

Universidade de São Paulo  
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”

Elementos estruturais MLC confeccionados com madeira de *Jacaranda copaia* e reforçados externamente com madeiras nativas amazônicas por meio de poliuretano a base de *Ricinus vulgaris*

**Rafael de Aguiar Rodrigues**

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre em Ciências, Programa: Recursos Florestais. Opção em: Tecnologia de Produtos Florestais

Piracicaba  
2023

Rafael de Aguiar Rodrigues  
Engenheiro Florestal

Elementos estruturais MLC confeccionados com madeira de *Jacaranda copaia* e reforçados externamente com madeiras nativas amazônicas por meio de poliuretano a base de *Ricinus vulgaris*

Versão revisada de acordo com a Resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:  
Prof. Dr. **JOSÉ NIVALDO GARCIA**

Dissertação apresentada para obtenção do título de  
Mestre em Ciências, Programa: Recursos Florestais.  
Opção em: Tecnologia de Produtos Florestais

Piracicaba  
2023

**Dados internacionais de Catalogação na Publicação**  
**Divisão de Biblioteca – DIBD/ESALQ/USP**

Rodrigues, Rafael de Aguiar

Elementos estruturais MLC confeccionados com madeira de *Jacaranda copaia* e reforçados externamente com madeiras nativas amazônicas por meio de poliuretano a base de *Ricinus vulgaris*/ Rafael de Aguiar Rodrigues  
- - Versão revisada de acordo com a Resolução CoPGr 6018 de 2011 - -  
Piracicaba 2023/

58 p.

Dissertação (mestrado) - USP / Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"

1. MOE 2. Flexão estática 3. Cisalhamento 4. Pará Pará 5. Madeira laminada I. Título

## Dedicatória

Dedico esta conquista  
Em memória de Maria Amélia Bittencourt de Aguiar,  
Minha avó, uma das 687 mil vítimas fatais de covid-19 no Brasil  
Seu amor e dedicação serão lembrados para sempre por mim,  
e por todos em nossa família

## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. José Nivaldo Garcia, pela confiança depositada em mim nessa orientação a distancia em função do caos de 2020 e ajuda, amizade e desses dois últimos anos;

Ao meu co-orientador e amigo, Prof. Dr. Victor Hugo Pereira Moutinho, que acompanhou nosso trabalho nesse mestrado me ajudando em todos. Obrigado por toda a paciência comigo e toda a dedicação em fazer o LTM se tornar uns dos melhores centros de ciência da UFOPA e da região;

Ao meu amigo Bruno Balboni, obrigado por 2016 ter me escolhido como orientado durante a minha graduação, é muito difícil colocar em palavras o quanto isso foi (e ainda é) importante pra mim. Obrigado por não perder a fé em mim como cientista, inclusive nas vezes em que nem mesmo eu conseguia tê-la. Espero que depois desse suado mestrado eu consiga agradecer propriamente com os futuros trabalhos e publicações, toda a ajuda que tive;

Thiago, Paulo Lobo, obrigado por todo tempo e suor que foram dedicados à montagem da prensa e me ensinando a manusear os equipamentos;

João Thiago, Wayka, Professor Fernando, obrigado por toda a ajuda, seja pelo trabalho braçal que foi necessário pra fazer esse trabalho acontecer, ou seja pela ajuda com a mais besta quebra de paginas na formatação do trabalho;

Aos colegas Juliane, Jessica, Erica, Felipe, Diego, Saulo, Marla, Iandra pelos trabalhos, fofocas e reclamações que sempre fizeram do LTM a minha segunda casa;

Obrigado ao Laboratório de Tecnologia da Madeira da UFOPA, pela ajuda em junho de 2021 durante o acidente que me custou 4 meses de trabalho que só conseguiram ser repostos por esforço do laboratório;

A equipe do LEM, que infelizmente não pude interagir tanto. Ainda assim, Obrigado Bruno, Thiago, Alessandra e Professor Garcia;

À Giovana, Solizete, Eliana e todos que me ajudaram em diversos momentos dessa jornada burocrática que é USP;

A ESALQ, UFOPA e CAPES pelo apoio técnico e financeiro;

À empresa Algimi pelo material doado para a realização do trabalho;

Aos meus amigos de longa data, Antônio, Ariane, Ezequias, Gabriela, Jordan, Luan, Vinicius, Walberson e Amanda, obrigado pelas risadas nas mesas de bares e pelas lágrimas que vira e mexe derramamos juntos;

Aos meus tios, tias, primos e primas em Belém;

E por último, mas definitivamente não menos importante, à minha família, em especial meu Pai, que incansavelmente vem lutando para manter nossa família unida.

## Epígrafe

Delírio- hm. Qual é a palavra pras coisas não serem sempre as mesmas sabe?[...] Deve ter uma palavra pra isso... a coisa que faz a gente saber que o tempo está acontecendo. Existe uma palavra?

Sonho - “mudança”

Delírio – ah.

Era isso que eu temia.

## SUMÁRIO

<b>RESUMO .....</b>	<b>8</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>9</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>10</b>
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>13</b>
<b>2. OBJETIVO.....</b>	<b>15</b>
2.1. GERAL .....	15
2.2. ESPECÍFICOS .....	15
<b>3. REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>17</b>
3.1. O SETOR MADEIREIRO E A COMERCIALIZAÇÃO DE ESPÉCIES NA AMAZÔNIA ORIENTAL .....	17
3.2. A ANATOMIA E AS PROPRIEDADES DA MADEIRA.....	18
3.3. PRODUTOS ENGENHEIRADOS: A MADEIRA LAMINADA COLADA NO CONTEXTO AMAZÔNICO .....	19
3.4. PRODUTOS ENGENHEIRADOS: A TECNOLOGIA DE PAINEL SANDWICH.....	19
3.5. O POLIURETANO A BASE DE MAMONA .....	20
3.6. A ESPÉCIE <i>JACARANDA COPAIA (AUBL.) D. DON (PARÁ-PARÁ)</i> E SUAS CARACTERÍSTICAS .....	21
<b>4. MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>23</b>
4.1. MATÉRIA PRIMA DO TRABALHO .....	23
4.2. AMOSTRAGEM .....	24
4.3. DESCRIÇÃO ANATÔMICA MACROSCÓPICA .....	24
4.4. CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA .....	25
4.5. CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA .....	27
4.6. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA.....	28
4.7. PRODUÇÃO DA PRENSA HIDRÁULICA .....	28
4.8. FABRICAÇÃO DAS VIGOTAS E CORPOS DE PROVA COLADOS .....	29
4.8.1. <i>Considerações sobre o material</i> .....	29
4.8.2. <i>Estrutura dos corpos de prova para ensaio de vigas ao esforço de flexão estática</i> .....	30
4.8.3. <i>Adesivo utilizado</i> .....	30
4.8.4. <i>Pressão aplicada</i> .....	31
4.8.5. <i>Etapas pré-produção das vigotas</i> .....	31
4.8.6. <i>Procedimento de colagem</i> .....	32
4.8.7. <i>Procedimento de prensagem</i> .....	33
4.9. ENSAIOS MECÂNICOS DO MATERIAL COLADO .....	33
4.10. CORREÇÃO DOS VALORES DE MOE.....	34
4.10.1. <i>Exportação das curvas</i> .....	35
4.10.2. <i>Plotagem dos gráficos e identificação do limite de proporcionalidade</i> .....	35
4.10.3. <i>Coefficiente angular</i> : .....	36
4.10.4. <i>MOE ajustado</i> .....	36
4.11. ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	36
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>37</b>
5.1. ANATOMIA MACROSCÓPICA .....	37
5.2. CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA .....	38
5.3. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA.....	39
5.4. CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA .....	40
5.5. CISALHAMENTO NA LINHA DE COLA (CLC) .....	41
5.6. CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DOS CORPOS DE PROVA DE FLEXÃO ESTÁTICA COLADOS .....	43
5.7. VALORES AJUSTADOS DE MOE.....	44
5.8. PESO ESPECÍFICO DAS PEÇAS.....	46
5.9. ANÁLISE ESTATÍSTICA: RELAÇÃO ENTRE AS PROPRIEDADES .....	46
5.9.1. <i>Dos valores de caracterização mecânica</i> .....	46
5.9.2. <i>Dos elementos estruturais</i> .....	48

<b>6. CONCLUSÃO .....</b>	<b>49</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>51</b>
<b>APÊNDICES .....</b>	<b>57</b>



## RESUMO

**Elementos estruturais MLC confeccionados com madeira de *Jacaranda copaia* e reforçados externamente com madeiras nativas amazônicas por meio de poliuretano a base de *Ricinus vulgaris***

O Brasil detém uma das maiores biodiversidades do mundo, que representa igual diversidade de espécies vegetais. Por conta disso, muitas são as espécies madeireiras disponíveis para consumo no país. No entanto, a demanda nacional e internacional de madeira gira e torno de um seleto grupo de espécies que colhidas a longo prazo podem representar uma perda na diversidade florística das áreas exploradas. Uma opção é inserir espécies de baixa densidade no mercado, como a espécie *Jacaranda copaia*, popularmente conhecida por “Pará Pará” a fim de diminuir a pressão de mercado nos grupos já estabelecidos. Para tal, tecnologias como MLC podem representar opções para agregar valor a essa madeira. Esta tecnologia garante a produção de elementos estruturais através da colagem de lamelas de madeira posicionada de modo a gerar uma estrutura com o melhor desempenho mecânico possível. Este trabalho buscou avaliar elementos estruturais produzidos com madeira colada de *Jacaranda copaia* e reforçados com lamelas externas confeccionadas com madeira das espécies Tauari e Muiracatiara. A madeira de Pará Pará foi caracterizada tecnologicamente para avaliar suas propriedades físicas, mecânicas e químicas. Posteriormente, foi produzida uma prensa hidráulica para produção do material colado. Vigotas e corpos de prova de cisalhamento na linha de cola foram produzidos para avaliar o desempenho da madeira como MLC. O adesivo utilizado foi o Poliuretano a base de mamona. Quimicamente o Pará Pará apresentou teor de cinzas 0,52%, extrativos 4,8%, lignina 27% e holocelulose 67%. Para os ensaios mecânicos de caracterização, foram obtidos os resultados de 35,94 Mpa para resistência na Flexão estática, 6,77 GPa para MOE na flexão estática, 23,97 Mpa para compressão paralela e 6MPa para cisalhamento. Para todas as propriedades, os valores observados ficaram abaixo dos encontrados em literatura para a mesma espécie. Os ensaios físicos demonstraram que a madeira possui densidade básica de 0,29 g/cm<sup>3</sup>, densidade aparente de 0,37 g/cm<sup>3</sup>, teor de umidade máximo de 280%, contração volumétrica de 11% e coeficiente de anisotropia de 1,79. Em relação à madeira maciça, Vigotas de Pará Pará reforçadas com as lamelas de reforço de outras espécies conseguiram maior resistência e rigidez no esforço de flexão estática, sem diferença estatística entre os tratamentos. As vigas com lamela de reforço de muiracatiara apresentaram 7513,92 Mpa de MOE enquanto as com reforço de tauari alcançaram 7335,45 Mpa de MOE. Para os mesmos tratamentos, os valores de MOR foram respectivamente de 38,39 e 40,42 Mpa. A linha de cola da interação Pará-Pará e Tauari foi a mais resistente ao esforço de cisalhamento, superando a resistência da linha de cola da interação Pará-Pará – Muiracatiara e Pará-Pará com a mesma espécie. A equação utilizada para calcular o módulo de elasticidade teórico para as vigotas gerou valores próximos o suficiente do valor real a ponto de não haver diferença estatística.

Palavras-chave: MOE, Flexão estática, Cisalhamento, Pará Pará, Madeira laminada

## ABSTRACT

**Glued laminated timber structural elements made with *Jacaranda copaia* wood and externally reinforced with native Amazonian woods through *Ricinus vulgaris* based polyurethane**

Brazil has one of the greatest biodiversity in the world, which represents an equal diversity of plant species. Because of this, there are many wood species available for consumption in the country. However, the national and international demand for wood revolves around a select group of species that harvested in the long term can represent a loss in the floristic diversity of the exploited areas. One option is to introduce low-density species into the market, such as the *Jacaranda copaia* species, popularly known as “Pará Pará” in order to reduce market pressure on already established groups. To this end, technologies such as MLC may represent options to add value to this wood. This technology guarantees the production of structural elements through the bonding of wooden lamellas positioned in such a way as to generate a structure with the best possible mechanical performance. This work sought to evaluate structural elements produced with glued *Jacaranda copaia* wood and reinforced with external lamellae made with wood from the Tauari and Muiracatiara species. Wood from Pará Pará was technologically characterized to evaluate its physical, mechanical and chemical properties. Subsequently, a hydraulic press was produced to produce the glued material. Beams and shear specimens in the glue line were produced to evaluate the performance of the wood as MLC. The adhesive used was polyurethane based on castor beans. Chemically, Pará Pará presented ash content 0.52%, extractives 4.8%, lignin 27% and holocellulose 67%. For the characterization mechanical tests, the results of 35.94 Mpa for resistance in static bending, 6.77 GPa for MOE in static bending, 23.97 Mpa for parallel compression and 6MPa for shear were obtained. For all properties, the observed values were below those found in the literature for the same species. The physical tests demonstrated that the wood has a basic density of 0.29 g/cm<sup>3</sup>, apparent density of 0.37 g/cm<sup>3</sup>, maximum moisture content of 280%, volumetric shrinkage of 11% and anisotropy coefficient of 1.79. In relation to solid wood, Pará Pará beams reinforced with reinforcing lamellae from other species achieved greater strength and stiffness in static bending effort, with no statistical difference between treatments. The beams with muiracatiara reinforcement lamella presented 7513.92 Mpa of MOE while those with tauari reinforcement reached 7335.45 Mpa of MOE. For the same treatments, the MOR values were respectively 38.39 and 40.42 Mpa. The glue line of the Pará-Pará and Tauari interaction was the most resistant to shear stress, surpassing the resistance of the glue line of the Pará-Pará – Muiracatiara and Pará-Pará interaction with the same species. The equation used to calculate the theoretical modulus of elasticity for the joists generated values close enough to the actual value that there was no statistical difference.

Keywords: MOE, Static bending, Shear strength, Pará Pará, Laminated timber

## LISTA DE FIGURAS

<b>FIGURA 1. IMAGENS DO MATERIAL ANTES DA DOAÇÃO .....</b>	<b>23</b>
<b>FIGURA 2. MATERIAL ENTABICADO DENTRO DA SALA DE ACLIMATAÇÃO DO LTM.....</b>	<b>24</b>
<b>FIGURA 3. PROCESSO DE POLIMENTO COM LIXA E ÁGUA .....</b>	<b>25</b>
<b>FIGURA 4. EXTRATOR DE GORDURA UTILIZADO PARA O PROCESSO DE EXTRAÇÃO TOTAL .....</b>	<b>26</b>
<b>FIGURA 5. ETAPAS DO PROCESSO DE LIGNINA INSOLÚVEL .....</b>	<b>26</b>
<b>FIGURA 6. MUFLA UTILIZADA PARA O ENSAIO DE CINZAS.....</b>	<b>27</b>
<b>FIGURA 7. ENSAIOS MECÂNICOS DE COMPRESSÃO PARALELA, FLEXÃO ESTÁTICA E CISALHAMENTO REALIZADOS NA MAQUINA DE ENSAIOS UNIVERSAL .....</b>	<b>28</b>
<b>FIGURA 8. PROTÓTIPO FINAL DA PREENSA HIDRÁULICA.....</b>	<b>29</b>
<b>FIGURA 9. VIGOTA PRÉ DESDOBRO DE ACABAMENTO .....</b>	<b>30</b>
<b>FIGURA 10. MISTURA DOS DOIS COMPONENTES DO ADESIVO. ....</b>	<b>31</b>
<b>FIGURA 11. APLICAÇÃO DO ADESIVO NAS FACES DAS MADEIRAS.....</b>	<b>32</b>
<b>FIGURA 12. PREENSA UTILIZADA NO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA DE CISALHAMENTO NA LINHA DE COLA .....</b>	<b>33</b>
<b>.....</b>	<b>34</b>
<b>FIGURA 13. SUBSTRATOS UTILIZADOS PARA A CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA DE CISALHAMENTO NA LINHA DE COLA.....</b>	<b>34</b>
<b>.....</b>	<b>34</b>
<b>FIGURA 14. CORPO DE PROVA DE CISALHAMENTO NA LINHA DE COLA APÓS O DESDOBRO .....</b>	<b>34</b>
<b>FIGURA 15. CONJUNTO DE DADOS PROVENIENTE DA EXPORTAÇÃO DA CURVA.....</b>	<b>35</b>
<b>FIGURA 16. CURVA ORIGINAL PLOTADA EM GRÁFICO NO SOFTWARE MICROSOFT EXCEL E TRECHO ISOLADO DA CURVA.....</b>	<b>35</b>
<b>FIGURA 17. ADIÇÃO DA LINHA DE TENDÊNCIA E OBTENÇÃO DO VALOR DO COEFICIENTE ANGULAR DA CURVA (VALOR CIRCULADO NA IMAGEM À DIREITA) .....</b>	<b>36</b>
<b>FIGURA 18. VISÃO MACROSCÓPICA DA MADEIRA DE JACARANDA SP. ....</b>	<b>37</b>
<b>FIGURA 19. GRÁFICO DOS COMPONENTES QUÍMICOS DA MADEIRA DE JACARANDA SP.....</b>	<b>38</b>
<b>FIGURA 20. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA; CVS FORAM RESPECTIVAMENTE, 10,24%, 6,92%, 8,54% E 9,37%. J. COPAÍÁ* = CORRESPONDEM AOS DADOS DE DO NASCIMENTO ET AL., 1997. ; PINUS = VALORES CORRESPONDENTES ULKER ET AL., 2012.; EUCALIPTUS = VALORES CORRESPONDENTES AOS DADOS DE BALBONI ET AL., 2021. ....</b>	<b>40</b>
<b>FIGURA 21. VALOR DO MÓDULO DE RUPTURA NO ESFORÇO DE CISALHAMENTO NA LINHA DE COLA PARA CADA UM DOS TRATAMENTOS DE INTERAÇÃO COM PARÁ-PARÁ. COLUNAS COM LETRAS DIFERENTES INDICAM DIFERENÇA ESTATÍSTICA SEGUNDO O TESTE TUKEY COM ERRO A 5%. CVS PARA PARA PARA = 11,16%; TAUARI = 14,04%; MUIRACATIARA = 13,21%. BARRAS DE ERRO CORRESPONDEM AO DESVIO PADRÃO. ....</b>	<b>41</b>
<b>FIGURA 22. CURVAS GERADAS DURANTE O ENSAIO DE RESISTÊNCIA DA LINHA DE COLA AO ESFORÇO DE CISALHAMENTO PARA: A – PARÁ PARÁ X TAUARI E B – PARÁ PARÁ X MUIRACATIARA .....</b>	<b>43</b>
<b>FIGURA 23. GRÁFICOS COM A COMPARAÇÃO ENTRE O VALOR DA MÉDIO DO MOE DAS LAMELAS (MOE M), DO MOE TEÓRICO DA VIGA CALCULADO (MOE T) E DO MOE OBTIDO NO ENSAIO DE FLEXÃO ESTÁTICA (MOE R). COLUNAS COM MESMA LETRA NÃO</b>	

