fibras de madeira. A camada de reforço foi disposta na camada externa tracionada da viga. Foram utilizadas três maneiras teóricas para abordar o problema: funções de tensão, teoria clássica da laminação e método da seção transformada. Concluíram que os dois primeiros fornecem resultados mais precisos, mas que o último é mais fácil de ser aplicado [10].

Fiorelli et al. (2010) apresentaram trabalho teórico a respeito de vigas de madeira laminada colada com camada de reforço de fibras de vidro e de fibras naturais (sisal e curauá), disposta na camada externa tracionada das vigas. Foram estimados o momento de ruptura e a rigidez das vigas com várias proporções de reforço. Como conclusão principal, a fibra de curauá foi considerada a mais eficiente podendo proporcionar aumentos de até 40% na resistência e na rigidez das vigas [11].

Moraes & Mascia (2012) desenvolveram estudo teórico para avaliar a influência do reforço com fibras de sisal dispostas na região tracionada da viga de MLC nos módulos de elasticidade da madeira, segundo as direções de simetria elástica. Concluíram que existe uma contribuição significativa do reforço nos módulos de elasticidade no compósito, mas que não há ganho quando se avalia o módulo de elasticidade em uma direção defasada de 6° em relação às fibras [12].

Hradil e Vanerek (2007) reforçaram vigas de madeira maciça e laminada colada com compósitos de fibras de vidro e de carbono e resina epóxi. Os resultados indicaram aumento na capacidade de carga. Observaram, na maioria dos casos de madeira maciça, falha de modo frágil do compósito e, para outros casos, falha pela presença de nós em que se iniciou a ruptura. Para a MLC, o reforço na borda inferior impediu falha na emenda dentada; no entanto, relataram falha inicial no local das emendas dentadas, em alguns casos [13].

## 2. MATERIAIS

### 2.1 Madeira

Foi utilizado um lote com 46 peças de *Eucalyptus sp*, densidade média do lote igual a 0,93 g/cm<sup>3</sup> a 12% de umidade, com dimensões nominais iguais a 5cm x 11cm x 200 cm. A secagem do lote foi realizada ao ar até atingir a umidade em torno de 12%. O controle do teor de umidade foi realizado com medidor digital, modelo DL 2000.

### 2.2 Fibras

No reforço das emendas dentadas foram utilizadas fibras de vidro e fibras de curauá. As propriedades de resistência a tração (f) consideradas para os compósitos reforçados com essas fibras, foram determinadas em ensaios prévios, sendo obtidos os valores:

$$f_{\text{vidro}} = 1.016 \text{ MPa}$$
$$f_{\text{curauá}} = 333 \text{ MPa}.$$

### 2.3 Adesivos

Para a colagem das emendas dentadas foi utilizado o adesivo Cascophen RS-216-M e o endurecedor FM-60-M, da empresa Hexion, na proporção foi 5:1, respectivamente. Segundo o fabricante, o tempo de cura do adesivo misturado varia entre 8 a 10 dias em temperatura ambiente (acima de 20°C).

Para aplicação do reforço de fibras nas emendas dentadas foi utilizada a resina epóxi AR-300 e o endurecedor AH-30, fabricados pela Barracuda Advanced Composites. A proporção resina: endurecedor foi 3:1, respectivamente. O tempo de cura dessa resinas epóxi segundo o fabricante varia entre 30 min. e 12 h em temperatura ambiente.

## 3. MÉTODOS

### 3.1 Classificação da madeira

Todas as peças foram classificadas mecanicamente, antes do processamento. A partir desses resultados foram selecionadas 24 peças para serem utilizadas nos testes. Após o processamento para reduzir as dimensões transversais para 3,5 cm x 10 cm, as peças foram novamente classificadas mecanicamente novamente. A classificação mecânica foi feita por meio de teste de flexão estática, segundo o eixo de menor inércia da peça, com aplicação de força no meio do vão e medindo a flecha nesse mesmo ponto. O módulo de elasticidade foi determinado no intervalo correspondente às forças que provocam, aproximadamente, flechas iguais a L/1000 e L/200, de modo a não exceder o limite de proporcionalidade do material.

### 3.2 Plano experimental

Com relação à existência de emenda dentada e à colocação de reforço, foram utilizados os seguintes tratamentos:

- T1:** peças sem emenda;
- T2:** com emenda e sem reforço;
- T3:** com emenda reforçada com compósito de fibra de vidro;
- T4:** com emenda reforçada com fibra natural.

