

## ARTIGO ORIGINAL

# Algoritmo para cálculo de painéis de madeira de florestas plantadas

## Algorithm for the veneer calculation from planted forests

Thomaz Correa e Castro da Costa<sup>1\*</sup> , Luiz Fernando França<sup>2</sup> <sup>1</sup>Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa, Sete Lagoas, MG, Brasil<sup>2</sup>Sig Soluções Ltda, Sete Lagoas, MG, Brasil

### INFORMAÇÕES DO ARTIGO

Fonte de financiamento: Nenhuma.  
Conflito de interesse: Nada a declarar.  
\*Autor correspondente:  
thomaz.costa@embrapa.br  
Recebido: 11 novembro 2024.  
Aceito: 25 março 2026.  
Editor: Alexandre de Vicente Ferraz.

**Como citar:** Costa, T. C. C., & França, L. F. (2026). Algoritmo para cálculo de painéis de madeira de florestas plantadas. *Scientia Forestalis*, 54, e4121. <https://doi.org/10.18671/scifor.v54.05>

### RESUMO

A madeira engenheirada (madeira laminada colada, painéis) no Brasil vem atraindo investidores e consumidores por ser uma construção “a seco” e com menor custo. Com a oferta de florestas plantadas (dimensões uniformes), regras de negócio podem ser desenvolvidas para dar suporte na quantificação de produtos dessa natureza. Desta forma, o atributo “volume” pode ser discriminado em folhas de madeira ou painéis compensados, que é o foco deste trabalho. Visando estimar produtos laminados de florestas plantadas, foi desenvolvido um algoritmo, com os seguintes objetivos: (1) Analisar os resultados desta aplicação, calculando a laminação em um pequeno povoamento de eucalipto, e (2) validar o modelo comparando com dados observados secundários. O cálculo da laminação foi considerado exato quando aplicado em um rol de toras. No caso de uma floresta plantada, para obter resultados com boa exatidão, a acurácia da função de forma é preponderante. Por meio deste, indústrias podem prever a obtenção de produtos laminados antecipadamente a colheita ou a compra de florestas.

**Palavras-chave:** Madeira laminada colada; Compensado; Software.

### ABSTRACT

The engineered wood (glued laminated timber, MDF, MDP, and particleboard) industry in Brazil has been attracting investors and consumers because it is a “dry” construction method with lower costs. With the availability of planted forests (uniform dimensions), business rules can be developed to support the quantification of this nature. In this way, the attribute “volume” can be discriminated in sheets of wood or plywood panels, which is the focus of this work. In order to estimate laminated products from planted forests, an algorithm was developed with the following objectives: (1) To analyze the results of this application, calculating lamination in a small eucalyptus stand, and (2) to validate the model by comparing it with secondary observed data. The lamination calculation was considered accurate when applied to a log list. In the case of a planted forest, to obtain results with good accuracy, the accuracy of the shape function is paramount. Through this, industries can predict the production of laminated products before the harvest or purchase of forests.

**Keywords:** Glued laminated timber; Plywood; Software.

## 1. INTRODUÇÃO

A madeira engenheirada (mass timber) é amplamente utilizada na construção civil em países como Áustria, Alemanha, Itália, França, Estados Unidos e Canadá, que são grandes consumidores e referências técnicas na produção desses materiais (Exame, 2022; Melo, 2023).

No Brasil, o uso da madeira engenheirada em estruturas de construção tem atraído o interesse de investidores e consumidores, especialmente por sua aderência aos princípios ESG (Environmental, Social and Governance) e pela possibilidade de redução nos custos de construção.

Entre os produtos processados, o painel compensado se destaca. Este material consiste em camadas de madeira coladas perpendicularmente, alternando a direção das fibras em número ímpar. O Brasil é o 4º maior produtor de compensado, com uma produção estimada em 2,7 milhões de m<sup>3</sup>, dos quais 27% são destinados ao mercado interno (Associação Brasileira da Indústria de Madeira Processada Mecanicamente, 2024). Os principais centros produtores estão localizados nos estados de Santa Catarina e Paraná, conforme dados da Associação Catarinense de Empresas Florestais (2022, citado por Modes et al., 2023). A base do setor florestal da região Sul do Brasil é composta principalmente



por plantios de *Pinus sp.* (Bonazza et al., 2022), a principal matéria-prima para a produção de madeira laminada.

