

ARTIGO ORIGINAL

Estudo do comportamento mecânico de madeira laminada colada de *Hevea brasiliensis* produzida com adesivo poliuretano

Study of the mechanical behavior of glued laminated wood of Hevea brasiliensis bonded with polyurethane adhesive

Douglas Lamounier Faria¹ , Lourival Marin Mendes¹ , José Benedito Guimarães Júnior¹ 

¹Universidade Federal de Lavras – UFLA, Lavras, MG, Brasil

Como citar: Faria, D. L., Mendes, L. M., & Guimarães Júnior, J. B. (2020). Estudo do comportamento mecânico de madeira laminada colada de *Hevea brasiliensis* produzida com adesivo poliuretano. *Scientia Forestalis*, 48(126), e3231. <https://doi.org/10.18671/scifor.v48n126.11>

Resumo

O objetivo deste trabalho foi avaliar as propriedades da madeira de seringueira (*Hevea brasiliensis*) para produção de peças estruturais de madeira laminada colada. Seis árvores com idades de aproximadamente 12 anos e diâmetro à altura do peito (DAP) maior que 25 cm foram abatidas. As vigas de madeira laminada colada foram produzidas com três lamelas com dimensões de 6,0 × 2,0 × 120,0 cm por viga, num total de 6 vigas, usando o adesivo poliuretano monocomponente. Foi determinada a umidade, densidade aparente e porosidade da madeira sólida. Já para as vigas de madeira laminada colada foram determinados o módulo de elasticidade (MOE), o módulo de ruptura (MOR), a resistência ao cisalhamento (linha simples e dupla), a delaminação e a visualização da linha de cola por meio de fotomicrografias das amostras de madeira laminada colada. Os valores das propriedades analisadas ficaram próximos às espécies tradicionalmente utilizadas para a produção de vigas de madeira laminada colada, atendendo aos requisitos mínimos para esta finalidade de acordo com as normas NBR 7190 e JAS 234 para MOR (30 MPa) e para cisalhamento da linha de cola simples e dupla (5,40 MPa) na condição seco.

Palavras-chave: Viga; Resistência; Linha de cola.

Abstract

The aim of this work was to evaluate the properties of rubber wood (*Hevea brasiliensis*) for the production of structural pieces of glued laminated timber. Six trees with ages of approximately 12 years and diameter at breast height (DBH) greater than 25 cm were felled. Glued laminated timber beams were produced with three layers measuring 6.0 × 2.0 × 120.0 cm per beam, in a total of 6 beams, using the one-component polyurethane adhesive. The moisture, apparent density and porosity of the solid wood were determined. The modulus of elasticity (MOE), the modulus of rupture (MOR), shear strength (single and double line), delamination and visualization of the glue line were determined by means of photomicrographs of the laminated wood samples. The values of the analyzed properties were close to the species traditionally used for the production of beams of glued laminated wood, meeting the minimum requirements for this purpose according to the norms NBR 7190 and JAS 234 for MOR (30 MPa) and for single and double glue line shear strength (5.40 MPa) in the dry condition.

Keywords: Anatomy; Apparent density; Glue line.

Fonte de financiamento: Nenhuma.

Conflito de interesse: Nada a declarar.

Autor correspondente: douglas.lamounier@yahoo.com

Recebido: 20 dezembro 2018.

Aceito: 10 julho 2019.

Editor: Francides Gomes Silva Júnior.



Este é um artigo publicado em acesso aberto (*Open Access*) sob a licença *Creative Commons Attribution*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

INTRODUÇÃO

A seringueira é natural da região Amazônica, e existem dez espécies no Brasil, das onze conhecidas. Botanicamente, a seringueira é uma dicotiledônea do gênero *Hevea*, pertencente à família Euphorbiaceae, sendo todas elas espécies arbóreas e arborícolas (Lima et al., 2000).

A expansão do plantio de seringueira no país provoca uma oferta significativa da madeira dessa cultura ao final de sua rotação (25-30 anos), o que leva ao interesse em estudos sobre essa matéria-prima. No Brasil, a madeira de *Hevea* obtida ao final do ciclo produtivo do látex é utilizada tradicionalmente como lenha, apesar de apresentar boas características de trabalhabilidade (colagem, pregação, perfuração, entre outras) e pode ser facilmente dobrada com o uso de vapor e facilmente tingida (Eufrade Junior et al., 2015).

A madeira de seringueira é viável para a produção de painéis de cimento, mostrando boa estabilidade dimensional, mesmo quando submetida à exposição à imersão em água (Okino et al., 2004), painéis *Oriented Strand Board* (OSB), com propriedades que atingiram padrões mínimos de comercialização (Okino et al., 2009) e painéis de partículas (Müzel et al., 2014). Analisando estes trabalhos, pode-se dizer que a madeira de seringueira apresenta potencial para diferentes usos, dentre eles, a produção de madeira laminada colada. Este é considerado um produto estrutural formado pela associação de peças de madeira selecionadas dispostas de modo que as fibras sejam paralelas e coladas com adesivos sob pressão variando de 0,7 a 1,5 MPa (Pfeil & Pfeil, 2003). Uma das vantagens da madeira laminada colada é a melhor utilização que a união de peças de madeira de pequenas dimensões proporciona para a fabricação de vigas estruturais (Segundinho et al., 2013).

Neste contexto, este trabalho propõe avaliar as propriedades físicas da madeira de *Hevea brasiliensis*; especificamente o clone RRIM 600, bem como as propriedades mecânicas de madeira laminada colada utilizando adesivo poliuretano.