<b>APRESENTAM DIFERENÇA ESTATÍSTICA SEGUNDO O TESTE TUKEY COM ERRO DE 5%. CVS FORAM RESPECTIVAMENTE: 12,99%, 33,6% E 14,97%. BARRAS DE ERRO CORRESPONDEM AO DESVIO PADRÃO.....</b>	<b>43</b>
<b>FIGURA 24. ESMAGAMENTO NA LAMELA DE REFORÇO LOCALIZADA NA ÁREA DE COMPRESSÃO DAS VIGAS ENSAIADAS .....</b>	<b>45</b>
<b>FIGURA 25. DADOS DE MOE R APÓS AJUSTES EM COMPARAÇÃO COM OS VALORES ANTERIORES. COLUNAS COM MESMA LETRA NÃO APRESENTAM DIFERENÇA ESTATÍSTICA SEGUNDO O TESTE TUKEY COM ERRO DE 5%. BARRAS DE ERRO CORRESPONDEM AO DESVIO PADRÃO.....</b>	<b>45</b>
<b>FIGURA 26. GRÁFICO DE VETORES NA ANÁLISE DAS COMPONENTES PRINCIPAIS .....</b>	<b>47</b>



## 1. INTRODUÇÃO

A Amazônia é um dos centros de biodiversidade mundial, tanto para fauna quanto para flora. Atualmente são listadas 46716 espécies vegetais, na qual as angiospermas apresentam aproximadamente 33282 espécies registradas (REFLORA, 2020); Essa biodiversidade reflete na gama de espécies madeireiras que podem ser comercializadas (IWAKIRI et al., 2017). Em toda a Amazônia legal, até 2016, 2.671,676 m<sup>3</sup> de madeira haviam sido colhidos, sendo 149,017 m<sup>3</sup> referentes ao estado do Pará, que figura em 4º lugar na lista de estados que mais extraem madeira nativa (Serviço Florestal Brasileiro, 2019). Contudo, nem todos os países possuem a mesma disponibilidade e variedade de tal recurso, de modo que nas últimas décadas, observou-se uma crescente demanda por materiais engenheirados proveniente de espécies madeireiras de rápido crescimento (NOGUEIRA, 2017)

Madeira Laminada Colada (MLC) é uma das mais versáteis e eficientes formas de aplicação da madeira de baixa densidade na construção civil, agregando valor ao material e sendo utilizada em todo mundo nas mais variadas formas e dimensões, para os mais diferenciados tipos de aplicação. O aumento na procura de MLC deve-se ao fato de que este material, diferente da madeira sólida, possui uma limitação muito menor das dimensões das peças finais além de garantir aumento da resistência da peças quando comparadas a peças de mesmas dimensões confeccionadas apenas com madeira sólida (DUARTE, 2004; ISSA e KMEID, 2005; ZANGIACOMO, 2007). Mas não é apenas no aumento de resistência que a MLC traz vantagens. As peças consistem em várias lamelas coladas, assim, pode-se posicionar lamelas menos resistentes em locais das peças onde será exercido maior esforço (Forest Products Laboratory, 1987). Além disso, a seleção de posição das lamelas também garante a possibilidade de usar madeiras com defeitos leves, que posicionados nos locais corretos, não comprometerão a peça estrutural (PFEIL e PFEIL, 2003).

Tecnologias intrínsecas à MLC também evoluíram conforme a necessidade mundial. Adesivos de poliuretano, que antes dependiam fortemente de produtos a base de petróleo, passaram a ter exemplares produzidos a partir de material renovável (SOMANI et al., 2003). Foi o caso do poliuretado de mamona, adesivo produzido a partir do óleo vegetal de mamona (*Ricinus communis* L.). O adesivo em questão possui boa resistência mecânica, estabilidade química e possui a vantagem de ser produzido a partir de matéria prima renovável (CERCHIARI, 2013).

Com tal conjunto de avanços tecnológicos, a MLC alcançou o mercado de madeiras nacionais e agora surge como uma das alternativas para tentar contornar a alta demanda pelas mesmas madeiras. Para isso, no entanto é preciso inserir de novas espécies no mercado madeireiro ou agregar valor a madeiras pouco comercializadas a fim de incentivar a demanda para estas. Dentro deste contexto, graças à tecnologia MLC, torna-se possível tentar agregar valor a madeiras nativas pouco densas, que não possuem utilizações tão demandadas quanto às madeiras de alta densidade (MONTEIRO et al., 2020).

Pensando nisso, o Pará pará (*Jacaranda copaia* (Aubl.) D. Do), madeira leve, pouco resistente, utilizada em maior parte para caixotaria e produção de poucos móveis, apresenta-se como uma possível espécie para inserção no mercado tendo em vista que esta árvore cresce rápido em plantios e possui baixa densidade (EMBRAPA Oriental, 2005; FALESI et al, 2020) .



## **2. OBJETIVO**

### **2.1. Geral**

Produzir e verificar a resistência e rigidez de elementos estruturais confeccionados com madeira de *Jacaranda sp.* e revestidos com lamelas finas de madeiras de espécies regionais.

### **2.2. Específicos**

Realizar caracterização física, química e mecânica da madeira maciça de Pará Pará;

Realizar ensaio de flexão estática para Vigotas produzidas com madeira da de Pará Pará e revestidas com lamelas de Pará Pará, Tauari e Muiracatiara;





### 3. REVISÃO DE LITERATURA

#### 3.1. O setor madeireiro e a comercialização de espécies na Amazônia Oriental

O Brasil é detentor de uma das maiores diversidades florísticas do mundo. Atualmente, reconhece-se em território nacional 49303 espécies vegetais, no qual destacam-se as angiospermas, com aproximadamente 35697 espécies do total (REFLORA, 2020), diversidade tamanha capaz de englobar diversos segmentos da sociedade, representando vital importância social, ambiental e econômica. Esse fator reflete em um conjunto vasto de espécies madeireiras que serviu de incentivo à exploração de tal recurso natural em terras amazônicas a partir de 1970 (OLIVEIRA et al., 2018), com a abertura de grandes estradas ligando a região a diferentes estados do país (Serviço Florestal Brasileiro & Instituto do Homem e Meio Ambiente da Amazônia, 2010).

Inicialmente, tratava-se de uma atividade sem nenhuma regularização, outro fator que estimulou atividades de exploração madeireira na região. Com a criação do código florestal, grande parte dessas operações passou a ocorrer ilegalmente. Apesar da alta biodiversidade e endemismo, a riqueza ambiental brasileira não é suficiente para impedir o uso insustentável dos seus recursos naturais (FAO, 2018): as formações vegetais brasileiras alcançam alto nível de desmatamento e hoje possuem seu alcance territorial extremamente reduzido (FAO, 2018). Com os atuais incentivos para exploração legal, o nível de desmatamento e do comércio ilegal de madeira diminuiu, contudo, para atingir uma exploração realmente sustentável a longo prazo, os interesses econômicos precisam estar de acordo com as exigências ambientais bem como das populações que ocupam o local explorado (ALMEIDA et al. 2010).

Das ações governamentais para diminuição da exploração ilegal de madeiras, destaca-se o incentivo à exploração comunitária na Amazônia. A idéia é minimizar a influencia de fatores econômicos limitantes, tendo em vista que o valor de investimento inicial é uma das maiores causas da debanda para exploração ilegal (ALMEIDA et al. 2010). Como a floresta ainda funciona como fonte de trabalho e renda para diversos grupos comunitários como indígenas e quilombolas, a atividade de exploração liderada por tais grupos consegue manter a idéia de manejo sustentável até certo ponto, considerando a maior conscientização ambiental por parte dessas comunidades (ALMEIDA et al., 2010)

Mesmo com a interferência do comércio ilícito, o mercado madeireiro ainda representa relevante montante para a economia local, em especial o estado do Pará. Em 2017, o estado movimentou cerca de US\$ 180.063.762 para o comércio externo, 6,5% da exportação total de madeira nacional daquele ano (OLIVEIRA et al, 2018). Atualmente, um dos grandes obstáculos encontrados é a pressão do mercado interno e externo por espécies específicas. De 2009 até 2015, mais da metade da demanda total de madeira no estado do Pará correspondia a apenas 3 gêneros botânicos: *Manilkara* (31,28 %), *Hymenaea* (10,66%) e *Dinizia* (10,47%) (da Luz et al, 2016). Na região do baixo amazonas, os dados para o mesmo período demonstraram que dos 5,5 milhões de metros cúbicos comercializados, 27% correspondiam a madeiras do grupo comercialmente conhecido por Massaranduba, enquanto ipê, jatobá e Angelim vermelho representaram cada uma 6% do valor comercializado (FREITAS et al, 2015).

A super exploração dessas espécies torna questionável a sustentabilidade da forma de manejo atual. Naves et al. 2020 demonstram que o manejo seletivo de espécies madeireiras ocasiona mudanças na abundância de indivíduos de determinadas espécies bem como na composição florística da floresta nas duas décadas seguintes à exploração causadas principalmente pela brusca abundância de espécies pioneiras no pós exploração.

### 3.2. A anatomia e as propriedades da madeira

O estudo da anatomia da madeira engloba as diversas tipagens celulares que compõem o xilema secundário (madeira), bem como toda sua estrutura, organização, funcionalidade e peculiaridades (ZENID, 2008). Ressalta-se que diferente do que muitas escolas abordam, a anatomia da madeira engloba não apenas o caule de espécies de hábito arbóreo e lianescente. Quanto se trata de anatomia da madeira, órgãos como raízes e uma minúscula quantidade de tecido foliar de espécie específicas também são abrangidos neste estudo. Anatomia e composição química são fatores cruciais para o entendimento de tal tecido. Em conjunto, essas duas propriedades possibilitam a seleção de madeira para aplicações específicas, identificação de madeiras e principalmente, traz a capacidade de predição de outras propriedades (BURGER e RICHTER, 1991).

As propriedades físicas e mecânicas surgem através da combinação da estrutura anatômica da madeira com sua composição química. Tal fato pode ser observado na relação direta entre a configuração anatômica da madeira e sua densidade, onde a quantidade de tecido fibroso e parenquimático está linearmente ligada a essa característica (PEREIRA, 1937). Para Metcalfe e Chalk (1983), o estudo das estruturas químico-anatômicas do xilema secundário, além de fornecer dados para subsidiar o seu uso, gera relações entre famílias botânicas e o estabelecimento de afinidades entre espécies ou grupos específicos.

Os esforços de tração, compressão, cisalhamento e flexão estática, normalmente presente nas estruturas de madeira englobam as propriedades mecânicas da madeira (BARNETT e JERONIMIDS, 2003). Graças às suas propriedades mecânicas, a madeira pode ser utilizada como um material para construções, podendo ser empregada na forma natural ou em produtos engenheirados, como a madeira laminada colada (BARNETT e JERONIMIDS, 2003). Em estruturas, a principal propriedade para superar os esforços solicitante é a resistência, obtida através do valor denominado “Modulo de Ruptura” (MOR) (HOADLEY, 1992). Um dos principais esforços encontrados em estruturas de madeira é denominado “flexão estática”, um esforço composto, no qual compressão, tração e cisalhamento ocorrem simultaneamente numa mesma peça. A superfície que recebe a aplicação de carga sofre compressão paralela, a região oposta sofre tração paralela e entre as duas regiões ocorre o esforço de cisalhamento paralelo (NIKLAS, 1992).

Algumas das propriedades físicas envolvem a densidade, contração, inchamento e umidade da madeira. Kollmann et al. em 1975 explicitaram a relação anatomia – propriedades físicas, demonstrando que a eficácia da colagem de madeiras e aplicação de adesivos, por exemplo, está diretamente relacionada com a porosidade da madeira. Lima et al. , em 2007, concluíram que a baixa capacidade de colagem da de madeiras densas pode ser atribuída a sua configuração anatômica, visto que sua baixa permeabilidade dificulta a ação de adesivos. Moveleiras e indústrias de construção civil também têm seus produtos afetados pela configuração anatômica das madeiras empregadas, tendo em vista que seus serviços consistem na utilização de produtos com melhor estabilidade dimensional, provenientes de madeiras com propriedades físicas específicas, que por sua vez são totalmente dependentes da estrutura interna da madeira (TRIANOSKI et al., 2013).

Quimicamente, a madeira é composta de maneira estrutural por três principais componentes: celulose, hemicelulose e lignina. Além destes, extrativos e compostos inorgânicos também participam de maneira não estrutural do tecido vegetal (LEPAGE et al, 1986)

Com utilidade taxonômica, os extrativos são componentes químicos da madeira que normalmente são depositados na parede celular após o processo de diferenciação celular e de deposição de lignina. Como podem ser

extraídos por meio de solventes sem comprometer a resistência física da madeira, não são considerados de propriedade estrutural (BUCHANAN, 1981)

### **3.3. Produtos engenheirados: a madeira laminada colada no contexto amazônico**

Com a crescente procura por construções mais sustentáveis a base de madeira, começaram a surgir no mercado madeireiro os produtos engenheirados. Esses produtos são desenvolvidos através de tecnologias e pesquisas e visam o melhor aproveitamento e a melhor utilização da madeira de espécies de rápido crescimento (CERCHIARI, 2013). Santos e Pinho (2004) apontam a Madeira lamelada Colada (MLC) do inglês, Glued Laminated Timber como um dos principais produtos engenheirados do cenário atual.

A tecnologia MLC consiste em um produto composto de diversas lamelas de madeira organizadas e coladas tangencialmente de maneira a suportar uma determinada carga (ANSHARI et al., 2012). Como a organização das lamelas de MLC permite o posicionamento de nós e outros defeitos da madeira, o produto final normalmente tem propriedades mecânicas mais uniformes em relação à madeira maciça justamente por posicionar os defeitos em posições que não exijam grande necessidade de resistência na peça (PFEIL, 2013).

Parte do avanço dessa tecnologia se deu em países de regiões mais temperadas. Em alguns desses países a utilização de madeiras de plantios predomina, visto que a maior parte das suas florestas nativas já foram exploradas (BOURREAU, 2013). Assim, lacunas acerca da produção de madeiras coladas com uso de espécies tropicais ainda existem, tais como a influência de suas propriedades no processo de colagem, que tende a ser mais trabalhoso considerando a grande variação do teor de extrativos, densidades normalmente altas das madeiras mais comercializadas etc.

Um dos fatores que causam problemas durante a colagem são os altos níveis de umidade e temperatura que muitas vezes podem afetar a ancoragem do adesivo selecionado (EN 301, 2006). Somado a isso, tem-se nas regiões tropicais grande comércio de madeiras densas, que possuem características diferentes das madeiras mais utilizadas para produção de MLC. Isto torna-se um obstáculo para o avanço da tecnologia, pois algumas características destes tipos de madeiras acabam atrapalhando o processo de colagem, como é o caso da presença de resinas, anatomia desfavorável (poucos e pequenos vasos, maior porcentagem de parede celular etc) à impregnação do adesivo entre outros fatores (GÉRARD, 1999; BOURREAU, 2013). Por conta disso, a produção de MLC com madeiras tropicais vem sendo alvo de muitos estudos, buscando encontrar as combinações certas de adesivos, madeiras, temperaturas e umidade para uma boa colagem com madeiras tropicais (GUISCAFRE e SALES, 1980).

