



UNIVERSIDADE ESTADUAL DA REGIÃO TOCANTINA DO MARANHÃO
CAMPUS AÇAILÂNDIA
CENTRO DE CIÊNCIAS HUMANAS, SOCIAIS, TECNOLÓGICAS E LETRAS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL BACHARELADO

VINÍCIUS DE SOUSA LIMA

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO MECÂNICO DE VIGAS DE LVL VISANDO UMA
ALTERNATIVA PARA A INDÚSTRIA DE COMPENSADOS DE PARICÁ (*Schizolobium
parahyba var. amazonicum* (Huber x Ducke))**

Açailândia-MA

2023

VINÍCIUS DE SOUSA LIMA

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO MECÂNICO DE VIGAS DE LVL VISANDO UMA
ALTERNATIVA PARA A INDÚSTRIA DE COMPENSADOS DE PARICÁ (*Schizolobium
parahyba var. amazonicum* (Huber x Ducke))**

Artigo apresentado ao Curso de Engenharia Civil Bacharelado do Centro de Ciência Humanas, Sociais, Tecnológicas e Letras da Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão, *campus* Açailândia, como requisito para o grau de bacharelado em Engenharia Civil.

Açailândia-MA

2023

VINÍCIUS DE SOUSA LIMA

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO MECÂNICO DE VIGAS DE LVL VISANDO UMA ALTERNATIVA PARA A INDÚSTRIA DE COMPENSADOS DE PARICÁ (*Schizolobium parahyba var. amazonicum* (Huber x Ducke))

Artigo apresentado ao Curso de Engenharia Civil Bacharelado do Centro de Ciência Humanas, Sociais, Tecnológicas e Letras da Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão, *campus* Açailândia, como requisito para o grau de bacharelado em Engenharia Civil.

Aprovado em ____/____/____

BANCA EXAMINADORA

Me. João Miguel Santos Dias (Orientador)
Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão

Dr. Sandro Fábio César
Universidade Federal da Bahia

Dr. Júlio César Molina
Escola de Engenharia de São Carlos – USP

Avaliação do desempenho mecânico de vigas de LVL visando uma alternativa para a indústria de compensados de paricá (*Schizolobium parahyba var. amazonicum* (Huber x Ducke))

*Evaluation of the mechanical performance of LVL beams aiming an alternative for the paricá plywood industry (*Schizolobium parahyba var. amazonicum* (Huber x Ducke))*

Vinicius de Sousa Lima¹; João Miguel Santos Dias²

¹ Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão, Engenharia Civil, Açailândia/MA, Brasil. Email: viniciuslima.20180040313@uemasul.edu.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5875-2980>

² Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão, Engenharia Civil, Açailândia/MA, Brasil. Email: joao.dias@uemasul.edu.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8030-739X>

Resumo: O trabalho teve como objetivo determinar as propriedades físicas e mecânicas de painéis LVL de paricá (*Schizolobium parahyba var. amazonicum* (Huber x Ducke)) colados com resina ureia-formaldeído. Foram produzidos 6 painéis LVL com 17 lâminas de 2,5 mm de espessura, sendo 14 lâminas de paricá e 3 lâminas de marupá (*Simarouba amara*). Para a condição de umidade padrão de 12%, foram realizados ensaios de teor de umidade, densidades aparente e básica (caracterização física), resistências à compressão paralela e perpendicular às fibras, tração paralela às fibras, cisalhamento na linha de cola e flexão estática *flatwise* e *edgewise* (caracterização mecânica). Além disso, foram realizados ensaios de compressão paralela às fibras e cisalhamento na linha de cola do LVL na condição de saturação total da madeira. Os resultados mostraram que os painéis LVL se enquadraram na classe de resistência D20 e de média densidade. Foi observado o modo de ruptura do tipo frágil em todos os ensaios mecânicos, exceto nos ensaios de compressão paralela e perpendicular às fibras. O aumento do teor de umidade, decorrente da saturação total da madeira, influenciou de forma negativa nas resistências à compressão paralela às fibras e ao cisalhamento na linha de cola. O LVL apresentou desempenho mecânico compatível com as solicitações estruturais.

Palavras-chave: Madeira, LVL, paricá, caracterização física, caracterização mecânica.

Abstract: The objective of this work was to determine the physical and mechanical properties of paricá (*Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* (Huber x Ducke)) LVL panels bonded with urea-formaldehyde resin. Six LVL panels were produced with 17 sheets of 2.5 mm thick, 14 sheets of paricá and 3 sheets of marupá (*Simarouba amara*). For the standard temperature condition of 12%, tests were carried out on moisture content, apparent and basic densities (physical characterization), resistance to resistance parallel and perpendicular to the fibers, traction parallel to the fibers, shearing in the glue line and flatwise static bending and edgewise (mechanical characterization). In addition, saturation tests parallel to the fibers and shear tests were carried out in the LVL glue line in the condition of total saturation of the wood. The results appreciated that the LVL panels fall within the D20 strength class and medium density. The brittle type failure mode was observed in all mechanical tests, except in the parallel and perpendicular compression tests to the fibers. The increase in moisture content, due to the total saturation of the wood, negatively influences the resistance to the slope parallel to the fibers and to the shear strength in the glue line. The LVL presented a mechanical performance compatible with the substitute.

Keywords: Wood, LVL, paricá, physical characterization, mechanical characterization.

1. Introdução

A madeira serrada, como material utilizado em estruturas de edificações, acompanha o ser humano desde as suas primícias. A escolha desse material como elemento estrutural se deve às suas vantagens: estética, alta disponibilidade, velocidade de execução elevada em obras com repetição de elementos estruturais, fácil trabalhabilidade, resistência à oxidação, bom desempenho estrutural em situação de incêndio, durabilidade compatível com a vida útil de projeto de edificações e desempenho mecânico adequado para uso estrutural (DIAS, 2018).

No entanto, por ser um material higroscópico, a madeira serrada apresenta facilidade em absorver água do ambiente, podendo sofrer variações dimensionais decorrente de seu inchamento. Além disso, os elementos estruturais fabricados com esse material apresentam limitações em suas dimensões, sendo dependentes do diâmetro e altura da árvore, e estão susceptíveis à presença de

defeitos naturais de crescimento da madeira. Essas limitações podem ser contornadas através da modificação dessa matéria prima por processos industrializados, dando origem aos produtos engenheirados (LIMA *et al.*, 2022a). Segundo Lima *et al.* (2022b), os produtos engenheirados de madeira podem ser constituídos por lâminas, partículas, fibras ou lamelas de diferentes espécies de madeira, unidas através de adesivos sintéticos sob ação de pressão e temperatura.