MATERIAL E MÉTODOS

Obtenção e caracterização das propriedades da madeira de *Hevea brasiliensis*

Seis árvores da espécie *Hevea brasiliensis*, especificamente o clone RRIM 600 foram cortadas com 12 anos de idade. As seringueiras estavam localizadas na região Sul do estado de Minas Gerais, Brasil. De cada árvore foram obtidas toras com 1,30 m à partir da base. Visando avaliar as propriedades da madeira, foram realizados ensaios de acordo com a norma brasileira NBR 7190 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (1997), onde foram determinadas umidade na base seca e a densidade aparente da madeira maciça de seringueira. Foi determinada também a porosidade da madeira, sendo calculada por meio da fórmula proposta por MacLean (1952), a qual estabelece que a porosidade está em função da densidade e do teor de umidade da madeira, conforme Equação 1.

$$Pm = 1 - DENSfv (0,667 + 0,01 * TUfv) * 100 \quad (1)$$

Em que:

Pm: porosidade da madeira (%);

DENSfv: densidade aparente da madeira ($g.cm^{-3}$);

TUfv: teor de umidade da madeira.

Produção das vigas de madeira laminada colada

Após o desdobro das toras e obtenção de tábuas, foram obtidas peças com dimensões de 25 x 70 x 1200 mm (espessura, largura e comprimento, respectivamente) que foram secas até atingir a umidade de 12%. Posteriormente, as faces foram aplainadas até atingir as dimensões finais de 20 x 60 x 1200 mm (espessura, largura e comprimento, respectivamente). As lâminas foram classificadas aplicando ondas de vibração com o uso do equipamento

Sonelastic. Para a produção da madeira laminada colada, as vigas foram classificadas de acordo com o valor do MOE, sendo as lâminas com maiores valores aplicadas às faces, e as lâminas com menores valores aplicadas no miolo. Seis vigas de madeira laminada colada foram produzidas. Cada viga foi composta por três lâminas. O adesivo usado para colar as vigas foi poliuretano (Jowat Fazer-PU 686.60) (Tabela 1).

Tabela 1. Parâmetros para a produção das vigas de madeira laminada colada.

Parâmetros	Poliuretano
Viscosidade aparente (25 °C)	5000 mPas
Teor de sólidos	100%
Gramatura	350 g.m ⁻²

As vigas de madeira laminada colada foram unidas com pressão de 1,0 MPa, com auxílio de uma prensa hidráulica, mantidas por 24 horas sob pressão constante em um aparato metálico.

Propriedades das vigas de madeira laminada colada

Ensaio de flexão estática

Após a prensagem, as vigas foram acondicionadas em ambiente com temperatura de 22 ± 2 °C e umidade relativa de $65 \pm 5\%$ até atingir a umidade de 12%. No total, 12 corpos de prova foram obtidos das vigas de madeira laminada colada produzidas e avaliadas de acordo com a norma American Society for Testing and Materials (2013). Os ensaios de flexão estática foram realizados de acordo com a ASTM D198 (American Society for Testing and Materials, 1997), para determinação do MOE e MOR.

Ensaio de cisalhamento e delaminação

Para a determinação da resistência ao cisalhamento na linha de cola (f_v), foram retirados 12 corpos de prova de maneira aleatória ao longo da viga de madeira laminada colada para ensaio na condição seca e 12 corpos de prova para avaliação na condição saturada da madeira laminada colada, segundo a norma brasileira NBR 7190 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1997). Também foi realizado ensaio de cisalhamento (f_v) em corpos de prova estruturais do tipo "H" (*push-out*) (Figura 1), de acordo com a norma americana American Institute of Timber Construction (2007). Para este ensaio, foram confeccionados seis corpos de prova para avaliação da resistência ao cisalhamento nas condições de umidade ambiente e saturado. Este teste foi realizado para avaliar a resistência ao cisalhamento e consequentemente à qualidade de duas linhas de cola.



Figura 1. Corpo de prova estrutural utilizado no ensaio de cisalhamento na linha de cola dupla.

Para a determinação da delaminação dos corpos de prova extraídos das vigas de madeira laminada colada, foram retirados seis corpos de prova nas dimensões 7,5 × 6,0 × 6,0 cm (comprimento, largura e espessura) no sentido paralelo às fibras, sendo utilizada a metodologia descrita por Lestari et al. (2015). O ensaio foi realizado deixando as amostras permanecerem 6 horas imersas em água, 18 horas em estufa com circulação forçada de ar a 40 ± 3 °C, 4 horas sob fervura a temperatura de 100 °C, 1 hora de imersão em água a temperatura ambiente e por fim 18 horas em estufa à temperatura de 70 ± 3 °C. Após a realização do ensaio, foi verificado o comportamento da madeira laminada colada exposta ao exterior, avaliando a porcentagem de delaminação, que foi obtida nas duas faces de topo dos corpos de prova. Para a verificação da porcentagem, foi obtido o comprimento de cada linha de cola em que ocorreu delaminação e, este será dividido pelo comprimento total da linha de cola, conforme Equação 2.

$$\text{Del} = (\text{CompDel} / \text{CompTotal}) * 100 \quad (2)$$

Em que:

Del = Delaminação (%);

CompDel = Comprimento em que ocorreu a delaminação (cm);

CompTotal = Comprimento total da linha de cola (cm).

Fotomicrografias da interface madeira-adesivo

O estudo da interface madeira-adesivo foi realizado de acordo com a metodologia proposta por Albino et al. (2010). Foram retiradas amostras das posições radial e longitudinal de um cubo central de 0,5 × 0,5 × 0,5 cm a partir das vigas de madeira laminada colada. Tais cubos foram saturados em uma bomba a vácuo até ficarem macios ao corte. Obteve-se as lâminas utilizando um micrótomo de deslizamento (Jung SM 2000). De cada cubo foram retiradas duas lâminas, sendo uma no plano transversal e outra no plano longitudinal da viga de madeira laminada colada para análise imediata no microscópio óptico, com fotomicrografias utilizando câmera digital Olympus BX51 e programa Image Pro-Plus 5.1.