### **3.4. Produtos engenheirados: a tecnologia de painel sandwich**

Por definição da ASTM (American Standard Testing and Materials), compósitos sanduíches são uma forma especial de compósito lamelado que compreende uma combinação de materiais de natureza distintas, ligados entre si buscando utilizar as propriedades singulares de cada componente separado gerando ao final uma vantagem estrutural de todo o conjunto (ASTM, 2007). A estrutura do painel consiste em duas faces externas que são separadas por um núcleo de maior espessura, unidas por adesivo.

As faces do painel devem ser produzidas utilizando materiais relativamente rígidos e resistentes. A exemplo, temos como materiais de face, fibras sintéticas (GARRIDO et al., 2014), madeira ou madeira

laminada/compensada (SRIVARO, et al., 2015), garantindo resistência aos esforços de tração e compressão enquanto o núcleo, precisa ser de baixa densidade. Normalmente os materiais do núcleo provem de três categorias: espumas, madeiras de baixa densidade e materiais com geometria “honeycomb” (CALLISTER, 2008). A combinação faces resistentes e núcleo elástico/leve garantem como vantagem do compósito sanduíche uma alta relação resistência/massa, ou seja, peças mais leves, porém com resistência elevada para a categoria de densidade do material. Isso ocorre pelo posicionamento estratégico dos materiais de natureza diferentes dentro de um mesmo painel.

O esforço de flexão estática consiste em um painel apoiado nas suas duas extremidades. O painel então recebe uma carga no centro do seu vão, e sua estrutura começa a deformar. A região onde a carga é aplicada comprime enquanto a face oposta à aplicação de carga traciona. No centro do painel, no núcleo, ocorre ainda o esforço de cisalhamento (NIKLAS, 1992). Estrategicamente, o aumento da altura do painel confere um ganho exponencial na resistência à flexão estática, visto que graças a uma propriedade mecânica denominada “momento de inércia”, o aumento da altura da peça reflete em um aumento considerável da resistência nesse esforço (RODRIGUES et al., 2018).

### 3.5. O poliuretano a base de mamona

Polímeros poliuretanos (PU) são caracterizados por ter em suas cadeias, unidades orgânicas ligadas quimicamente através de ligações uretânicas (Vilar, 2004). Inicialmente, os PUs dependiam majoritariamente de produtos derivados do petróleo, o que, do ponto de vista ambiental não era um fator positivo para o produto final, considerando a crise do petróleo e as consequências do efeito estufa decorrente do aquecimento global antrópico (Cerchiani, 2013).

Posteriormente, iniciou-se a produção de poliuretanos mais ecológicos, dependentes, desta vez de produtos a base de óleo vegetal (SOMANI et al 2003), uma alternativa viável para diminuir a utilização os adesivos convencionais. Normalmente, esses polímeros são bicomponentes e as vantagens ambientais que tais adesivos apresentam são: fonte de produção renovável e natural, biodegradação e ausência de emissão de toxinas (AZAMBUJA, 2006; MARINHO et al., 2013; CAVALHEIRO, 2021).

Uma das rotas de produção do PU orgânico acontece em duas fases e culmina em um adesivo bicomponente. Inicialmente, obtém-se um pré-polímero de estado de polimerização incompleta. Quando este pré-polímero é misturado estequiometricamente a um polioliol, obtém-se como resultado o poliuretano desejado (CAVALHEIRO, 2021). Uma das características principais geradas ao PU através desta rota de produção é a alta flexibilidade do adesivo (JESUS, 2000).

No Brasil, desde a década de 80, o Grupo de Química Analítica e Tecnologia de Polímeros, GQATP, do Instituto de Química de São Carlos da Universidade de São Paulo, vem desenvolvendo pesquisas para produção de PU a base de mamona (AZEVEDO, 1999). Algumas das vantagens do PU de mamona são a cura a frio e aplicação sob condições ambientais (JESUS, 2000).

Wilczak (2014) testou o PU de mamona para a produção de painéis compensados utilizando como comparativo a colagem com adesivos convencionais até então utilizados, como o adesivo uréia-formaldeído e fenol-formaldeído. Ao fim, o PU de mamona obteve valores de resistência na flexão estática e cisalhamento na linha de cola maiores que os outros dois adesivos utilizados, mostrando, assim a viabilidade do adesivo para produção de painéis compensados. A penetração e resistência da colagem do PU de mamona foram também

demonstradas por Bianche (2014). No trabalho em questão Microscopia Eletrônica de Varredura foi utilizado para avaliar a interface madeira adesivo em juntas coladas em eucalipto e pinus. PU de mamona obteve boa penetração gerando resistência mais alta do que adesivos PVAC (acetato de polivinila).

Mölleken (2017) obteve valores de cisalhamento na linha de cola superiores ao de adesivos convencionalmente utilizados na indústria, como PVAc D3 e EPI. O autor apresentou a colagem de *Pinus taeda* e *Tectona grandis* com PU de mamona em diferentes gramaturas e com diferentes proporções dos componentes misturados.

### 3.6. A espécie *Jacaranda copaia* (Aubl.) D. Don (Pará-Pará) e suas características

A Família botânica Bignoniaceae abrange cerca de 110 gêneros e 790 espécies, tendo a área continental sul americana como grande centro da biodiversidade da família (FERNANDES, 2021). No Brasil os representantes da família botânica compreendem 34 gêneros e 420 espécies, dentre elas, 195 localizadas na floresta amazônica. (LOHMANN et al., 2020).

Dentre as espécies brasileiras, está a *Jacaranda copaia*, popularmente conhecida como “Pará-Pará” ou “Caroba”, uma árvore com ampla distribuição na Amazônia, ocorrendo nos estados Acre, Amazonas, Amapá, Pará, Rondônia, Roraima, Maranhão e Mato Grosso (REFLORA, 2020).

Estudos etnobotânicos demonstram uma diversa gama de utilizações do seu conteúdo em comunidades tradicionais: uso medicinal de casca e folhas para combater principalmente infecções de pele e doenças gastrointestinais (RODRIGUES, 2006; GACHET e SCHÜHLY, 2009; ROTH e LINDORF, 2013). Utilização da sua madeira como material de construção e para produção de móveis também é observada em território nacional.

Árvores desta espécie podem atingir até 30 m de altura, tem alta exigência de luz nos estágios iniciais de vida, apresentando rápido crescimento em áreas abertas, fatores que a caracterizam como uma espécie pioneira (LORENZI, 2002; ABENSUR et al., 2007). Para plantações, o Pará Pará também possui grande viabilidade. Tonini et al. 2008 demonstraram que os plantios com espaçamento de 2,5m x 2m para períodos de 9 anos atingiram DAP final de 20,7 cm e altura total de 17 m. A alta taxa de crescimento da espécie também foi mostrada por Montagnini et al. (2003), onde as árvores de *J. copaia* apresentaram caule cilíndrico com poucas ramificações ao longo de 8 anos de crescimento, com incremento diamétrico médio anual variando de 2,10 cm a 2,57 cm.

A densidade básica da sua madeira é de 0.31 g/cm<sup>3</sup> (ELEOTÉRIO e DA SILVA, 2013 apud IBAMA, 2011) sendo, dessa forma, considerada uma madeira de baixa densidade. Cerne e alburno são de coloração branco-amarelado e não são distintos pela cor; grã direita, textura média, brilho moderado e cheiro imperceptível são outras características organolépticas da sua madeira. É vulnerável ao ataque de organismos xilófagos tendo assim, sua utilização resumida a caixotaria e produção de alguns brinquedos (CORRÊA, 1984; GURGEL et al., 2006; ELEOTÉRIO e DA SILVA, 2013).

À parte das utilizações convencionais da madeira, estudos sobre sua anatomia vem demonstrado grande potencial para dendrocronologia em zonas tropicais, onde a correlação entre os raios analisados foi de 0,36, com a espécie inclusive registrando eventos extremos de fenômenos como El niño e La nina (CAHUANA et al., 2020).



## 4. MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1. Matéria prima do trabalho

O experimento de pesquisa foi realizado majoritariamente com madeira da espécie *Jacaranda copaia* (Aubl.) D. Don, conhecida popularmente como Pará Pará. Um lote de aproximadamente 0,3m<sup>3</sup> de madeira da espécie em questão foi doado pela empresa Algimi Florestal Indústria De Pisos De Madeiras – LTDA. Segundo a empresa, o lote consiste em três árvores que foram derrubadas, desdobradas e posteriormente o material proveniente das árvores foi agrupado formando o lote em questão. Dados como DAP, Altura ou altura comercial não foram informados.



**Figura 1.** Imagens do material antes da doação

A madeira foi recebida em formato de sarrafos de aproximadamente 25mm x 50mm x 1600mm e 50mm x 50mm x 1600mm. Os sarrafos de maior espessura foram utilizados para produzir as lamelas de reforço dos elementos estruturais e corpos de prova dos ensaios de caracterização enquanto os sarrafos menores passaram por processo de plaina e polimento com lixa para compor as lamelas internas das vigotas.

O material de Tauari e Muiracatiara usado neste trabalho foi doado pela mesma empresa. Pequenas peças de 20mm x 50mm x 300mm foram recebidas no Laboratório de Tecnologia da Madeira da Universidade Federal do Oeste do Pará. Tauari e muiracatiara foram escolhidas como espécies tratamento em função da diferença entre as suas densidades quando comparadas com a do Pará Pará. Tauari é considerada de média (pode-se encontrar alta densidade dependendo da espécie) densidade enquanto muiracatiara possui alta densidade. Para as camadas externas das vigotas, lamelas de 5mm x 50mm x 1600mm foram compradas em serraria para utilização.

Todo o material, posteriormente foi entabicado e acomodado em uma sala de aclimação com condições ambiente reguladas a fim de garantir que a madeira atingisse umidade de equilíbrio de 12% ou o mais próximo possível.





**Figura 2.** Material entabicado dentro da sala de aclimação do LTM

## **4.2. Amostragem**

Para os procedimentos de caracterização física, química e mecânica, foram utilizadas 12 peças de madeira de dimensões 25 mm x 50 mm x 1500 mm. Cada peça gerou um corpo de prova (cp) de flexão estática, cisalhamento e uma amostra para caracterização anatômica. Cada cp de flexão estática gerou após o ensaio um cp para verificação da propriedades físicas (densidade e retratibilidade) e outro para o ensaio de compressão paralela as fibras. O material residual de cada peça foi triturado com uso de destopadeira para produzir serragem para os ensaios químicos.

## **4.3. Descrição anatômica macroscópica**

Para a descrição macroscópica, a amostra de madeira foi polida com lixa progressivamente mais fina sob água até ter em sua sessão transversal qualidade visual suficiente para que a descrição anatômica fosse realizada. As lixas utilizadas foram de granulometria 80, 120, 180, 280, 400, e 600 nesta exata sequencia. As imagens anatômicas foram obtidas por meio de câmera digital acoplada a um estéreo microscópio. As características foram então analisadas e comparadas com material da xiloteca do LTM e com informações encontradas em literatura.



**Figura 3.** Processo de polimento com lixa e água

#### **4.4. Caracterização química**

Para as análises químicas, o material foi preparado de acordo com a norma ASTM D1105 – 96. A serragem para os ensaios foi moída em um moinho de facas e posteriormente peneirada. A fração de serragem retida entre as peneiras de 40 e 60 mesh foi a fração usada para os ensaios.

A quantificação dos teores de extrativos ocorreu seguindo a metodologia preconizada na ASTM D1107 – 96. O procedimento de extração total consiste em três gramas de serragem lavados em um conjunto extrator de gorduras sohxlet inicialmente com uma solução de Álcool 100% e tolueno em concentração 2:1. Em seguida, o material é lavado novamente apenas com álcool 100%. O ensaio tem duração de no mínimo 6 horas para cada solução, com ciclos de lavagem de duração de 15 minutos. O material foi então filtrado com água destilada e seco em estufa por no mínimo 24h. O quantidade de extrativos é dada pela diferença entre a massa de serragem pré extração e pós extração.



**Figura 4.** Extrator de gordura utilizado para o processo de extração total

Teor de lignina foi obtido pelo método de lignina insolúvel em ácido de klasson. O processo compreende 0,3g de madeira sem extrativos que passam por ataque de ácido sulfúrico, misturados em 87 ml de água destilada e seguindo posteriormente para a autoclave por uma hora após alcançar a pressão necessária. Depois disso o material é filtrado com água destilada e seco em estufa por 24h. Esse processo degrada toda holocelulose. Assim, a quantidade de lignina é a massa que sobrou após o procedimento. Todo o processo foi feito seguindo a norma ASTM D 1106 – 96.



**Figura 5.** Etapas do processo de lignina insolúvel

Para o teor de cinzas, a norma usada foi a ASTM D1762 – 84. Três gramas de serragem são colocados em cadinhos de porcelana dentro de fornos do tipo mufla. O material fica na mufla por 6 horas a partir do momento que o forno atinge a temperatura de 750°C com uma taxa de aquecimento de 1,6°C por minuto. A massa antes e depois do processo é aferida. A massa pós-ensaio são as cinzas da madeira. O teor é calculado seguindo a fórmula (1):

Equação (1)

$$T_c = \frac{100 * MC}{MS}$$

Onde:

$T_c$  = Teor de Cinzas

MC = Massa de cinzas

MS = Massa inicial de serragem



Figura 6. Mufla utilizada para o ensaio de cinzas

Os valores de holocelulose foram obtidos por meio da diferença, considerando a equação abaixo:

Equação (2)

$$Th: 100 - ext - lig - cnz$$

Onde:

Th: Teor de Holocelulose

Ext – teor de extrativos

Lig – teor de lignina

Cnz – teor de cinzas

Todos os ensaios químicos utilizaram triplicata de amostras como esforço estatístico.

#### 4.5. Caracterização mecânica

Para a caracterização mecânica da espécie, foram realizados os ensaios de Compressão paralela as fibras, Cisalhamento e flexão estática, onde foram obtidos os valores de Módulo de Ruptura e Módulo de Elasticidade. Todos os cps foram produzidos seguindo as recomendações da norma ASTM D143 para dimensões reduzidas. Corpos de prova de flexão estática tiveram dimensões de 25mm x25mm x 410mm, ao passo que os cps de compressão paralela tiveram dimensões de 25mm x25mm x 100mm. Os ensaios foram realizados no LTM na máquina de ensaios universais modelo EMIC.



**Figura 7.** Ensaio mecânico de compressão paralela, flexão estática e cisalhamento realizados na máquina de ensaios universal

#### 4.6. Caracterização física

Os ensaios para caracterização física são os de densidade aparente por método de Arquimedes e retratibilidade pelo meio estereométrico.

Para verificar a densidade, cada cp foi pesado em balança semianalítica e mergulhado em uma proveta com água. O deslocamento da água gerou o valor do volume. Dividindo a massa pelo volume obteve-se a densidade aparente.

O cp foi então colocado em um dessecador com água onde ficou saturando até atingir massa constante. As madeiras foram então retiradas do dessecador e uma nova pesagem e mensuração das dimensões foram realizadas. Depois disso, cada cp foi levado à estufa regulada com temperatura de aproximadamente 103°C onde ficaram até atingir massa constante mais uma vez. Massa e dimensões foram medidas novamente. Contração, inchamento e coeficiente de anisotropia foram calculados segundo a norma ASTM D143.

#### 4.7. Produção da prensa hidráulica

Para a produção dos corpos de prova de Viga Lamelada Colada, uma prensa hidráulica foi desenvolvida pelos alunos e professores envolvidos no experimento. O sistema da prensa é formado por quatro conjuntos de tubos metálicos retangulares soldados a um macaco hidráulico cada, em uma das suas extremidades. Os conjuntos foram montados e soldados usando como base uma estrutura de madeira. Cada conjunto hidráulico é separado um do outro por aproximadamente 40cm de distância e inclinados em 45 graus. As dimensões máximas alcançadas para produção de vigas são: 75cm de altura (desconsiderando madeiras para distribuição de pressão) e 15cm de espessura, podendo produzir, utilizando todos os conjuntos de macacos hidráulicos peças de até 2m de comprimento. O protótipo final da prensa bem como as etapas de sua produção está ilustrado nas imagens abaixo:



**Figura 8.** Protótipo final da prensa hidráulica

## **4.8. Fabricação das vigotas e corpos de prova colados**

### **4.8.1. Considerações sobre o material**

A partir do procedimento de classificação visual das peças observou-se alta ocorrência de empenamentos na madeira de Pará Pará. Há duas possibilidades acerca do surgimento desses defeitos: (i) eles podem ter ocorrido devido a saída brusca de água das superfícies das peças no momento do desdobro e/ou durante o período de aclimação ou surgiram por tendências naturais desta madeira. Empenamentos do tipo arqueamento foram os que mais ocorreram nas peças.

Em literatura, é possível encontrar informações sobre tendências dessa madeira a desenvolver defeitos de secagem. Torcedura moderada e forte endurecimento são alguns dos defeitos citados em literatura para tal espécie (IBDF, 1981; Souza et al., 1997). Considerando o valor do coeficiente de anisotropia encontrado neste trabalho, junto do fato de os corpos de prova utilizada estar com os elementos anatômicos bem orientados, a possibilidade de surgimento natural desses defeitos pode ser justificável.

