

ANÁLISE DA UTILIZAÇÃO DE FIBRAS DE VIDRO EM VIGAS DE MADEIRA LAMINADA COLADA SUBMETIDAS À FLEXÃO SIMPLES

Analysis of the use of glass fibers in glued beams subjected to simple bending

Fernanda Lenzi ¹, Paloma de Oliveira Matias ², Adriano Vieira Risson ³

Recebido em 28 de novembro de 2016; aceito em 19 de setembro de 2017; disponível on-line em 09 de outubro de 2017.



PALAVRAS CHAVE:

Madeira laminada colada;
Vigas de madeira;
Polímero reforçado com
fibras (PRF);
Fibras de vidro;
Vigas de madeira
reforçadas.

KEYWORDS:

Glulam Beam;
Wooden beam;
Fiber reinforced polymers
(FRP);
Glass fiber;
Reinforced wooden beam

RESUMO: A madeira apresenta boas propriedades mecânicas, porém há a necessidade de melhorias para que os elementos estruturais atendam as demandas solicitadas. Neste contexto, buscou-se com este trabalho analisar a utilização de fibras de vidro em vigas de madeira laminada colada submetidas à flexão simples para reforço estrutural, verificando o aumento de rigidez e resistência de seis vigas de madeira laminada colada através do adesivo Melamina Uréia Formaldeído MUF 1242 com o emulsificante líquido 2542, reforçadas com tecido unidirecional de fibra de vidro em conjunto com a resina epoxídica Compound, em comparação com uma viga de referência sem aplicação de reforço, assim como analisando a aderência entre o reforço e a superfície da madeira e também o modo de ruptura de cada viga. A aderência madeira-madeira e a aderência madeira-fibra demonstraram-se satisfatórias. Houve aumento quanto à rigidez das vigas reforçadas e quanto à carga de ruptura das mesmas, com um aumento máximo de 26,25% de carga de ruptura em relação à viga de referência. O modo de ruptura de todas as vigas deu-se por tração, sendo que em apenas uma viga não ocorreu cisalhamento longitudinal e em duas vigas houve esmagamento das lamelas superiores das vigas por compressão. A principal contribuição deste trabalho foi apresentar a viabilidade do uso de fibras de vidro como reforço para vigas de madeira laminada colada.

ABSTRACT: The wood has good mechanical properties, but there is a need for improvements to the structural elements meet the demands requested. In this context, it sought this paper was to analyze the use of glass fibers in glued laminated timber beams subjected to simple bending for structural reinforcement, Verifying the increase of stiffness and strength of six laminated wood beams bonded through the adhesive Melamine Urea MUF 1242 with the liquid emulsifier 2542, reinforced with unidirectional fiberglass fabric together with epoxy resin Compound, comparing with a reference beam without reinforcement application, and also analyzing the adhesion between the reinforcement and the surface of the wood and the failure mode of each beam. The wood-wood grip and wood-fiber adhesion proved to be satisfactory. There was an increase in the stiffness of the reinforced beams and in the load of failure of the reinforced beams, with a maximum increase of 26.25% of breaking load in relation to the reference beam. The failure mode of all the beams occurred by traction, and in only one beam did not occur longitudinal shear and in two beams there was crushing of the upper lamellae of the beams by compression. The main contribution of this paper is to present the viability of using glass fibers as reinforcement for glued laminated timber beams.

* Contato com os autores:

- ¹ e-mail: fernandalenzi@gmail.com (F. Lenzi)
Engenheira civil, pós-graduanda do MBA em Gerenciamento e execução de obras, UDC
- ² e-mail: palomamatias94@gmail.com (P. O. Matias)
Engenheira civil, pós-graduanda do MBA em Gerenciamento e execução de obras, UDC
- ³ e-mail: adrianorisson@hotmail.com (A. V. Risson)
Engenheiro civil, Mestre, Professor do curso de Engenharia Civil, UDC.

1. INTRODUÇÃO

A madeira é um material presente no meio ambiente que possibilita inúmeras finalidades. Na construção civil a madeira auxiliou no desenvolvimento da sociedade a partir da utilização da mesma como elemento estrutural e continuou sendo utilizada desde os tempos primórdios devido às suas excelentes características. Além de suas características como elemento estrutural, a madeira é um material ecologicamente correto, pois se executado o correto manejo do plantio da madeira a mesma se torna uma matéria-prima infinita, diminuindo o problema da escassez de matéria-prima, além de que este plantio auxilia no sequestro do gás carbônico do meio ambiente, através das árvores, melhorando a qualidade do ar e do meio ambiente em geral.

Devido ao incorreto manejo do plantio da madeira realizado durante muitos anos, surgiu-se a necessidade de aprimoramento das técnicas empregadas para o aproveitamento mais racional da madeira. Assim, a produção da madeira laminada colada demonstrou-se uma técnica viável, além de apresentar vantagens em relação à madeira convencional, permitindo sua utilização de forma mais abrangente e, apresentando vantagens como a possibilidade de obtenção de maiores vãos e elementos com curvaturas, além da eliminação de defeitos, entre outras possibilidades.

Devido a escassez da madeira, a utilização da madeira laminada colada (MLC) se tornou necessária para que houvesse a substituição do material natural pelo manufaturado, contribuindo, assim, para a diminuição da sua extração. Apesar das vantagens apresentadas pela técnica da MLC, melhorias podem ser feitas para que se obtenha a possibilidade de utilização da mesma de forma ainda mais ampla. Esta melhoria pode ser atingida por meio do uso de polímeros reforçados com fibras, mais especificamente das fibras de vidro de reforço estrutural combinadas com um adesivo para aderência fibra-madeira na área mais crítica do elemento estrutural.

Assim, partindo da necessidade de melhorar o desempenho de resistência dos elementos construtivos de madeira, de forma que atribua a estes elementos características que possibilitem sua utilização em vãos maiores e com seções transversais reduzidas, o estudo da aplicação de reforço com fibra de vidro em vigas de MLC se justifica com a finalidade de aprimorar o conhecimento sobre as características e o comportamento mecânico deste material.

2. OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo analisar o comportamento de vigas de madeira laminada colada (MLC), submetidas à flexão simples, reforçadas com fibras de vidro na região tracionada da seção transversal, verificando as vantagens e desvantagens do sistema construtivo.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A madeira sempre foi um dos materiais mais utilizados no mundo em diversas situações. Por possuir como característica a facilidade de manuseio e também de processamento, este material foi aplicado pelo homem em diversas condições, sendo assim foi um dos primeiros e principais materiais utilizados como matéria-prima para desenvolvimento da sociedade (RUBINI e MORAES, 2012).