Dias (2018) expõe que existem vários produtos de madeira engenheirada, dentre os quais se pode destacar os painéis compensados, que são compostos por lâminas com espessuras de 1,0 a 3,0 mm aglutinadas perpendicularmente entre si com adesivos estruturais. O compensado é destinado, sobretudo, às indústrias da construção civil, naval, moveleira e automotiva (APRE, 2020). De acordo com Silva *et al.* (2015) e Lima *et al.* (2022a), as indústrias de compensado se concentram na região Sul e Sudeste do Brasil e nordeste do Estado do Pará. Segundo ABIMCI (2019), a espécie de madeira mais utilizada na fabricação desse produto é o pinus (*Pinus spp.*), porém Vidaurre *et al.* (2018) referem que, no nordeste do estado do Pará, os compensados são produzidos com madeira de paricá (*Schizolobium parahyba var. amazonicum* (Huber x Ducke)).

De acordo com Silva *et al.* (2020), a madeira de paricá é a espécie nativa amazônica mais cultivada, uma vez que ela apresenta características apropriadas para as indústrias de laminação, tais como a baixa densidade, fácil trabalhabilidade, poucos defeitos naturais de crescimento e alta porosidade (COSTA *et al.*, 2020), além de possuir rápido crescimento em altura e diâmetro, possibilitando sua utilização em até sete anos após o plantio (VIDAURRE *et al.*, 2018).

Um produto de madeira engenheirada semelhante ao compensado é o LVL (*laminated veneer lumber*) que, segundo a norma ASTM D 5456:2006 - *Standard Specification for Evaluation of Structural Composite Lumber Products*, é composto por lâminas com espessuras até 6,4 mm, orientadas paralelamente entre si. Uma vez que o LVL apresenta as fibras orientadas em uma mesma direção, a sua rigidez e resistência mecânica, na direção longitudinal, é superior ao do compensado (MENDOZA *et al.*, 2017), tornando viável a sua utilização como elementos estruturais lineares.

No que concerne à caracterização do desempenho mecânico de LVL de paricá, Iwakiri *et al.* (2010a) e Costa (2015) estudaram o desempenho mecânico de corpos de prova (CPs) com espessuras de lâmina de 2,0 mm, coladas com fenol-formaldeído. Iwakiri *et al.* (2010a) verificaram que a produção de LVL de paricá é viável, uma vez que o seu desempenho mecânico foi similar aos painéis com *Pinus taeda* nas faces. Nos trabalhos de Melo e Del Menezzi (2014a), Melo e Del

Menezzi (2015a) e Melo e Del Menezzi (2015b) foram avaliadas, respectivamente, a influência das espessuras das lâminas (1,54 mm, 2,32 mm e 2,71 mm), do tipo de adesivo (PVAc, fenol-formaldeído e poliuretano) e da classificação das lâminas nas propriedades mecânicas dos painéis. Esses estudos mostraram que a diminuição das espessuras das lâminas, o uso do adesivo fenol-formaldeído e a pré-classificação das lâminas resultaram no aumento da resistência mecânica dos painéis.

Segundo Molina *et al.* (2013) o custo dos adesivos é um dos principais fatores que impedem o avanço da produção nacional de LVL. Segundo Silva *et al.* (2012), os adesivos fenólicos, comumente empregados na colagem de compensados, apresentam custo aquisitivo superior ao adesivo ureico. Assim sendo, como forma de propor uma alternativa econômica para a indústria de compensados da região nordeste do Pará, é conveniente verificar a viabilidade da utilização de LVL de paricá, sem que hajam impactos significativos na linha de produção. Por conseguinte, este trabalho teve como objetivo determinar as propriedades físicas e mecânicas de painéis LVL de paricá colados com resina ureia-formaldeído.

2. Metodologia

Foram produzidos 6 painéis de LVL, fornecidos pela empresa ADECO Indústria e Comércio de Compensados Ltda., do Grupo Arboris, com espessura final variável entre 37 e 38 mm, 2,28 m de comprimento e 1,22 m de largura. Em cada painel, foram usadas 14 lâminas da madeira de paricá e 3 lâminas da madeira de marupá (*Simarouba amara*), sendo a espessura das lâminas de 2,50 mm. Com o objetivo de impedir o encanoamento dos painéis, as lâminas de marupá foram dispostas perpendicularmente às lâminas de paricá (Figura 1). A espécie marupá foi escolhida para essa finalidade pois suas propriedades mecânicas de rigidez e resistência são superiores aos do paricá.

As lâminas foram coladas com resina ureia-formaldeído e prensadas durante 25 minutos com uma temperatura de 112 °C e pressão de 1,77 MPa. Dos 6 painéis, foram obtidos os CPs para realização da caracterização física e mecânica, conforme a norma ABNT NBR 7190-3:2022 – *Projeto de Estruturas de Madeira. Parte 3: Métodos de ensaio para corpos de prova isentos de defeitos para madeiras de florestas nativas.*

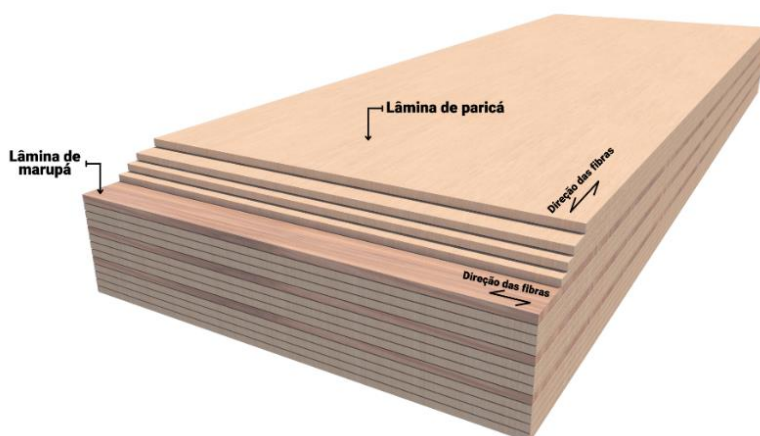


Figura 1 - Configuração dos painéis de LVL.

Fonte: autor (2023).

Foram realizados ensaios de teor de umidade, densidades aparente e básica (caracterização física), resistências à compressão paralela e perpendicular às fibras, tração paralela às fibras, cisalhamento na linha de cola e flexão estática *flatwise* e *edgewise* (caracterização mecânica). Após a finalização dos ensaios mecânicos, foram observados os modos de ruptura dos CPs. A Figuras 2 apresenta os detalhes da realização dos ensaios mecânicos do LVL.