Em função dos arqueamentos, os seguintes procedimentos foram tomados: durante a confecção dos corpos de prova, as extremidades menos empenadas foram agrupadas em um lado da peça, deixando o outro completamente livre de defeitos. Com o empenamento das lamelas surgindo conforme o comprimento se aproximava da extremidade empenada, prensou-se então a vigota; após as 24h de pressão, durante o descarte das extremidades da vigota, priorizou-se a retirada de maior parte que se localizava na extremidade onde a maior parte dos empenamentos estava localizada, diminuindo assim o defeito na peça final.

A produção dos corpos de prova para caracterização não foi afetada.

#### 4.8.2. Estrutura dos corpos de prova para ensaio de vigas ao esforço de flexão estática

A estrutura dos cps consistiu em cinco lamelas de Pará Pará com aproximadamente 19mm x 50mm x 1400mm. Como tratamento, duas lamelas finas, com aproximadamente 5mm de altura (demais dimensões se mantiveram iguais) foram colocadas como as lamelas de reforço das vigotas. Cada tratamento equivaleu a uma espécie de madeira diferente, tendo, ao final, vigotas com três tratamentos: lamelas externas de Pará Pará, Tauari e Muiracatiara. Para este experimento, foram produzidas cinco cps colados de cada tratamento totalizando, quinze cps no total.



**Figura 9.** Vigota pré desdobro de acabamento

#### 4.8.3. Adesivo utilizado

Para a colagem do material, foi aplicado Poliuretano a base de mamona, adesivo bi componente doado pela empresa impermeveg. A quantidade de adesivo aplicada foi a recomendada pelo fabricante, 250g/m<sup>2</sup>.



**Figura 10.** Mistura dos dois componentes do adesivo.

#### **4.8.4. Pressão aplicada**

Todos os corpos de prova e vigotas foram prensados com taxa de pressão de 0,8 mpa. Para tal, uma vigota teste de cada tratamento foi utilizada para calibração. Com o auxílio de uma célula de carga, foi medida a distancia que cada pistão dos macacos hidráulicos se elevou até gerar pressão suficiente para compor os 0,8 MPa para prensagem. Depois de cada procedimento teste, a altura que gera a pressão correta pra cada teste já era conhecida, podendo assim ser realizada a prensagem com o mínimo de pressão exigida.

#### **4.8.5. Etapas pré-produção das vigotas**

Para selecionar quais sarrafos viriam a se tornar lamelas dos elementos estruturais, uma classificação visual foi feita considerando nível de empenamento e presença de defeitos como nós ou sarrafos com orientação indesejada de elementos anatômicos.

Após a classificação, as futuras lamelas foram submetidas a ensaios não destrutivos de flexão estática com três apoios para obtenção de um valor de MOE. Preliminarmente, três lamelas foram ensaiadas até seu rompimento para obtenção do valor de MOR médio. Os ensaios foram realizados em uma maquina de ensaios universal modelo EMIC com um extensometro acoplado para mensuração precisa da flecha de cada lamela. Cada ensaio de flexão estática não destrutivo foi levado até cerca de 50% do valor de MOR obtido. Os valores de MOE obtidos foram usados para estratificar cada vigota que viria a ser produzida.

O processo de estratificação consiste em selecionar as lamelas que integrarão cada vigota e posicioná-las de maneira que gere o maior MOE possível em comparação com a média de MOE das lamelas de cada elemento estrutural. A equação 3, usada para estimar o MOE teórico de uma viga está demonstrada abaixo:



Equação (3)

$$E_v = \frac{\sum E_i * (I_i + AT_i * d_i^2)}{I_v}$$

Onde:

$E_v$  - Módulo de elasticidade da vigota

$I_v$  - Momento de inércia da vigota

$E_i$  - Módulo de elasticidade da  $i$  lamela da vigota

$I_i$  - Momento de inércia da  $i$  lamela da vigota

$AT_i$  - Área transversal da  $i$  lamela da vigota

$d_i$  - Distância entre o centro de gravidade da  $i$  lamela para o centro de gravidade da viga

Desse modo, as vigotas foram estratificadas de forma que o MOE de cada lamela diminuiu das posições mais externas até chegar ao centro, na lamela de menor MOE. Tem-se então uma vigota de cinco camadas. As lamelas de 5 mm foram posicionadas nas extremidades superiores e inferiores de cada elemento estrutural, concluindo o processo com uma vigota de 7 camadas.

Antes do processo de colagem, cada lamela passou por polimento superficial leve com lixa para madeira de granulometria média (grão 120). O procedimento foi feito utilizando lixadeira orbital e após o polimento, o pó de madeira nas superfícies foi retirado com ar comprimido.

#### 4.8.6. Procedimento de colagem

O adesivo foi espalhado nas faces a serem coladas em uma dosagem de 250g/m<sup>2</sup> (recomendado pelo fabricante) com auxílio de pincel. A montagem das lamelas componentes foi realizada exatamente após a aplicação do adesivo. O tempo de cura do adesivo é de 15 minutos.



**Figura 11.** Aplicação do adesivo nas faces das madeiras

#### 4.8.7. Procedimento de prensagem

Para as vigotas, a pressão necessária para a colagem foi garantida através do uso de 3 dos 4 conjuntos de macacos hidráulicos da prensa. Para assegurar distribuição de pressão por toda superfície do elemento estrutural sem comprometer a camada mais externa da peça, uma ripa de madeira foi colocada entre os macacos e a primeira lamela da vigota. A pressão foi mantida por aproximadamente 24 horas.

A prensagem dos cps de cisalhamento da linha de cola foi feita em uma prensa modelo BOVENAU-P15000. O procedimento ocorreu de maneira similar ao de produção das vigotas, com peças de madeira distribuindo a pressão pelos cps por cerca de 24 h.



**Figura 12.** Prensa utilizada no processo de fabricação dos corpos de prova de cisalhamento na linha de cola

O ultimo desdobro ocorreu logo após o período de prensagem. As extremidade em comprimento dos cps e vigotas foram removidos para retirar possíveis locais com má colagem.

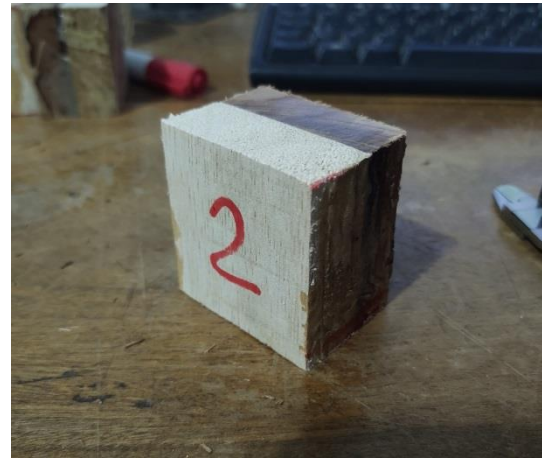
#### 4.9. Ensaio mecânicos do material colado

Três tipos de corpos de prova foram produzidos: cps com substrato a e b exclusivamente de Pará Pará, interação Pará Pará (a) e Tauari (b) e interação Pará Pará (a) e Muiracatiara (b).

Os substratos de Pará Pará foram confeccionados usando os sarrafos de 25mm de altura. As peças passaram por procedimento de plaina até a altura se aproximar de 20mm. Os substratos de Tauari e Muiracatiara foram produzidos a partir de material doado pela empresa Algimi, que chegou ao laboratório em forma de peças de madeira de dimensões 20mm x 50mm x 320mm. Os substratos de Pará Pará foram cortados no comprimento de 320mm buscando se adequar ao tamanho das peças das demais espécies.



**Figura 13.** Substratos utilizados para a confecção dos corpos de prova de cisalhamento na linha de cola

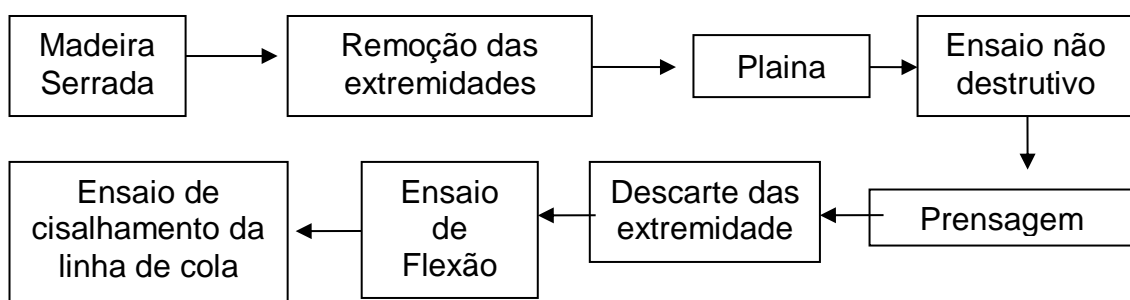


**Figura 14.** Corpo de prova de cisalhamento na linha de cola após o desdobro

Para cada tratamento de interação (Muiracatiara e Tauari) duas peças, cada uma com duas lamelas da espécie tratamento e duas lamelas de Pará Pará, foram produzidas. As dimensões seguiram o tamanho já explanado no parágrafo anterior. De cada peça, 10 corpos de prova foram produzidos e ensaiados. Para facilitar o desdobro, os corpos de prova foram adaptados (figura 14) sem os dentes que o formato padrão possui. A estrutura da emic que recebe os corpos de prova também foi adaptada para mantê-los na posição enquanto a carga era exercida.

Tanto o ensaio de resistência ao cisalhamento na linha de cola (ASTM D-905), quanto o de flexão estática com três apoios foram realizados em uma máquina de ensaios universal modelo EMIC. Para o ensaio de flexão estática, o vão entre os apoios escolhido foi de 1,28m, recomendado por Serrano (2013). Ressalta-se que o vão recomendado para a altura média das vigotas, considerando a relação de 12 vezes o valor da altura seria de aproximadamente 1,30m. Contudo, a base onde os apoios se localizam possui apenas 1,28 m para realizar o ensaio.

O processo de produção das vigotas está explanado no fluxograma abaixo:

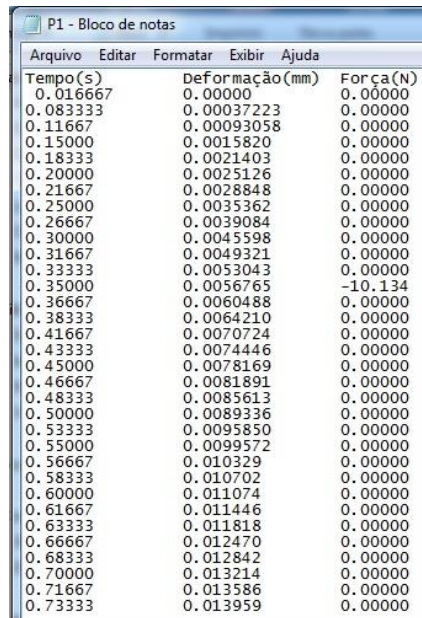


#### 4.10. Correção dos valores de MOE

Após a obtenção dos dados dos ensaios, os valores de MOE sofreram ajustes a fim de discriminar ao máximo a influência do esmagamento nos seus valores. O método para ajuste do valor do MOE está descrito abaixo.

#### 4.10.1. Exportação das curvas

Os valores de deformação e força ao longo do tempo de cada ensaio foram exportados através do software da EMIC. Cada curva de Deformação x Força ao longo do tempo foi exportada de cada viga ensaiada.



Tempo (s)	Deformação (mm)	Força (N)
0.016667	0.00000	0.00000
0.083333	0.00037223	0.00000
0.11667	0.00093058	0.00000
0.15000	0.0015820	0.00000
0.18333	0.0021403	0.00000
0.20000	0.0025126	0.00000
0.21667	0.0028848	0.00000
0.25000	0.0035362	0.00000
0.26667	0.0039084	0.00000
0.30000	0.0045598	0.00000
0.31667	0.0049321	0.00000
0.33333	0.0053043	0.00000
0.35000	0.0056765	-10.134
0.36667	0.0060488	0.00000
0.38333	0.0064210	0.00000
0.41667	0.0070724	0.00000
0.43333	0.0074446	0.00000
0.45000	0.0078169	0.00000
0.46667	0.0081891	0.00000
0.48333	0.0085613	0.00000
0.50000	0.0089336	0.00000
0.53333	0.0095850	0.00000
0.55000	0.0099572	0.00000
0.56667	0.010329	0.00000
0.58333	0.010702	0.00000
0.60000	0.011074	0.00000
0.61667	0.011446	0.00000
0.63333	0.011818	0.00000
0.66667	0.012470	0.00000
0.68333	0.012842	0.00000
0.70000	0.013214	0.00000
0.71667	0.013586	0.00000
0.73333	0.013959	0.00000

Figura 15. Conjunto de dados proveniente da exportação da curva

#### 4.10.2. Plotagem dos gráficos e identificação do limite de proporcionalidade

Os valores foram exportados para o software Microsoft excel e usando-os, gerou-se gráficos para cada uma das vigas. Nos gráficos foi possível visualizar em quais pontos da curva o limite de proporcionalidade terminava, iniciando o comportamento plástico com influência do esmagamento. Assim, isolaram-se os trechos da curva sem influência do esmagamento e novas curvas foram geradas:

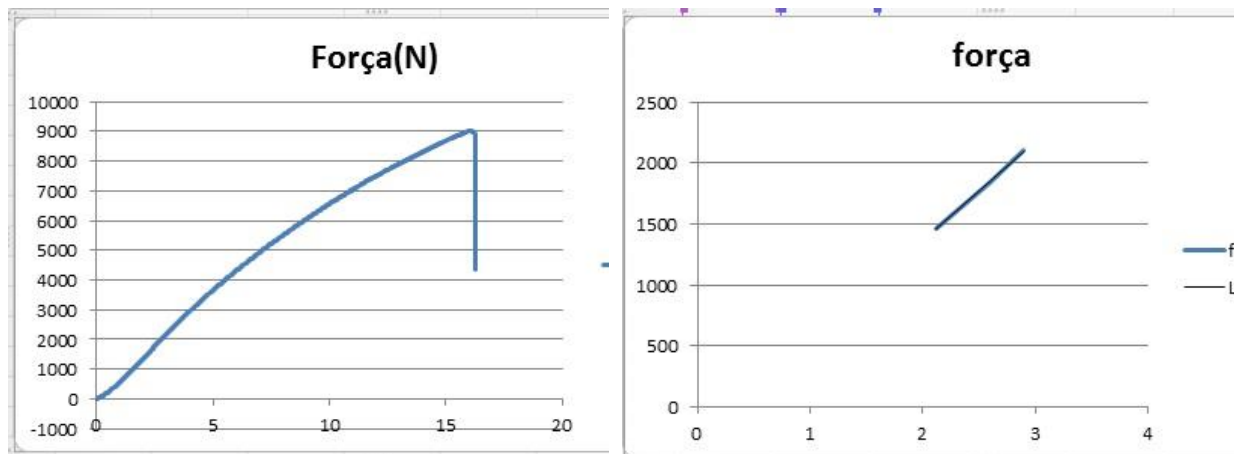


Figura 16. Curva original plotada em gráfico no software Microsoft Excel e trecho isolado da curva.

### 4.10.3. Coeficiente angular:

Em cada gráfico seguiu-se a seguinte sequência: “adicionar linha de tendência” -> “exibir equação no gráfico”. Através da equação, encontrou-se o coeficiente angular para cada conjunto de dados que posteriormente seria usado para calcular o MOE.

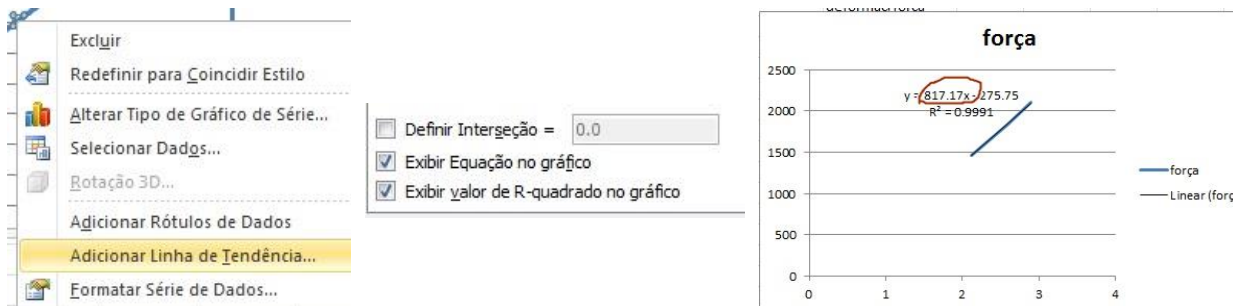


Figura 17. Adição da linha de tendência e obtenção do valor do coeficiente angular da curva (valor circulado na imagem à direita)

### 4.10.4. MOE ajustado

O valor de MOE ajustado foi calculado usando a equação abaixo:

Equação (4)

$$\frac{CA * V\tilde{a}o^3}{48 * largura * espessura^3}$$

Onde:

CA – coeficiente angular

Vão – valor do vão (mm) utilizado no ensaio

Largura – largura da viga (mm)

Espessura – espessura da viga (mm)

## 4.11. Análise estatística

Para averiguar a via estatística a ser seguida, os dados passaram pelo teste de normalidade de Shapiro-wilk e homogeneidade de variâncias de bartlett. Seguiu-se então para a via paramétrica. Realizou-se ANOVA, seguida do teste Tukey para comparação entre as médias dos tratamentos.