A madeira laminada colada em função de seu peso próprio ser relativamente baixo apresenta alta resistência aos esforços mecânicos além de também apresentar a característica de se adaptar com maior facilidade a uma variedade de formas (ZANGIÁCOMO, 2003), tendo conseqüentemente uma maior gama de aplicações, por ser um material que apresenta boa resistência aos esforços aplicados à peça e por proporcionar uma grande variedade de formas, conciliando assim boa resistência e possibilidade de uso de inúmeras maneiras, sobretudo pela possibilidade de formar elementos curvos e também pela possibilidade de obter vãos mais elevados (TELES, 2009).

Em busca de uma maior resistência à flexão, geralmente em estruturas de grandes vãos ou de elevados carregamentos, uma das soluções propostas é a utilização de fibras sintéticas na face tracionada da viga de MLC como reforço (MIOTTO e DIAS, 2011).

Considerando que um elemento de madeira reforçado com fibras na face tracionada, sujeita à flexão, apresenta comportamento dúctil pois o reforço obriga a madeira romper-se na região comprimida, entende-se que há enormes vantagens em sua utilização inclusive para reforçar estruturas novas, no processo de dimensionamento (BARBOSA, 2008).

O uso de fibras para reforçar vigas não só garante melhorias na resistência estrutural e rigidez do elemento, mas também altera seu modo de ruptura. Os polímeros reforçados com fibras (FRP) são formados a partir da ligação de fibras a um adesivo, tornando-se um compósito que apresenta propriedades mecânicas de resistência e rigidez superiores às de cada material individualmente (FIORELLI e DIAS, 2011).

4. MATERIAL E MÉTODO

4.1 MATERIAL

Neste trabalho foram realizados ensaios de flexão em vigas de madeira laminada colada com a finalidade de avaliar o incremento de resistência provocado pelo reforço em fibras de vidro, bem como sua rigidez. Para isto, foram utilizados os seguintes materiais.

4.1.1 Espécie da madeira

Foram utilizadas para montagem das vigas de madeira laminada colada tábuas de madeira da espécie *Pinus Taeda*. As dimensões das vigas são de 7 x 20 x 300 cm, largura, altura e comprimento, respectivamente. No total foram fabricadas sete vigas para análise em ensaios com esta mesma espécie de madeira.

A escolha por esta espécie de madeira deu-se por sua utilização em áreas de reflorestamento, sua grande ocorrência nas regiões

sul e sudeste do Brasil e por seu valor econômico acessível comparado a outras espécies de madeira. As peças de madeira que foram utilizadas foram preparadas e classificadas de acordo com a NBR 7190 (ABNT, 1997), para reconhecimento dos defeitos presentes e posterior classificação.

4.1.2 Adesivo para madeira laminada colada

Para fabricação das sete vigas de madeira laminada colada foi utilizado para colagem das peças o adesivo Melamina Uréia Formaldeído MUF 1242 com o emulsificante líquido 2542, ambos de fabricação da empresa Akzonobel.

De acordo com o fabricante a viscosidade da cola é de 11.000 mPas (milipascal segundo) e do catalizador 14.000 mPas (milipascal segundo) e a proporção da mistura é de 100 partes por peso para a cola e de 20 ou 25 partes por peso para o catalizador.

Em relação ao tempo pós-catalização, o produto possui um tempo de cura para atingir total resistência a água após a colagem de no mínimo 5 dias.

4.1.3 Fibra de vidro

Para o reforço nas vigas de madeira laminada colada foi utilizado o tecido de fibra de vidro unidirecional ERW 600 de fabricação da empresa Texiglass. Este tecido está classificado na categoria E-glass e possui um peso nominal de 551 g/m², espessura seca de 0,62 mm, carga de ruptura de 138 kgf/cm, módulo de elasticidade de 82 GPa e resistência a tração de 2000 MPa.

4.1.4 Resina para fixação da fibra de vidro à madeira

Para fixação das fibras de vidro na madeira foi utilizada a resina Compound, de fabricação da empresa Vedacit. Esta resina é um adesivo estrutural à base de epóxi, bicomponente para impregnação e colagem em vários tipos de substrato. Esta resina possui elevadas resistências mecânicas, excelente aderência a vários substratos e facilidade de aplicação, pois foi desenvolvida para aplicação manual.

O produto possui resistência inicial em 24 horas, porém para a cura total do produto, ou seja, com o produto aplicado e pronto para uso, o tempo de cura é de até sete dias.

4.2 MÉTODOS

4.2.1 Classificação visual

A classificação visual das peças de madeira que foram utilizadas foi realizada de acordo com a NBR 7190 (ABNT, 1997). Inicialmente, todas as peças passaram por um processo de aplainamento para retirada de defeitos superficiais que resultou em uma homogeneização da superfície da madeira, sendo que o aplainamento foi feito até que todas as peças possuíssem dimensão transversal de 2,5 cm x 7 cm.

Logo após o processo de aplainamento foram separadas as peças onde houve a priorização das tábuas que possuíam menor quantidade de nós, ausência de fissuras e medula. As peças foram cortadas para que a dimensão longitudinal de cada uma chegasse a 301 cm, sendo que não foram utilizadas emendas longitudinais.

4.2.2 Ensaio de compressão da madeira

Para avaliação da resistência a compressão da madeira utilizada foi realizado o ensaio de compressão paralela às fibras da madeira. Segundo o disposto pela NBR 7190 (ABNT, 1997) o corpo-de-prova possui dimensões de 5 cm de largura, 5 cm de altura (seção transversal quadrada) e 15 cm de comprimento. O corpo-de-prova foi posicionado no equipamento Prensa a Compressão que aplicou um carregamento de 10 MPa por minuto até a ruptura do corpo-de-prova. Através da leitura do equipamento que forneceu um valor de carga de 76,7 kN, e a área da seção transversal já definida pela equação 2 foi possível determinar a resistência à compressão paralela às fibras de 30,68 MPa através da Equação 1.

$$F_{c0} = \frac{F_{c0,máx}}{A} \quad \text{Eq. [1]}$$

Em que:

F_{c0} = resistência à compressão paralela às fibras;

F_{c0,máx} = carga de ruptura do corpo-de-prova;

A = área da seção transversal do corpo-de-prova;

$$A = L \times L \quad \text{Eq. [2]}$$

Em que:

A = Área;

L = largura ou altura ;

4.2.3 Determinação do módulo de elasticidade das lamelas

Para a realização da determinação do módulo de elasticidade das lamelas foram posicionadas cada peça de madeira de 301 cm de vão sob dois apoios com a mesma altura em relação ao nível do piso, um em cada extremidade da viga, logo após seu posicionamento foi fixada uma linha de nylon tensionada alinhada a cada peça de madeira. Após este processo inicial foi aplicada uma carga conhecida de 1,5 Kg no meio da peça, a 150,5 cm de distância de cada extremidade, esta carga foi suspensa através de um gancho apoiado no ponto médio do vão com a carga suspensa presa ao gancho como mostra a Figura 1.

