

ANÁLISE DE VIGAS DE MADEIRA LAMELADA COLADA ENRIJECIDAS COM BAMBU

ANALYSIS OF GLUED LAMINATED TIMBER BEAMS STIFFENED WITH BAMBOO

ANÁLISIS DE VIGAS DE MADERA LAMINADA ENCOLADA REFORZADA CON BAMBÚ

Fernando Sergio Okimoto¹
Mariana de Carvalho Dias²
Fernanda Nascimento Rígolo³
Andressa dos Santos⁴

Resumo: O objetivo foi investigar o desempenho mecânico de vigas artesanais de madeira lamelada colada com reforço de bambu. Assim, o experimento contou com ensaios de flexão estática em três distintos corpos de prova (CP), sendo estes: -vigas de madeira maciça (VM); -vigas de madeira lamelada colada (MLC); e -vigas de madeira lamelada colada com reforço de bambu (MLCB). Foi utilizado adesivo único a base de Formol e Ureia e dois tempos de pressão da colagem, 12 horas e 24 horas. Constatou-se que a utilização do bambu proporcionou um aumento de rigidez material entre 41% e 56% em relação às MLCs.

Palavras-chave: Madeira. Bambu. Desempenho estrutural. Madeira lamelada colada.

Abstract: The aim was to investigate the mechanical performance of handmade glued laminated timber beams stiffened with bamboo. Therefore, the experiment counted on with static flexion tests on three different specimens: - solid timber beam; - glued laminated timber beam; and – glued laminated timber beam stiffened with bamboo. It was used a single adhesive based on Formol and Urea and two different periods of bonding's application. It was noticed that the use of bamboo as a stiffening material provided an increase in material stiffness between 41% and 56% in relation to glued laminated timber beams.

Keywords: Timber. Bamboo. Structural behavior. Glued laminated timber.

Resumen: El objetivo fue investigar el desempeño mecánico de vigas de madera lameladas encoladas hechas a mano con refuerzo de bambú. Así, el experimento incluyó ensayos de flexión estática en tres probetas diferentes, a saber: -vigas de madera maciza; - vigas de madera lamelada encolada; - vigas de madera lamelada en-colada con refuerzo de bambú solo se utilizó un adhesivo a base de urea y dos tiempos diferentes de presión. Se obtuvieron los valores de los respectivos Módulos de Elasticidad en Flexión y se verificó que el uso del bambú proporcionó un aumento en la rigidez entre 41% y 56%.

Palabras-clave: Madera. Bambú. Comportamiento estructural. Madera lamelada encolada.

Submetido 13/11/2022

Aceito 28/02/2023

Publicado 09/03/2023

¹ Doutor. Faculdade de Ciências e Tecnologia (FCT) da UNESP de Presidente Prudente, São Paulo, Brasil. ORCID (<https://orcid.org/0000-0003-1385-8316>). e-mail: fs.okimoto@unesp.br.

² Graduanda em Arquitetura e Urbanismo. Bolsista PIBIC-CNPq 2021-2022. FCT/UNESP. ORCID (<https://orcid.org/0000-0002-7403-4823>). e-mail: mariana.c.dias@unesp.br.

³ Arquiteta e Urbanista. Pesquisadora PIBIC-ICSB 2019. FCT/UNESP. ORCID (<https://orcid.org/0000-0003-0772-0564>). e-mail: fernanda.rigolo@unesp.br.

⁴ Engenheira Civil. UNOESTE. ORCID (<https://orcid.org/0000-0002-1901-7633>). e-mail: stos.andressa@gmail.com.

Introdução

A madeira é um material orgânico, leve e com ampla empregabilidade na construção civil devido ao fácil manuseio e às suas vantagens, tais como a alta relação resistência/peso. No Brasil, onde há um reconhecido potencial florestal, sua variabilidade é imensa, abarcando diversas tonalidades, aromas, texturas, resistências e desempenho. Entretanto, a Lei Federal 12.651, de 25 de maio de 2012, do Código Florestal Brasileiro indica para a utilização na escala da construção civil, deve-se buscar o uso de madeiras reflorestadas (manejadas), não sendo permitida a extração de madeira de florestas nativas (BRASIL, 2012), em detrimento das madeiras nativas, a fim de reduzir o desmatamento no país. Sua utilização, ainda, é indicada devido ao seu menor custo e tradicional crescimento acelerado, podendo algumas espécies atingirem a idade de abate, para o uso declarado, aos 20 anos. Deste modo, as espécies disponíveis e recomendadas para a indústria brasileira da construção são a *araucaria brasiliensis* e a *tectona grandis* e algumas dos gêneros pinus e eucaliptos.

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) em sua Norma Brasileira (NBR) ABNT NBR 7190-1:2022 (p. 9), as propriedades da madeira são condicionadas por sua estrutura anatômica e fisiológica, em que se distinguem os valores dos esforços de tração e compressão, bem como os da direção paralela às fibras e os da direção normal às fibras. Isto posto, explana-se que as características da madeira maciça são variáveis de acordo com a espécie e de acordo com a posição de retirada da madeira na tora. Ressalta-se que as Normas Técnicas são regras, procedimentos, processos em geral que são aprovadas pela ABNT e passam a estabelecer padronizações técnicas fundamentadas nas práticas e nas pesquisas sobre os temas. Não têm força de lei, mas muitas vezes estão atreladas a leis que impelem os seus usos.

Além disso, esses fatores, tais como a densidade, por exemplo, indicam a resistência e a durabilidade que este material deve apresentar, sendo que quanto maior a densidade, mais durável costuma ser. De acordo com Latorraca e Albuquerque (2012), esta característica pode ser alterada em função da própria espécie, como, também, por influências externas, sejam elas intervenções silviculturais ou ambientais⁵.

⁵ Saiba mais em Target, Normas: <https://www.normas.com.br/>. Acessado em 15 de fevereiro de 2023.

No último caso, um exemplo seria o teor de umidade que a madeira apresenta, pois suas propriedades mecânicas aumentam com o decréscimo da umidade e, conseqüentemente, elevam sua rigidez e o adensamento das paredes celulares. Por ser um material higroscópico, o ambiente em que a madeira é cultivada e armazenada se faz muito importante, pois contribui para sua qualidade. Nesse contexto, com intuito de evitar problemas futuros, a ABNT NBR 7190-1:2022 padroniza uma classe de umidade e recomenda o processo de secagem para o material, tanto para que não ocorra o empenamento, como para que este cumpra adequadamente seu desempenho como isolante.