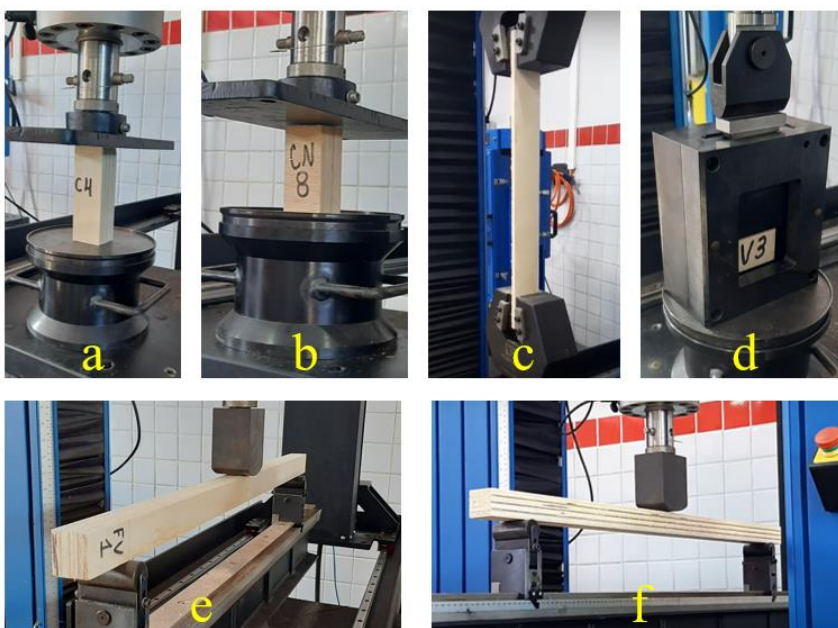


Figura 2 – Detalhes dos ensaios mecânicos. a) compressão paralela às fibras, b) compressão perpendicular às fibras, c) tração paralela às fibras, d) cisalhamento na linha de cola, e) flexão edgewise, f) flexão flatwise. Fonte: autor (2023).

Para aferir a resistência mecânica e a qualidade da linha de cola do LVL em elevados teores de umidade, foram realizados ensaios de compressão paralela às fibras e de cisalhamento na linha de cola em CPs submetidos à saturação total da madeira. Para cada ensaio, foram adotadas as taxas de carregamento e o número de CPs (30 espécimes) conforme preconizado pela norma ABNT NBR 7190-3:2022. As dimensões dos CPs foram modificadas proporcionalmente em relação à norma ABNT NBR 7190-3:2022, devido à limitação da espessura final (cerca de 38 mm) dos painéis.

Os resultados dos ensaios de compressão paralela às fibras e cisalhamento na linha de cola nas condições de umidade padrão de 12% e saturação total da madeira foram submetidos à análise de variância e suas médias foram comparadas pelo teste *t-Student* ao nível de 5% de significância.

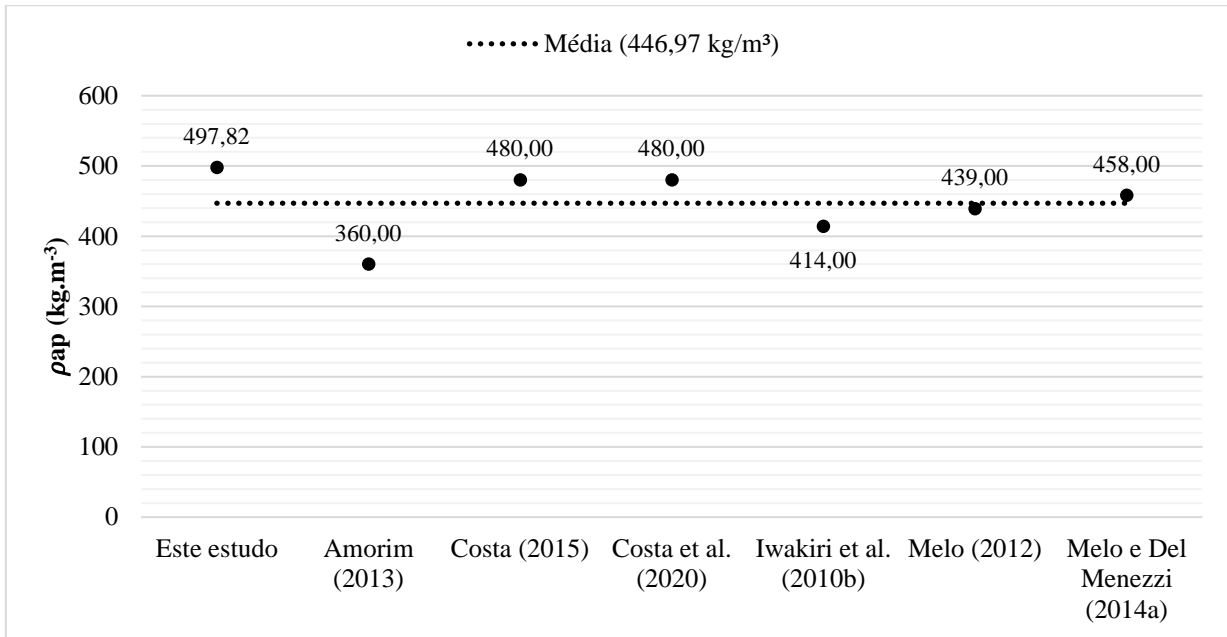
3. Resultados e discussão

O teor de umidade variou de 9,14% a 10,87%, possuindo um valor médio de 9,84%. Tal valor médio se enquadra na Classe de Umidade 1 (12%) da norma ABNT NBR 7190-1:2022 – *Projeto de Estruturas de Madeira. Parte 1: Critérios de dimensionamento*. Esse teor de umidade favorece na qualidade da linha da cola de painéis engenheirados (MATOS *et al.*, 2019). Segundo Silva *et al.* (2019), a região de Açailândia - MA apresenta uma umidade relativa do ar de 36,51% (estação seca) e 86,65% (época de chuvas), implicando em inchamentos e retrações significativas nos painéis, podendo interferir na resistência mecânica do LVL, uma vez que a ureia-formaldeído possui baixa resistência à umidade (LOPES *et al.*, 2020).