Com uma trena foi medido o quanto que o elemento sofreu de deflexão, com a aplicação da carga, em relação à linha de referência fixada nas extremidades da peça analisada. Através da Equação 3 foi obtido o módulo de elasticidade de cada lamela.

$$\delta = \frac{P \times L^3}{48 \times E \times I} \quad \text{Eq. [3]}$$

Em que:

δ = deflexão;

P = carga aplicada à peça analisada;

E = módulo de elasticidade da madeira;

I = momento de inércia da seção transversal.



FIGURA 1: Deslocamento da peça de madeira.

FONTE: Autores (2017).

4.2.4 Padronização das vigas para o processo de montagem

Para que se obtivesse uma padronização das vigas em análise, o ideal seria que as lamelas com a mesma posição nas vigas fossem retiradas de uma mesma tábua, porém devido à falta de uniformidade de peças de madeira Pinus e também da dificuldade em se encontrar tábuas com largura suficiente para atender esta condição foi realizado um esquema de posicionamento de lamelas para obter certa uniformização entre as vigas,

inicialmente as vigas com aplicação do tecido de fibra de vidro foram enumeradas de 1 a 6 e a viga sem aplicação das fibras foi denominada de viga de referência (VR), após a denominação de cada viga, cada lamela foi denominada numericamente durante o processo de determinação do módulo de elasticidade das lamelas para posterior posicionamento, assim, a partir de lamelas inteiras, de 2,5 centímetros de espessura e largura de 7 centímetros, foi realizado o posicionamento de cada lamela, de acordo com o Quadro 1, para que se obtivessem resultados mais seguros quando da análise comparativa dos resultados.

QUADRO 1: Posicionamento das lamelas para formação das vigas.

VR	V1	V2	V3	V4	V5	V6
lamela 5	lamela 7	lamela 10	lamela 11	lamela 18	lamela 20	lamela 25
lamela 47	lamela 33	lamela 38	lamela 55	lamela 35	lamela 44	lamela 53
lamela 46	lamela 13	lamela 42	lamela 1	lamela 16	lamela 28	lamela 31
lamela 49	lamela 52	lamela 8	lamela 4	lamela 43	lamela 32	lamela 26
lamela 12	lamela 54	lamela 27	lamela 36	lamela 41	lamela 19	lamela 45
lamela 23	lamela 3	lamela 14	lamela 17	lamela 6	lamela 15	lamela 40
lamela 48	lamela 30	lamela 39	lamela 50	lamela 34	lamela 56	lamela 51
lamela 22	lamela 29	lamela 2	lamela 24	lamela 21	lamela 9	lamela 37

4.2.4.1 Montagem das vigas

Foram montados um total de 7 vigas de madeira laminada colada da espécie Pinus Taeda, com dimensões de 7 x 20 x 301 cm, largura, altura e comprimento, respectivamente, sendo que todas as vigas foram formadas por lamelas de madeira com 2,5 cm de espessura, ou seja, por um total de 8 lamelas. Inicialmente foram separadas as lamelas de cada viga na ordem da colagem, de acordo com a padronização feita através do módulo de elasticidade das lamelas, para uniformização das características das vigas.

Após o posicionamento de cada lamela deu-se início ao processo de colagem, porém este processo foi realizado em duas etapas devido as dimensões da prensa não serem suficientes para que as 7 vigas fossem colocadas no equipamento de uma só vez, logo na primeira etapa foi feita a colagem da viga de referência e das vigas 1, 2 e 3 e na segunda etapa a colagem das vigas 4, 5 e 6.

Para iniciar o processo de colagem das vigas foi realizada inicialmente a regulagem da prensa para que ficasse em conforme com as dimensões das vigas e para que obtivesse a pressão adequada, logo após a regulagem foi feita a pesagem e a mistura do adesivo Melamina Uréia Formaldeído MUF 1242 com o emulsificante líquido 2542 na proporção de 100 partes por peso e 20 partes por peso, a mistura foi feita até que se obtivesse a homogeneização do adesivo.

As lamelas foram apoiadas em cavaletes de madeira e através de um rolo metálico com recipiente para armazenamento foi aplicado o adesivo em movimentos retilíneos em cada lamela de cada viga como mostra a Figura 2.

Logo após a aplicação do adesivo homogeneizado as lamelas foram colocadas na prensa como mostra a Figura 3.



FIGURA 2: MUF 1242 com o emulsificante líquido 2542.

FONTE: Autores (2017).



FIGURA 3: Posicionamento das peças na prensa.

FONTE: Autores (2017).

As vigas ficaram sob uma pressão de 6 kgf/cm^2 por um período de cura de 10 horas devido a temperatura ambiente ser de 20°C , respeitando as especificações técnicas do fabricante do adesivo. Após a retirada das vigas do equipamento as mesmas foram aplainadas para receber o acabamento lateral final.

Após o processo completo da primeira etapa foram realizados os mesmos procedimentos para as vigas 4, 5 e 6, mistura do adesivo, aplicação do adesivo e posicionamento das lamelas na prensa, porém a primeira lamela de cada uma das vigas 4, 5 e 6 não foi colada juntamente as vigas devido ao posterior recebimento das fibras de vidro entre a primeira e a segunda lamela, as vigas da segunda etapa também passaram por um processo de cura de 10 horas sob uma pressão de 6 kgf/cm^2 devido à temperatura ambiente ser de 20°C . Posteriormente a cura total do adesivo e retirada das vigas 4, 5 e 6 da prensa, as mesmas também foram aplainadas, como mostra a Figura 6, para recebimento do acabamento lateral, e após todas as vigas serem coladas e aplainadas foi feito o corte do comprimento de cada viga para obtenção de extremidades sem desigualdades,

ressaltos ou com colagem imperfeita, obtendo-se assim vigas com comprimento de 300 cm.