Contudo, deve-se atentar ao fato de que a madeira maciça, muitas vezes, não apresenta homogeneidade em sua estrutura e dispõe de alguns defeitos, o que reduz sua resistência e elasticidade, e impede sua utilização completa. Sendo assim, segundo Stamato (1998), este foi um dos fatores que levaram ao desenvolvimento da madeira lamelada colada (MLC), a qual é composta por lâminas de madeira que contêm espessuras variando entre 1cm e 5cm, coladas entre si por meio de um adesivo a prova d'água (ABNT NBR 7190-1, 2022) que garantirá a rigidez e resistência da peça.

Entende-se por madeira lamelada colada (MLC) para fins estruturais, peças de madeira engenheirada em processo industrializado de fabricação, composta de lamelas coladas umas às outras e dispostas com as fibras paralelas ao eixo longitudinal da peça final. As lamelas possuem dimensões relativamente reduzidas se comparadas às dimensões do elemento estrutural final. Na produção das peças de MLC, as lamelas são sobrepostas e coladas até atingirem a seção transversal determinada no dimensionamento da peça estrutural, cujo eixo pode ser reto ou curvo (ABNT NBR 7190-1, 2022, pg 34).

Outros fatores interessantes desta técnica estão atrelados a sua baixa relação resistência/peso, desempenho elevado sob ação do fogo, em razão de suas seções transversais avantajadas, e elevada resistência aos agentes corrosivos. Para a confecção das MLCs, faz-se necessário que sua densidade esteja compreendida entre 0,40 g/cm³ e 0,75g/cm³ e que seu teor de umidade esteja entre 7% e 14%, ou entre 12% e 16%, se em ambientes não climatizados, sendo que a diferença entre as tábuas não pode exceder 5%, proporcionando, nessa conjuntura, um melhor efeito de colagem (SZÜCS, 1992). Essa tecnologia, de acordo com as afirmações

de Rouger (1995), proporciona maior rigidez para a peça, devido ao efeito da laminação, e diminui sua dimensão volumétrica, acarretando um material menor e mais forte.

Seguindo a mesma abordagem de enrijecimento das peças de madeira, destacam-se as técnicas de utilizar fibras para reforço, as quais auxiliam na redução de consumo do material principal e promovem um acréscimo de rigidez às peças. Carvalho (2005), através de sua investigação, ratificou que a adesão de fibras de sisal às estruturas de madeira aumentou a rigidez delas em 14,2% nos esforços de flexão; ou seja, os resultados são satisfatórios. Sob esse prisma, a hipótese foi aliar essas duas técnicas, MLC e reforço com fibras naturais em um processo fabril simplificado, para verificar se é possível haver um acréscimo significativo de desempenho estrutural. Optou-se, então, pelo bambu para compor, junto com a MLC, a materialidade. Para contextualizar, tal escolha pautou-se, principalmente, na notória resistência à tração que este material apresenta devido sua estrutura ser composta por fibras longas e alinhadas (GHAVAMI; RODRIGUES, 2000), sendo considerado o “aço verde” da construção civil.

Além disso, optou-se pelo bambu, devido suas características de matéria-prima renovável, de elevada eficiência energética e grande presença no território brasileiro, bem como fácil reprodução e manejo. Deste modo, quando associados entre si, o conjunto, MLC e bambu, apresenta vantagens em termos do aumento das propriedades de resistência, elasticidade e estabilidade dimensional.

Como se não bastasse, ao pesquisar sobre o bambu, verificou-se que sua associação à MLC seria análoga à técnica existente de bambu laminado colado (BLC), que possui quase os mesmos processos do método em madeira ao envolver secagem, corte e aglutinação por pressão e por substâncias adesivas. Destarte, objetiva-se uma análise comparativa entre o desempenho mecânico, a partir de um ensaio não destrutivo, de vigas de madeira maciça, vigas de MLC e vigas de madeira lamelada colada com reforço de bambu (MLCB), produzidas de modo artesanal a partir de com prensas hidráulicas manuais. Assim, será possível para verificar se a utilização do reforço com lâmina de bambu na zona tracionada promove um aumento de rigidez, melhorando as qualidades estruturais da peça.

Materiais e métodos

Materiais

Os materiais da pesquisa foram: madeira de pinus, bambu *phyllostachys aurea* e adesivo a base de ureia.

Para a pesquisa, utilizou-se a madeira de espécie *pinus sp*, genérica e comercializada pela empresa COMAVE/SA, cuja classe de resistência espera-se corresponder a das coníferas C20, com as características indicadas na ABNT NBR 7190-1 (2022, p. 11). Com um único lote desse material, se confeccionou todos os corpos de prova, tal como preconizado na ABNT NBR 15575-2:2013, que ainda destaca a importância de padronizar os procedimentos e manter o controle construtivo.

Além disso, para a elaboração, necessitou-se distinguir a classe de umidade da madeira, a fim de adequar as propriedades de rigidez e resistência dela em função das condições ambientais onde a estrutura foi designada. Neste caso, a classe de umidade correspondente é a 1 (ABNT NBR 7190-1:2022, tabela 1, p. 10), que enquadra umidade relativa abaixo de 65%, devido os dados da cidade de Presidente Prudente, local de elaboração do trabalho, apresentarem uma média de 60,7% entre os anos de 2017 e 2021 (64,6%; 62,8%; 60,3%; 58,0% e 57,6%, respectivamente), conforme aponta as informações disponibilizadas pela estação meteorológica A707⁶. Por fim, seguindo as recomendações da ASTM D3737-18 (2018), as vigas de MLC foram produzidas com lâminas de mesma espessura e dimensão menor que 0,05 metros.

O bambu utilizado foi a espécie cana-da-índia (*phyllostachys aurea*), disponível no campus da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Unesp de Presidente Prudente. Deste modo, foram abatidas as canas daqueles que apresentavam espessura aproximada de 3cm. Em seguida, realizou-se a retirada dos colmos e colocou-os lado a lado verticalmente por um período de 14 dias e, por fim, efetuou-se o tratamento de secagem e prevenção de possíveis fungos pelo aquecimento com um maçarico a gás butano.