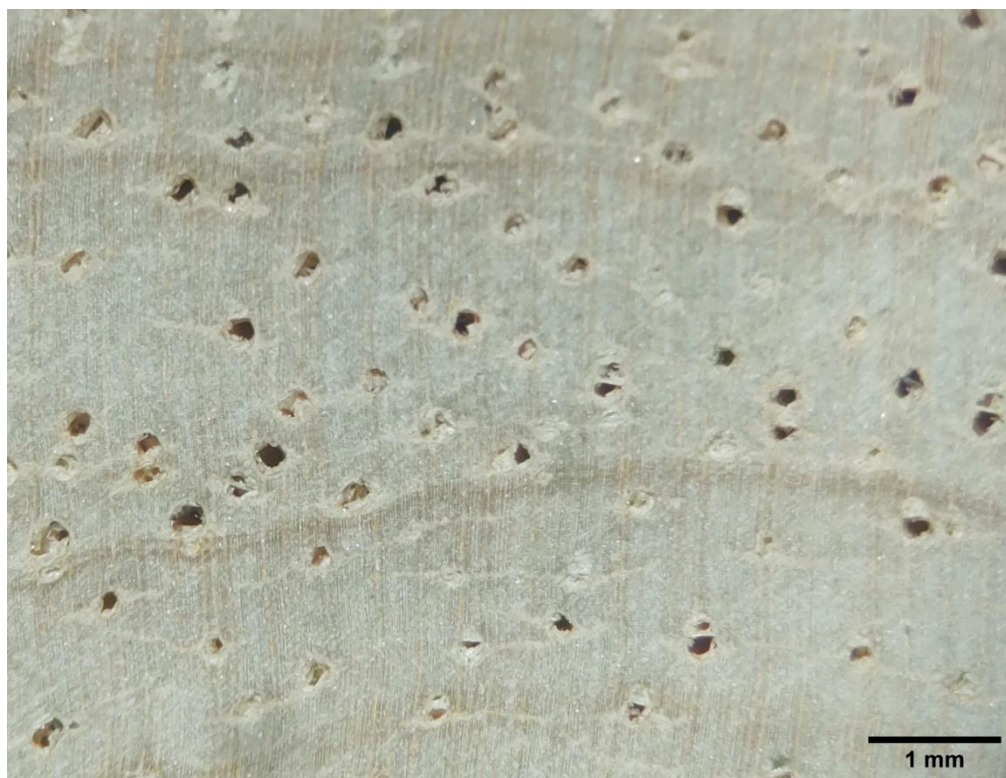
Os resultados obtidos nos ensaios de caracterização foram submetidos à Análise de Componentes Principais.

Todos os gráficos e análises foram produzidos através do software R.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. Anatomia macroscópica

Para a descrição anatômica, foi observada a configuração anatômica da madeira em questão verificando-se as seguintes características: **vasos**, de grande calibre, visíveis a olho nu, predominantemente solitários com ocorrência de múltiplos de dois, podendo em raros momentos apresentar-se em cadeias radiais, sem obstrução e com porosidade difusa; o **parênquima axial** é do tipo paratraqueal aliforme de extensão linear, havendo confluência em alguns pontos, visível também a olho nu; **parênquima radial** visível a olho nu, tanto no plano transversal quanto tangencial, sem estratificação e com diferentes alturas tangenciais, porém sempre mantendo-se pequenos; **camadas de crescimento** são demarcadas por zonas fibrosas. A descrição da madeira vai de acordo com a observada por Embrapa Oriental (2005) para a espécie *Jacaranda copaia*, porém ressalta-se que a descrição macroscópica garante uma identificação botânica apenas em nível de gênero. A imagem 12 demonstra a anatomia macro da madeira:

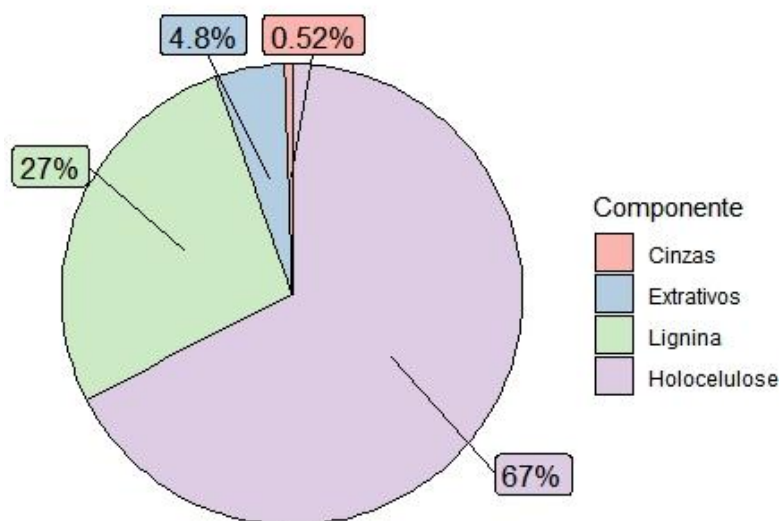


**Figura 18.** Visão macroscópica da madeira de *Jacaranda sp.*

Os resultados encontrados estão de acordo com os dados encontrados em literatura para a espécie em questão. Ainda assim, por conta da ausência de uma identificação botânica com madeira reprodutivo, as conclusões que podemos chegar é são as de que a madeira deste trabalho pertence ao gênero *Jacaranda*, sua anatomia se assemelha bastante ao da espécie *Jacaranda copaia* e por conta disso, podemos identificá-la como pertencente ao grupo comercial conhecido por “Pará Pará”, ou apenas como *Jacaranda sp.*

## 5.2. Caracterização química

Quanto à caracterização química da madeira, os resultados estão explanados na figura (16):



**Figura 19.** Gráfico dos componentes químicos da madeira de *Jacaranda sp.*

Santana e Okino (2007), para a espécie *Jacaranda copaia*, encontraram os valores de 0,5%, 1,2%, 28,2% e 64,7% respectivamente para cinzas, extrativos, lignina e holocelulose (desvio padrão: 9,19 , 22,8 , 5,14 e 3,28% respectivamente). De todos os valores, o único que variou mais em relação aos dados de literatura de Santana e Okino foi o do teor de extrativos, valor em questão que se apresentou mais alto que o da literatura. Tal fato pode ser consequência de condições de sítio no qual as árvores se desenvolveram antes da derrubada, tendo em vista que as condições do ambiente no qual o indivíduo está localizado pode afetar diretamente o teor de extrativos (PETTERSEN, 1984).

Normalmente, madeiras dos gêneros *Pinus* e *Eucalyptus* são as mais usadas para produção de madeira laminada colada. Rocha et al. (2016) encontraram para madeira de *Eucalyptus* plantada sob diferentes espaçamentos os seguintes valores médios para os teores de extrativos, lignina e holocelulose: 2,56%, 27,2% e 64,5%. Poubel et al. (2013), para madeira do gênero *Pinus*, encontraram para a composição química 1,8% de extrativos, 23% de lignina e 67% de holocelulose. Mais uma vez, os valores de extrativo de Pará Pará deste trabalho foram maiores em relação aos de *Pinus* e *Eucalyptus* citados. Jiang et al. (2014) explica que a composição química da madeira, principalmente o teor de extrativos e pH exercem grande influência no processo de ancoragem de determinados adesivos. Para os autores, extrativos solúveis em água e materiais voláteis como resinas de caráter hidrofóbico e ácidos graxos avançam para a superfície da madeira durante os processos que envolvem secagem da madeira e forma uma camada superficial menos reativa na madeira (BIKERMAN, 1961); extrativos muito ácidos podem acelerar ou desacelerar o processo de

cura de determinados adesivos que sejam dependentes do pH (SCHEIKL, et al, 2003). Madeira com teor de extrativos acima de 5% podem apresentar falha na linha cola após o processo de ancoragem (JIANG et al. 2014, apud: ZEPPEFELD e GRUNWALD, 2005).

### 5.3. Caracterização física

A tabela 1 apresenta os dados obtidos nos ensaios de Densidade, Umidade e Contração.

**Tabela 1.** Resultados dos ensaios de propriedades físicas da madeira. Densidade A = aparente a 12% de umidade;  $\beta T$  = contração tangencial,  $\beta R$  = contração radial e  $\beta V$  = contração volumétrica.

Propriedade	Valor	Desv. Pad.	Coef. De Var. (%)
Densidade A.	0,37 g/cm <sup>3</sup>	0,025	7,04
Umidade Max	280%	19,83	9,81
$\beta T$ .	6,72%	0,75	11,19
$\beta R$ .	4%	1,32	29
$\beta V$ .	11%	1,66	13,81
Coef. Anis.	1,79	0,07	4

Quanto à densidade, a madeira apresentou 0,29 g/cm<sup>3</sup> para densidade básica e 0,35 g/cm<sup>3</sup> (Coeficiente de variação (CV) = 8,81%) para densidade aparente à 12%. Ambos os valores classificam a madeira como de baixa densidade ou leve. Do Nascimento et al. (1997), trabalhando com madeiras amazônicas encontrou valor semelhante para a mesma espécie considerando massa específica básica: 0,31 g/cm<sup>3</sup>. Araújo (2007), para a mesma espécie, obteve a densidade aparente de 0,31 g/cm<sup>3</sup>. Dessa forma, considerando a variação natural da madeira, os resultados deste trabalho vão de acordo com os observados em literatura. A umidade máxima ficou em aproximadamente 280%. Esse valor é considerado alto, mas é compreensível se tratando de uma madeira de baixa densidade como a em questão. Madeiras de densidade baixa possuem configuração anatômica com tendência favorável à higroscopicidade. Para essas madeiras, quanto maior a quantidade de espaços vazios na madeira, como vasos, lume e espaços intercelulares, maior é a quantidade máxima de umidade que a madeira é capaz de absorver do sistema no qual ela está inserida (SKAAR, 1984).

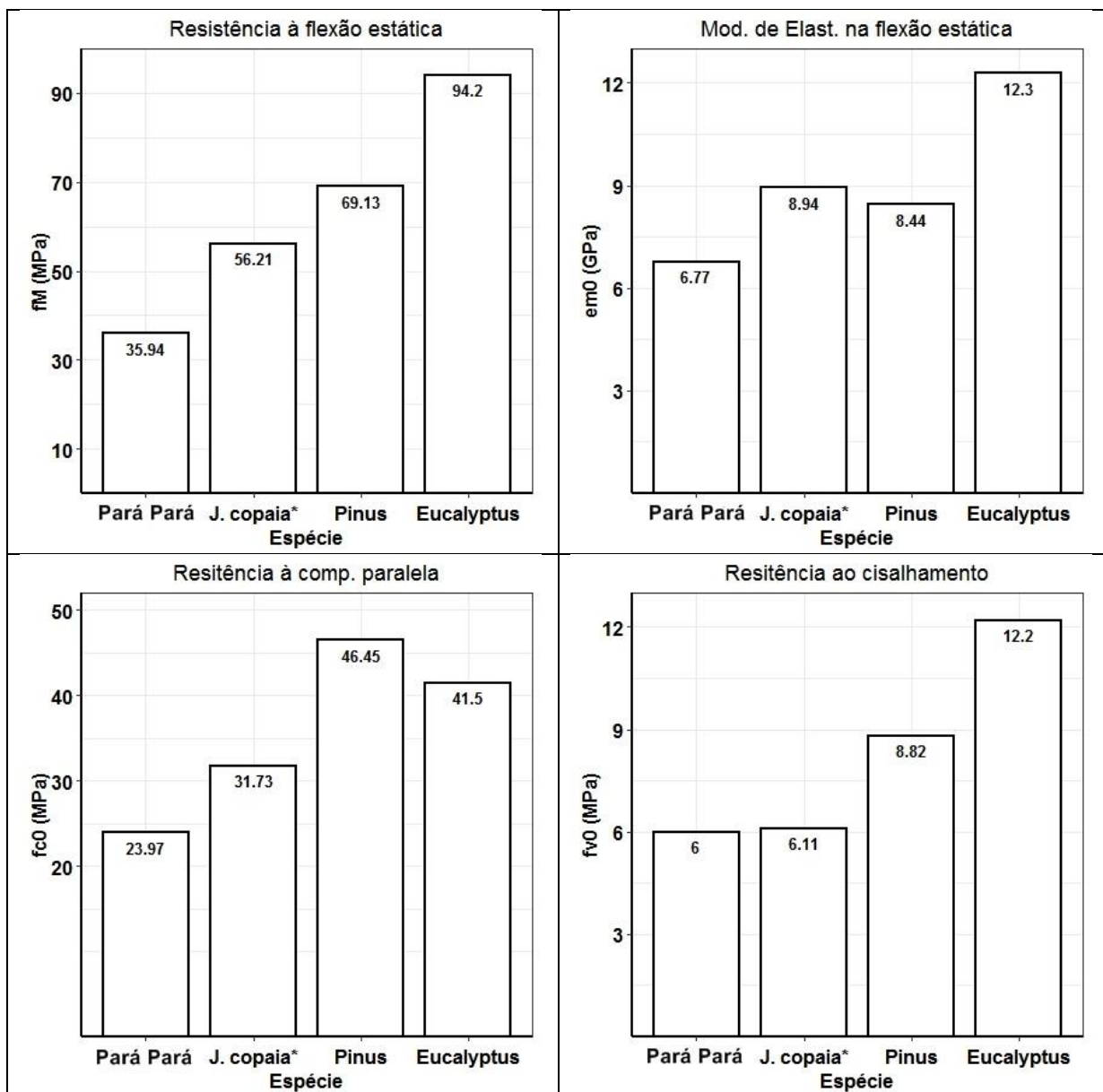
Contrações tangencial ( $\beta T$ ) e radial ( $\beta R$ ) ficaram na faixa de 6,72% (CV = 0,60) e 4% respectivamente. Madeiras com densidade similar ao Pará costumam ter valores de contração mais baixo, como é o caso do Marupá com ct e Cr de 6,8% e 4,8% e a Sumauma com 5,2% e 2,7% (DE ARAÚJO, 2007). Um dos fatores que afeta a contração da madeira é a quantidade de parede celular secundária, tendo em vista que é entre as microfibrilas de celulose que a água de impregnação está localizada. Como a contração é a saída da água de impregnação que localizam-se entre as microfibrilas de celulose (ROJAS et al., 2021), a tendência é que madeiras com mais parede celular contraíam mais enquanto as madeiras menos densas, por terem a parede celular mais delgada, não contraíam na mesma proporção. Esse comportamento, contudo, não é absoluto para todas as madeiras existentes, como demonstrado por Araújo (2007), onde espécies com densidade 0,88 g/cm<sup>3</sup> apresentaram contração tangencial de 9,4% enquanto a espécie *Diploon venezuelana*, com 0,85 g/cm<sup>3</sup> de densidade básica, apresentou mais de 10% de para a mesma contração. Quanto ao coeficiente de anisotropia, na madeira em questão o valor foi de 1,8, o que indica que esta madeira não possui boa estabilidade dimensional. É importante ressaltar que este coeficiente não indica se a



madeira contrai mais ou menos, ele indica se a diferença entre as contrações é alta a ponto de causar empenamentos durante a secagem ou não. Quanto mais próximo de 1, melhor é o comportamento dimensional da madeira. Desta forma, considerando o valor do coeficiente de anisotropia, pode-se inferir que a madeira de Pará Pará tem grandes possibilidades de empenamento durante o processo de secagem.

#### 5.4. Caracterização mecânica

Os resultados obtidos nos ensaios para caracterização mecânica são apresentados nas imagens abaixo::

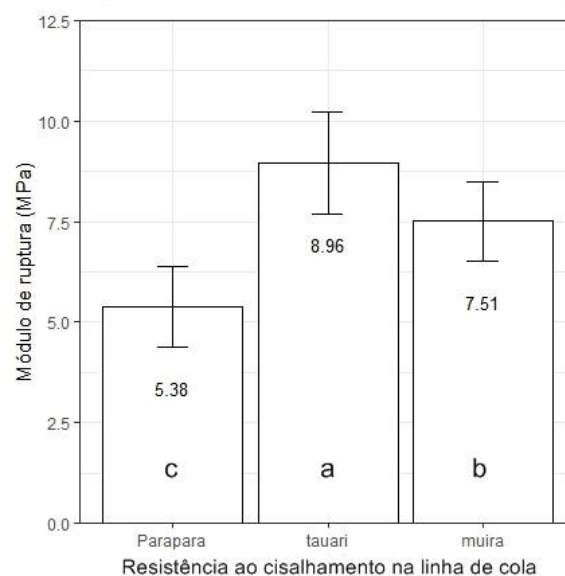


**Figura 20.** Resultados dos ensaios de caracterização mecânica; CVs foram respectivamente, 10,24%, 6,92%, 8,54% e 9,37%. J. copaia\* = correspondem aos dados de Do Nascimento et al., 1997. ; Pinus = Valores correspondentes Ulker et al., 2012.; Eucalyptus = valores correspondentes aos dados de Balboni et al., 2021.