Para a densidade aparente foi encontrado o valor médio igual a 497,82 kg.m⁻³, em um intervalo de 455,52 kg.m⁻³ a 541,20 kg.m⁻³, enquanto que a densidade básica variou de 387,85 kg.m⁻³ a 452,41 kg.m⁻³, com valor médio igual a 418,85 kg.m⁻³, o que enquadra o LVL na classe de madeira de média densidade (DIAS, 2018). A densidade aparente média encontrada para o LVL nesse estudo é 38,28% superior à densidade aparente média encontrada por Amorim (2013) (360,00 kg.m⁻³), para painéis de LVL de paricá colado com PVA.

Além do estudo citado anteriormente, outros valores médios de densidade aparente de painéis LVL de paricá encontrados por trabalhos na literatura são apresentados no Gráfico 1. A diferença entre os resultados de densidade aparente pode estar relacionada com a gramatura e o tipo de adesivo usado. Além disso, as lâminas de marupá, usadas na confecção do LVL deste estudo, possuem densidade aparente superior à da madeira de paricá (SOUZA, BUFALINO e GOMES, 2020; LIMA *et al.*, 2022c; VIDAURRE *et al.*, 2018).

Gráfico 1 - Gráfico comparativo entre o resultado encontrado na pesquisa com resultados de densidade aparente do LVL de paricá obtidos na bibliografia.



Fonte: autor (2023).

A Tabela 1 apresenta os valores máximos, médios e mínimos, além do coeficiente de variação e valores característicos obtidos nos ensaios de caracterização mecânica do LVL na umidade padrão de 12%. A resistência à compressão paralela às fibras variou de 32,20 MPa a 37,28 MPa, com valor médio e característico iguais a 35,09 MPa, o que significa que, segundo a norma ABNT NBR 7190-1:2022, o LVL produzido neste trabalho se enquadra na classe de resistência D30. Na Tabela 2, é possível encontrar a comparação da resistência à compressão paralela às fibras deste estudo com trabalhos de caracterização mecânica de LVL de paricá da bibliografia.

Tabela 1 - Propriedades mecânicas do LVL na umidade padrão de 12%.

	f_{c0}	f_{c90}	f_{t0}	f_v	f_M^{edg}	f_M^{flat}	MOE^{edg}	MOE^{flat}
Máximo (MPa)	37,28	9,71	55,32	2,60	64,64	55,87	9186	8962
Médio (MPa)	35,09	7,66	36,02	1,71	57,37	43,92	8376	8133
Mínimo (MPa)	32,20	4,84	20,12	0,49	40,47	27,24	6864	7086
CV (%)	3,67	12,81	29,00	32,02	8,95	14,24	5,85	5,88
Valor característico (MPa)	35,09	6,66	25,21	1,20	52,51	38,53	-	-

CV: coeficiente de variação; f_{c0} e f_{c90} : resistências à compressão paralela e perpendicular às fibras, respectivamente; f_{t0} : resistência à tração paralela às fibras; f_v : resistência ao cisalhamento na linha de cola; f_M^{edg} e f_M^{flat} : resistência à flexão em edgewise e flatwise, respectivamente; MOE^{edg} e MOE^{flat} : módulo de elasticidade à flexão em edgewise e flatwise, respectivamente. Fonte: autor (2023).

Como é possível observar na Tabela 2, o valor médio de resistência à compressão paralela às fibras encontrado neste estudo é superior a todos os valores médios obtidos na bibliografia, sendo a maior e a menor diferença percentual em relação aos estudos de Amorim (2013) e Melo e Del Menezzi (2014a), respectivamente.

Tabela 2 - Resistência à compressão paralela às fibras de LVL de paricá encontrados na bibliografia.

Autor	Adesivo	g (g/m ²)	e (mm)	$f_{c0,m}$ (MPa)	Δ (%)
Amorim (2013)	acetato de polivinila (PVA)	150	1,84	19,80	-43,57
Melo e Del Menezzi (2014a)	acetato de polivinila (PVA)	200	1,54	28,26	-19,46
			2,32	28,84	-17,81
			2,71	28,17	-25,42
Melo e Del Menezzi (2015a)	acetato de polivinila (PVA)	200	2,71	28,17	-19,72
	fenol-formaldeído			26,25	-25,19
	poliuretano			26,92	-23,28
Melo e Del Menezzi (2015b)	fenol-formaldeído	200	2,71	26,40	-24,76

g : gramatura de adesivo; e : espessura das lâminas; $f_{c0,m}$: resistência média à compressão paralela às fibras; Δ : diferença percentual em relação ao valor médio deste estudo (valores positivos e negativos representam, respectivamente, superioridade e inferioridade do valor da bibliografia ao deste estudo). Fonte: autor (2023).

Comparando a resistência à compressão paralela às fibras característica com os valores informados pelos fabricantes de LVL, é possível constatar que o valor obtido neste trabalho é 84,68% superior ao Kerto Q (METSÄ WOOD, 2019), 69,68% superior ao Versa-Lam[®] LVL Beams (BOISE CASCADE, 2022), 16,45% inferior ao hySPAN (FUTUREBUILD LVL, 2019), 75,45% superior ao J-Frame (JUKEN NEW ZEALAND, 2020), 0,26% superior ao LVL S (STORA ENSO, 2022) e 102,72% superior ao Microllam[®] (WEYERHAEUSER, 2021).

Os CPs destinados ao ensaio de compressão paralela às fibras apresentaram comportamento dúctil, exibindo alta deformação até a ruptura. Observou-se, com a aplicação da carga, a perda de estabilidade dos CPs por delaminação das lâminas, podendo estar relacionada com a falta de

aderência entre as camadas, e pelo esmagamento do topo e base (Figura 3). Esses modos de ruptura também foram observados no ensaio de compressão paralela às fibras do LVL com laminação vertical estudados por Molina *et al.* (2013).



Figura 3 – Modos de ruptura observados nos CPs de compressão paralela às fibras. Fonte: autor (2023).

A resistência à compressão perpendicular às fibras variou entre 4,84 MPa e 9,71 MPa, possuindo valores médio e característico iguais a 7,66 MPa e 6,66 MPa, respectivamente. No estudo de Duriot *et al.* (2021), com LVL de abeto-de-douglas (*Pseudotsuga menziesii*), foram encontradas resistências médias à compressão perpendicular às fibras iguais a 7,13 MPa (para o cerne) e 9,24 MPa (para o alburno), sendo tais valores 6,92% inferior e 20,63% superior ao deste trabalho, respectivamente. Os LVLs *Versa-Lam*[®] *LVL Beams* (BOISE CASCADE, 2022) e *Microllam*[®] (WEYERHAEUSER, 2021) possuem valor característico de resistência à compressão normal às fibras igual a 5,17 MPa, sendo tal valor 22,37% inferior ao obtido neste estudo para essa propriedade mecânica.