Este procedimento constou na colocação das canas do bambu sobre dois cavaletes de, aproximadamente, 0,60 metros de altura e no seu tratamento com o fogo do maçarico de maneira uniforme, através de suas rotações constantes. Ainda, a obtenção das laminações de

⁶ Estação Meteorológica da Faculdade de Ciências e Tecnologia UNESP/Presidente Prudente

bambu se deu pelo seu corte e posterior processamento no LabBioC - Laboratório de Bioconstrução Civil da FCT/UNESP de Presidente Prudente, buscando-se as dimensões desejadas. O resultado obtido foi um conjunto de lâminas com, aproximadamente, 1,25 milímetros de espessura.

Enfim, o último material da lista foi o adesivo REDEMITE® da empresa Redelease™, feito à base de ureia-formol. Sua aplicação na análise teve como intuito, além do efeito aglutinante, a avaliação de sua resistência em dois sistemas diferentes de colagem, como, também, sua interação com a associação madeira-bambu.

Métodos

Trata-se de uma pesquisa quantitativa que busca avaliar a contribuição do bambu no enrijecimento de vigas de madeira lamelada colada. Foi uma pesquisa experimental de natureza aplicada que buscou explicar a força material de uma composição criativa e de baixo impacto para vigas. As vigas são elementos estruturais muito presentes na arquitetura e na engenharia das edificações e a busca de melhorias de suas propriedades mecânicas e físicas é crucial para se buscar eficiência e sustentabilidade econômica e ambiental.

Os procedimentos metodológicos podem ser divididos em:

- A. Aquisição e Coleta dos materiais bases para a confecção dos corpos de prova: tal procedimento foi definido e declarado no item anterior;
- B. Preparação dos corpos-de-prova estatisticamente relacionados para simplificar o espectro de variáveis independentes;
- C. Fabricação das vigas em MLC e em MLC com reforço de bambu;
- D. Ensaios de flexão nas vigas maciças, nas vigas em MLC e nas vigas de MLCB.

Preparação dos Corpos-de-prova

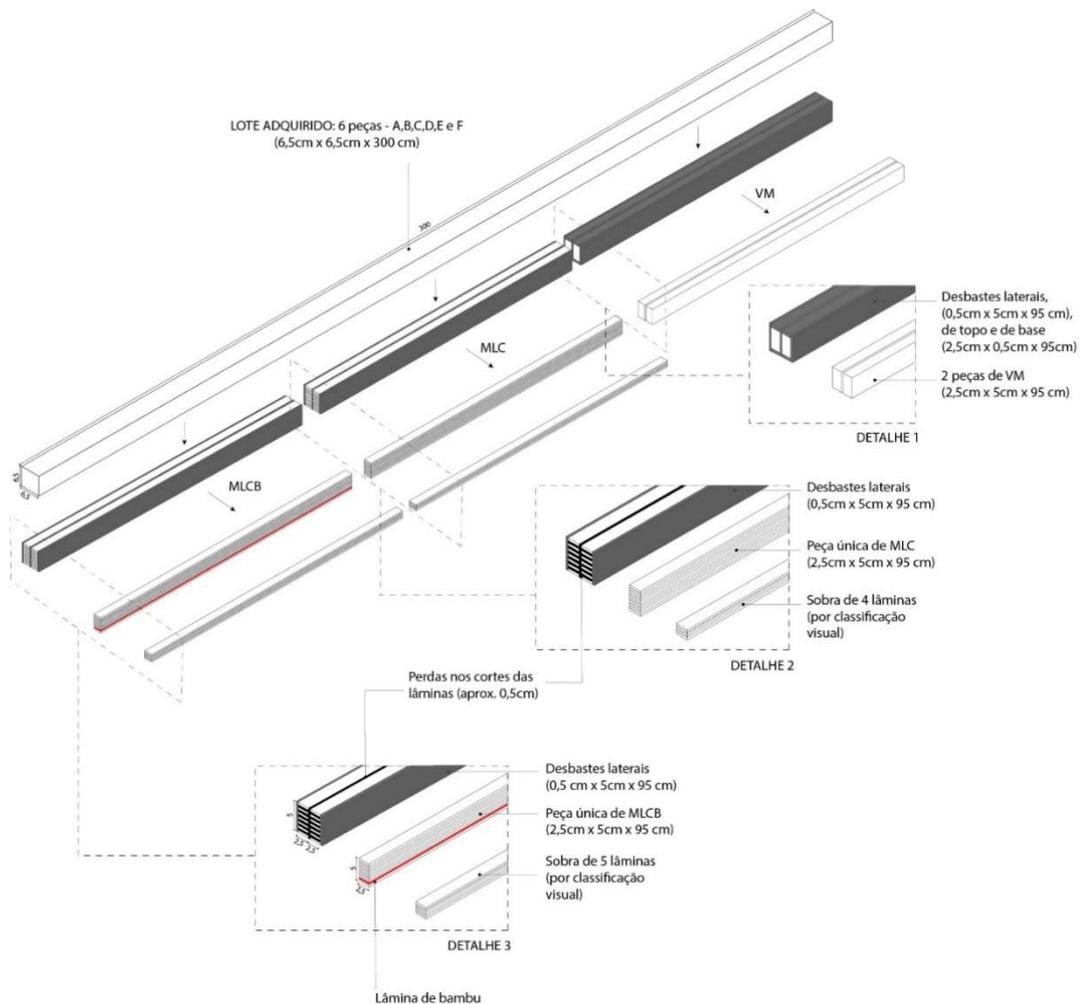
Para a realização do estudo, fabricou-se três tipos de corpos de prova (CP), sendo eles vigas de madeira maciça (VM), vigas de madeira lamelada colada (MLC) e vigas de madeira lamelada colada reforçadas com bambu (MLCB).

A elaboração de cada uma delas se deu pela utilização de três segmentos de 1 metro provenientes de uma peça comercial de seção 6,5cm X 6,5cm por 3 metros de comprimento, de modo que todos os CP seriam oriundos de uma mesma peça, evitando, assim, o enfrentamento

das variações decorrentes da anisotropia radial e tangencial das peças na tora da árvore (Figura 1). Por conseguinte, o primeiro terço, de 1m, originou dois corpos de prova (CP) de VM, sendo corpos de prova de referência da espécie natural, não industrializada.