Estando concluídas todas as vigas as mesmas estavam prontas para o processo de aplicação do tecido de fibra de vidro unidirecional, como uma das vigas montadas, a viga de referência, não recebeu a aplicação do tecido de fibra de vidro unidirecional, a mesma esteve finalizada para o procedimento de análise logo após seu processo completo de fabricação. As fibras de vidro possuem dois modelos de aplicação sobre as 6 vigas restantes, em 3 delas o tecido de fibra de vidro unidirecional foi colado em três camadas através da resina Compound na primeira lamela, ou seja, na face inferior da viga. Nas outras 3 vigas restantes o tecido foi aplicado em três camadas entre a primeira e a segunda lamela através da mesma resina Compound. A Figura 5 mostra um corte transversal dos três tipos de vigas em relação ao posicionamento do tecido de fibra de vidro, sendo o primeiro, um corpo de prova de referência, sem aplicação das fibras, o segundo com a aplicação na face inferior da viga e o terceiro com as fibras aplicadas entre a primeira e a segunda lamela.



FIGURA 4: Aplainamento da viga.

FONTE: Autores (2017).

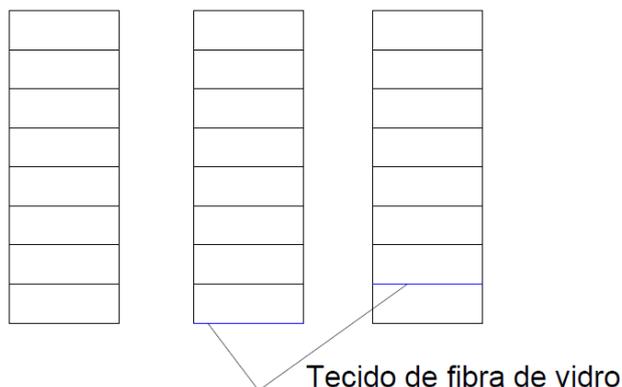


FIGURA 5: Corte transversal dos três modelos de aplicação do reforço.

FONTE: Autores (2017).

Para dar início ao processo de aplicação das fibras inicialmente realizou-se o corte do tecido de fibra de vidro unidirecional em uma quantidade de 18 faixas de tecido, com dimensões de 10 cm de largura e 315 centímetros de comprimento. Após o processo de corte do tecido iniciou-se a mistura do componente A com o componente B do adesivo Compound na proporção de 1:1, foi necessário anteriormente misturar cada componente separadamente para obtenção de um produto final homogêneo.

O adesivo foi aplicado sobre as vigas com um pincel e rapidamente foram posicionadas as faixas do tecido sobre o adesivo, devido à alta temperatura ambiente que acelerou o processo de cura do adesivo, em seguida retirou-se o ar incorporado através da aplicação de movimentos horizontais no sentido do centro da viga até suas

extremidades, este processo foi repetido até a colagem de três faixas de tecido de fibra de vidro para cada viga, sendo que nas vigas 1, 2 e 3 o reforço foi aplicado na face inferior da primeira lamela de cada viga com a última camada em adesivo, como mostra a Figura 6.

Nas vigas 4, 5 e 6 o tecido foi aplicado entre a primeira e a segunda lamela, através do mesmo processo de aplicação das fibras das vigas anteriores, logo após o término da aplicação das fibras na segunda lamela, as três vigas foram colocadas na prensa juntamente com a primeira lamela de cada viga para obtenção de peças com dimensões iguais as anteriores.

Depois de finalizadas as seis vigas, como mostra a Figura 7, as mesmas permaneceram sobre um processo de cura de 7 dias para obtenção da resistência total do adesivo Compound.



FIGURA 6: Aplicação do reforço sobre as vigas.
FONTE: Autores (2017).



FIGURA 7: Vigas durante processo de cura.
FONTE: Autores (2017).

4.2.5 Determinação do módulo de elasticidade das vigas

Para determinação do módulo de elasticidade das vigas foi inicialmente realizado o rompimento de uma viga reforçada de cada modelo, ou seja, da viga 1 e da viga 4, para determinação da capacidade de carga de referência em toneladas através do equipamento Prensa Universal. As vigas foram posicionadas em um sistema de três apoios de acordo com a NBR 7190 (1997) demonstrado na Figura 8, com uma carga concentrada posicionada no meio do vão e com 5 centímetros de folga em cada extremidade, ou seja, com uma vão livre de 2,90 metros.

Após a obtenção do valor de referência das vigas 1 e 4, foi determinado o módulo de elasticidade das vigas 2, 3, 5 e 6 seguindo as diretrizes dispostas pela NBR 7190 (1997), com a aplicação da carga de referência com variação de 10% e 50% do valor da carga e repetidas estabilizações de 30 segundos por duas vezes com a carga a 50% e por duas vezes com a carga a 10%. Através de um transdutor de deslocamento instalado na lateral das vigas fixado através de uma

chapa metálica e dois parafusos, como mostra a Figura 9, foram feitas as medições dos deslocamentos de cada viga durante a variação das porcentagens de carga.

4.2.6 Determinação da capacidade de carga das vigas

Inicialmente foi realizado o ensaio de capacidade de carga da viga de referência, da viga 1 e da viga 4, já a determinação da capacidade de carga das demais vigas foi realizada logo após a determinação do módulo de elasticidade das mesmas através do ensaio de flexão segundo as diretrizes da NBR 7190 (ABNT, 1997).

Através do equipamento Prensa Universal e do mesmo esquema de apoio e posicionamento da carga concentrada de 3 pontos, com 5 cm de folga em cada extremidade e vão livre de 2,90 metros como mostra a Figura 10, foi aplicada a carga concentrada até o rompimento de cada viga e obtenção do valor de capacidade de carga de cada uma quando submetidas ao ensaio de flexão simples.

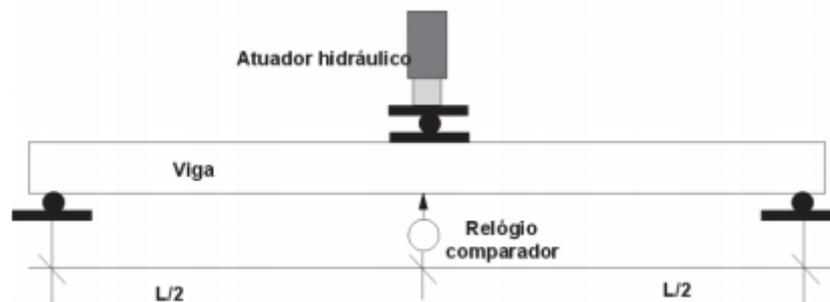


FIGURA 8: Esquema de ensaio com três pontos.