Em comparação com os valores encontrados por Do Nascimento et al. (1997), os encontrados em nosso trabalho ficaram abaixo da média para todas as propriedades verificadas, exceto o valor da resistência ao cisalhamento, que foi muito parecido com a da literatura. Nas demais propriedades, os valores, ainda que mais baixos, foram próximos aos de literatura para a mesma espécie. Em comparação com os valores obtidos por Ulker et al. (2012) e Balboni et al. (2021) respectivamente para madeiras de Pinus e Eucalipto, todos os valores das propriedades mecânicas do Pará Pará foram mais baixo. A diferença nos valores, neste caso pode ser atribuída à densidade da madeira do Pará Pará, que foi mais baixa do que ambas as espécies em literatura citadas acima. Esse menor valor observado na madeira de Pará Pará deste trabalho pode ainda estar atrelado ao fato de o material ser muito heterogêneo, consequência da sua proveniência. As madeiras, não exclusivamente as amazônicas, tem naturalmente uma variação alta no lenho, seja em caráter anatômico ou em químico (BODIG e JAYNE, 1982). Como as propriedades físicas e mecânicas são dependentes desses fatores, a variação alta do material pode ser a causa do menor valor para as propriedades mecânicas encontradas neste trabalho. Além disso, o material utilizado neste trabalho é proveniente de três diferentes árvores que compuseram o lote amostras. Nisso, não se tem controle de qual sarrafo é proveniente de cada árvore ou se o material é proveniente de cerne ou alburno. A abordagem de uma possível influência desde último fator (cerne e alburno) é difícil, considerando a incapacidade de distinção em caráter visual de material proveniente de cerne, do material proveniente de alburno para o Pará Pará. Estudos como os de Scremim (2013) apresentam madeiras (*Pinus* e *Eucalyptus*) em que a diferença nos valores de propriedades mecânicas estudadas não foram suficiente para gerar classificação diferente em caráter de classe de resistência. Ainda assim, são muitos os fatores dentro de um mesmo indivíduo que afetam as propriedades de sua madeira. Faz-se necessário, de qualquer forma, estudos de comparação cerne x alburno para melhor entender se há ou não de fato diferença nas propriedades da madeira de Pará Pará considerando os tratamentos em questão.

### 5.5. Cisalhamento na linha de cola (CLC)

Os valores referentes à resistência da linha de cola ao esforço de cisalhamento estão explanados na figura 15:



**Figura 21.** Valor do módulo de ruptura no esforço de cisalhamento na linha de cola para cada um dos tratamentos de interação com Pará-pará. Colunas com letras diferentes indicam diferença estatística segundo o teste tukey com erro a 5%. CVs para Para Para = 11,16%; Tauari = 14,04%; Muiracatiara = 13,21%. Barras de erro correspondem ao desvio padrão.

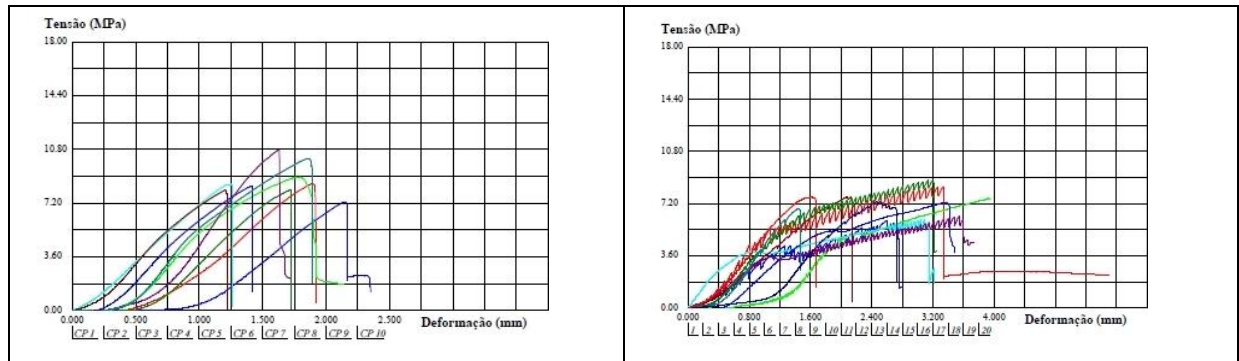
Dos tratamentos aplicados às vigotas, a combinação que gerou maior resistência na linha de cola foi a interação Pará Pará – Tauari, seguida da interação Pará Pará – muiracatiara e tendo a interação exclusiva de substratos de Pará Pará a resistência mais baixa. Pimentel et al. (2021), trabalhando com madeiras tropicais nacionais coladas com poliuretano, encontraram para ipê e cumaru valores de resistência ao CLC de respectivamente 14,43 e 15,16 MPa, quase o dobro do observado em nosso trabalho quando tem-se como comparativo os valores do tratamento com um substrato muiracatiara. Os autores, no entanto, não citam detalhes sobre o tipo de poliuretano utilizado. Para madeiras mais leves como Marupá, com classe de densidade semelhante ao Pará-pará, coladas com adesivos de caráter mais industrial, o valor de resistência gira em torno de 5,53 MPa (DOS SANTOS e DEL MENEZZI, 2005). Para madeiras mais usualmente utilizadas para produção de MLC, como as dos gêneros *Eucalyptus*, e *Pinus* os valores encontrados são de 7,32 MPa e 4,23 MPa para colagem com poliuretano a base de mamona (BIANCHE et al., 2016).

Cada uma das 3 espécies possui sua peculiaridade como material. Pará Pará possui baixa densidade e vasos de diâmetro grande porte, tauari é uma madeira com densidade variando de média para alta com baixa frequência de vasos, porém de grande calibre (221  $\mu\text{m}$ , 2,5 vasos por  $\text{mm}^2$  segundo SANTOS et al. (2020)), e muiracatiara com alta densidade, vasos de diâmetro médio e frequência mediana (166  $\mu\text{m}$ , 8,8 vasos por  $\text{mm}^2$  segundo MELO et al. (2013)). A interação Pará-Pará – Muiracatiara, ainda que tenha usado da madeira mais resistente neste trabalho, não apresentou a melhor resistência de linha de cola. Kamke e Lee (2005) explicam que a penetração de adesivo, quando consideradas as madeiras mais pesadas, se deve em grande parte as características de vaso, visto que é por eles que o adesivo encontra a passagem com menor resistência dentro da madeira. Quando se leva em conta tais fatores, é compreensível que a madeira de Tauari tenha obtido valores de resistência da linha de cola, uma vez que seus vasos possuem os maiores diâmetros, suas fibras terem maior lume, permitindo maior penetração de adesivo, o que teoricamente levou a uma ancoragem melhor.

A presença de extrativos também pode ter sido um dos fatores que influenciaram na colagem. Hse e Kuo (1988) explicam que madeiras com alta concentração de extrativos de natureza apolar dificultam o processo de penetração do adesivo. No estudo de Santana e Okino (2007), o teor de extrativos totais das madeiras de Tauari e Muiracatiara é de respectivamente 1,4% e 8,8%, mostrando que, em questão de extrativos, a segunda espécie também se apresenta desfavorável à colagem.

É interessante frisar que mesmo havendo diferença estatística entre os valores de cisalhamento na linha de cola, os tratamentos aplicados às vigotas não geraram diferença significativa durante o ensaio de flexão estática. Como flexão estática é um esforço composto, o reforço mecânico se deu em função do aumento de resistência e rigidez nos locais onde os elementos estruturais estavam submetidos à tração e compressão, deixando o núcleo da vigota apenas com a resistência do Pará Pará ao cisalhamento na linha de cola, posto que é nessa região que o esforço em questão atua.

A imagem tal demonstra o comportamento dos corpos de prova de cisalhamento na linha de cola durante os ensaios realizados.

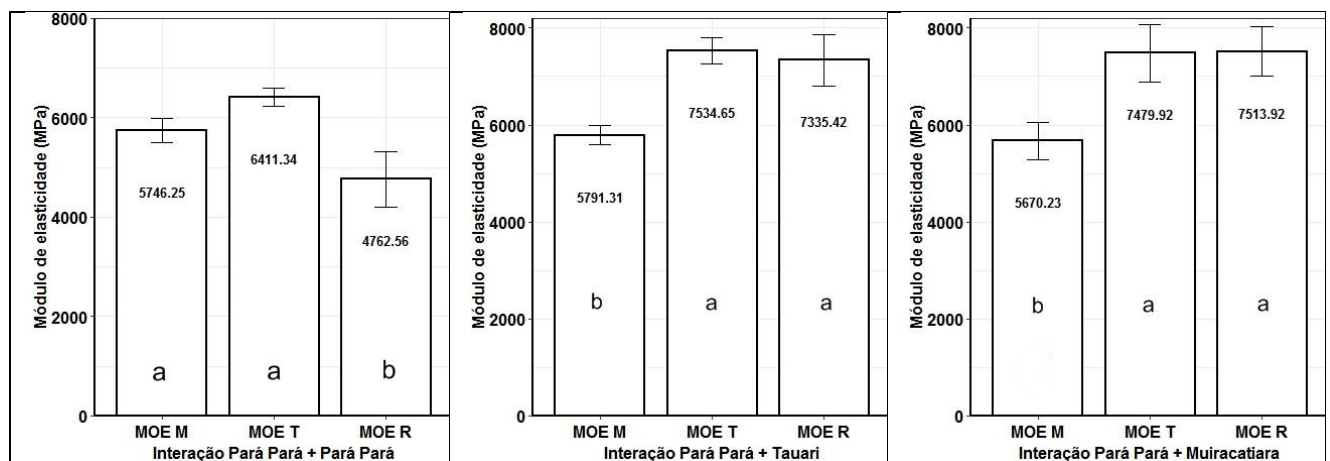


**Figura 22.** Curvas geradas durante o ensaio de resistência da linha de cola ao esforço de cisalhamento para: a – Pará Pará x Tauari e b – Pará Pará x Muiracatiara

Observa-se para o tratamento com Muiracatiara um comportamento mais “instável” durante o ensaio de cisalhamento. Ressalta-se que inicialmente alguns corpos de prova foram perdidos durante o ensaio por conta dos picos de tensão x deformação apresentados pelos corpos de prova. Ao primeiro indicativo de queda da resistência, a máquina de ensaios encerrava automaticamente o ensaio, identificando aquela queda como uma ruptura. Após a mudança no script para encerramento manual dos ensaios, as curvas conseguiram ser geradas até a ruptura real. Os picos apresentados podem ser reflexos da já discutida possível colagem menos eficaz da madeira de Muiracatiara assim como à natureza elástica do poliuretano. Tendo em mente que o mesmo poliuretano foi empregado na colagem dos cps de Pará Pará x tauari, e que estes corpos de prova não apresentaram mesma instabilidade durante os ensaios, a hipótese ligada às individualidades da madeira se apresentam mais plausíveis. Os apêndices a e b apresentam o relatório completo dos ensaios de cisalhamento na linha de cola para estes dois tratamentos.

## 5.6. Características mecânicas dos corpos de prova de flexão estática colados

A comparação entre os valores de módulo de elasticidade está demonstrada na figura:



**Figura 23.** Gráficos com a comparação entre o valor da médio do MOE das lamelas (MOE M), do MOE teórico da viga calculado (MOE T) e do MOE obtido no ensaio de flexão estática (MOE R). Colunas com mesma letra não apresentam diferença estatística segundo o teste tukey com erro de 5%. CVs foram respectivamente: 12,99%, 33,6% e 14,97%. Barras de erro correspondem ao desvio padrão.

A partir da análise estatística inicial, observa-se que para vigas com lamelas de reforço de Tauari e Muiracatiara, não houve diferença estatística entre os valores de MOE teórico e MOE R. Assim, pode-se constatar que para tais tratamentos, a equação para determinar o MOE de vigas teóricas previu de maneira aceitável o possível valor desta propriedade. Para as vigotas confeccionadas exclusivamente com madeira de *Jacaranda sp.*, no entanto, a equação não foi eficaz, tendo em vista a existência de diferença estatística entre o valor teórico e o obtido através do ensaio.

As vigotas com lamelas externas de Pará Pará apresentaram diminuição no valor do MOE obtido por ensaio em relação a tanto ao valor calculado quanto à média de moe das lamelas. As de Tauari e Muiracatiara, em contrapartida tiveram um aumento de 32 e 26% em relação ao valor médio das lamelas usadas. É importante frisar que ambos os aumentos foram reflexo do aumento de 10mm na altura total das vigotas, o que acabou influenciando o momento de inércia da peça. Contudo a melhora na rigidez também pode ter ocorrido em função da qualidade mecânica das madeiras utilizadas como revestimento. Considerando a altura média das vigas de 110mm, podemos concluir que para as vigotas com reforço diferente de Pará Pará, o aumento de 10% na altura equivaleu a um aumento de 32% e 26% na sua rigidez.

Ao comparar com os dados da madeira maciça (valores da caracterização), a solidarização de lamelas de Pará Pará somada às lamelas externas apresentaram aumento no valor de rigidez na flexão estática de respectivamente 8,2 e 10,4% para Tauari e Muiracatiara. O  $m_{or}$  na flexão estática para a madeira de Pará Pará era de 35,94 MPa. A madeira colada do material aumentou para 38,39 (CV = 7,04%) e 40,42 Mpa (CV = 14,5%) respectivamente para os mesmos tratamentos, o que equivaleu a um aumento de 6,75% e 12,4% no valor da variável.

Técnicas de reforço em vigas de madeira não são incomuns em literatura, contudo, a maioria delas trabalha com reforço utilizando materiais diferentes de madeira justamente por conta das diferentes propriedades que os distintos materiais proporcionam para a peça final. Há, entretanto, trabalhos que utilizando camadas externas provenientes de material lignocelulósico. É o caso de Dziurka et al. (2022) e Derkowski et al. (2022). No primeiro trabalho, os pesquisadores utilizaram LVL e Plywood como camada externa posicionada na região de tração de vigas de 8 lamelas de Pinus, gerando aumento de aproximadamente 30% na resistência à flexão estática. O segundo trata da produção de vigas MLC de Pinus com uma camada de *Fagus sylvatica* L ou *Quercus robur* L. localizada na região de tração. Neste, a presença da lamela de Faia (*Fagus sylvatica* L) e Carvalho (*Quercus robur* L) gerou um aumento de cerca de 70% no MOR em relação a vigas produzidas apenas com madeira de Pinus. Ambos os trabalhos geraram aumento maior do que o observado em nosso experimento. Ressalta-se, no entanto que para os dois trabalhos, as lamelas de reforço utilizadas possuíam quase quatro vezes maior espessura em relação às lamelas externas de Tauari e Muiracatiara.

## 5.7. Valores ajustados de MOE

Após os ensaios de flexão estática, observou-se na região de compressão das vigas vestígios de esmagamento concentrados na região do cutelo. Em alguns corpos de prova os esmagamentos chegavam a ultrapassar boa parte da lamela de reforço da região de compressão, como observado nas imagens abaixo.

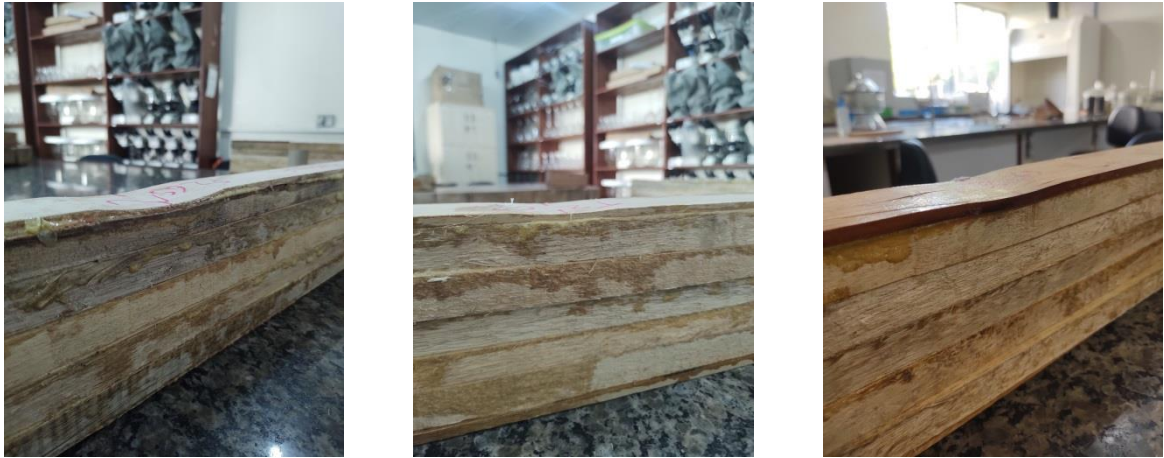


Figura 24. Esmagamento na lamela de reforço localizada na área de compressão das vigas ensaiadas

Considerando a presença dessa forma de falha na peça, presume-se que o vão utilizado nos ensaios foi curto demais, de modo que a tensão se concentrou demais, gerando um esmagamento que submeteu as lamelas de reforço a um esforço de compressão normal.