Já a fabricação das vigas lameladas, referentes ao restante da peça, foi feita de duas formas: com colagem por pressão pelo período de 12 horas, o que é recomendado pelo fabricante; e outra, por um período de 24 horas, a fim de analisar se um adicional de tempo agregaria maior desempenho estrutural para a peça. Desta forma, todos os CP foram obtidos por meio de lote de 6 (seis) barras denominadas A, B, C, D, E e F, e tiveram uma perda material na ordem de 4 milímetros de espessura, quase a própria espessura da lâmina, gerada pelo corte dos segmentos. Sendo assim, os produtos foram 12 CP de VM, (a saber: Viga maciça A dividida em dois segmentos), 6 CP de MLC (3 CP com colagem por 12 horas e 3 CP por 24 horas), feitos com lâminas de ambos os lados da peça, e 6 CP de MLCB, com colagem, tempo de pressão e processo construtivo tais como as das MLC (Tabela 1).

Figura 1 – Metodologia de obtenção das vigas através das divisões e laminações necessárias



Fonte: Elaboração própria.

A Figura 1 apresenta uma das 6 peças (A a F) de seção transversal 6,5cm por 6,5cm e 3 metros de comprimento sendo dividida em 3 partes iguais de aproximadamente 1 metro. De cada um desses terços foram tirados os corpos de prova maciço (VM), as lâminas para as MLC e as lâminas para MLCB, sendo que nessa última, a lâmina de bambu (em vermelho). Como pode se obter mais lâminas do que o mínimo necessário para fabricar as MLCs e as MLCBs, foi possível escolher as melhores peças (isentas ou com um número menor de nós, rachaduras e afins, o que é a base conceitual das MLCs, isto é, utilizar as peças menos comprometidas).

Tabela 1 - Corpos de prova

ORIGEM	VIGA MACIÇA	MADEIRA LAMELADA COLADA	MADEIRA LAMELADA COLADA COM REFORÇO EM BAMBU
PEÇA A	VM,A1 e VM,A2	MLC,A,24H	MLCB,A,24H
PEÇA B	VM,B1 e VM,B2	MLC,B,24H	MLCB,B,24H
PEÇA C	VM,C1 e VM,C2	MLC,C,24H	MLCB,C,24H
PEÇA D	VM,D1 e VM,D2	MLC,D,12H	MLCB,D,12H
PEÇA E	VM,E1 e VM,E2	MLC,E,12H	MLCB,E,12H
PEÇA F	VM,F1 e VM,F2	MLC,F,12H	MLCB,F,12H

Fonte: Elaboração própria.

Para efeito de nomenclatura, foram definidos os nomes desses corpos de prova tal como apresentado na Tabela 1. Ressalta-se que foi determinado que as peças A, B e C gerariam as MLCs e MLCBs elaboradas sob pressão de projeto de 7,5kgf/cm² e com um tempo de colagem de 24 horas enquanto as demais peças (D, E e F) foram coladas em um tempo menor (12 horas).

Fabricação das vigas de MLC e MLCB

A fabricação dos corpos de prova das vigas de MLC e das de MLCB foi realizada de acordo com a ASTM D3737 (2018), que estabelece as propriedades permitidas para madeira lamelada colada estrutural. Portanto, seguindo os apontamentos, levou-se em conta, num primeiro momento, a seleção das lâminas para sua constituição, como já mencionado. Essa escolha constou na eleição de dez ripas entre as quatorze obtidas a partir do corte com a serra circular do LabBioC, de maneira a respeitar as limitações aceitas da presença de nós na madeira. Anteriormente, preparou-se o adesivo e realizou sua aplicação uniforme em cada laminação, seguindo as instruções do fabricante, até atingir a dimensão almejada do corpo de prova e, enfim, finalizou-o por meio da prensagem no valor de umidade preestabelecido, conforme indica a ASTM D2559 (2018), de 50% a 70%.

Por conseguinte, discorrendo acerca da elaboração das MLCs, afirma-se que todas as vigas seguiram o mesmo procedimento construtivo. Com isso, elucida-se que tal procedimento empregou um acessório pensado e elaborado estritamente para este fim, cujos componentes são

duas barras em perfil metálico I, sendo uma fixa, apoiada em uma prensa hidráulica manual MARCON de 30 toneladas, e outra sustentada sobre as lâminas a serem coladas, de maneira a receber a carga da prensa e transferi-la homogeneamente sobre a viga, com o auxílio de guias metálicas.

Entretanto, os produtos obtidos diferenciam-se entre si a partir do tempo de pressão aplicado em cada um. Sendo assim, explana-se que para as vigas de MLC A, B e C, foi utilizado o sistema de pressão para colagem de 24 horas, em que o procedimento foi esquematizado de modo que a primeira carga aplicada seria da ordem de $7,5 \text{ kgf/cm}^2$, e que esta seria reaplicada depois de 2 horas, 6 horas e 12 horas, sendo retirada após 24 horas de prensagem. Já no caso das vigas de MLC D, E e F, o sistema de pressão foi o de 12 horas, com carga inicial de $7,5 \text{ kgf/cm}^2$, que foi reaplicada em 1 hora, 3 horas e 6 horas, e retirada ao final de 12 horas. O valor de pressão de $7,5 \text{ kgf/cm}^2$, é 1,5 vezes a pressão de projeto de 5 kgf/cm^2 , utilizado em ambas as variações de tempos de pressionamento. Essa majoração foi estabelecida para compensar as perdas de pressão devido à fluência do material.

Depois, em se tratando da produção das vigas de MLCB, reitera-se que a determinação de seu tamanho e o método de colagem foi o mesmo utilizado para a confecção daquelas sem o reforço. Sendo assim, os corpos de prova obtidos dispuseram de uma seção transversal final de $2,5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$, com dez camadas no total. Contudo, tais camadas, neste caso, foram o diferencial destas peças, pois houve a substituição de uma lâmina de madeira *pinus sp* por uma de bambu, que foi posicionada na penúltima camada (de cima para baixo), com intuito de reforçar a região que sofre os esforços de tração na viga.