Para o ensaio de compressão perpendicular às fibras, foi observado o comportamento dúctil dos CPs face à aplicação da carga. Os modos de ruptura, apresentados na Figura 4, foram a delaminação e o esmagamento das lâminas, além do deslizamento das fibras ao longo de uma superfície inclinada decorrente do cisalhamento.



Figura 4 – Modos de ruptura observados nos CPs de compressão perpendicular às fibras. Fonte: autor (2023).

Para a resistência à tração paralela às fibras foi encontrado um valor máximo igual a 55,32 MPa e mínimo igual a 20,12 MPa, sendo seu valor médio e característico igual a 36,02 MPa e 25,21 MPa, respectivamente. No estudo realizado por Bortoletto Júnior (2009), com LVL e madeira serrada de *Pinus merkussi*, foi obtido uma resistência à tração paralela às fibras igual a 82,47 MPa para o LVL, sendo tal valor 128,96% superior ao deste estudo (36,02 MPa). Quanto à madeira serrada, foi encontrado um valor médio igual a 72,00 MPa, sendo esse valor superior ao encontrado por Terezo *et al.* (2015) para a madeira serrada de paricá com 10 anos de idade (63,52 MPa). Logo, a diferença entre as resistências à tração paralela às fibras das duas espécies pode explicar a superioridade do LVL de *Pinus merkussi* sobre o LVL da madeira de paricá.

Comparativamente aos LVLs das empresas fabricantes desse produto, a resistência à tração paralela às fibras característica deste estudo é 70,11% superior ao *Versa-Lam*[®] *LVL Beams* (BOISE CASCADE, 2022), 15,97% inferior ao *hySPAN* (FUTUREBUILD LVL, 2019), 27,97% inferior ao *LVL S* (STORA ENSO, 2022) e 92,88% superior ao *Microllam*[®] (WEYERHAEUSER, 2021).

Foi observado um comportamento frágil na ruptura dos CPs submetidos ao ensaio de tração paralela às fibras, caracterizado pela pequena deformação e ruptura abrupta. Os modos de ruptura, representados na Figura 5, foram o corte das fibras (perpendicular ao seu comprimento), a separação das fibras decorrente da tração da madeira, o esmagamento e cisalhamento das fibras na região do contato com a área de aplicação da carga.



Figura 5 – Modos de ruptura observados nos CPs de tração paralela às fibras. a) corte das fibras, b) tração da madeira, c) esmagamento e cisalhamento das fibras em contato com o mordente. Fonte: autor (2023).

No que concerne à resistência ao cisalhamento na linha de cola, foram encontrados valores máximo, médio e mínimo iguais a 2,60 MPa, 1,71 MPa e 0,49 MPa, respectivamente, sendo o valor característico igual a 1,20 MPa. Os resultados obtidos neste estudo foram inferiores a todas as resistências ao cisalhamento na linha de cola dos estudos apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Resistência ao cisalhamento na linha de cola de painéis LVL de paricá encontrados na bibliografia.

Autor	Adesivo	g (g/m ²)	e (mm)	$f_{v0,m}$ (MPa)	Δ (%)
Iwakiri <i>et al.</i> (2010b)	fenol-formaldeído	320	2,00	1,81	5,85
Amorim (2013)	acetato de polivinila (PVA)	150	1,84	2,7	57,89
Melo e Del Menezzi (2014a)	acetato de polivinila (PVA)	200	1,54	4,42	158,48
			2,32	4,28	150,29
			2,71	3,86	125,73
Melo e Del Menezzi (2015a)	acetato de polivinila (PVA)	200	2,71	3,86	125,73
	fenol-formaldeído			4,82	181,87
	poliuretano			4,64	171,35
Melo e Del Menezzi (2015b)	fenol-formaldeído	200	2,71	4,80	180,70
Costa (2015)	fenol-formaldeído	200	2,00	2,52	47,37

g : gramatura de adesivo; e : espessura das lâminas; $f_{v0,m}$: resistência média ao cisalhamento na linha de cola; Δ : diferença em relação ao valor médio deste estudo (valores positivos e negativos representam, respectivamente, superioridade e inferioridade do valor da bibliografia ao deste estudo). Fonte: autor (2023).

Quanto aos produtos de LVL comercializados, a resistência ao cisalhamento característica deste estudo é 7,69% inferior ao Kerto Q (METSÄ WOOD, 2019), 39,09% inferior ao Versa-Lam®

LVL Beams (BOISE CASCADE, 2022), 65,71% inferior ao *hySPAN* (FUTUREBUILD LVL, 2019), 47,83% inferior ao *LVL S* (STORA ENSO, 2022) e 39,09% inferior ao *Microllam*[®] (WEYERHAEUSER, 2021).

O fato de todos os valores de resistência ao cisalhamento na linha de cola encontrados na bibliografia serem superiores ao obtido neste estudo, pode estar relacionado com a presença da lâmina perpendicular à direção de aplicação da carga, localizada no centro da seção transversal dos CPs desta campanha experimental (Figura 5), uma vez que, na direção perpendicular às fibras, a madeira apresenta baixa resistência mecânica (DIAS, 2018). Para esse ensaio, foi observado o modo de ruptura do tipo frágil devido ao cisalhamento por rolamento, ou "*rolling shear*" em inglês, das camadas adjacentes à linha de cola submetida às tensões de cisalhamento. Esse comportamento depende de vários fatores, como a qualidade da colagem entre as camadas, a espessura das lâminas individuais e a orientação das fibras (AICHER, CHRISTIAN e HIRSCH, 2016).

Para o ensaio de flexão na posição *flatwise*, foram encontrados valores médios iguais a 43,92 MPa e 8133,93 MPa, respectivamente, para a resistência e rigidez à flexão, enquanto que, para a posição *edgewise*, os valores médios de resistência e rigidez à flexão foram iguais a 57,37 MPa e 8376,62 MPa, respectivamente. Assim como observado nos estudos de Iwakiri *et al.* (2010b), Nogueira (2017) e Melo e Del Menezzi (2015b), os resultados deste estudo para a resistência à flexão na posição *edgewise* foram maiores que na configuração *flatwise*. Esses resultados estão em concordância com Palma e Ballarin (2011), que afirmam que, na flexão em *flatwise*, o desempenho mecânico do painel é mais sensível às propriedades mecânicas das lâminas. Melo e Del Menezzi (2015b) observaram que o uso de lâminas com alto valor de módulo de elasticidade dinâmico nas bordas resultou em maior resistência mecânica e rigidez ao LVL na flexão em *flatwise*.