Análise estatística

Para avaliar as propriedades da madeira de seringueira e das vigas de madeira laminada colada, os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) com posterior aplicação do teste de Tukey, ambos a 5% de significância. Os dados foram processados e analisados no software *Sisvar* (Ferreira, 2014).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Caracterização física da madeira de seringueira

A madeira de seringueira apresentou densidade aparente igual a 0,624 g.cm⁻³ com teor de umidade de 11,29%. O conhecimento da umidade e a densidade aparente do lote de madeira são fatores fundamentais para fabricação de madeira laminada colada, uma vez que a umidade deve estar entre 8 e 12% e a densidade aparente influencia no tempo de prensagem e na pressão, durante o processo de produção dos elementos de madeira laminada colada (Forest Products Laboratory, 2010; Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2013; Segundinho et al., 2015a).

A literatura relata resultados de densidade aparente para o clone de seringueira RRIM 600 de 0,590 g.cm⁻³ (Riyaphan et al., 2015) e 0,655 g.cm⁻³ para o clone RRIM 605 (Kadir & Jantan, 2016).

A porosidade obtida para a madeira de seringueira foi de 51,33%, o que explica a boa adesão ocorrida nas vigas de madeira laminada colada, pois quanto maior a porosidade da madeira, maior será a penetração do adesivo nesses poros, ocorrendo posteriormente à solidificação, com a formação de ganchos fortemente presos entre os substratos (Iwakiri, 2005). Ainda segundo o autor, a frequência de vasos está relacionada com a porosidade, que se relaciona com a densidade, o que influencia a penetração dos adesivos na madeira.

Caracterização mecânica das vigas de madeira laminada colada de *Hevea brasiliensis*

A Tabela 2 apresenta os valores médios para MOR e MOE para as vigas de madeira laminada colada produzidas. Nota-se que as vigas apresentaram valores médios para MOR superiores aos observados na literatura para madeira sólida, como visto no trabalho de Majumdar et al. (2015) para árvores com 30 anos de idade e valores médios de MOR de 65,5 MPa. As vigas de madeira laminada colada são mais fortes e rígidas que os produtos de madeira maciça (Thelandersson & Larsen, 2003; Porteous & Kermani, 2007).

Tabela 2. Valores médios para MOR e MOE em flexão estática para as vigas de madeira laminada colada.

	MOR (MPa)	MOE (MPa)
Valores médios	77,93 ± 10,89*	6.793,77 ± 867,03
CV (%)	13,98	12,76

Onde: *Desvio padrão; CV = Coeficiente de variação.

Durante o ensaio de flexão estática das vigas de madeira laminada colada, observou-se comportamento semelhante em todas as vigas testadas, ocorrendo predominância de ruptura por tração nas lâminas inferiores e por cisalhamento longitudinal. As vigas romperam sem aviso prévio, apresentando inicialmente ruptura à tração na primeira lâmina das vigas, e, posteriormente, houve a distorção da seção transversal e a ruptura por cisalhamento longitudinal, surgindo aberturas entre as lâminas das vigas, como observado na Figura 2. Em todas as vigas analisadas não houve o descolamento entre as lâminas de madeira por falha no processo de adesão, as falhas foram observadas apenas na madeira.

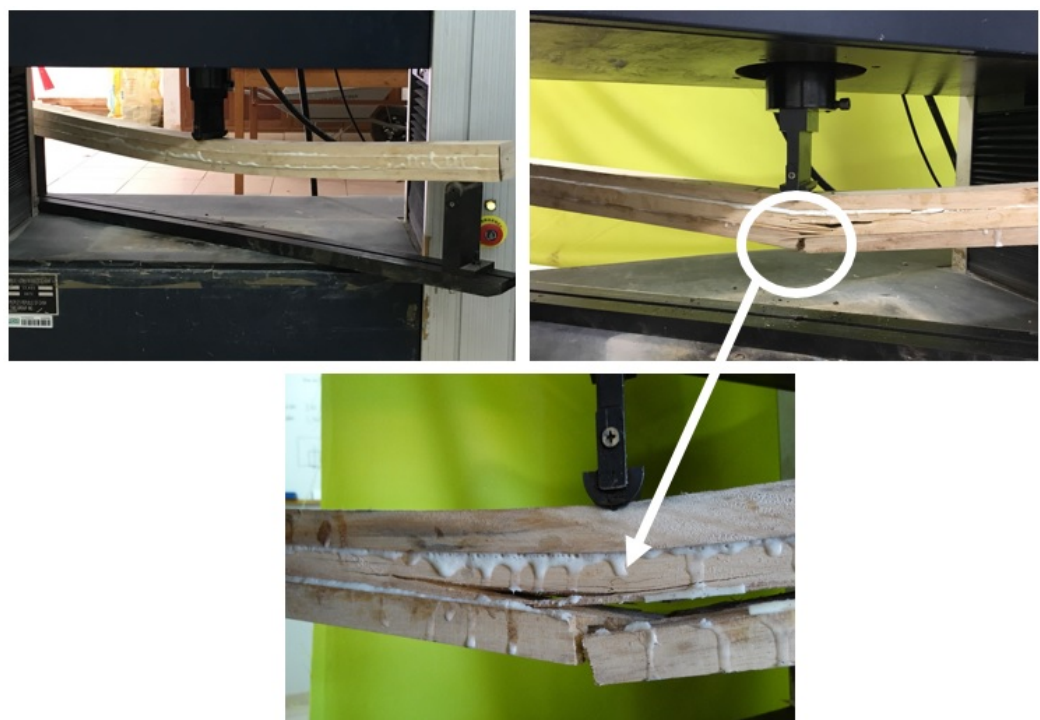


Figura 2. Falha típica de viga laminada colada submetida à flexão estática.