FONTE: Lima Júnior e Dias (2001).



FIGURA 92: Modo de fixação do transdutor de deslocamento.

FONTE: Autores (2017).



FIGURA 10: Modo de apoio para determinação da carga de ruptura.

FONTE: Autores (2017).

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 VERIFICAÇÃO DA RIGIDEZ DAS VIGAS DE MADEIRA LAMINADA COLADA REFORÇADAS E NÃO REFORÇADA, POR MEIO DA DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DAS PEÇAS

O módulo de elasticidade das vigas pode ser obtido através do rompimento de vigas semelhantes para obtenção da carga de referência, desta forma as vigas 1 e 4 foram rompidas para que o módulo de elasticidade das vigas 2, 3, 5 e 6 fossem obtidos e estão dispostos no Figura 11.

Comparando-se os resultados das vigas pode-se observar que sendo o módulo de elasticidade proporcional a rigidez, logo, a viga 5 possui a maior rigidez, sendo seguida pela viga 6 e pela viga 2. Já a viga 3 é a que possui menor rigidez comparada as demais.

Observa-se que para o primeiro modelo de colagem do tecido de fibra de vidro, no qual o reforço foi aplicado na face inferior da primeira lamela das vigas, os módulos de elasticidade

obtidos foram menores do que para o segundo modelo de colagem do reforço, no qual o reforço foi aplicado entre a primeira e a segunda lamela das vigas, demonstrando que a lamela posicionada logo abaixo do tecido de fibra de vidro, para as vigas 5 e 6, interferiu positivamente no comportamento das vigas. Apesar do reforço nas vigas 5 e 6 estar posicionado mais próximo da linha neutra comparando-se ao modelo de aplicação das vigas 2 e 3, além de o processo de colagem do reforço ter sido mais satisfatório nas vigas 5 e 6, as mesmas foram colocadas na prensa para aderência da primeira lamela à viga, o que pode ter causado o acréscimo de rigidez devido a uniformização do tecido unidirecional de fibra de vidro, através da retirada de vazios e ondulações.

A Figura 12 demonstra o comportamento da viga de referência, que não possuía reforço, ao longo de seu trajeto até a ruptura, sendo a carga de ruptura de 3,01 toneladas e o deslocamento no momento da ruptura de 47,053 milímetros.

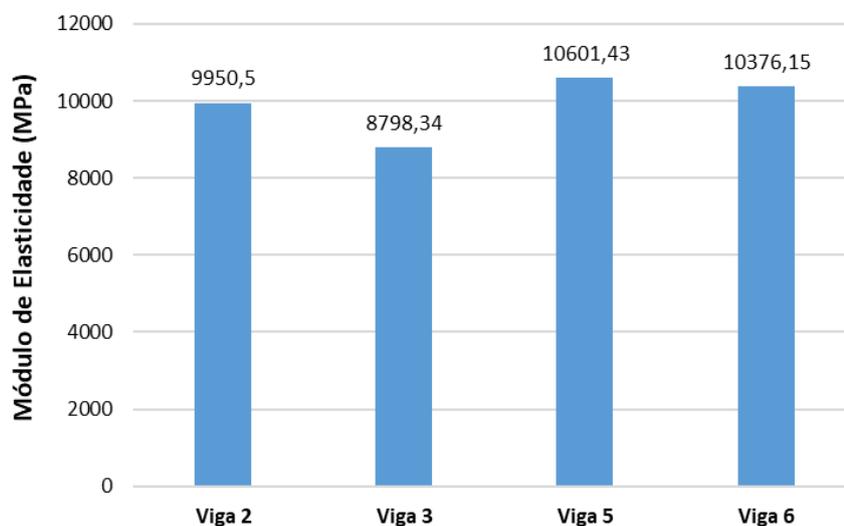


FIGURA 3: Módulo de elasticidade das vigas analisadas.

FONTE: Autores (2017).

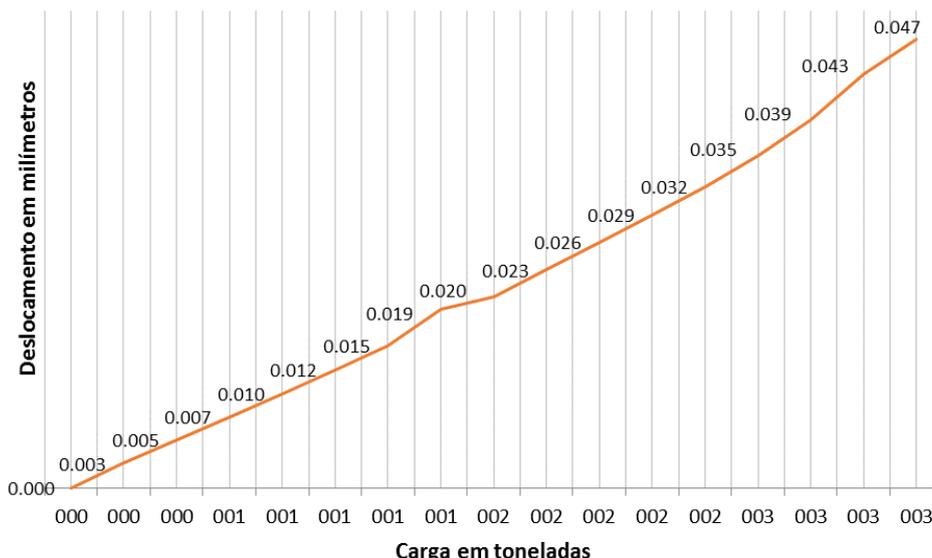


FIGURA 4: Comportamento da viga referência durante solicitação de carga versus deslocamento.
FONTE: Autores (2017).