Foram testadas 6 peças de *Eucalyptus sp* para cada tipo de tratamento (T1, T2, T3 e T4). Com o intuito de diminuir a variabilidade, as 24 peças foram distribuídas em 6 grupos (G1 a G6), de acordo com o módulo de elasticidade, buscando-se a homogeneidade entre as peças de cada grupo. A distribuição das peças de cada grupo entre os tratamentos foi feita de forma aleatória, por sorteio.

Após a realização dos testes nessas peças, constatou-se que parte das rupturas do grupo T3 ocorreu fora da região da emenda, com valores de resistência baixos. Assim, para o grupo T3 foram feitas mais duas peças extras (réplicas), com o intuito de substituir as duas peças que apresentaram menores valores de resistência.

### 3.3 Confeção das emendas dentadas

Foram confeccionadas emendas dentadas com padrão vertical, com as dimensões mostradas na Tabela 2, na metade do comprimento das peças de madeira.

No processamento dos dentes foram utilizadas facas asas giratórias, como ilustra a Figura 1.

Tabela 2: Parâmetros geométricos das emendas dentadas com perfil vertical.

Fonte: Hernández (1998) [14].

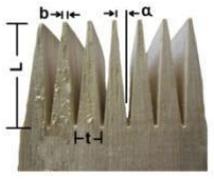
Parâmetro do dente	Dimensões	
comprimento	L=28,30 mm	
largura	t=6,98 mm	
largura da ponta	b=0,81 mm	
inclinação	A=1:10,6	



Figura 1: Processamento dos dentes da emenda dentada e detalhe das facas

O adesivo utilizado nas emendas dentadas foi Cascophen, pressão de colagem 9 MPa e tempo mínimo de prensagem igual a 2 segundos, conforme recomenda a norma DIN 68140: 1971 [15]. O equipamento usado para a prensagem era composto por um pistão pneumático para aplicação da força e um anel dinamométrico para acompanhamento da força necessária para a execução da emenda. O período da cura do adesivo foi superior a 10 dias, em temperatura ambiente.

A Figura 2 ilustra as etapas de colagem e pressão da emenda dentada com o adesivo Cascophen.

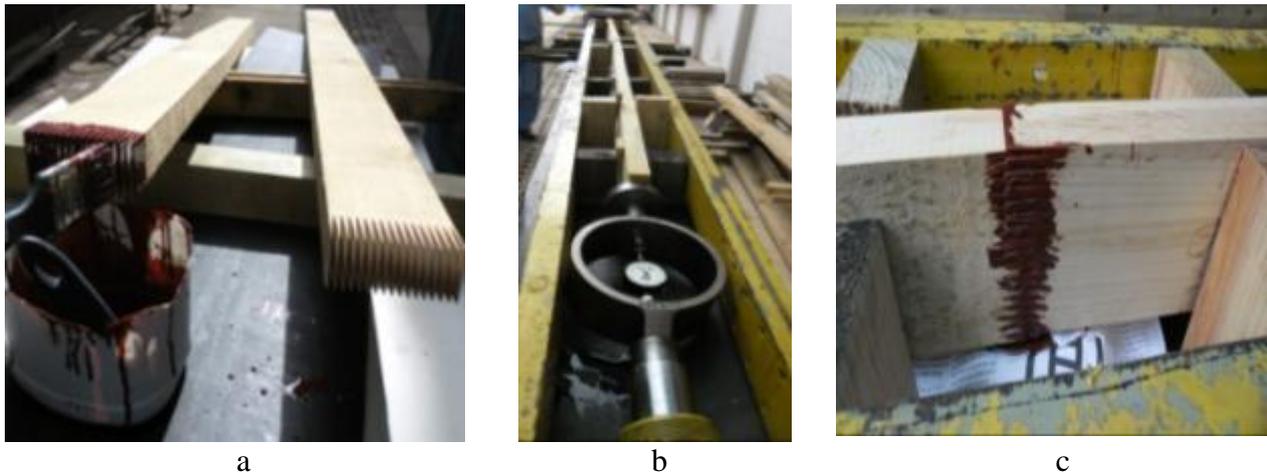


Figura 2: Aplicação do adesivo Cascophen nas emendas (a), equipamento utilizado para prensagem (b) e detalhe da emenda dentada prensada no equipamento (c).