Os resultados obtidos nesse estudo para MOR encontram-se ligeiramente inferiores aos observados por Icimoto et al. (2016), cujos autores obtiveram valores variando entre 90,12 a 96,63 MPa para vigas de madeira laminada colada confeccionadas com a espécie *Pinus oocarpa*, unidas com o adesivo resorcinol-formaldeído. Porém, comparando os resultados obtidos neste estudo com aqueles originados no trabalho de Almeida et al. (2014), onde os autores avaliaram vigas de madeira laminada colada da espécie *Shizolobium amazonicum* unidas com o adesivo resorcinol-formaldeído, observa-se que os autores encontraram valores de MOR variando entre 39 e 45 MPa, resultados inferiores aos obtidos neste trabalho. Resultados semelhantes foram obtidos por Nadir & Nagarajan (2014), apresentando valores médios de MOR de 70,35 MPa para vigas de madeira laminada colada de seringueira contendo três lâminas de 20 mm de espessura cada, coladas com adesivo PVAc. Os valores de MOR encontrados neste estudo estão acima daqueles exigidos pela Norma Japanese Agricultural Standard (2003) para vigas estruturais de madeira laminada colada, onde o valor mínimo exigido é de aproximadamente 30 MPa.

Para MOE, observa-se resultados inferiores àqueles obtidos por Nadir & Nagarajan (2014) para vigas de madeira laminada colada de seringueira, apresentando valores médios de 9.996,87 MPa. Essa diferença pode ser atribuída a inúmeros fatores, como tipo de adesivo empregado; pressão utilizada para união das lâminas; teor de umidade das lâminas; densidade aparente da madeira e a idade das árvores. Os autores utilizaram árvores com idade acima de 20 anos obtidas após o período de extração do látex.

Maiores valores de MOE para as vigas estruturais podem ser obtidos realizando a classificação não destrutiva das lâminas, e posteriormente distribuindo as lâminas com maiores valores de MOE nas regiões mais solicitadas, que são as áreas tracionadas e comprimidas. Esse comportamento foi observado no presente estudo e também no trabalho de Cunha & Matos (2011), cujos autores avaliaram a rigidez e resistência de vigas estruturais de *Pinus taeda* coladas com adesivo poliuretano. Os autores obtiveram resultados médios de MOE dinâmico de 7.107 MPa para vigas produzidas com lâminas distribuídas aleatoriamente e 7.576 MPa, para vigas com distribuição não aleatória das lâminas. Para MOE estático, os autores obtiveram resultados médios de 7.897 MPa, ligeiramente acima daqueles observados nas vigas com distribuição não aleatória, porém distante daqueles resultados encontrados de MOE dinâmico para as lâminas distribuídas aleatoriamente.

Os valores de MOE das vigas de madeira laminada colada são diretamente proporcionais aos valores de MOE das lâminas individuais, especialmente as lâminas empregadas na área tracionada, bem como a densidade da espécie utilizada (Moody et al., 1999).

Os resultados obtidos para MOE no presente estudo encontram-se próximos aos observados na literatura para vigas estruturais de madeira laminada colada. Porém, comparando os resultados de MOE deste estudo com os padrões de qualidade para vigas estruturais de MLC da Norma JAS 234 (Japanese Agricultural Standard, 2003), percebe-se que tais resultados encontram-se ligeiramente inferiores ao mínimo estipulado pela normativa para MOE, que é de 7.358 MPa.

Observando a Tabela 3, nota-se que os resultados obtidos para os ensaios de cisalhamento da linha de cola e cisalhamento da linha dupla de cola das vigas de madeira laminada colada nas condições seco e saturado apresentaram diferenças estatísticas significativas ao nível de 95% de probabilidade utilizando o teste Tukey. O valor médio da resistência ao cisalhamento da linha de cola na condição seca foi aproximadamente 39,47% superior em relação a condição saturado, esse percentual se apresentou próximo comparando ao ensaio de cisalhamento da linha dupla de cola, sendo 42,18% superior em relação ao ensaio na condição saturado. De acordo com os padrões para madeira laminada colada, o valor mínimo estipulado pela JAS 234 (Japanese Agricultural Standard, 2003) para resistência ao cisalhamento é de 5,40 MPa, logo, somente os ensaios de cisalhamento da linha de cola e cisalhamento da linha dupla de cola na condição seco atenderam a essa normativa.

Tabela 3. Resistência ao cisalhamento simples e duplo e percentagem de falhas nas vigas de madeira laminada colada de *Hevea brasiliensis*.

Condição	Cisalhamento			Cisalhamento "H"		
	Média (MPa)	CV (%)	FM (%)	Média (MPa)	CV (%)	FM (%)
Seco	7,65 B	0,70	92,5	7,42 B	1,17	97,5
Saturado	4,63 A	0,90	75,0	4,29 A	1,89	62,5

CV: Coeficiente de Variação. FM: Falha na Madeira. Médias seguidas pela mesma letra não diferem ao nível de 5% de significância pelo teste Tukey.