A equação para estimar o MOE de uma viga teórica não funcionou para as vigas com lamelas de reforço de Pará Pará pelo fato de que a espécie, das três utilizadas neste experimento, é que possui os menores valores de suas propriedades mecânicas, não gerando grande resistência ao esforço de compressão normal concentrado na região onde o cutelo aplicava a força. Conseqüentemente, o desempenho mecânico da viga foi comprometido.

Os valores de MOE ajustados após a obtenção das curvas sem influencia do esmagamento estão apresentados na figura 25.

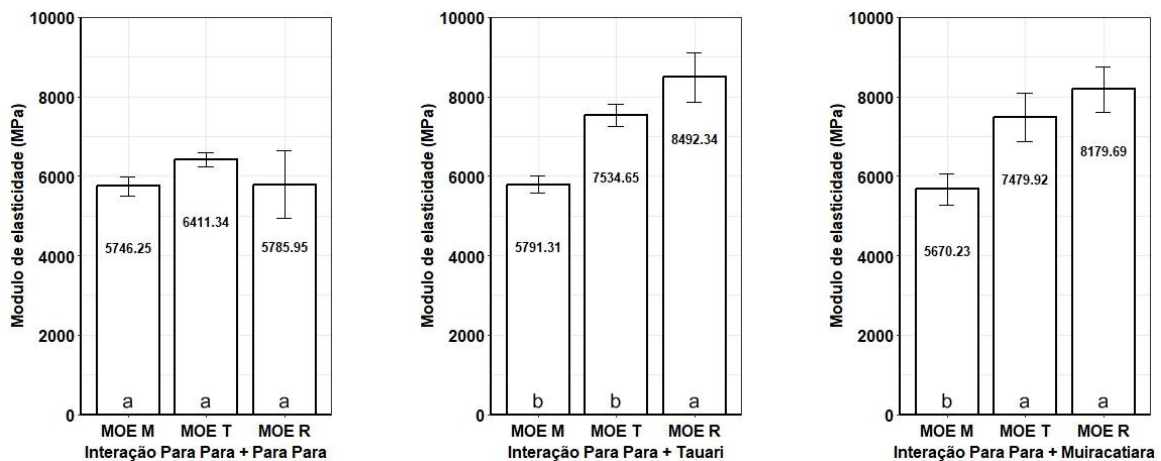


Figura 25. Dados de MOE R após ajustes em comparação com os valores anteriores. Colunas com mesma letra não apresentam diferença estatística segundo o teste Tukey com erro de 5%. Barras de erro correspondem ao desvio padrão.

O ajuste das curvas demonstrou uma tendência de aumento de MOE inversamente proporcional à densidade da espécie da madeira utilizada em cada lamela de reforço. Para a interação Pará Pará + Pará Pará, o aumento de MOE foi de cerca de 21,48% em relação ao valor original, sendo a maior porcentagem ganha, seguido da interação Pará Pará + Tauari, com um aumento de 15,7%, e por último a interação Pará Pará + Muiracatiara, com 8,86% de aumento.

O fato de que após o ajuste dos valores, não houve mais diferença estatística entre o MOE calculado e o MOE obtido no ensaio para as vigas que utilizaram lamelas de reforço de Para Para, reforça a ideia de que o esmagamento comprometeu o desempenho mecânico das vigas.

Após os ajustes, a equação usada para gerar o MOE de uma viga teórica conseguiu prever de maneira aceitável o MOE real. Apenas Tauari apresentou diferença estatística quando comparados os valores de do MOE teórico e MOE real.

## 5.8. Peso específico das peças

A relação peso/resistência é um fator importante no setor de construção civil ao dimensionar a peça a ser utilizada. A tabela 1 apresenta os valores de massa e sua variação, dos elementos estruturais.

**Tabela 2.** Variação de massa e rigidez em função da adição das lamelas tratamento em comparação com o valor médio do MOE das lamelas utilizadas em cada vigota

<b>Núcleo (g)</b>	<b>Lamelas externas</b>	<b>Massa (g)</b>	<b>Ganho de massa (%)</b>	<b>Variação de rigidez (%)</b>
2930	Pará Pará	323	11	-11
	Tauari	681	23	22
	Muiracatiara	845	28	32

O peso médio de uma vigota de Pará Pará colada sem nenhuma lamela fina foi de 2930g. A massa média das duas lamelas finas é de 323g para Pará Pará, 681,83g para Tauari e 845,41g para Muiracatiara. O Aumento da massa da viga para cada tratamento foi de 11, 23 e 28% respectivamente. Dessa forma, as vigotas de Muiracatiara tiveram um aumento de 32% no valor de MOE para um aumento de 28% na sua massa final, enquanto as de Tauari aumentaram 26% seu MOE para um aumento de 23% de massa.

Quanto à relação aumento de massa/aumento de rigidez, para cada 1% de massa aumentado, tauari gerou um ganho de 1,15% na rigidez enquanto muiracatiara contou com um aumento de 1,45% do seu MOE.

É importante frisar que em função das dimensões relativamente pequenas das lamelas externas, a viabilidade de utilização de madeiras nativas de alta resistência para compor esses elementos estruturais se justifica ainda se consideramos a grande quantidade de madeiras de galhos dessas espécies é deixada na área de manejo durante a colheita florestal. Estima-se que de 2009 até 2015, cerca de 900,000 m<sup>3</sup> de madeiras nobres foram abandonados nas áreas de manejo madeireiro (MOREIRA et al., 2022). A utilização dessa matéria prima para reforço de elementos estruturais representaria uma forma de melhorar o rendimento da colheita de madeira na região amazônica.

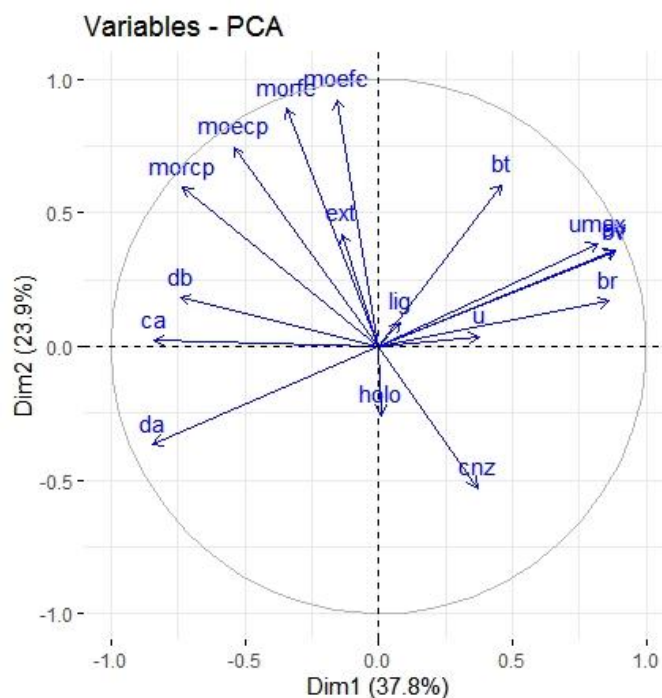
## 5.9. Análise estatística: relação entre as propriedades

### 5.9.1. Dos valores de caracterização mecânica

Os valores obtidos nos ensaios de caracterização mecânica foram submetidos à Análise de Componentes Principais (PCA) a fim de verificar a existência ou não de relações entre as propriedades entre si. A tabela 3 apresenta os dados de variância explicada acumulada enquanto figura 18 demonstra as relações entre as variáveis através das componentes:

**Tabela 3.** Variância explicada acumulada para cada componente principal

Componentes Principais	Variância Explicada (%)	Variância Explicada Acumulada (%)
PC 1	37.81540892	37.81541
PC 2	23.85109776	61.66651
PC 3	18.31436901	79.98088
PC 4	8.19781764	88.17869
PC 5	5.26701088	93.4457
PC 6	2.74252817	96.18823
PC 7	1.74831165	97.93654
PC 8	1.43189038	99.36843
PC 9	0.46944168	99.83788
PC 10	0.09733557	99.93521
PC 11	0.06478834	100



**Figura 26.** Gráfico de vetores na Análise das Componentes principais

O gráfico de variância acumulada demonstra que as componentes 1 e 2 explicam sozinhas cerca de 60% da variação. Quando se considera a terceira componente, a variância explicada acumulada alcança os 80%. A partir da PCA, podemos observar a relação inversamente proporcional entre o teor de umidade máxima e as densidades básica e principalmente a aparente, corroborando a influência já explicada anteriormente dos espaços vazios da



madeira no teor de umidade máximo (SKAAR, 1984). Extrativos muitas vezes afetam o teor de umidade por conta da natureza hidrofóbica de alguns deles, de modo que a maior quantidade desses extrativos afeta a higroscopicidade da madeira, como já discutido anteriormente. Neste trabalho os extrativos não demonstram ter relação com os teores de umidade avaliados, portanto, para este caso, não interferem na absorção de água pela madeira. Entretanto, como não conhecimento da natureza dos extrativos desta madeira, recomenda-se a realização de ensaios de resistência ao cisalhamento na linha de cola para averiguar de fato se há influência dos extrativos presentes na madeira estudada no processo de colagem. A relação inversamente proporcional entre as contrações e a densidade vai contra a teoria, visto que em tese, quanto mais densa a madeira é, maior é o nível da contração. Lignina e Holocelulose representaram bem pouco da variação em ambas as componentes. Isso pode ter sido causado pela variação intrínseca do material em função do lote corresponder a três árvores diferentes, além das demais variações inerentes à heterogeneidade dos indivíduos.

### 5.9.2. Dos elementos estruturais

Os valores de MOE e MOR na flexão estática e o valor da resistência no cisalhamento na linha de cola foram submetidos ao teste de correlação pelo método de Pearson.

Nenhuma das variáveis avaliadas no teste obteve relação com o valor de cisalhamento na linha de cola. MOE na flexão e resistência ao cisalhamento tiveram valor P de 0.2901, enquanto a interação MOR na flexão e MOR no cisalhamento obteve valor P de 0.6404. Ambas as relações foram estatisticamente invalidas.. Como discutido anteriormente, a variação do MOE e MOR não gerou diferença significativa entre os tratamentos de muiracatiara e tauari, todavia, a resistência ao cisalhamento na linha de cola não acompanhou a variação na flexão, tendo diferença estatística. Somado a isso tem-se agora a ausência de relação entre o valor de resistência ao cisalhamento das vigotas com a resistência e rigidez das mesmas. Dessa forma, pode-se inferir que nem a resistência ao cisalhamento do núcleo de Pará Pará, nem a da interação das lamelas externas com as adjacentes está interferindo de maneira significativa na resistência e rigidez das vigotas. Isso corrobora a idéia já apresentada anteriormente de que o aumento da resistência está atrelado basicamente ao reforço obtido pelas lamelas finas nos locais estratégicos (extremidades superiores e inferiores das vigotas). MOE e MOR na flexão estática apresentaram relação positiva de 0.745 (valor P - 0.03393). Essa relação já era esperada, tendo em vista que normalmente os mesmos fatores (densidade, anatomia, orientação do cp etc) que afetam a variação de uma propriedade também afetam a outra.

## 6. CONCLUSÃO

A madeira de *Jacaranda sp.* possui características tecnológicas similares a outras madeiras de classe de densidade baixa.

Com o processo de colagem, peças de Pará Pará apresentaram resistência ao cisalhamento na linha de cola similar ao da madeira em questão na forma maciça.

O vão utilizado se mostrou curto demais, gerando esmagamento das lamelas de revestimento por conta da concentração de tensão.

O cálculo do MOE teórico de vigas foi eficaz para os tratamentos de Tauari e Muiracatiara. Após o ajuste dos dados, a viga não subestimou nenhum MOE real, de modo que as vigas com lamela de reforço de Para Para não tiveram diferença estatística dentre os tratamento intraespecíficos.

A aplicação de camadas de madeira densa como reforço em elementos estruturais confeccionados com Pará Pará garantiram aumento na rigidez e da resistência da peça.

A colagem de substratos de Pará Pará combinados com os de tauari foram os que apresentaram maior resistência ao cisalhamento na linha de cola.

Recomendam-se estudos sobre o comportamento da espécie durante o processo de secagem a fim de evitar o surgimento de empenamentos e outros defeitos de secagem.



## REFERÊNCIAS

- ABENSUR, F.O.; MELO, M.F.F.; RAMOS, M.B.P; VARELA, V.P.; BATALHA, L.P. **Tecnologia de sementes e morfologia da germinação de *Jacaranda copaia* D. Don (bignoniaceae)**. Revista Brasileira de Biociências, Porto Alegre, v. 5, supl. 2, p. 60-62, jul. 2007.
- ALMEIDA, Alexandre Nascimento de et al. Mercado de madeiras tropicais: substituição na demanda de exportação. 2010.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard methods of testing small clear specimens of timber: ASTM D 143. **Annual book of ASTM standards**, v. 4, n. v. 10, 1994.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test methods for strength properties of adhesive bonds in shear by compression loading. ASTM D905-08. **Annual book of ASTM standards**, v. 15, 1994.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test methods for preparation of extractive-free wood. ASTM D 1107. **Annual Book of ASTM standards**, v. 4, 2010.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test methods Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal. ASTM D1762 – 84. **Annual Book of ASTM standards**, 2007.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Acid-Insoluble Lignin in Wood. ASTM D 1106 -96. **Annual Book of ASTM standards**, 2001.
- AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS. ASTM Standard Terminology of Structural Sandwich Constructions (C274-07). West Conshohocken, PA: ASTM International 2007
- ANSHARI, B. et al. Structural behaviour of glued laminated timber beams pre-stressed by compressed wood. **Construction and Building Materials**, v. 29, p. 24-32, 2012.
- AZAMBUJA, M. A. **Estudo experimental de adesivos para fabricação de madeira laminada colada: avaliação da resistência de emendas dentadas, da durabilidade e de vigas**. 2006. Tese (Doutorado) – IQSC, São Carlos, 2006.
- Azevedo, E. C. **Síntese e Caracterização de Compósito Piezo elétrico Polímero Cerâmica 0-3**. 1999. Dissertação (Mestrado) – São Carlos, 1999
- BALBONI, B. M.; BATISTA, A. S.; GARCIA, J. N. Evaluating the potential for timber production of young forests of Eucalyptus spp. clones used for bioenergy: wood density and mechanical properties. **Australian Forestry**, v. 84, n. 3, p. 122-132, 2021.
- BIKERMAN, Jacob Joseph. **The science of adhesive joints**. Elsevier, 2013.
- BIANCHE, J. J. **Interface madeira-adesivo e resistência de juntas coladas com diferentes adesivos e gramatura**. 2014. Tese (Doutorado) – UFV, Viçosa, 2014.
- BIANCHE, Juliana Jerásio et al. Shear strength in the glue line of Eucalyptus sp. and Pinus sp. wood. **Revista Árvore**, v. 40, p. 1109-1117, 2016.
- BODIG, Jozsef; JAYNE, Benjamin A. Mechanics of wood and wood composites. 1982.
- BOURREAU, Damien et al. Feasibility of glued laminated timber beams with tropical hardwoods. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 71, n. 5, p. 653-662, 2013.
- Buchanan, M.A. Extraneous components of wood. **The chemistry of wood**. Editado por Browning, B.L. Robert Krieger Publishing Company. New York: 1981. 689p.

- Burger, M. L.; Richter, H. G. 1991. **Anatomia da madeira**. São Paulo. Ed. Nobel, 151p.
- CAHUANA, Leif Armando PORTAL et al. DENDROCRONOLOGÍA DE Jacaranda copaia QUE CONTIENE REGISTRO ENSO EN MADRE DE DIOS, PERÚ. **Nativa**, v. 8, n. 4, p. 572-578, 2020
- CALLISTER JR, Willian D.; RETHWISCH, David G. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**, 7 Edição. **São Paulo**, 2008.
- CAVALHEIRO, Fernando Nunes et al. Caracterização de madeira de Eucalyptus urograndis e adesivo a base de óleos vegetais visando o emprego em peças de madeira laminada colada. 2021.
- CERCHIARI, Aline Maria Faria. **Aprimoramento do poliuretano a base de óleo de mamona na manufatura de Madeira Laminada Colada (MLC) de Cupressus lusitanica, Corymbia maculata e Hevea brasiliensis**. 2013. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- CORRÊA, M. P. 1984. **Dicionário das Plantas Úteis do Brasil e das Exóticas Cultivadas**. Rio de Janeiro: Imprensa Nacional, 1926-1978. v. 2. Ministério da Agricultura. Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Florestal. 707 p.
- Da LUZ, Pablo Antônio Souza Amorim; ANDRADE, Fernando Wallase Carvalho; PINTO, Tatiane Inácio; BULIGON, Ediane Andreia. **Levantamento Botânico Quantitativo do Comércio de Madeiras Nativas no estado do Pará entre 2009 a 2015**. Livro de resumos do IV Simpósio Brasileiro Florestal, Aquidauana – MS 14-17 de set. de 2016.
- DE ARAÚJO, Henrique José Borges. **Relações funcionais entre propriedades físicas e mecânicas de madeiras tropicais brasileiras**. 2007.
- DE OLIVEIRA, Rafael GE et al. Analysis of glue line and correlations between density and anatomical characteristics of Eucalyptus grandis× Eucalyptus urophylla glulam. **Maderas. Ciencia y tecnología**, v. 22, n. 4, p. 495-504, 2020.
- DERIKVAND, Mohammad et al. What to do with structurally low-grade wood from Australia’s plantation eucalyptus; building application?. **BioResources**, v. 12, n. 1, p. 4-7, 2017.
- DERKOWSKI, Adam et al. Mechanical Characterization of Glued Laminated Beams Containing Selected Wood Species in the Tension Zone. **Materials**, v. 15, n. 18, p. 6380, 2022.
- DOS SANTOS, Cristiane Moreira Tavares; DEL MENEZZI, Cláudio Henrique Soares. Efeito da gramatura sobre a resistência ao cisalhamento da linha de cola de duas madeiras tropicais: seru (*Allantoma lineata*) e marupá (*Simarouba amara*). **Floresta**, v. 40, n. 2, 2010.
- DOS SANTOS, Joielan Xipaia et al. Anatomical characterization of wood marketed as “tauari”(Lecythidaceae) in Pará state, Brazil. **FLORESTA**, v. 50, n. 3, p. 1421-1429, 2020.
- DUARTE, Renata de Souza; CARRASCO, Edgar Vladimiro Mantilla. Avaliação do comportamento de ligações com parafusos auto-atarraxantes em vigas de MLC. 2004.
- DZIURKA, Dorota et al. GL Beams Reinforced with Plywood in the Outer Layer. **Materials**, v. 15, n. 11, p. 3976, 2022.
- EMBRAPA ORIENTAL. Parápará: *Jacaranda copaia*. **Embrapa Amazônia Oriental**, 2004.
- ELEOTÉRIO, Jackson Roberto; DA SILVA, Cláudia Mariana Kirchheim. Programas de secagem para marupá (*Simarouba amara*), Pará-Pará (*Jacaranda copaia*) e virola (*Virola surinamensis*). **Floresta**, v. 44, n. 2, p. 313-322, 2013.
- FAO. The state of the World’s forests-forest pathways to sustainable development. 2018.