Após o período de secagem do adesivo, as peças foram aplainadas. As peças de *Eucalyptus sp*, inicialmente com dimensões nominais 4cm x 10 cm x 200 cm, passaram a ter dimensões nominais de 3 cm x 8,5 cm x 200 cm, após a confecção das emendas. Foram feitas 18 peças com emenda dentada, correspondentes aos 3 tratamentos (T2, T3 e T4) que possuem emenda.

### 3.4 Aplicação do reforço nas emendas dentadas

A Figura 3 apresenta o esquema do reforço aplicado nas peças.

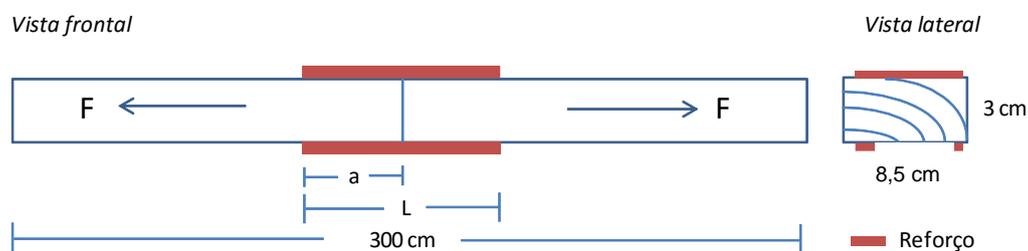


Figura 3: Esquema geral de uma peça com emenda dentada e reforço.

Para o tratamento T3, correspondente às emendas com reforço de fibra de vidro, a quantidade de camadas utilizadas em cada lado da peça, a largura e o comprimento do reforço foram definidos de acordo com os procedimentos descritos a seguir.

Inicialmente, foi definida a área necessária de fibra de vidro para recompor totalmente a resistência esperada para a peça de madeira com emenda dentada. A força que o reforço deve resistir foi considerada como sendo igual ao produto da área da seção transversal das peças pelo valor médio da resistência à tração das peças sem emenda (84 MPa), como apresentado no item 4. deste trabalho.

Foi obtido o valor de 5 camadas de fibras de vidro, aproximadamente, sendo utilizadas 6 camadas (3 de cada lado).

Com relação ao comprimento do reforço ( $L=2a$ , ver figura 3), o valor de  $a$  foi estimado considerando a resistência ao cisalhamento na interface madeira com adesivo epóxi igual a 10 MPa, como definido por Fiorelli (2002). Obteve-se o valor igual a 25 cm, optando-se por usar um comprimento de 35 cm.

No caso das fibras de curauá, considerando a dimensão nominal da peça de madeira 3 cm x 8,5 cm, a resistência à tração da madeira (84 MPa) e a resistência do compósito fibra-resina (333 MPa), obteve-se o valor da área necessária de fibras (650 mm<sup>2</sup>, aproximadamente). Utilizando um comprimento de reforço igual a 35 cm e considerando a densidade do curauá (1100 kg/m<sup>3</sup>), obteve-se o valor total de fibras a ser utilizada (250 g).

Por se tratar de fibras soltas, verificou-se que a aplicação dessa quantidade seria inviável; assim optou-se por aplicar apenas 40% desse valor, o que corresponde a 50 g de fibras de cada lado do reforço, com capacidade estimada de resistir a uma força igual a 86,6 kN, que, aplicada na peça de madeira com as mesmas dimensões e sem o reforço, corresponderia a aplicação de uma tensão igual a 34 MPa. A menor utilização dessa fibra também permitiu avaliar o comportamento do reforço em relação à emenda dentada, isto é, se há necessidade de recompor toda a resistência da peça com o reforço, ou se há a ocorrência de soma das resistências do reforço com a resistência da emenda.

A colagem foi realizada utilizando a resina epóxi AR300. O período da cura das peças com o reforço foi superior a 8 dias em temperatura ambiente. O procedimento para a colagem do reforço com 6 camadas de fibra de vidro por peça está ilustrado na Figura 4.



Figura 4.: Colagem do reforço com fibra de vidro

A Figura 5 ilustra o processo de aplicação da fibra de curauá, realizada com o auxílio de garras e madeiras de apoio para a melhor adesão da fibra à madeira.



Figura 5: Colagem do reforço com fibra de curauá

### 3.5 Ensaio de tração nas lâminas

Os ensaios de tração nas lâminas foram realizados na máquina de ensaio de tração horizontal, modelo 422 da Metriguard com capacidade para 880 kN, mostrada na Figura 6. A resistência à tração paralela as fibras ( $f_{t0}$ ) ou da emenda dentada ( $f_{gt,0}$ ) foi dada pela razão entre a força máxima aplicada e a área de madeira da seção transversal da peça, como determina a norma ABNT: NBR7190/1997 [16].