Resultados semelhantes ao deste trabalho foram obtidos por Segundinho et al. (2015a), encontrando resistência ao cisalhamento paralelo às fibras na condição seco de 8,66 MPa para vigas estruturais de *Acacia mangium* coladas com adesivo poliuretano. Nadir & Nagarajan (2014) trabalhando com vigas estruturais de madeira laminada colada de seringueira obtiveram resistência ao cisalhamento da linha de cola de 8,59 MPa, valor próximo ao deste estudo. Para a condição saturada, Segundinho et al. (2015a) obtiveram valores médios de resistência ao cisalhamento paralelo às fibras na condição saturado de 5,09 MPa. De acordo com Vick (1999), a qualidade da ligação adesiva é influenciada pela espécie de madeira, espessura da lâmina e pressão utilizada no processo.

Para o ensaio de resistência ao cisalhamento em corpo de prova estrutural "H" (Figura 3), foi observado comportamento semelhante ao cisalhamento da linha de cola simples para as condições seco e saturado. Os resultados obtidos para os corpos de prova estruturais deveriam ser duas vezes maiores em relação aos resultados do cisalhamento do corpo de prova simples, pois estes apresentam duas linhas de cola. Comparando os resultados deste trabalho aos da literatura, observa-se proximidade a trabalhos realizados por diversos autores, como Almeida et al. (2014), que obtiveram resistência ao cisalhamento seco de 7,75 MPa em corpo de prova estrutural de madeira laminada colada da espécie *Lyptus* utilizando adesivo resorcinol-formaldeído; Segundinho et al. (2015b), encontraram resultados de resistência ao cisalhamento seco de 6,44 MPa em corpo de prova estrutural de madeira laminada colada da espécie *Eucalyptus sp.* utilizando adesivo melamina-ureia-formaldeído; Calil Neto et al. (2014a) estudando a linha de cola de vigas laminadas coladas de três espécies de florestamento obtiveram valores médios de resistência ao cisalhamento na condição seco de 5,00 MPa para a espécie *Pinus*, 5,40 MPa para a espécie *Teca* e 3,10 MPa para a espécie *Eucalipto*. Os resultados encontrados para resistência ao cisalhamento na condição seco estão próximos àqueles estudados na literatura para espécies tradicionalmente utilizadas para confecção de peças estruturais de madeira laminada colada.

Para a condição saturado no ensaio de resistência ao cisalhamento em corpo de prova estrutural, os valores observados neste estudo encontram-se próximos aos observados por Segundinho et al. (2015b). Os autores encontraram resistência média de 5,07 MPa na condição saturado dos corpos de prova obtidos das vigas de madeira laminada colada confeccionadas com madeira de *Eucalyptus sp.* e adesivo à base de melamina-ureia-formaldeído. Almeida et al. (2014) obtiveram resistência ao cisalhamento saturado de 6,60 MPa em corpo de prova estrutural de madeira laminada colada da espécie *Lyptus* utilizando adesivo resorcinol-formaldeído. Os resultados encontrados para resistência ao cisalhamento nas condições seco e saturado estão próximos àqueles estudados na literatura para espécies tradicionalmente utilizadas para confecção de peças estruturais de madeira laminada colada, tornando a seringueira uma espécie com potencial para emprego nesta situação.

Em relação às análises das falhas na linha de cola dos corpos de prova colados, pode-se inferir que um maior percentual de falha na madeira está relacionado com uma maior eficiência do adesivo. Maiores porcentagens de falha na madeira indicam que as ligações adesivas são mais fortes que a própria madeira. O percentual de falhas na madeira para o ensaio de resistência ao cisalhamento simples na condição seco ficou próximo aos observados por Nadir & Nagarajan (2014), onde os autores encontraram percentual de falha

na madeira de 99,7% para vigas laminadas coladas de seringueira e adesivo PVAc. De acordo com a Norma JAS 234 (Japanese Agricultural Standard, 2003), o percentual mínimo de falha da madeira é de 60%, sendo assim, os resultados obtidos neste trabalho para resistência da ligação adesiva da linha de cola simples e linha de cola dupla nas condições seco e saturado atenderam à norma.

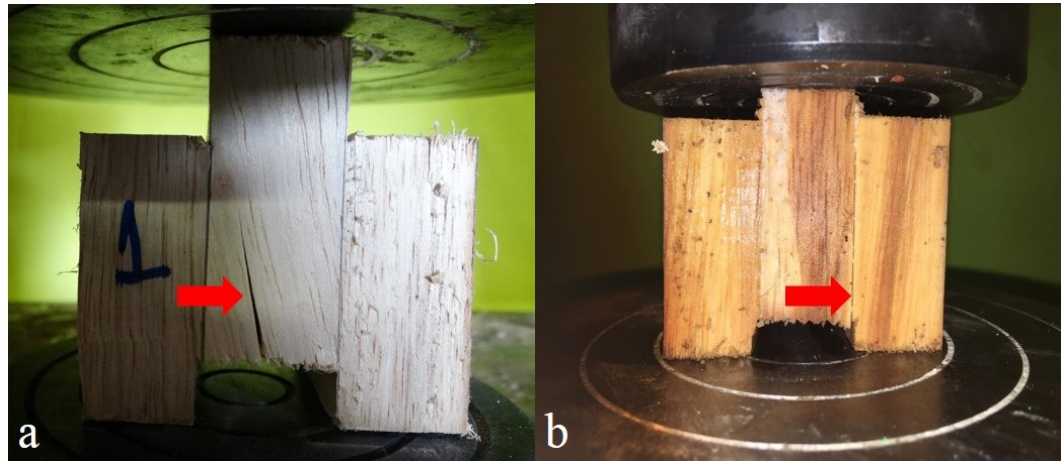


Figura 3. Corpo de prova estrutural de cisalhamento na linha de cola após ensaio. a) Rompimento na madeira após ensaio de cisalhamento na linha de cola. b) Rompimento observado em uma das linhas de cola do corpo de prova estrutural.