A viga mostra certa linearidade e proporção nos deslocamentos em função da carga crescente aplicada. Através do comportamento da viga e da Equação 4, pode-se obter o valor do módulo de elasticidade da viga de referência, sendo de 8.698,76 MPa, que quando comparado às vigas que possuíam reforço o valor é menor, porém não tão abaixo da viga 3, que possui menor módulo comparada as demais.

$$E_{md} = \frac{(F_{m50\%} - F_{m10\%}) \times L^3}{(V_{50\%} - V_{10\%}) \times 4 \times b \times h^3} \quad \text{Eq. [4]}$$

Em que:

- E_{md}** = módulo de elasticidade da viga;
- F_{m,10%}** e **F_{m,50%}** = cargas correspondentes a 10% e 50% da carga máxima estimada, aplicada ao corpo-de-prova;
- V_{10%}** e **V_{50%}** = deslocamentos no meio do vão correspondentes a 10% e 50% da carga de referência da viga rompida inicialmente;
- b** = largura da seção transversal da viga.

Notou-se durante a ruptura das vigas que enquanto a viga de referência VR possuiu certa linearidade nos deslocamentos ao longo da aplicação crescente e proporcional da carga, as demais vigas comportaram-se de forma que no início da aplicação da carga o deslocamento era acelerado e linear, como na viga de referência VR, porém após certo valor de aplicação de carga e também certa flexão das vigas, próximo ao valor de ruptura da viga de referência, as mesmas diminuía seu deslocamento enquanto que a carga continuava sendo aplicada na mesma velocidade e proporção anterior a desaceleração.

A Figura 13 apresenta os deslocamentos de cada viga no momento em que a carga aplicada era de 3,01 toneladas, carga correspondente a carga de ruptura da viga de referência.

O deslocamento da viga de referência no momento da ruptura era de 47,053 mm enquanto que nas demais vigas o deslocamento para a mesma carga é menor, o que mostra a eficiência do reforço em aumentar a rigidez, das vigas, diminuindo sua deflexão, para uma mesma aplicação de carga.

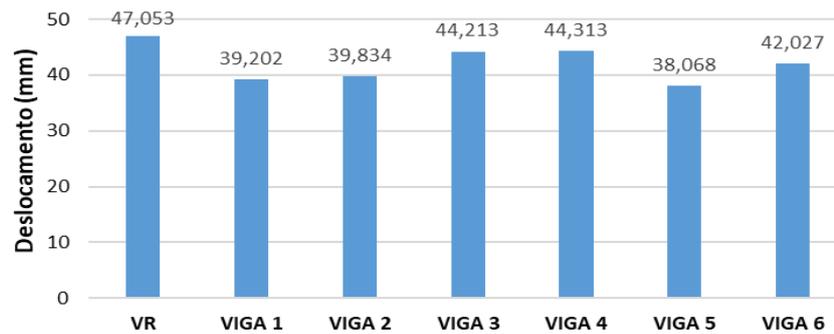


FIGURA 5: Deslocamento das vigas para carga de ruptura da viga de referência: 3,01 toneladas.

FONTE: Autores (2017).

5.2 COMPARAÇÃO DA CARGA DE RUPTURA DAS VIGAS REFORÇADAS COM A VIGA SEM REFORÇO

De acordo com Fiorelli (2005) a carga de ruptura de vigas de madeira laminada colada, quando há a utilização do conjunto fibra de vidro/resina epoxidica como reforço, se torna maior quando comparada a uma viga de madeira laminada colada sem aplicação do reforço, em concordância com o autor a Figura 14 mostra as respectivas cargas de ruptura de cada viga demonstrando um acréscimo de carga para as vigas reforçadas.

A viga que obteve maior carga de ruptura foi a viga 1, com 3,8 toneladas, seguida das vigas 5 e 4, com 3,7 e 3,69 toneladas respectivamente, a viga 6 obteve carga de ruptura de 3,51 toneladas e as vigas 2 e 3, obtiveram ruptura com o mesmo valor de aplicação de carga sendo de 3,44 toneladas.

A média de carga de ruptura das vigas do primeiro modelo, no qual o reforço foi aplicado na

face inferior das vigas é de 3,56 toneladas e do segundo modelo, no qual o reforço foi aplicado entre a primeira e a segunda lamela das vigas é de 3,63 toneladas.

A Tabela 1 mostra o acréscimo, em porcentagem, de carga de ruptura comparando-se a viga de referência, viga sem aplicação de reforço. A porcentagem de reforço aplicado, sendo a espessura do tecido de fibra de vidro unidirecional utilizado de 0,62 mm, foi de 0,93% em relação à altura da viga, o que corresponde a três camadas de fibra de vidro, sendo que segundo Fiorelli (2005) a máxima resistência obtida com aplicação de reforço de tecido unidirecional de fibra de vidro é quando se utiliza um reforço com espessura de 3,3% em relação à altura da viga. A utilização de 3,3% de espessura de reforço em relação à altura da viga corresponderia à utilização de 11 camadas do tecido de fibra de vidro unidirecional, o que inviabiliza o processo de aplicação do reforço e aumenta consideravelmente os custos do uso do reforço.

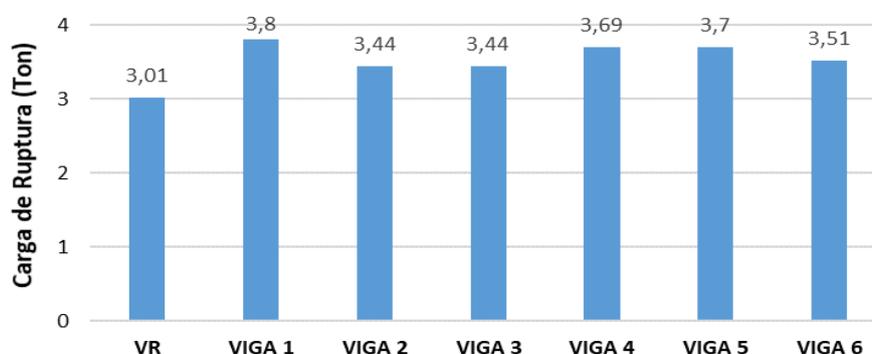


FIGURA 6: Carga de ruptura das vigas.

FONTE: Autores (2017).

TABELA 1: Porcentagem de acréscimo de carga devido ao reforço.

VIGA	CARGA DE RUPTURA (toneladas)	PORCENTAGEM DE ACRÉSCIMO
VR	3,01	sem reforço
V1	3,8	26,25%
V2	3,44	14,29%
V3	3,44	14,29%
V4	3,69	22,59%
V5	3,7	22,92%
V6	3,51	16,61%

FONTE: Autores (2017).