Figura 6: Máquina para ensaio de tração horizontal - Metriguard.

#### 4. RESULTADOS OBTIDOS E ANÁLISE

A Tabela 1 mostra os resultados obtidos para o módulo de elasticidade, com as peças já separadas nos grupos (G1 a G6) de forma a se ter peças homogêneas em termos de módulo de elasticidade em cada grupo, e os tratamentos (T1 a T4) em que foram distribuídas de forma aleatória. As peças do grupo 1 possuem os maiores valores de módulos de elasticidade, que vai diminuindo para os demais grupos.

Tabela 3: Módulo de elasticidade (MPa) das lâminas de *Eucalyptus sp* utilizadas nos ensaios

T	G1	G12	G3	G4	G5	G6
T1	22250	20804	18567	17252	16601	13668
T2	22557	20064	18647	18098	16797	12363
T3	27956	19830	19510	18283	16812	16501
T4	21389	19844	19429	18554	16588	15895

A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos para a resistência à tração e forma de ruptura de cada peça, bem como o valor médio e o coeficiente de variação (CV) de cada tratamento. O modo de ruptura nas peças com emendas são apresentados de acordo com a norma ASTM D 4688: 1999 (ver Tabela 1), e de acordo com Bui; Milner e Williams (1996) quando a falha ocorre no reforço (ver item 1 deste trabalho). O valor marcado com asterisco não foi considerado nesses cálculos.

Observando-se os resultados, pode-se concluir que não houve influência do grupo, para todos os tratamentos. Assim, a análise será feita sem considerar a influência do grupo.

Tabela 4: Resistência à tração das lâminas e modos de ruptura nas emendas

Grupo	T1	T2		T3		T4	
	$f_{t,0}$ (MPa)	$f_{gt,0}$ (MPa)	modo	$f_{gt,0}$ (MPa)	modo	$f_{gt,0}$ (MPa)	modo
G1	76,4	60,6	1	69,5	II	72,6	II
G2	62,6	54,8	1	70,3	6	79,8	I
G3	73,1	33,1	1	68,3	6	82,4	I
G4	120,3	30,3	1	78,1	II	68,4	I
G5	11,4*	32,8	1	76,4	II	77,8	I
G6	87,4	42,6	5	80,6	II	67,3	I
média	84,0	42,4	-	73,9	-	74,7	-
CV	23%	14%	-	7%	-	8%	-

O valor médio obtido para a resistência à tração das peças do tratamento T1 foi 84,0 MPa.

O valor médio obtido para a resistência à tração das peças do tratamento T2 foi 42,4 MPa. Cinco lâminas desse tratamento apresentaram ruptura do tipo 1, no qual a ruptura ocorre ao longo das superfícies da linha de cola com poucas falhas de qualquer outro tipo. Essa forma de ruptura denota deficiência na colagem das emendas dentadas, que deve ter sido motivado pela maior densidade da madeira empregada, cujo valor médio determinado foi igual a  $0,93 \text{ g/cm}^3$  (para um teor de umidade igual a 12%). A outra peça teve ruptura do modo 5, isto é a, ruptura começa na emenda, possivelmente devido a um concentrador de tensão, e prossegue fora da emenda. Em termos de valores médios, a resistência das peças com emendas (tratamento T2) foi cerca de metade da resistência das peças sem emendas (tratamento T1), indicando a conveniência de se fazer o reforço das emendas.

O valor médio da resistência obtido para o tratamento T3 foi 73,9. Para duas lâminas desse tratamento, a ruptura ocorreu por falha na madeira fora da região do reforço (modo de ruptura 6). Nesses casos, pode ser considerado que a resistência da emenda com reforço é superior ao valor obtido, pois a emenda resistiu, sem ter falhado, ao valor de tensão que causou a ruptura da peça. As outras quatro lâminas do tratamento T3 apresentaram ruptura do modo II: ruptura por cisalhamento na linha de cola do adesivo epóxi e a madeira. Nesses casos, após a falha do reforço, observou-se a ruptura da emenda por descolamento dos dentes.

O valor médio da resistência obtido para o tratamento T4 foi 74,7 MPa. Todas as 6 peças desse tratamento romperam na região da emenda reforçada. Cinco dessas peças apresentaram ruptura do modo I, que ocorre quando a ruptura se inicia pela emenda dentada, isto é, ocorre falha inicial na emenda seguida da falha no reforço. Nessas lâminas, após a falha do reforço houve a ruptura da emenda por descolamento dos dentes.