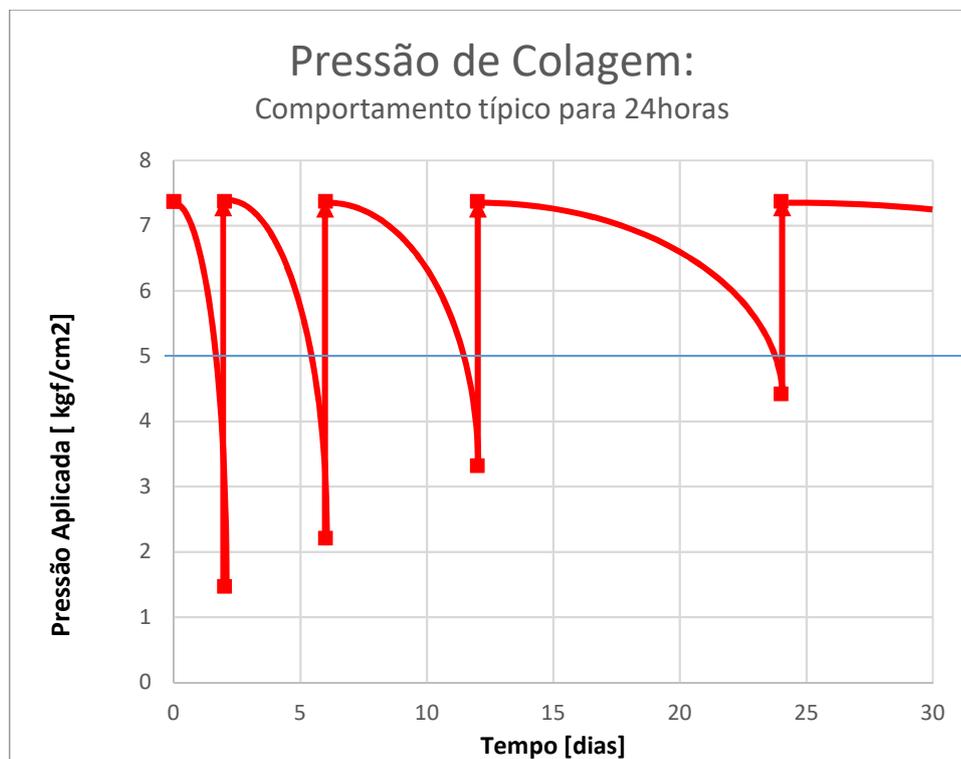
Tal procedimento, promoveu uma lâmina construída a partir da união de filetes de bambu, reproduzidos em 4 fiadas de $1,25 \text{ mm}$ cada, totalizando 8 lâminas para haver a compatibilização de espessura e largura com as lâminas de madeira. Nesse contexto, é possível observar, na Tabela 2 e Figura 2, respectivamente, o esquema de aplicação e reaplicação da pressão de colagem e o comportamento esperado para 24 horas de prensagem para as duas produções e, na Tabela 3 e Figura 3, os mesmos aspectos, só que para 12 horas de prensagem da colagem.

Tabela 2 - Esquema de Aplicação/Reaplicação de Carga [em kgf], em 24 horas

COLAGEM MLC OU MLCB – 24H									
TEMPO (H)	0	2	2	6	6	12	12	24	24
FORÇA APLICADA (KGF)	1750	350	1750	525	1750	787	1750	1050	1750
PRESSÃO (KGF/CM ²)	7,37	1,47	7,37	2,21	7,37	3,32	7,37	4,42	7,37

Fonte: Elaboração própria.

Figura 2 - Comportamento esperado da pressão na colagem de 24 horas



Fonte: Elaboração própria.

Tanto na Tabela 2 quanto na Figura 2, podem ser visualizadas a prensagem e as reaplicações da prensagem para manter a pressão mínima de 5,0kgf/cm², considerada a pressão de projeto, compensando as perdas normais com a fluência da madeira. Após ter sido aplicada a tensão de aproximadamente 7,5 kgf/cm² (7,37 kgf/cm², na verdade porque a precisão do manômetro não permitiu ser mais próximo de 7,5 kgf/cm²) foi reaplicada no segundo dia porque

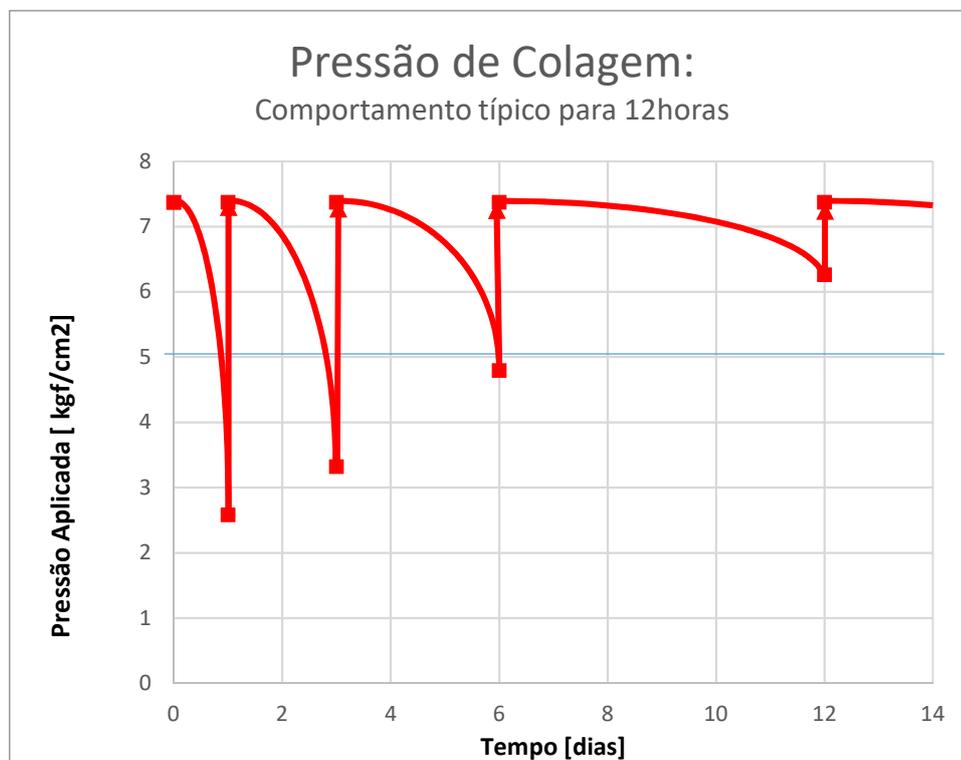
a leitura já marcava 1,47 kgf/cm². No sexto dia, novamente foi reaplicada porque já havia caído novamente, agora para 2,21 kgf/cm². No décimo segundo dia, novamente foi reaplicada e nesse dia a queda registrada foi para 3,32 kgf/cm². Por fim, no vigésimo quarto dia, foi reaplicado pela última vez a tensão de 7,5 kgf/cm², porque havia caído para 4,42 kgf/cm² e esperou-se que a tensão de prensagem da colagem se mantivesse acima de 5,0 kgf/cm² até que a cola endurecesse.