Figura 5 – Corpo de prova de cisalhamento na linha de cola após ruptura. Fonte: autor (2023).

Conforme a Tabela 4, para a posição *edgewise*, a média da resistência à flexão deste estudo é 22,99% inferior ao valor encontrado por Iwakiri *et al.* (2010b) e 16,42% superior ao obtido por Melo e Del Menezzi (2015b). Já para a posição *flatwise*, o resultado deste estudo é 66,36% superior ao encontrado por Iwakiri *et al.* (2010b) e 15,33% inferior ao de Melo e Del Menezzi (2015b). Comparativamente aos LVLs comercializados, a resistência à flexão característica na posição *flatwise* deste estudo é 8,26% inferior ao apresentado por *hySPAN* (FUTUREBUILD LVL, 2019), 80,30% superior ao *Versa-Lam® LVL Beams* (BOISE CASCADE, 2022), 92,65% superior ao J-Frame (JUKEN NEW ZEALAND, 2020), 22,94% inferior Kerto LVL S-beam (METSA WOOD, 2019) e 22,94% inferior ao *LVL S* (STORA ENSO, 2022). Quanto a posição *edgewise*, o valor deste estudo é 19,34% superior ao Kerto LVL S-beam (METSA WOOD, 2019), 5,02% superior ao *hySPAN* (FUTUREBUILD LVL, 2019) e 19,34% superior ao *LVL S* (STORA ENSO, 2022).

Tabela 4 – Resistências e rigidezes à flexão de LVL de paricá encontrados na bibliografia.

Autor	Adesivo	e (mm)	<i>flatwise</i>				<i>edgewise</i>			
			f_M (MPa)	Δ (%)	MOE (MPa)	Δ (%)	f_M (MPa)	Δ (%)	MOE (MPa)	Δ (%)
Iwakiri <i>et al.</i> (2010b)	fenol- formaldeído	2,00	26,40	-39,89	5157	- 36,60	74,50	29,86	20102	139,98
Melo e Del Menezzi (2014a)	acetato de polivinila (PVA)	1,54	51,87	18,10	9845	21,04	49,28	-14,10	7536	-10,04
Melo e Del Menezzi (2015b)	fenol- formaldeído	2,71	51,80	17,94	10162	24,93	53,10	-7,44	9049	8,03

e : espessura das lâminas; f_M : resistência à flexão estática; MOE: módulo de elasticidade à flexão estática; Δ : diferença em relação ao valor médio deste estudo (valores positivos e negativos representam, respectivamente, superioridade e inferioridade do valor da bibliografia ao deste estudo). Fonte: autor (2023).

Os CPs submetidos ao ensaio de flexão estática na posição *flatwise* apresentaram ruptura do tipo frágil por delaminação oriunda do cisalhamento ao longo do comprimento longitudinal da viga nas regiões próximas à linha neutra da seção. Já para a posição *edgewise*, assim como observado no trabalho de Molina *et al.* (2013), a ruptura dos CPs ocorreu por tração das lâminas inferiores, caracterizada por um comportamento frágil. A Figura 6 mostra os modos de ruptura obtidos no ensaio de flexão.

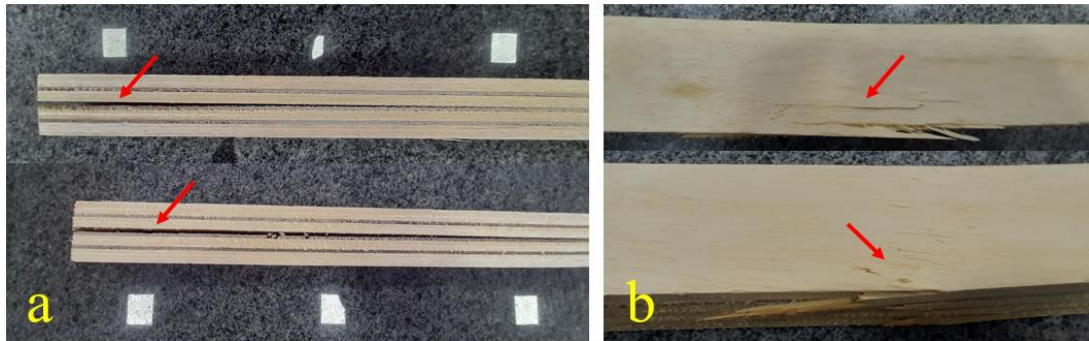


Figura 6 – Modos de ruptura observados nos CPs de flexão. a) delaminação (flatwise), b) tração da madeira (edgewise). Fonte: autor (2023).

A diferença entre os resultados das propriedades mecânicas do LVL encontrados neste estudo e os apresentados na bibliografia, pode estar relacionada ao uso de diferentes dimensões, normas, adesivos e procedimentos de ensaios de cada trabalho. As dimensões do corpo de prova, por exemplo, podem influenciar diretamente a distribuição de tensões e deformações durante os ensaios, afetando os resultados obtidos (MORESCHI, 2012). Além disso, diferentes normas de ensaio podem estabelecer critérios distintos para a seleção de amostras, condições ambientais, métodos de carregamento e critérios de avaliação, o que pode resultar em valores variados para as propriedades mecânicas (MORESCHI, 2012). A escolha de adesivos também desempenha um papel fundamental, uma vez que diferentes adesivos possuem características diferentes de resistência, durabilidade e adesão à madeira (MENDOZA *et al.*, 2017). Portanto, é essencial considerar esses fatores ao interpretar e comparar os resultados das propriedades mecânicas da madeira.

Para verificar o desempenho face à presença de água, foram realizados ensaios de compressão paralela às fibras e de cisalhamento na linha de cola, cujos resultados estão presentes na Tabela 5. O valor máximo obtido para a resistência à compressão paralela às fibras na condição de saturação foi de 17,91 MPa, o valor mínimo foi igual a 13,05 MPa e os valores médio e característico foram iguais a, respectivamente, 16,44 MPa e 11,51 MPa. Tais valores são inferiores aos encontrados para a resistência à compressão paralela às fibras do LVL na condição de umidade padrão de 12%. O maior valor para a resistência ao cisalhamento na linha de cola foi 0,83 MPa, enquanto que o menor valor foi 0,14 MPa, sendo os valores médio e característico foram iguais a 0,50 MPa e 0,35 MPa, respectivamente.