O valor médio obtido para as resistências das peças do tratamento T4 foi cerca de 1% superior ao valor médio das resistências das peças do tratamento T3, reforçando a idéia de comportamento semelhante entre os dois tipos de reforço. De certa forma este resultado foi contrário ao previsto inicialmente, pois se esperava um pior desempenho dos reforços com fibras de curauá (tratamento T4), em comparação ao reforço com fibras de vidro (tratamento T3), tendo em vista que os reforços de fibra de vidro foram dimensionados para um maior valor de solicitação.

Tendo em vista a análise qualitativa apresentada, esse fato pode ter a seguinte explicação: desde que não ocorram rupturas no modo 6 (falha da madeira, falha da região da emenda) e ruptura do modo II (a falha ocorre por cisalhamento do plano de colagem do reforço com a madeira), a resistência da emenda é obtida pela soma da resistência à tração da emenda dentada teria (caso não houvesse reforço) com uma contribuição adicional da resistência à tração do reforço. Caso o reforço seja dimensionado, em termos da sua seção transversal, para absorver a totalidade do esforço de tração aplicado na lâmina (caso das peças do tratamento T3, reforços de fibras de vidro), a falha da emenda não será a causa da ruptura da peça, mas sim ocorrerá fora da região da emenda reforçada, por falha na madeira, ou então por descolamento do reforço, motivado por cisalhamento da madeira e/ou por falha na linha de cola do reforço com a madeira.

Outro aspecto a destacar é que a forma de ruptura obtida para quatro peças do tratamento T3 ocorreu por falha da madeira fora da região da emenda, o que indica que a resistência à tração da emenda com reforço é superior. Isso não ocorreu para as peças do tratamento T4, em que todas as rupturas ocorreram na região da emenda.

Em termos de valores médios, observou-se um ganho de resistência igual a 74% para o caso do reforço de fibra de vidro, e igual a 76% para as emendas com fibras de curauá, em relação à resistência das emendas dentadas sem reforço.

A equivalência entre as resistências dos tratamentos T3 e T4 reforça a idéia de comportamento semelhante entre os dois tipos de reforço. De certa forma este resultado foi contrário ao previsto inicialmente, pois se esperava um pior desempenho dos reforços com fibras de curauá (tratamento

T4), em comparação ao reforço com fibras de vidro (tratamento T3), tendo em vista que os reforços e fibra de vidro foram dimensionados para um maior valor de solicitação. Esse fato pode ter a seguinte explicação: desde que não ocorram rupturas por falha da madeira fora da região da emenda e por falha do plano de colagem do reforço por cisalhamento, a resistência da emenda é obtida pela soma da resistência à tração da emenda dentada teria, caso não houvesse reforço, com uma contribuição adicional da resistência à tração do reforço.

As peças com emendas reforçadas com fibras de vidro e com fibras de curauá atingiram, respectivamente, 87% e 89 % da resistência das peças sem emendas, em termos de valores médios.

Uma das peças do Tratamento T1 (peças sem emendas) teve grande influência positiva no valor médio da resistência. Se não a considerarmos, o valor médio da resistência das peças sem emendas passaria a ser 74,9 MPa. Nesse caso, a resistência das peças com emendas reforçadas com fibras de vidro e com fibras de curauá atingiriam, respectivamente, 99% e praticamente 100 % da resistência das peças sem emendas, em termos de valores médios.

## 5. CONCLUSÃO

O valor médio obtido para a resistência à tração das peças com emenda e sem reforço foi 42,4 MPa. Em termos de valores médios, a resistência dessas foi cerca de metade da resistência das peças sem emendas, igual a 84,0 MPa, indicando a conveniência de se fazer o reforço das emendas, em peças com maior densidade devido à menor eficiência da colagem das emendas dentadas.

A utilização do reforço com fibras proporcionou um grande incremento na resistência das peças com emendas. Observou-se um ganho de resistência igual a 74% para o caso do reforço de fibra de vidro, e igual a 76% para as emendas com fibras de curauá, em relação à resistência das emendas dentadas sem reforço, em termos de valores médios.

As peças reforçadas com fibras de vidro e fibras de curauá apresentaram resistência equivalente, apesar deste último reforço ter sido dimensionado para uma força menor (40% do outro caso). Esse resultado sugere que a resistência da emenda é obtida pela soma da resistência à tração da emenda dentada sem reforço, com uma contribuição adicional do reforço.