A viga que obteve maior acréscimo de carga em porcentagem foi a viga 1, com 26,25% de acréscimo, as vigas 2 e 3 obtiveram o menor acréscimo de carga, com 14,29% de acréscimo.

Analisando as vigas 2, 3, 5 e 6, o acréscimo de carga das vigas entra em concordância com os módulos de elasticidade obtidos para cada viga, sendo que as vigas 5 e 6, que possuem maior módulo de elasticidade, obtiveram maior porcentagem de acréscimo de carga de ruptura, enquanto que as vigas 2 e 3, que possuem menor módulo de elasticidade, obtiveram menor porcentagem de acréscimo de ruptura.

5.3 MODO DE RUPTURA DAS VIGAS

Durante o ensaio a flexão das sete vigas de madeira laminada colada, sendo uma viga não reforçada e outras seis vigas reforçadas, observou-se comportamentos semelhantes entre a maioria das vigas, com ruptura por tração das lamelas

inferiores e por cisalhamento longitudinal.

A viga de referência, sendo esta a viga sem aplicação de reforço, obteve uma ruptura frágil, sem aviso prévio, com uma ruptura inicialmente a tração das duas primeiras lamelas da viga e em conformidade com a bibliografia apresentada, houve, logo após a tração, a distorção da seção transversal e a ruptura por cisalhamento longitudinal, no qual surgiram aberturas na terceira, quarta e quinta lamela da viga, como mostra a Figura 15. A ruptura da viga de referência deu-se a uma carga de 3,01 toneladas e o deslocamento obtido pelo transdutor de deslocamento no momento da ruptura foi de 47,053 milímetros. Durante o ensaio observou-se um deslocamento praticamente linear e proporcional da viga conforme a aplicação de carga, sendo que a mesma não aumentou consideravelmente seu deslocamento quando atingida a carga de ruptura.



FIGURA 7: Ruptura viga de referência.

FONTE: Autores (2017).

A viga 1, que possuía a aplicação do reforço em três camadas na face inferior da viga, obteve uma ruptura frágil, assim como a viga de referência. Nota-se na Figura 16, que a viga 1 obteve uma ruptura a tração das duas primeiras lamelas da viga e também do reforço, e logo após a tração, houve o cisalhamento longitudinal da viga observado na terceira, quarta e quinta lamela da viga.

A carga de ruptura da viga 1 foi de 3,8 toneladas, sendo 26,25% maior, quando comparado a viga de referência e o deslocamento obtido no momento da ruptura da viga foi de 62,821 milímetros.

A viga 2, que possuía a aplicação do reforço em três camadas na face inferior da viga, assim como as vigas analisadas anteriormente, obteve uma ruptura sem avisos e frágil, sendo que a ruptura deu-se inicialmente a tração da primeira lamela da viga e do reforço, e posteriormente por

cisalhamento longitudinal causando aberturas na terceira, quarta e quinta lamela da viga, como pode ser observado na Figura 17.

A ruptura da viga 2 deu-se a uma carga de 3,44 toneladas, 14,29% maior comparando-se à viga de referência, com deslocamento no momento da ruptura de 63,310 milímetros.

A viga 3, que possuía a aplicação do reforço em três camadas na face inferior da viga, também teve um comportamento a ruptura frágil, sendo que a ruptura da mesma deu-se inicialmente a tração das duas primeiras lamelas da viga e também do reforço e em seguida por cisalhamento longitudinal, que causou abertura na terceira, quarta, quinta lamela, como mostra a Figura 18. A carga de ruptura da viga foi de 3,44 toneladas, 14,29% maior comparando-se à viga de referência, exatamente o mesmo valor obtido na viga 2, porém o deslocamento no momento de ruptura foi de 65,999 milímetros.



FIGURA 8: Ruptura da viga 1.
FONTE: Autores (2017).



FIGURA 17: Ruptura viga 2.
FONTE: Autores (2017).



FIGURA 9: Ruptura da viga 3.

FONTE: Autores (2017).

A viga 4, que possuía as três camadas de fibra de vidro aplicadas entre a primeira e a segunda lamela da viga, obteve uma ruptura frágil, sem avisos, com a ruptura inicialmente a tração da primeira lamela da viga, logo abaixo do reforço, e também do reforço, posteriormente por cisalhamento longitudinal que causou aberturas das lamelas, não afetando apenas a última lamela da viga, como mostra a Figura 19. Observou-se uma leve deformação na última lamela da viga, porém não causou esmagamento por compressão das lamelas superiores da viga. A ruptura da viga 4 deu-se a uma carga de 3,69 toneladas, 22,59% maior comparando-se à viga de referência com um

deslocamento no momento da ruptura de 63,279 milímetros.

A Figura 20 mostra a ruptura da viga 5, que obteve uma ruptura frágil, com ruptura a tração da primeira, segunda, terceira, quarta e quinta lamela da viga e também do reforço, nesta viga, diferentemente das demais analisadas, não houve cisalhamento longitudinal. Observou-se um afundamento da lamela superior o que causou esmagamento da madeira por compressão. Carga de ruptura da viga 5 foi de 3,70 toneladas, 22,92% maior comparando-se a viga de referência, sendo que o deslocamento no momento da ruptura foi de 83,722 milímetros.



FIGURA 19: Ruptura da viga 4.

FONTE: Autores (2017).



FIGURA 10: Ruptura viga 5.

FONTE: Autores (2017).

A viga 6, obteve uma ruptura frágil, porém mais brusca comparando-se as demais vigas analisadas, como pode ser observado pela Figura 21, a ruptura deu-se inicialmente por tração nas três primeiras lamelas da viga e no reforço, e por cisalhamento longitudinal que causou aberturas na terceira, quarta, quinta e sexta lamela, sendo que houve separação total da viga por cisalhamento longitudinal observado na terceira e quarta lamela. Notou-se também esmagamento das lamelas superiores por compressão.

A ruptura da viga 6 deu-se a uma carga de 3,51 toneladas, 16,61% maior comparando-se a viga de referência, e um deslocamento no momento da ruptura de 81,625 milímetros.

Em todas as vigas analisadas não houve o descolamento entre as lamelas de madeira por mau funcionamento do adesivo Melamina Uréia Formaldeído MUF 1242 com o emulsificante líquido 2542 aplicado entre as lamelas, e também não houve descolamento do reforço por mau funcionamento da resina Compound. Em todas as vigas reforçadas observou-se que o deslocamento

das mesmas era linear e proporcional, assim como a viga de referência, até o valor de carga de ruptura da viga de referência, 3,01 toneladas, após este valor o deslocamento sofria uma desaceleração e quando era atingida a carga de ruptura da viga, ocorria um deslocamento acentuado da viga e por fim sua ruptura.