Tabela 5 - Resistência à compressão paralela às fibras e resistência ao cisalhamento na linha de cola do LVL na condição de saturação total da madeira.

	f_{c0}^{SAT}	f_v^{SAT}
Máximo (MPa)	17,91	0,83
Média (MPa)	16,44	0,50
Mínimo (MPa)	13,05	0,14
CV (%)	5,94	33,63
Valor característico (MPa)	11,51	0,35

CV: coeficiente de variação; f_{c0}^{SAT} : resistência à compressão paralela às fibras na condição de saturação; f_v^{SAT} : resistência ao cisalhamento na condição de saturação. Fonte: autor (2023).

Para verificar se houve diferença estatística entre os resultados das resistências à compressão paralela às fibras e cisalhamento na linha de cola nos teores de umidade padrão de 12% e saturado, realizou-se um teste *t-Student*, para um nível de confiança de 95%. Conforme é possível verificar na Tabela 6, houve diferença estatística entre os resultados encontrados para os CPs nas condições de umidade padrão de 12% e saturada.

Tabela 6 - Teste t-Student das resistências à compressão paralela às fibras e ao cisalhamento da linha de cola na condição de umidade padrão de 12% e saturado.

	f_{c0}^{sat}	f_v^{sat}
$f_{c0}^{12\%}$	$2,54 \times 10^{-52*}$	-
$f_v^{12\%}$	-	$1,80 \times 10^{-13*}$

*: há diferença significativa entre as duas amostras; $f_{c0}^{12\%}$ e f_{c0}^{SAT} : resistência à compressão paralela às fibras do CP nas condições de umidade padrão de 12% e saturado, respectivamente; $f_v^{12\%}$ e f_v^{SAT} : resistência ao cisalhamento na linha de cola do CP nas condições de umidade padrão de 12% e saturado, respectivamente. Fonte: autor (2023).

A redução do desempenho mecânico dos CPs, face ao aumento do teor de umidade, pode estar relacionada com a perda de resistência mecânica da madeira à elevados teores de umidade (DIAS, 2018) e a indução de tensões na linha de cola oriundas do inchamento do elemento (BOLGENHAGEN, 2018). Além disso, a água e umidade provocam a deterioração das ligações da resina ureia formaldeído devido a hidrólise de sua ligação aminometilênica (KEINERT, 2021). Vale ressaltar que foram ensaiados apenas 29 CPs para a determinação da resistência ao cisalhamento na linha de cola na condição saturada total da madeira, pois um dos 30 CPs submersos em água apresentou ruptura na área de análise antes mesmo de ser submetido ao aparelho de ensaio.

4. Considerações finais

Os resultados obtidos nesta campanha experimental revelam que o LVL de paricá, colado com ureia-formaldeído, apresenta desempenho mecânico compatível com as solicitações estruturais. No entanto, uma vez que o adesivo apresenta baixa resistência à água, é conveniente proceder à impermeabilização do LVL ou recorrer à substituição do adesivo por outra alternativa mais adequada. Deve ser destacado também, que o LVL de paricá poderá ter seu desempenho mecânico melhorado através da reorientação das três lâminas de marupá, uma vez que a sua disposição ortogonal à direção longitudinal do painel, apenas contribui positivamente quanto à retração por diminuição de teor de umidade em elementos estruturais bidimensionais.

Os painéis LVL utilizados neste estudo se enquadram na classe de madeira de média densidade e, conforme a ABNT NBR 7190-1:2022, na classe de resistência D30. As propriedades mecânicas dos painéis de LVL de paricá apresentaram resultados similares aos valores de resistência mecânica de diferentes painéis LVL estudados na bibliografia analisada, o que mostra a viabilidade de seu uso em elementos estruturais.

Foi observado o modo de ruptura do tipo frágil em todos os ensaios mecânicos, exceto nos ensaios de compressão paralela e perpendicular às fibras. O aumento do teor de umidade, decorrente da saturação total da madeira, influenciou de forma negativa nas resistências à compressão paralela às fibras e ao cisalhamento na linha de cola do LVL.

Agradecimentos

O autor agradece ao Grupo Arboris pelo fornecimento dos painéis LVL e a Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão (UEMASUL) pela bolsa concedida.

Referências

- AICHER, S.; CHRISTIAN, Z.; HIRSCH, M. *Rolling shear modulus and strength of beech wood laminations*. **Holzforschung**, v. 70, n. 8, p. 773-781, 2016.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 5456**: *standard specification for evaluation of structural composite lumber products*. West Conshohocken, 2006.
- AMORIM, M. R. S. **Agrupamento de espécies madeireiras amazônicas para a produção de painéis de lâminas paralelas (LVL)**. (Dissertação de mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, DF). 2013.

Associação Brasileira da Indústria de Madeira Processada Mecanicamente (ABIMCI). **Estudo Setorial 2019**. Curitiba. 2019.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190 - 3: Projeto de estruturas de madeira. Parte 3: Métodos de ensaio para corpos de prova isentos de defeitos para madeiras de florestas nativas**. Rio de Janeiro. 2022.

ASSOCIAÇÃO PARANAENSE DE EMPRESAS DE BASE FLORESTAL (APRE). **Estudo setorial APRE 2020**. Curitiba: APRE Florestas, 2020.

BOISE CASCADE. **Eastern Specifier Guide**. Boise Cascade EWP, USA. 2022.

BOLGENHAGEN, A. **Avaliação comparada dos parâmetros que influenciam na colagem lateral de painéis de madeira de *Pinus elliottii* e *Pinus Taeda***. (Dissertação de Mestrado Universidade da Região de Joinville, Joinville, SC). 2018.

BORTOLETTO JÚNIOR, G. Estudo comparativo das propriedades físicas e mecânicas da madeira e do LVL de *Pinus merkusii*. **Revista Forestal Venezolana**, Volume 53(2), p. 191-195. 2009.

COSTA, A. A. et al. Caracterização tecnológica de painéis engenheirados produzidos com madeira de paricá. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 8, e786986089. 2020.

COSTA, M. A. **Efeito de diferentes estratégias de densificação sobre as propriedades de compensados e painéis de lâminas paralelas de paricá (*Schizolobium amazonicum Huber ex Ducke*)**. (Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, Brasília, DF). 2015.

DIAS, J. M. S. Estruturas de Madeira. Coleção Manuais de Engenharia Civil. Volume 3. **Editora 2B Educação**, 2018.

DURIOT, R. et al. *An insight into mechanical properties of heartwood and sapwood of large French Douglas-fir LVL*. **Construction and Building Materials**, 123859. 2021.

FUTUREBUILD LVL. **Specific Engineering Design Guide**. Futurebuild LVL, Nova Zelândia. 2019.