As peças com emendas reforçadas com fibras de vidro e com fibras de curauá atingiram, respectivamente, 87% e 89 % da resistência das peças sem emendas, em termos de valores médios. Isso indica a conveniência do reforços em peças com grande resistência, em que o ponto frágil certamente será a emenda dentadas.

Finalmente, deve ser destacado que o reforço das emendas dentadas somente será necessário no caso de lâminas de madeira com boa qualidade e alta resistência, situadas em regiões de maior solicitação por tração, situações em que é provável que a ruptura se inicie na emenda dentada. Nesses casos, o reforço pode implementar um aumento significativo na resistência das peças, equiparando-a à resistência da peça sem emenda.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão de bolsas e pelo apoio financeiro.

## REFERÊNCIAS

- [1] American Society for testing and materials 'ASTM D4688 Standard Test Method for Evaluating Structural Adhesives for Finger Jointing Lumber'. (1999).
- [2] Carvalho, R. F. 'Compósitos de fibras de sisal para uso e reforço de estruturas de madeira'. 133 p. Tese - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos – SP (2005).
- [3] Bui, Q. D.; Milner, H. R.; Williams, J.M. 'Fibre reinforced finger joints'. In: International Wood Engineering Conference, 1996. Anais... v. 1, p.427-430 (1996).

- [4] Yingcheng, H. et al. 'Reinforcement Design of Poplar Glulam'. *Materials Science Forum*, Switzerland, v. 620-622, p. 137-140, 2009.
- [5] Szücs, C. A. 'Madeira laminada colada reforçada com fibras de vidro na direção transversal às suas fibras'. In: IV Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de madeira, São Carlos, julho de 1992. Anais... v.3, p.79-90 (1992).
- [6] Dagher, H. J. et al. 'Advanced fiber-reinforced polymer-wood composites in transportation applications'. *Transportation Research Record*, nº 1814, paper nº 02-3484, p.237-242 (2002).
- [7] Dagher, H. J. 'High-performance wood composites for construction'. In: VII Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de madeira, São Carlos, julho 2000, São Carlos Brasil. Anais... (2000).
- [8] Fiorelli, J. 'Estudo teórico e experimental de vigas de madeira laminada colada reforçadas com fibra de vidro'. 108f. Tese Doutorado - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos – SP (2005).
- [9] Fiorelli, J., Dias, A. A. 'Glulam beams reinforced with FRP externally-bonded: theoretical and experimental evaluation'. *Materials and Structures*, Ed. Springer, v.44, p.1431-1440 (2011).
- [10] Mascia, N.T; Furlan, J.E.; Vanalli, L. 'Mechanical analysis of Sisal Fibres to use as a reinforced material in timber'. In: 11th International Conference on Non-conventional Materials and Technologies (NOCMAT 2009), Bath, UK, 6-9 setembro 2009. Anais... Bath, UK, cd-rom, 8p (2009).
- [11] Fiorelli, J.; Rossignolo, J. A.; Savastano Jr., H. S.; Santos, S. F.; Dias, A. A. 'Mechanical analysis of Sisal Fibres to use as a reinforced material in timber'. In: 11th International Conference on Non-conventional Materials and Technologies (NOCMAT 2010), Cairo, Egito, 21-23 setembro 2010. Anais... Cairo, Egito, cd-rom, 8p (2010).
- [12] Moraes, R. W.; Mascia, N.T. 'Vigas laminadas coladas de madeira, reforçadas com fibras de sisal: análise tridimensional teórica do módulo de elasticidade'. In: XIII Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira, Vitória, 23-25 julho 2012. Anais... Vitória, CAUFES, cd rom. 9p (2012).
- [13] Vanerek, J.; Hradil, P. 'Evaluation of timber beams reinforced with FRP fabrics' (2007).
- [14] Hernandez, R. 'Analysis of Strain in Finger-Jointed Lumber.' In: 5th World Conference On Timber Engineering, Montreux, Switzerland, 17-20 agosto 1998. Anais...(1998).
- [15] Deutsches Institut Fur Nurmung. "DIN 68140: Keilzinkenverbindungen von Holz'. Berlin, Alemanha, (1971).
- [16] Associação Brasileira de Normas Técnicas (1997). 'ABNT: NBR7190-Projeto de estruturas de madeira', Rio de Janeiro (1997).