Tabela 3 - Esquema de Aplicação/Reaplicação de Carga [em kgf], em 12 horas

COLAGEM MLC OU MLCB – 12H									
TEMPO (H)	0	1	1	3	3	6	6	12	12
FORÇA APLICADA (KGF)	1750	612,50	1750	787,50	1750	1137,50	1750	1487,50	1750
PRESSÃO (KGF/CM²)	7,37	2,58	7,37	3,32	7,37	4,79	7,37	6,26	7,37

Fonte: Elaboração própria.

Figura 3 - Comportamento esperado da pressão na colagem de 12 horas



Fonte: Elaboração própria.

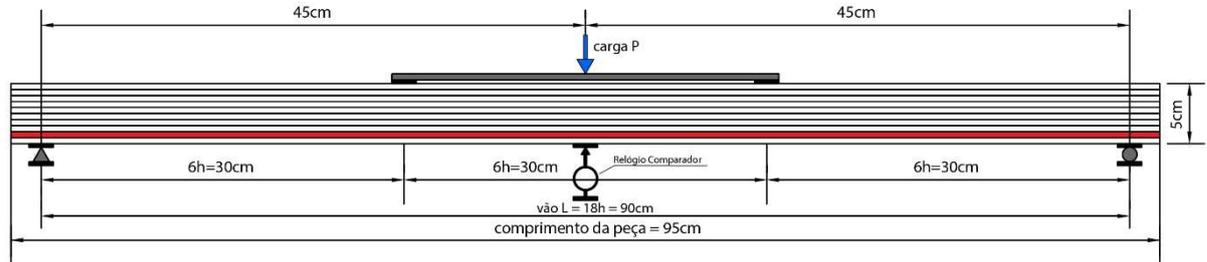
Já na Tabela 3 e na Figura 3, podem ser visualizadas a prensagem em 12h com uma rotina assemelhada com a aplicação inicial e as reaplicações da prensagem para manter a pressão mínima de $5,0 \text{ kgf/cm}^2$. Após ter sido aplicada a tensão de aproximadamente $7,5 \text{ kgf/cm}^2$ ($7,37 \text{ kgf/cm}^2$, na verdade) foi reaplicada no dia seguinte porque a leitura já marcava $2,58 \text{ kgf/cm}^2$. No terceiro dia, novamente foi reaplicada porque já havia caído novamente, agora para $3,32 \text{ kgf/cm}^2$. No sexto dia, novamente foi reaplicada e nesse dia a queda registrada foi para $4,79 \text{ kgf/cm}^2$. Por fim, no décimo segundo dia, foi reaplicado pela última vez a tensão de $7,5 \text{ kgf/cm}^2$, mas havia caído para $6,26 \text{ kgf/cm}^2$, ainda acima da tensão de projeto e, novamente, esperou-se que a tensão de prensagem da colagem se mantivesse acima de $5,0 \text{ kgf/cm}^2$ até que a cola endurecesse.

Ensaio de flexão estática

A metodologia para o ensaio de flexão estática nas vigas maciças, vigas de madeira lamelada colada e vigas de madeira lamelada colada com reforço de bambu, seguiu o estabelecido pela norma ASTM D198 (2022). Nessa conjuntura, adotou-se ensaios não destrutivos e aplicou-se os carregamentos no meio do vão, distribuídos nos terços da viga, realizando uma posterior leitura de deslocamento de cada peça por meio de um relógio comparador da marca Starrett, cuja precisão é de centésimo de milímetro.

Sendo assim, os CP foram apoiados nas extremidades com uma distância (L) igual à 18 vezes a altura de sua seção (h) e carregados, simetricamente, em uma distância de 6 vezes a altura h, conforme indica a Figura 4. Com tais determinantes e sabendo que a altura das vigas produzidas é de 5cm, constatou-se que os corpos-de-prova (CP) deveriam ser apoiados formando um vão de distância igual a 90cm (correspondendo a 18h), apresentando, conseqüentemente, uma folga de 2,5cm restantes em cada lado.

Figura 4 - Esquema de ensaio à flexão estática



Fonte: Elaboração própria.

Portanto, o vão para o ensaio de flexão foi de 90cm, distribuídos em três terços de 30cm. A carga aplicada foi distribuída nas extremidades do terço central por um sistema de barra e apoios de aço

Com estes dados coletados, obteve-se o módulo de elasticidade na flexão ($E_{,F}$) de cada viga, a partir da Equação 1 da Resistência dos Materiais e da Estática das Estruturas, a qual encaminhou, posteriormente, a investigação para a Equação 2, determinante dos valores do Módulo de Elasticidade das vigas. Em suma, com os valores obtidos, foi possível desenvolver uma análise comparativa (Tabela 4) com os valores normativos, de modo a enquadrá-los nas classes de resistência de coníferas da ABNT NBR 7190-1:2022.

$$f = \frac{(P/2).a}{6.E.I} \times (3Lx - a^2 - 3x^2) \quad (1)$$

$$E_{,F} = \frac{23.P.L^3}{1296.I.f} \quad (2)$$

Tabela 4 - Classes de resistência definidas em ensaios de peças estruturais para espécies florestadas, segundo a ABNT NBR 7190-1:2022