Em relação ao ensaio de delaminação dos corpos de prova de madeira laminada colada, notou-se por meio da verificação visual do estado das linhas de cola que os corpos de prova não apresentaram fendas de delaminação; comprovou-se que a porcentagem de delaminação foi igual à zero. Segundinho et al. (2015a) também obtiveram porcentagem de delaminação igual a zero estudando o comportamento de vigas estruturais de *Acacia mangium* coladas com adesivo poliuretano. Resultados próximos a zero também foram observados por Calil Neto et al. (2014b), encontrando porcentagem de delaminação de 0,5 e 0,6% para madeira laminada colada de *Pinus* produzidas com adesivos poliuretano e resorcinol-formaldeído, respectivamente.

A porcentagem de delaminação observada neste trabalho foi inferior ao máximo de 10% estipulado pela Norma europeia EN 386 (British Standards Institute, 2001), bem como inferior ao máximo permitido pela Norma JAS 234 (Japanese Agricultural Standard, 2003) que é de 5%. A avaliação da eficiência desses adesivos, quando submetidos a variações de umidade, pressão e temperatura é de fundamental importância para garantir a integridade do elemento estrutural em madeira laminada colada durante seu tempo de uso (Fiorelli & Dias, 2005).

Analisando as Figuras 4 e 5, observa-se que a linha de cola apresenta-se desuniforme, possuindo variada espessura ao longo da sua interface. Para a posição transversal foi observado espessura média da linha de cola de 7,55 μm , e para a posição longitudinal, 9,27 μm . Resultados semelhantes foram observados por Segundinho et al. (2017) para as juntas coladas utilizando o adesivo poliuretano, cujos autores obtiveram valores médios de espessura da linha de cola de 13,41 μm para a face transversal e 7,86 μm para a face longitudinal para a madeira de *Eucalyptus cloeziana*. A baixa espessura da linha de cola do adesivo poliuretano pode ser explicada pois devido à baixa viscosidade do adesivo (430,63 cP), sendo muito fluido, o mesmo pode ocorrer uma penetração excessiva e desaparecimento do adesivo através da estrutura porosa da madeira, resultando numa situação de quantidade insuficiente de adesivo na linha de cola, ocorrendo uma linha de cola faminta (Iwakiri, 2005).

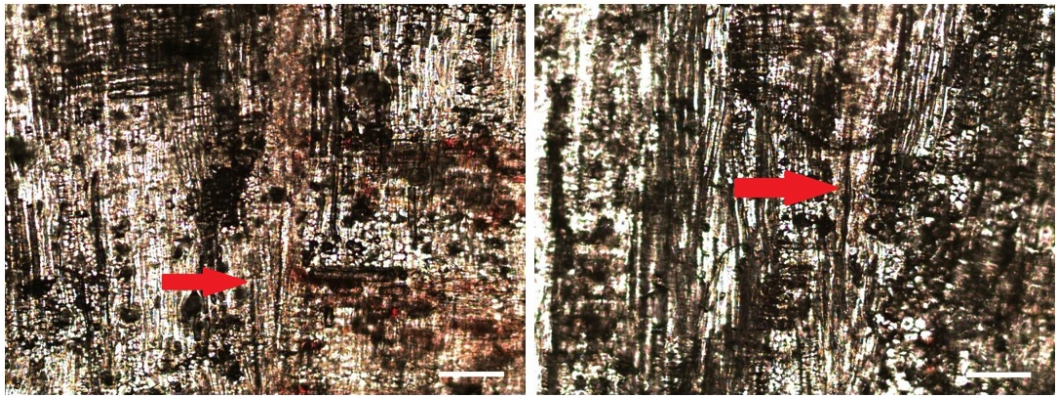


Figura 4. Fotomicrografias da interface madeira-adesivo no plano longitudinal das vigas de madeira laminada colada de *Hevea brasiliensis*. Seta vermelha indica a linha de cola. Barra de escala= 100 μ m.

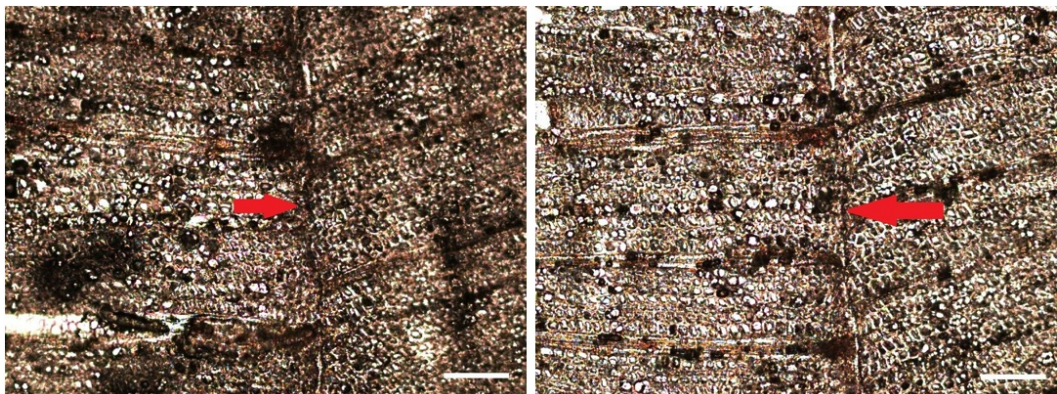


Figura 5. Fotomicrografias da interface madeira-adesivo no plano transversal das vigas de madeira laminada colada de *Hevea brasiliensis*. Seta vermelha indica a linha de cola. Barra de escala= 100 μ m.