- FALESI, I. C.; BITTENCOURT, ICFP de M.; BRASIL, E. C. Parapará (Jacaranda copaia Aublet D. Don). **Embrapa Amazônia Oriental-Capítulo em livro técnico (INFOTECA-E)**, 2020.
- FERNANDES, José. MORFOLOGIA DE Jacaranda copaia (AUBL.) D. DON (BIGNONIACEAE): UMA ESPÉCIE MEDICINAL EM ALTA FLORESTA, MATO GROSSO. **ENCICLOPÉDIA BIOSFERA**, v. 18, n. 37, 2021.
- Flora do Brasil 2020 em construção. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://reflora.jbrj.gov.br/reflora/floradobrasil/FB23618>>. Acesso em: 15 Out. 2020
- FOREST PRODUCTS LABORATORY (US). **Wood handbook: wood as an engineering material**. The Laboratory, 1987.
- FREITAS, Bruna Bandeira de; PINTO, Tatiane Inácio; ANDRADE, Fernando Wallase Carvalho; MOUTINHO, Victor Hugo Pereira. **Principais Espécies Madeireiras Comercializadas no Baixo Amazonas do Pará no Período de 2009 a 2015**. Livro de resumos do IV Simpósio Brasileiro Florestal, Aquidauana – MS 14-17 de set. de 2016.
- GACHET, María Salomé; SCHÜHLY, Wolfgang. Jacaranda—an ethnopharmacological and phytochemical review. **Journal of Ethnopharmacology**, v. 121, n. 1, p. 14-27, 2009.
- SRIVARO, Suthon; MATAN, Nirundorn; LAM, Frank. Stiffness and strength of oil palm wood core sandwich panel under center point bending. **Materials & Design**, v. 84, p. 154-162, 2015.
- GÉRARD, J. Specific features of tropical hardwoods bondability: adding values to secondary wood species and multi-species gluing. **Ann Génie Civil Bois Collage Struct**, v. 1, p. 15-30, 1999.
- GURGEL, Ely Simone Cajueiro et al. Jacaranda copaia (Aubl.) D. Don. subsp. spectabilis (Mart. ex A. DC) Gentry (Bignoniaceae): aspectos morfológicos do fruto, semente, germinação e plântula. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi Ciências Naturais**, v. 1, n. 2, p. 101-120, 2006.
- HENDRIK, Jessica et al. Properties of glued laminated timber made from fast-growing species with mangium tannin and phenol resorcinol formaldehyde adhesives. **Journal of the Korean Wood Science and Technology**, v. 47, n. 3, p. 253-264, 2019.
- HOADLEY, R. Bruce. **Understanding wood: A Craftsman's Guide to Wood Technology**. 10 ed. Newtown: Taunton Press, 2000. 280 p.
- HSE, Chung-Yun; KUO, Mon-lin. Influence of extractives on wood gluing and finishing-a review. **Forest Products Journal 38 (1): 52-56**, 1988.
- IAWA COMMITTEE et al. IAWA list of microscopic features for hardwood identification. **IAWA Bull. ns**, v. 10, n. 3, p. 219-332, 1989.
- INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS (IBAMA). Disponível em: <<http://www.ibama.gov.br/lpf/madeira>>.
- ISSA, Camille A.; KMEID, Ziad. Advanced wood engineering: glulam beams. **Construction and Building Materials**, v. 19, n. 2, p. 99-106, 2005.
- IWAKIRI, Setsuo et al. Avaliação da qualidade de juntas coladas de seis espécies de madeiras tropicais da amazônia. **FLORESTA**, v. 46, n. 4, p. 455-464, 2017.
- Jacaranda in Flora do Brasil 2020 em construção*. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://reflora.jbrj.gov.br/reflora/floradobrasil/FB114117>>. Acesso em: 09 nov. 2020
- JESUS, J. M. H. **Estudo do adesivo poliuretano à base de mamona em madeira laminada colada (MLC)**. 2000. Tese (Doutorado) – USP, São Carlos, 2000

- JIANG, Y. et al. Bonding of various wood species—studies about their applicability in glued laminated timber. In: **Materials and Joints in Timber Structures**. Springer, Dordrecht, 2014. p. 365-374.
- KAMKE, Frederick A.; LEE, Jong N. Adhesive penetration in wood—a review. **Wood and Fiber Science**, p. 205-220, 2007.
- KOLLMANN, Franz F. P.; KUENZI, Edward W.; STAMM, Alfred J.. **Principles of wood science and technology: II Wood Based Materials**. 1 ed. Germany: Springer, 1975. 703 p.
- LIMA, C. K. P. et al. **Características anatômicas e química da madeira de clones de eucalyptus e sua influência na colagem**. CERNE, Lavras, v. 13, n. 2, p. 123-129, fev./mar. 2007.
- Lepage, E.S.; Oliveira, A.M.F.; Lelis, A.T.; Lopez, G.A.C.; Chimello, J.P.; Oliveira, L.C.S.; Cañedo, M.D.; Cavalcante, M.S.; Ielo, P.K.Y.; Zanotto, P.A. Milano, S. **Manual de preservação de madeiras**. São Paulo: IPT, 2ª edição, 1986.
- LOBÃO, Moisés Silveira; GOMES, Adriana. Qualidade da adesão de madeira de eucalipto em corpos-de-prova colados em dois diferentes planos e densidades. **Cerne**, v. 12, n. 2, p. 194-200, 2006.
- LORENZI, HARRI. **Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas do Brasil**, vol. 1/ Harri Lorenzi. 4. Ed. Nova Odessa, SP: Instituto Plantarum, 2002.
- LOHMANN, L. G.; FONSECA, L. H. M. ; KAEHLER, M.; FARIAS-SINGER, FIRETTI, F.; et al. 2020. Bignoniaceae in Flora do Brasil 2020. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://floradobrasil.jbrj.gov.br/reflora/floradobrasil/FB112305>>. Acesso em: 01/10/2022
- MATHEUS D'OLIVEIRA, Pedro; LOBATO GONÇALVES, Syanne; AMANAJÁS PENA, Heriberto W. Setor madeireiro: abordagem da dinâmica econômica do emprego, renda e concentração de estabelecimentos no estado do Pará, Amazônia, Brasil. **Observatorio de la Economía Latinoamericana**, n. noviembre, 2018.
- MARINHO, N. P.; NASCIMENTO, E. M.; NISGOSKI, S.; MAGALHÃES, W. L. E.; NETO, S. C.; AZEVEDO, E. C. Caracterização Física e Térmica de Compósito de Poliuretano Derivado de Óleo de Mamona Associado com Partículas de Bambu. **Polimeros**, v. 23, n 2, pp. 201-205, 2013
- MCKEEVER, David B. Engineered wood products: a response to the changing timber resource. **Pacific Rim Wood Market Report**, v. 123, n. 5, p. 15, 1997.
- Metcalfe, C. R.; Chalk, L. **Anatomy of the dicotyledons, wood structure and conclusion of the general introduction**. Clarendon Press, Oxford, UK, 1983. 297pp.
- MELO, Luiz Eduardo de Lima et al. Variação anatômica no lenho de *Astronium lecontei* Ducke. **Floresta e Ambiente**, v. 20, p. 135-142, 2013.
- MELOTTO, Marco Aurélio. **Estudo do tempo de adesão, da temperatura e da pressão de colagem na tensão limite de cisalhamento de uniões de madeira de *Eucalyptus grandis* coladas com adesivo sem solvente**. 2007. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- MONTEIRO, Sandra RS et al. Mechanical performance of glulam products made with Portuguese poplar. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 78, n. 5, p. 1007-1015, 2020.
- MÖLLEKEN, Richard Eduard et al. **Aplicação do adesivo poliuretano derivado do óleo de mamona na obtenção de painéis de madeira colados lateralmente**. 2017. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

- MONTAGNINI, Florencia; UGALDE, Luis; NAVARRO, Carlos. Growth characteristics of some native tree species used in silvopastoral systems in the humid lowlands of Costa Rica. **Agroforestry systems**, v. 59, n. 2, p. 163-170, 2003
- MOREIRA, Letícia da Silva et al. Wood from Forest Residues: Technological Properties and Potential Uses of Branches of Three Species from Brazilian Amazon. **Sustainability**, v. 14, n. 18, p. 11176, 2022.
- NAVES, Rafaela Pereira et al. Tropical forest management altered abundances of individual tree species but not diversity. **Forest Ecology and Management**, v. 475, p. 118399, 2020.
- NIKLAS, Karl J. Plant biomechanics: an engineering approach to plant form and function. 13 ed. Chicago: University of Chicago Press, 1992. 607 p
- NOGUEIRA, Davi. A versatilidade da madeira laminada colada. **CONSTRUINDO**, v. 9, n. 01, p. 1-14, 2017.
- ONG, C. B. Glue-laminated timber (Glulam). **Wood Composites**, p. 123-140, 2015.
- PETTERSEN, Roger C. The chemical composition of wood. **The chemistry of solid wood**, v. 207, p. 57-126, 1984.
- PEREIRA, J.A.; **As relações da estrutura anatomica do lenho com as propriedades físicas e mecânicas e os usos das madeiras**; Rodriguésia, vol 11, 1937, p. 337-341.
- PFEIL, W.; PFEIL, M. **Estruturas de Madeira**. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos Editora, 2003
- PIMENTEL, Thalles Santiago et al. Resistência ao cisalhamento da linha de cola em madeiras tropicais amazônicas. 2021.
- POUBEL, Dallyene da Silva et al. Efeito da termoretificação nas propriedades físicas e químicas da madeira de *Pinus caribaea*. **Cerne**, v. 19, p. 391-398, 2013.
- R Development Core Team (2020) “R: a language and environment for statistical computing”. R Foundation for Statistical Computing, Vienna. <http://www.r-project.org/>. Acesso em 03 de abril de 2020
- Rasband WS (1997–2011) ImageJ. U.S. National Institute of Health, Bethesda, Maryland. <http://imagej.nih.gov/ij/>. Acesso em 03 de abril de 2020.
- REIS, Leonardo Pequeno et al. Avaliação do potencial madeireiro na Floresta Nacional do Tapajós após 28 anos da exploração florestal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 30, n. 64, p. 265-265, 2010.
- ROCHA, M. F. V. et al. Effects of plant spacing on the physical, chemical and energy properties of Eucalyptus wood and bark. **Journal of Tropical Forest Science**, p. 243-248, 2016.
- RODRIGUES, Eliana. Plants and animals utilized as medicines in the Jaú National Park (JNP), Brazilian Amazon. **Phytotherapy Research: An International Journal Devoted to Pharmacological and Toxicological Evaluation of Natural Product Derivatives**, v. 20, n. 5, p. 378-391, 2006.
- ROJAS, Luis Quintanar et al. ANISOTROPIA DA CONTRAÇÃO E INCHAMENTO DA MADEIRA: UMA ABBORDAGEM TECNOLÓGICA. MADEIRAS NATIVAS E PLANTADAS DO BRASIL: QUALIDADE, PESQUISAS E ATUALIDADES-VOLUME 2, v. 2, n. 1, p. 81-100, 2021.
- ROTH, Ingrid; LINDORF, Helga. **South American medicinal plants: botany, remedial properties and general use**. Springer Science & Business Media, 2013.
- SANTANA, Marcos Antonio Eduardo; OKINO, Esmeralda Yoshico Arakaki. Chemical composition of 36 Brazilian Amazon forest wood species. 2007.
- SANTOS, José António dos; PINHO, C. Marques. Avaliação do módulo de elasticidade à flexão como ferramenta do controlo da qualidade em vigas lameladas coladas em madeira. In: **CIMAD 04, 1º Congresso Ibérico, A Madeira na Construção**. 2004.



- SCHEIKL, M. et al. 4 Bonding Process. **COST Action E13**, p. 89, 2003
- SCREMIM, Cristofer Bernardi. Avaliação sobre a diferença de propriedades mecânicas do cerne e do alburno de mesmas espécies de madeira. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
- SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO & INSTITUTO DO HOMEM E MEIO AMBIENTE DA AMAZÔNIA (Belém). Ministério do Meio Ambiente (Org.). **A atividade madeireira na Amazônia brasileira: produção, receita e mercados**. Belém: Departamento Nacional do Livro, 2010. 26 p. Disponível em: <[http://www.mma.gov.br/estruturas/sfb/\\_arquivos/miolo\\_resexec\\_polo\\_03\\_95\\_1.pdf](http://www.mma.gov.br/estruturas/sfb/_arquivos/miolo_resexec_polo_03_95_1.pdf)>. Acesso em: 15 out. 2020.
- Serviço Florestal Brasileiro. 2019. Brazilian forests at a glance. Brasília, Ministério da Agricultura, Serviço Florestal Brasileiro. (Citado 28 de dezembro 2021). <https://www.florestal.gov.br/documentos/publicacoes/4262-brazilian-forests-at-a-glance-2019/file>
- SKAAR, C. Wood-water relationships.
- SOMANI, Keyur P. et al. Castor oil based polyurethane adhesives for wood-to-wood bonding. **International Journal of Adhesion and adhesives**, v. 23, n. 4, p. 269-275, 2003.
- SRIVARO, Suthon; MATAN, Nirundorn; LAM, Frank. Stiffness and strength of oil palm wood core sandwich panel under center point bending. **Materials & Design**, v. 84, p. 154-162, 2015.
- TIENNE, Delaine Lima da C. et al. Qualidade de adesão de juntas de madeira de Pinus coladas em condições simuladas de serviço interna e externa. **Floresta e Ambiente**, v. 18, n. 1, p. 16-29, 2012.
- TONINI, Helio; OLIVEIRA JUNIOR, Moisés Mourão Cordeiro de; SCHWENGBER, Dalton. Crescimento de espécies nativas da Amazônia submetidas ao plantio no estado de Roraima. **Ciência Florestal**, v. 18, p. 151-158, 2008
- TRIANOSKI, Rosilani et al. Avaliação da estabilidade dimensional de espécies de pinus tropicais. **Floresta e Ambiente**, v. 20, n. 3, p. 398-406, 2013.
- ULKER, Onur; IMIRZI, Ozgür; BURDURLU, Erol. The effect of densification temperature on some physical and mechanical properties of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). **BioResources**, v. 7, n. 4, p. 5581-5592, 2012.
- VILAR, W. D. **Química e Tecnologia dos Poliuretanos**. 3. ed. Rio de Janeiro: Vilar Consultoria, 2004
- WILCZAK, Luana. **Avaliação do comportamento mecânico do adesivo poliuretano derivado de óleo de mamona utilizado na produção de painéis compensados**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
- ZANGIÁCOMO, André Luiz; LAHR, Francisco Antonio Rocco. Emprego de espécies tropicais alternativas na produção de elementos estruturais de madeira laminada colada. **Cadernos de Engenharia de Estruturas, São Carlos**, v. 9, n. 4, p. 103-131, 2007.
- Zenid, G.J. Comercialização de Madeiras no Brasil: A importância da correta identificação das espécies. **Tecnologias aplicadas ao setor madeireiro III**. Suprema Gráfica e Editora. Jerônimo Monteiro – ES. p 73 – 97. 2008.
- ZEPPEFELD, G.; GRUNWALD, D. Klebstoffe in der Holzund Möbelindustrie. 2. Auflage. **DRW-Verlag, Leinfelden-Echterdingen**, 2005.