		Coníferas											Folhosas								
		C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50	D18	D24	D30	D35	D40	D50	D60	D70
		Propriedades de resistência [MPa]																			
Flexão	$f_{b,k}$	14,0	16,0	18,0	20,0	22,0	24,0	27,0	30,0	35,0	40,0	45,0	50,0	18,0	24,0	30,0	35,0	40,0	50,0	60,0	70,0
Tração paralela	$f_{t,0,k}$	8,0	10,0	11,0	12,0	13,0	14,0	16,0	18,0	21,0	24,0	27,0	30,0	11,0	14,0	18,0	21,0	24,0	30,0	36,0	42,0
Tração perpendicular	$f_{t,90,k}$	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Compressão paralela	$f_{c,0,k}$	16,0	17,0	18,0	19,0	20,0	21,0	22,0	23,0	25,0	26,0	27,0	29,0	18,0	21,0	23,0	25,0	26,0	29,0	32,0	34,0
Compressão perpendicular	$f_{c,90,k}$	2,0	2,2	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,1	3,2	7,5	7,8	8,0	8,1	8,3	9,3	11,0	13,5
Cisalhamento	$f_{v,k}$	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	3,4	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,5	5,0
		Propriedades de rigidez [GPa]																			
Módulo de elasticidade a 0° médio	$E_{0,m}$	7	8	9	9,5	10	11	12	12	13	14	15	16	9,5	10	11	12	13	14	17	20

Fonte: Adaptada da ABNT NBR 7190-1:2022, pág.12, tabela parcial.

Na Tabela 4, pode ser visualizados os valores correspondentes às resistências características à flexão, à tração paralela e normal às fibras, à compressão paralela e normal às fibras e ao cisalhamento das diversas classes de resistência, tanto de coníferas quanto de folhosas, estabelecidos pela ABNT NBR 7190-1: 2022.

Resultados e discussões

Com base nos ensaios de flexão e em suas leituras de deslocamento, obteve-se o Módulo de Elasticidade à Flexão de todos os corpos de prova, os quais estão apontados na Tabela 5. Para as VMs, diferentemente das demais vigas, analisou-se cada peça individualmente e registrou-se os resultados na coluna de deslocamento lido, para que, depois, na coluna de deslocamento, trabalhasse com a média delas. Foi possível constatar que nas MLCs houve um ganho no valor do Módulo de Elasticidade em todas as peças; já nas MLCBs, percebe-se que este incremento é muito maior, como pode ser visto, mais precisamente, na Tabela 6.



Tabela 5 - Resultados dos ensaios de Flexão Estática

VIGA	DESLOCAMENTO LIDO [mm]	DESLOCAMENTO (cm)	MÓDULO ELASTICIDADE (kgf/cm ²)	MÓDULO ELASTICIDADE (MPa)
VM A1 e A2	(0,476;0,565)	0,0521	53641,0	5364,10
VM B1 e B2	(0,550;0,545)	0,0548	50995,7	5099,57
VM C1 e C2	(0,390;0,440)	0,0415	67277,5	6727,75
VM D1 e D2	(0,540;0,510)	0,0525	53181,3	5318,13
VM E1 e E2	(0,370;0,510)	0,0440	63454,9	6345,49
VM F1 e F2	(0,660;0,350)	0,0505	55287,4	5528,74
MLC - A 24h	0,1950	0,0195	143180,3	14318,03
MLC - B 24h	0,2600	0,0260	107385,2	10738,52
MLC - C 24h	0,2050	0,0205	136195,9	13619,59
MLC - D 12 h	0,2950	0,0295	94644,6	9464,46
MLC - E 12 h	0,3475	0,0348	80345,8	8034,58
MLC - F 12 h	0,3300	0,0330	84606,5	8460,65
MLCB - A 24 h	0,1575	0,0158	177270,9	17727,09
MLCB - B 24 h	0,2225	0,0223	125483,9	12548,39
MLCB - C 24 h	0,1125	0,0113	248179,2	24817,92
MLCB - D 12 h	0,2400	0,0240	116334,0	11633,40
MLCB - E 12 h	0,1700	0,0170	164236,2	16423,62
MLCB - F 12 h	0,2325	0,0233	120086,7	12008,67

Fonte: Elaboração própria.

Na Tabela 5 estão os valores de deslocamentos obtidos nos ensaios e de Módulos de Elasticidade à Flexão calculados. Lembra-se que para cada peça foram obtidas duas vigas maciças, uma viga MLC e uma viga MLCB.

Tabela 6 - Resultados dos ensaios de Flexão Estática, com os ganhos comparativos entre cada peça

PEÇAS [6,5x6,5cm]	E_{VM} [MPa]	TEMPO DE COLAGEM [horas]	E_{MLC} [MPa]	E_{MLCB} [MPa]	DIFERENÇA (VM-MLC) [%]	DIFERENÇA (VM-MLCB) [%]	DIFERENÇA (MLC-MLCB) [%]
D	5318,1	12	9464,5	11633,4	78%	119%	23%
E	6345,5		8034,6	16423,6	27%	159%	104%
F	5528,7		8460,7	12008,7	53%	117%	42%
MÉDIA	5730,8		8653,2	13355,2	53%	132%	56%
A	5364,1	24	14318,0	17727,1	167%	230%	24%
B	5099,6		10738,5	12548,4	111%	146%	17%
C	6727,7		13619,6	24817,9	102%	269%	82%
MÉDIA	5730,5		12892,0	18364,5	127%	215%	41%

Fonte: Elaboração própria.

Na Tabela 6 estão os resultados agrupados por tempo de colagem e calculados os ganhos de Rigidez das vigas em MLC e MLCB em relação à maciças e entre elas também.

Dado o exposto, fica evidente a aderência dos resultados de Elasticidade à Flexão das VMs em *pinus sp*, de aproximadamente 5700 MPa para a classe C14 cuja a rigidez à compressão é de 7GPa e à flexão deve ser aproximadamente 5950 MPa ($E_{F} = 0,85 E_{C}$). Além disso, demonstra-se que, quando as MLCs são montadas, há um ganho médio de 53% em um tempo de aglutinação de 12 horas, bem como, comprova-se, também, que quando há reforço com bambu na peça, este valor salta para 132%. Neste caso, os Módulos de Elasticidade à Flexão aumentam para 8653,2 MPa e para 13355,2 Mpa, respectivamente. Nesse caso, as classes de resistência mais adequadas passam a ser a C22 e C45 ($E_{C} = 10180,2\text{MPa}$ e $E_{C} = 15712,2\text{MPa}$, respectivamente) da Tabela 4. Pode-se afirmar que a produção de vigas MLC de madeira classe de resistência C14 passa a se enquadrar na classe C22 e a produção de MLCB passa a se enquadrar na classe C45, uma das mais elevadas das coníferas.