CONCLUSÕES

Os resultados das propriedades mecânicas obtidas para as vigas de madeira laminada colada produzidas com a espécie *Hevea brasiliensis* foram satisfatórios em comparação aos valores observados na literatura para espécies Pinus e Eucalipto, usadas como referência para produção de madeira laminada colada.

Constatou-se, na presente pesquisa, que as rupturas de todas as vigas de madeira laminada colada ocorreram por tração no ensaio de flexão estática. Para MOE, as vigas não atenderam o valor mínimo exigido pela Norma JAS 234 (Japanese Agricultural Standard, 2003); já em relação a MOR, os resultados mostraram-se muito superiores ao mínimo exigido pela normativa.

A partir dos resultados de resistência ao cisalhamento na linha de cola simples e dupla, concluiu-se que há potencialidade de produção de madeira laminada colada utilizando a espécie *Hevea brasiliensis*, porém, protegida de possíveis condições excepcionais, como alto teor de umidade.

Quanto ao ensaio de delaminação, a espécie apresentou resultado satisfatório, indicando a potencialidade da madeira laminada colada em uso estrutural, como pilares e vigas de estruturas empregadas em coberturas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à empresa Jowat pela doação do Poliuretano. À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – FAPEMIG, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoa de Nível Superior – CAPES, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e

Tecnológico – CNPq e ao Sr. José Osvaldo Vádi por gentilmente permitir a realização desta pesquisa em seu plantio florestal de seringueira.

REFERÊNCIAS

- Albino, V. C. S., Mori, F. A., & Mendes, L. M. (2010). Estudo da interface madeira-adesivo de juntas coladas com resorcinol-formaldeído e madeira de *Eucalyptus grandis* w. Hill ex Maiden. *Scientia Forestalis*, 38(87), 509-516.
- Almeida, D. H., Cavalheiro, R. S., Macêdo, L. B., Calil Neto, C., Christoforo, A. L., Calil Júnior, C., & Lahr, F. A. R. (2014). Evaluation of quality in the adhesion of glued laminated timber (glulam) of paricá and lyptus wood species. *International Journal of Materials Engineering*, 4(3), 114-118. <http://dx.doi.org/10.5923/j.ijme.20140403.07>.
- American Institute of Timber Construction – AITC. (2007). *AITC 190: structural glued laminated timber* (20 p.). Colorado: AITC.
- American Society for Testing and Materials – ASTM. (1997). *ASTM D198: standard test methods of static tests of lumber in structural sizes*. Philadelphia: ASTM.
- American Society for Testing and Materials – ASTM. (2013). *ASTM D905-08: standard test method for strength properties of adhesive bonds in shear by compression loading*. Pennsylvania: ASTM.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. (1997). *NBR 7190: projeto de estruturas de madeira*. Rio de Janeiro: ABNT.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. (2013). *Projeto de revisão NBR 7190 CB-02: projeto de estruturas de madeira*. São Paulo: ABNT.
- British Standards Institute – BSI. (2001). *EN 386: glued laminated timber: performance requirements and minimum production requirements*. London: BSI.
- Calil Neto, C., Christoforo, A. L., Lahr, F. A. R., & Calil Júnior, C. (2014b). Analysis of specie: treatment: adhesive combinations for glulam purpose. *International Journal of Materials Engineering*, 4(1), 41-47. <http://dx.doi.org/10.5923/j.ijme.20140401.06>.
- Calil Neto, C., Christoforo, A. L., Ribeiro Filho, S. L. M., Lahr, F. A. R., & Calil Júnior, C. (2014a). Avaliação da resistência ao cisalhamento e à delaminação em madeira laminada colada. *Ciência Florestal*, 24(4), 989-996. <http://dx.doi.org/10.5902/1980509816612>.
- Cunha, A. B., & Matos, J. L. M. (2011). Avaliação da rigidez de vigas estruturais de madeira laminada colada unidas por adesivo poliuretano. *Cerne*, 17(4), 593-600. <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-77602011000400019>.
- Eufrade Junior, H. J., Ohto, J. M., Silva, L. L., Palma, H. A. L., & Ballarin, A. W. (2015). Potential of rubber wood (*Hevea brasiliensis*) for structural use after the period of latex extraction: a case study in Brazil. *Journal of Wood Science*, 61(4), 384-390. <http://dx.doi.org/10.1007/s10086-015-1478-7>.
- Ferreira, D. F. (2014). Sisvar: a guide for its bootstrap procedures in multiple comparisons. *Ciência e Agrotecnologia*, 38(2), 109-112. <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-70542014000200001>.
- Fiorelli, J., & Dias, A. A. (2005). Avaliação da delaminação em peças de madeira laminada colada reforçadas com fibra de vidro. *Revista Matéria*, 10(2), 241-249.
- Forest Products Laboratory – FPL. (2010). *Wood handbook: wood as an engineering material: general technical report FPL-GTR-190* (508 p.). Madison: U.S. Department of Agriculture, Forest Service.
- Icimoto, F. H., Calil Neto, C., Ferro, F. S., Macedo, L. B., Christoforo, A. L., Lahr, F. A. R., & Calil Júnior, C. (2016). Influence of lamellar thickness on strength and stiffness of glued laminated timber beams of *Pinus oocarpa*. *International Journal of Materials Engineering*, 6(2), 51-55. <http://dx.doi.org/10.5923/j.ijme.20160602.05>.
- Iwakiri, S. (2005). *Painéis de madeira reconstituída*. Curitiba: Fupef.
- Japanese Agricultural Standard – JAS. (2003). *JAS 234: glued laminated timber*. Tokyo: Ministry of Agriculture, Forestry, and Fisheries.
- Kadir, R., & Jantan, M. (2016). Enhancement of *Hevea brasiliensis* properties through chemical application. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 88(4), 2081-2092. PMID:27991952. <http://dx.doi.org/10.1590/0001-3765201620150650>.
- Lestari, A. S. R. D., Hadi, Y. S., Hermawan, D., & Santoso, A. (2015). Glulam properties of fast-growing species using mahogany tannin adhesive. *BioResources*, 10(4), 7419-7433. <http://dx.doi.org/10.15376/biores.10.4.7419-7433>.