A Tabela 2 mostra os valores de carga de ruptura e deslocamento no momento de ruptura de cada viga, nota-se que a viga 1 obteve o maior valor de carga de ruptura, 3,80 ton, e o menor deslocamento entre as vigas reforçadas, 62,821 mm, a viga 5 obteve o segundo maior valor de carga, 3,7 ton, e o maior deslocamento final, 83,722 mm, a viga 6 obteve o terceiro maior valor de carga, 3,51 ton, com o segundo maior deslocamento final, 81,625 m, a viga 4 obteve o quarto maior valor de carga de ruptura, 3,69 ton, com deslocamento final de 63,279 mm, por fim as vigas 2 e 3 obtiveram o mesmo valor de carga de ruptura, 3,44 ton, com deslocamentos de 63,310 e 65,999 mm, respectivamente.



FIGURA 11: Ruptura viga 6.

FONTE: Autores (2017).

TABELA 2: Carga de ruptura e deslocamento.

VIGA	CARGA DE RUPTURA (TON)	DESLOCAMENTO (MM)
VR	3,01	47,053
Viga 1	3,8	62,821
Viga 2	3,44	63,31
Viga 3	3,44	65,999
Viga 4	3,69	63,279
Viga 5	3,7	83,722
Viga 6	3,51	81,625

FONTE: Autora (2015).

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através da análise dos resultados obtidos nos ensaios de aderência madeira-madeira, aderência madeira-fibra, módulo de elasticidade e capacidade de carga a flexão simples das vigas, pode-se obter as seguintes conclusões:

O adesivo Melamina Uréia Formaldeído MUF 1242 com o emulsificante líquido 2542 aplicado entre as lamelas apresentou-se adequado para o uso em vigas de madeira laminada colada submetidas à flexão simples, pois não houve descolamento nem deslizamento entre as lamelas de madeira quando as vigas foram solicitadas.

Comparando-se a viga de referência, sem reforço, com as vigas reforçadas houve um aumento na rigidez das vigas que receberam o reforço, o que proporcionou um menor deslocamento das vigas reforçadas, para uma mesma carga, comparando-se a viga sem reforço e também proporcionou uma maior capacidade de carga das vigas. Assim como, houve um aumento do módulo de elasticidade das vigas reforçadas em relação à viga de referência. Um aumento mais significativo de rigidez somente não foi obtido devido à falta de semelhança entre o módulo de elasticidade do tecido unidirecional de fibra de vidro e o módulo de elasticidade da madeira.

Em relação à capacidade de carga das vigas, o reforço demonstrou-se funcional, pois através da aplicação de três camadas de tecido unidirecional de fibra de vidro, o que corresponde a 0,93% de espessura em relação à altura da viga, houve um aumento de até 26,25% na capacidade de carga das vigas onde houve a aplicação do

reforço. A máxima resistência obtida com a aplicação de um reforço de tecido unidirecional de fibra de vidro se dá quando se utiliza um reforço com espessura de 3,3% em relação à altura da viga, porém a utilização de 3,3% de espessura de reforço em relação à altura da viga corresponderia à utilização de 11 camadas do tecido de fibra de vidro unidirecional, o que inviabiliza o processo de aplicação do reforço e aumenta consideravelmente os custos do uso do mesmo.

Quanto ao modo de ruptura das vigas, todas as vigas obtiveram ruptura a tração das lamelas inferiores, sendo que em apenas uma das vigas não houve ruptura por cisalhamento longitudinal, assim como em apenas duas vigas houve o esmagamento a compressão das lamelas superiores das vigas.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190**: Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro: ABNT, 1997. 107 p
- BARBOSA, Rui Manuel Teixeira. **Estruturas de madeira lamelada colada reforçada com sistemas compósitos de FRP**. 2008. 167 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade do Porto, Porto, 2008.
- FIORELLI, Juliano. **Estudo teórico e experimental de vigas de madeira laminada colada reforçadas com fibra de vidro**. 2005. 108 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciência e Engenharia dos Materiais, Departamento de Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/88/88131/td-e-19072005-110613/pt-br.php> < Acesso em: 02 out. 2014.

FIORELLI, Juliano; DIAS, Antonio Alves. Glulam beams reinforced with FRP externally-bonded: theoretical and experimental evaluation. **Materials And Structures**, [s.l.], v. 44, n. 8, p.1431-1440, 11 fev. 2011. Springer Nature.

LIMA JÚNIOR, Humberto; DIAS, Antônio. Vigas mistas de madeira Vigas mistas de madeira de reflorestamento e bambu laminado de reflorestamento e bambu laminado colado: análise teórica e experimental colado: análise teórica e experimental. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 5, n. 3, p.519-524, fev. 2001. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v5n3/v5n3a25.pdf>>. Acesso em: 14 jun. 2015.

MIOTTO, José Luiz; DIAS, Antonio Alves. Reforço e recuperação de estruturas de madeira. **Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas**, Londrina, v. 27, n. 2, p.163-174, jul. 2006. Semestral. Disponível em: <<http://www.uel.br/revistas/uel/index.php/semexatas/article/view/1875/1581>>. Acesso em: 10 nov. 2014.

RUBINI, Lucas; MORAES, Poliana Dias de. Aderência à Madeira de Polímeros Reforçados com Fibras de Carbono sob Temperaturas Elevadas. **Floram: Floresta e Ambiente**, Rio de Janeiro, v. 19, n. 2, p.236-242, abr. 2012. Disponível em: <<http://www.floram.org/files/v19n2/v19n2a16.pdf>>. Acesso em: 12 mar. 2015.

TELES, Ricardo Faustino. **Propriedades tecnológicas de vigas de madeira laminada colada produzidas com louro vermelho**. 2009. 101 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Ciências Florestais, Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, 2009. Disponível em: <http://bdtd.bce.unb.br/tesesimplificado/tde_arquivos/46/TDE-2009-03-30T194316Z-3763/Publico/2009_RicardoFaustinoTeles.pdf>. Acesso em: 10 nov. 2014.

ZANGIÁCOMO, André Luiz. **Emprego de espécies tropicais alternativas na produção de elementos estruturais de madeira laminada colada**. 2003. 82 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-26052006-150001/pt-br.php>>. Acesso em: 07 nov. 2014.