No que tange o esquema de colagem de 24 horas, o ganho das MLCs sobre as VMs sobe de 53% para 127%, indicando que o acréscimo de tempo para a aglutinação do experimento, além do mínimo indicado pelo fabricante do adesivo, é significativo. Quando há o reforço com

o bambu, o ganho das MLCBs passa de 132% para 215%, atestando ainda ser relevante o ganho de elasticidade para tal tempo, mesmo que em menor proporção que o ganho para o tempo de 12h. Tanto é verdade que há ganhos menores (41%) quando há o reforço de bambu com colagem de 24 horas, contra 56% de ganho quando o mesmo acontece para 12 horas. Reflete-se que pode ser que o maior tempo de prensagem na colagem tenha causado algum efeito negativo nas interfaces bambu-madeira, ou mesmo nas lâminas de bambu, devido uma menor impregnação de adesivo ou esmagamento normal (ortogonal à direção axial das fibras de bambu) às fibras de bambu. Além disso, percebe-se que a frequência de reaplicações de tensão de colagem em menores tempos (1, 3, 6 e 12 dias) deve estar mais alinhado com o tempo de endurecimento do adesivo.

Conclusões

Ao comparar as vigas de MLCB com as vigas de MLC e maciças, pôde-se perceber que as de MLC realmente elevam a qualidade do material madeira natural para ser empregado como elemento estrutural. Seus Módulos de Elasticidade tiveram significativos ganhos com este sistema (53% para 12 horas de pressão de colagem e 127% para 24 horas de pressão)

Além disso, o reforço de bambu, tal como proposto, permitiu um ganho médio entre 41% e 56% adicional em relação às MLCs equivalentes. Como se não bastasse, em todos os casos a fabricação indicou que a colagem em 24 horas é muito mais eficiente do que em 12 horas, e o processo proposto não aumentou o trabalho de intervenção, já que são as mesmas reaplicações de pressão em ambos os casos. Além disso, o reforço de bambu não promove trabalho adicional efetivo e sua adesão indica haver benefícios reais.

Com isso, pode-se afirmar que o processo de fabricação de MLCs e de MLCBs se artesanais, facilitados e com baixo custo tecnológico e financeiro pode ser uma estratégia de elevar a qualidade material e viabilizar o uso da madeira em estruturas das edificações, principalmente das madeiras de pinus, reconhecidamente mais fracas estruturalmente e mais suscetíveis aos ataques biológicos, mas, ao mesmo tempo, de fontes mais renováveis mais baratas e mais adequadas ao tratamento preservativo químico por serem mais moles e impregnáveis.

Na escala das vigas ensaiadas, as cargas aplicadas foram da ordem de 1750 kgf, entretanto, para vigas de maior porte, por exemplo de 15cm de largura por 40cm de altura e 8

metros de comprimento, seria necessária uma carga de 60000kgf que, por mais difícil de se aplicar com prensas, poderia ser aplicada de modo pontual, através de sargentos e torqueses, tal como as fábricas de MLC já fazem.

Sugere-se, como continuidade dessa pesquisa, que sejam avaliadas outras configurações de reforço de bambu (outros arranjos) e a avaliação da utilização de outros adesivos. Um outro ponto importante deverá ser testar pressões menores que 5 kgf/cm² e majorações menores que 1,5 vezes, para simplificar e ampliar a facilidade da fabricação. Por fim, conclui-se que, apesar da ABNT NBR 7190-6:2022 salientar que as MLCs devem ser produzidas sob controle e processo fabril, a fabricação artesanal pode ser um elemento capaz de viabilizar as MLCs e MLCBs, tanto financeiramente, quanto tecnologicamente.

Agradecimentos

Agradecimentos à empresa COMAVE/SA pelo fornecimento das informações de procedência do material, à Marcenaria da Faculdade de Ciências e Tecnologia pelo processamento da madeira, ao LabBioC pela estrutura física para a produção das vigas e para os ensaios realizados. Agradecimentos ao PIBIC/UNESP-CNPq pelo apoio oferecido.

Referências Bibliográficas

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D198: Standard Test Methods of Static Tests of Lumber in Structural Sizes**, Philadelphia, PA, 2022.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D2559: Standard Specification for Adhesives for Bonded Structural Wood Products for Use Under Exterior Exposure Conditions**, Philadelphia, PA, 2018.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D3737: Standard Practice for Establishing Allowable Properties for Structural Glue Laminated Timber (Glu-lam)**, Philadelphia, PA, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-2: Edificações habitacionais – Desempenho. Parte 2: Requisito para os sistemas estruturais**. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190-1: Projeto de estruturas de madeira. Parte 1: Critérios de Dimensionamento**. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190-6: Projeto de estruturas de madeira. Parte 6: Métodos de ensaio para caracterização de madeira lamelada colada estrutural**. Rio de Janeiro, 2022.

BRASIL. Lei 12.651, de 25 de maio de 2012. Estabelece normas para proteção da vegetação nativa em áreas de preservação permanente, reserva legal, uso restrito, exploração florestal e assuntos relacionados. Institui o novo Código Florestal, Brasília, DF, 2012.

CARVALHO, R. F. **Compósitos de fibras de sisal para uso em reforço de estruturas de madeira**. 2005. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo/USP, São Carlos, SP, Brasil, 2005.

GHAVAMI, K.; RODRIGUES, C. S. Engineering Materials and Components with Plants. **Anais: Proceedings of the Construction and Environment Symposium**. IPT CIB. São Paulo, Brasil, 2000. Vol. Único, p. 33-38.

LATORRACA, J. V. F.; ALBUQUERQUE, C. E. C. Efeito Do Rápido Crescimento Sobre As Propriedades Da Madeira. **Floresta e Ambiente**, v. 7, n. 1, pp. 279 – 291, 2012.

ROUGER, F. Volume and stress distribution effects. **Timber Engineering STEP 1: Basis of design, material properties, structural components and joints**, pp. B1/1-B1/8, Centrum Hout, The Netherlands, 1995.

STAMATO, G. C. **Resistência ao embutimento da madeira compensada**. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo/USP, São Carlos, SP, Brasil, 1998.

SZÜCS, C. A. Madeira lamelada colada reforçada com fibra de vidro na direção transversal as suas fibras. **Anais do EBRAMEM - Encontro Brasileiro de Madeira e de Estruturas de Madeira**, São Carlos, SP, Brasil, 1992.