IWAKIRI, S. et al. Avaliação do potencial de utilização da madeira de *Schizolobium amazonicum* "Paricá" e *Cecropia hololeuca* "Embaúba" para produção de painéis aglomerados. **Acta amazonica**, 40(2), 303-308. 2010a.

IWAKIRI, S. et al. Produção de painéis laminados unidirecionais - LVL com lâminas de *Schizolobium amazonicum*, *Eucalyptus saligna* e *Pinus taeda*. **Cerne**, Lavras, v. 16, n. 4, p. 557-563. 2010b.

JUKEN NEW ZEALAND. **Strength Characteristics**. Juken New Zealand, Nova Zelândia. 2020.

KEINERT, A. C. **Resistência à umidade e emissão de formaldeído em painéis de partículas de média densidade fabricados com diferentes resinas melamina ureia formaldeído.** (Dissertação de Mestrado, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, PR). 2021.

LIMA, F. O. et al. Adição de nanopartículas em painéis engenheirados de madeira. *Brazilian Journal of Development*, Curitiba, v.8, n.1, p. 2659-2667. 2022b.

LIMA, V. S. et al. Avaliação das propriedades físicas e mecânicas da madeira de paricá (*Schizolobium amazonicum*) utilizada na indústria de compensados no Estado do Maranhão. *Research, Society and Development*, v. 11, n. 9, e46911932065. 2022c.

LIMA, V. S. et al. *Economic and geographic assessment of Brazilian plywood industry. Avaliação geográfica e econômica das indústrias de compensado no Brasil.* *The Journal of Engineering and Exact Sciences – jCEC*, v. 08, n. 04. 2022a.

LOPES, T. A. et al. Nanopartículas de lignina e seus efeitos nas propriedades do adesivo ureia-formaldeído para colagem de madeira. **Engenharia Industrial Madeireira: Tecnologia, Pesquisa e Tendências.** 2020.

MATOS, A. C. et al. Influência de diferentes composições de lâminas de *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* (*Huber ex Ducke*) Barneby e *Pinus oocarpa* var. *oocarpa* (*Schiede ex Schltdl*) para produção de compensados multilaminados. *Scientia Forestalis*, 47(124), 799-810. 2019.

MELO, R. R. **Avaliação de variáveis tecnológicas na produção de painéis LVL confeccionados com paricá (*Schizolobium amazonicum Huber ex. Ducke*).** (Tese de Doutorado em Ciências Florestais, Universidade de Brasília, Brasília, DF). 2012.

MELO, R. R.; DEL MENEZZI, C. H. S. *Effects of grading of veneers on properties of LVL made from Schizolobium amazonicum Huber ex. Ducke.* *Eur. J. Wood Prod*, 73:677–683. 2015b.

MELO, R. R.; DEL MENEZZI, C. H. S. Estimativas das propriedades de compostos LVL produzidos com paricá (*Schizolobium amazonicum Huber ex Ducke*) por meio de *stress wave*. *Revista Árvore*, 38(6), 1155-1163. 2014b.

MELO, R. R.; DEL MENEZZI, C. H. S. *Influence of Adhesive Type on the Properties of LVL Made from Paricá (*Schizolobium amazonicum Huber ex. Ducke*) Plantation Trees.* *DRVNA INDUSTRIJA*, n. 66, v. 3, p. 205-212. 2015a.

MELO, R. R.; DEL MENEZZI, C. H. S. *Influence of veneer thickness on the properties of LVL from Paricá (*Schizolobium amazonicum*) plantation trees.* *Eur. J. Wood Prod.* 72:191–198. 2014a.

MENDOZA, Z. M. S. H. et al. Aspectos gerais sobre adesivos para madeira. **Multitemas**, Campo Grande, MS, v. 22, n. 51, p. 49-68, jan./jun. 2017.

MENDOZA, Z. M. S. H. et al. Estudo comparativo das propriedades físicas e mecânicas de painéis compensados e *laminated veneer lumber* (LVL). **Nativa, Sinop**, v.5, esp., p. 588-593, dez. 2017.

- METSA WOOD. **Declaration of performance**. Metsa Wood, Lohja, Finland. 2019.
- MOLINA, J. C. *et al.* Avaliação do comportamento de vigas retangulares (LVL) com laminação horizontal e vertical. **Revista Madeira Arquitetura & Engenharia**, v14, n.35. 2013.
- MORESCHI, J. C. **Propriedades da madeira**. Departamento de Engenharia e Tecnologia Floresta I-UFPR. Paraná, v. 4, p. 01-208, 2012.
- NOGUEIRA, R. S. **Proposta de um método de ensaio para controle de qualidade na produção de elementos estruturais de MLC e de LVL**. (Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP). 2017.
- PALMA, H. A. L.; BALLARIN, A. W. Propriedades físicas e mecânicas de painéis LVL de *Eucalyptus grandis*. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 21, n. 3, p. 559-566, jul.-set. 2011.
- SILVA, B. C. *et al.* Qualidade de compensados fabricados com adesivos à base de tanino-formaldeído de *Pinus oocarpa* e fenol-formaldeído. **Floresta e Ambiente**, n. 19, v. 4, p. 511-519. 2012.
- SILVA, G. F. *et al.* Rendimento em laminação de madeira de Paricá na região de Paragominas, Pará. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 25, n. 2, p. 447-455, abr.-jun. 2015.
- SILVA, J. G. M. *et al.* *Influence of anatomy on the adhesion performance of four wood species*. **Research, Society and Development**, 9(4). 2020.
- SILVA, V. P. S. *et al.* **Análise do teor de umidade de madeiras comercializadas na cidade de Açailândia – MA**. III Semana de Engenharia Civil – SEC Marabá-PA. 2019.
- SOUZA, M. M.; BUFALINO, L.; GOMES, L. G. Caracterização madeira de Marupá (*Simarouba Amara Aubl*, *Simaroubaceae*) visando utilização na indústria moveleira. **Braz. J. of Develop.**, Curitiba, v. 6, n.12, p.98163-98185 dec. 2020.
- STORA ENSO. **Declaration of performance LVL S**. Stora Enso, Finland. 2022.
- TEREZO, R. F. *et al.* Propriedades da madeira de paricá em diferentes idades para uso estrutural. **Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)**, 6(3), 244-253. 2015.
- VIDAURRE, G. B. *et al.* *Physical and mechanical properties of juvenile Schizolobium amazonicum wood*. **Revista Árvore**, 42(1), 1-9. 2018.
- WEYERHAEUSER. **Trus Joist® Beam, Header and Column Specifier's Guide**. Weyerhaeuser, USA. 2021.