- Lima, R. R., Tourinho, M. M., & Costa, J. P. C. (2000). *Várzeas fluvio-marinhas da Amazônia brasileira: características e possibilidades agropecuárias* (341 p.). Belém: FCAP, Serviço de Documentação e Informação.
- MacLean, J. D. (1952). *Preservative treatment of wood by pressure methods* (160 p.). Madison: U. S. Department of Agriculture.
- Majumdar, M. S. M., Das, A. K., Shams, M. I., & Chowdhury, M. Q. (2015). Effect of age and height position on physical and mechanical properties of rubber wood (*Hevea brasiliensis*) of Bangladesh. *Bangladesh Journal of Scientific and Industrial Research*, 49(2), 79-84. <http://dx.doi.org/10.3329/bjsir.v49i2.22000>.
- Moody, R. C., Hernandez, R., & Liu, J. Y. (1999). Glued structural timbers. In Forest Products Laboratory, *Wood handbook: wood as an engineering material*. Madison: USDA Forest Service.
- Müzel, S. D., Lima, L. R., Gava, M., Garcia, J. N., Barbosa, J. C., & Ferreira, B. S. (2014). Multilayer medium density particleboard using castor oil-based polyurethane resin and *Hevea brasiliensis* wood. *Advanced Materials Research*, 1025-1026, 559-563. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1025-1026.559>.
- Nadir, Y., & Nagarajan, P. (2014). The behavior of horizontally glued laminated beams using rubber wood. *Construction & Building Materials*, 55, 398-405. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.032>.
- Okino, E. Y. A., Souza, M. R., Santana, M. A. E., Sousa, M. E., & Teixeira, D. E. (2004). Chapa aglomerada de cimento-madeira de *Hevea brasiliensis* Müll. Arg. *Revista Árvore*, 28(3), 451-457. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-67622004000300016>.
- Okino, E. Y. A., Teixeira, D. E., Souza, M. R., Santana, M. A. E., Silva, C. B. G., Tomaz, R. B., & Sousa, M. E. (2009). Uso das madeiras de seringueira, pinus e cipreste na fabricação de chapas OSB. *Floresta*, 39(2), 457-468. <http://dx.doi.org/10.5380/rf.v39i2.14573>.
- Pfeil, W., & Pfeil, M. (2003). *Estruturas de madeira*. Rio de Janeiro: LTC.
- Porteous, J., & Kermani, A. (2007). *Structural timber design to Eurocode 5*. Oxford: Blackwell Publishing. <http://dx.doi.org/10.1002/9780470697818>.
- Riyaphan, J., Phumichai, T., Neimsuwan, T., Witayakran, S., Sungsing, K., Kaveeta, R., & Phumichai, C. (2015). Variability in chemical and mechanical properties of Pará rubber (*Hevea brasiliensis*) trees. *ScienceAsia*, 41(4), 251-258. <http://dx.doi.org/10.2306/scienceasia1513-1874.2015.41.251>.
- Segundinho, P. G. A., Calil Neto, C., Gonçalves, F. G., Regazzi, A. J., & Calil Júnior, C. (2015b). Resistência de linhas de cola para madeiras de reflorestamento. *Semina. Ciências Exatas e Tecnológicas*, 36(1), 107-116. <http://dx.doi.org/10.5433/1679-0375.2015v36n1p117>.
- Segundinho, P. G. A., Carreira, M. R., Calil Neto, C., Regazzi, A. J., Dias, A. A., & Calil Júnior, C. (2013). Avaliação do módulo de elasticidade de peças de madeira laminada colada (MLC) obtido por meio do ensaio de vibração transversal. *Ambiente Construído*, 13(2), 7-14. <http://dx.doi.org/10.1590/S1678-86212013000200002>.
- Segundinho, P. G. A., França, L. C. A., Medeiros Neto, P. N., Gonçalves, F. G., & Oliveira, J. T. S. (2015a). Madeira lamelada colada (MLC) com *Acacia mangium* e adesivos estruturais. *Scientia Forestalis*, 43(107), 533-540.
- Segundinho, P. G. A., Gonçalves, F. G., Gava, G. C., Tinti, V. P., Alves, S. D., & Regazzi, A. J. (2017). Eficiência da colagem de madeira tratada de *Eucalyptus cloeziana* F. Muell para produção de madeira laminada colada (MLC). *Revista Matéria*, 22(2), e11808. <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620170002.0140>.
- Thelandersson, S., & Larsen, H. J. (2003). *Timber engineering*. New York: John Wiley & Sons.
- Vick, C. B. (1999). Adhesive bonding of wood material. In Forest Products Laboratory, *Wood handbook: wood as an engineering material*. Madison: USDA Forest Service.

Contribuição dos autores: DLF: conceituação, investigação, curadoria de dados, escrita - primeira redação, escrita - revisão e edição; LMM e JBGJ: metodologia, supervisão, escrita - primeira redação, recursos, administração do projeto.