A madeira de eucalipto tem sido utilizada na produção de painéis no país, porém ainda existem limitações quanto à madeira obtida de plantas juvenis, como exemplo: diâmetros da tora inferiores a 15 cm, tensão de crescimento e a densidade básica da madeira, o que pode dificultar seu uso para laminação em larga escala (Rocha et al., 2024).

A disponibilidade de florestas plantadas, com suas dimensões uniformes, abre oportunidades para o desenvolvimento de regras de negócio que possam apoiar produtores, manejadores e processadores na comercialização da madeira. Com informações sobre as unidades do produto, o atributo “volume” da madeira pode ser detalhado em termos de folhas de madeira ou painéis compensados, neste caso específico.

Uma variável crítica nesse processo é o rendimento da madeira processada, que depende de fatores como o diâmetro das toras, as características do maquinário, a forma do tronco e a presença de defeitos, como nós, tortuosidade, rachaduras e problemas de sanidade (Rocha & Tomaselli, 2002; Manhiça et al., 2013; Juízo et al., 2014; Cunha et al., 2015; Bonato Júnior et al., 2017, Bouaphavong et al., 2022).

O uso de tecnologias como o escaneamento terrestre com LIDAR (Tupinambá-Simões et al., 2025) estão permitindo obter o modelo completo dos fustes por árvore. Larysch et al. (2025), usando esta tecnologia, testaram uma metodologia de ajuste (encaixe) dos rolos de laminas em seções do tronco.

No caso deste trabalho, utilizou-se o inventário florestal convencional e fórmulas para calcular a quantidade de laminas a serem obtidas de cada árvore inventariada no beneficiamento. Partindo dessa premissa, a hipótese é que um software pode estimar com precisão o rendimento de madeira, oferecendo suporte ao planejamento da produção. Desta forma a laminadora pode ter uma previsão do estoque potencial e da receita de painéis compensados, com base na floresta ou nas toras adquiridas.

Para isso, o algoritmo desenvolvido foi projetado para calcular tanto produtos roliços quanto laminados que podem ser extraídos

de uma floresta plantada. O sistema ajusta uma função de afilamento (Andrade et al., 2022) com o modelo de Kozak et al. (1969) e utiliza uma função de volumetria (modelo de Schumacher & Hall, 1933, citado por Silva et al., 2009), com base em dados sobre a forma das árvores. Os resultados foram apresentados em termos de número de folhas de madeira e painéis compensados.

O presente trabalho teve como objetivo testar o módulo de cálculo de laminação em um pequeno povoamento de eucalipto, analisar os resultados obtidos e validar o modelo por meio de comparação com dados observados em Bortoletto Júnior (2008).

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1. Algoritmo

O algoritmo desenvolvido em Python 3.6, calcula as funções de taper (afilamento) no modelo de Kozak et al. (1969) e de volumetria, no modelo de Schumacher & Hall (1933), conforme ilustrado no diagrama da Figura 1.

No processo de laminação, existem dois tipos principais de maquinários para o corte das lâminas: o torno de laminação (conforme Modes et al., 2014) e o rolo faca (também conhecido como faqueamento). Durante o processo de desfolhamento ou desenrolamento da lâmina de madeira oriunda da tora (Figura 2), ambas as máquinas fixam a tora em um eixo ou a pressionam contra dois rolos. O diâmetro do eixo é o limite da sobra, onde a laminação é interrompida. Essa sobra é chamada de “rolo resto”. O diâmetro do rolo resto (mm) é o 1º dado solicitado pelo algoritmo.

Para a produção de painéis compensados, são usualmente adotadas lâminas de 2 ou 3 mm. A espessura da lâmina (mm) é o 2º dado de entrada no algoritmo.

A largura da folha é determinada pelo comprimento da tora, enquanto o comprimento da folha (m) é o 3º dado inserido no algoritmo. E o número de folhas para confeccionar o painel compensado, geralmente 5, 7 ou 9 folhas, é o 4º dado fornecido como entrada no algoritmo.

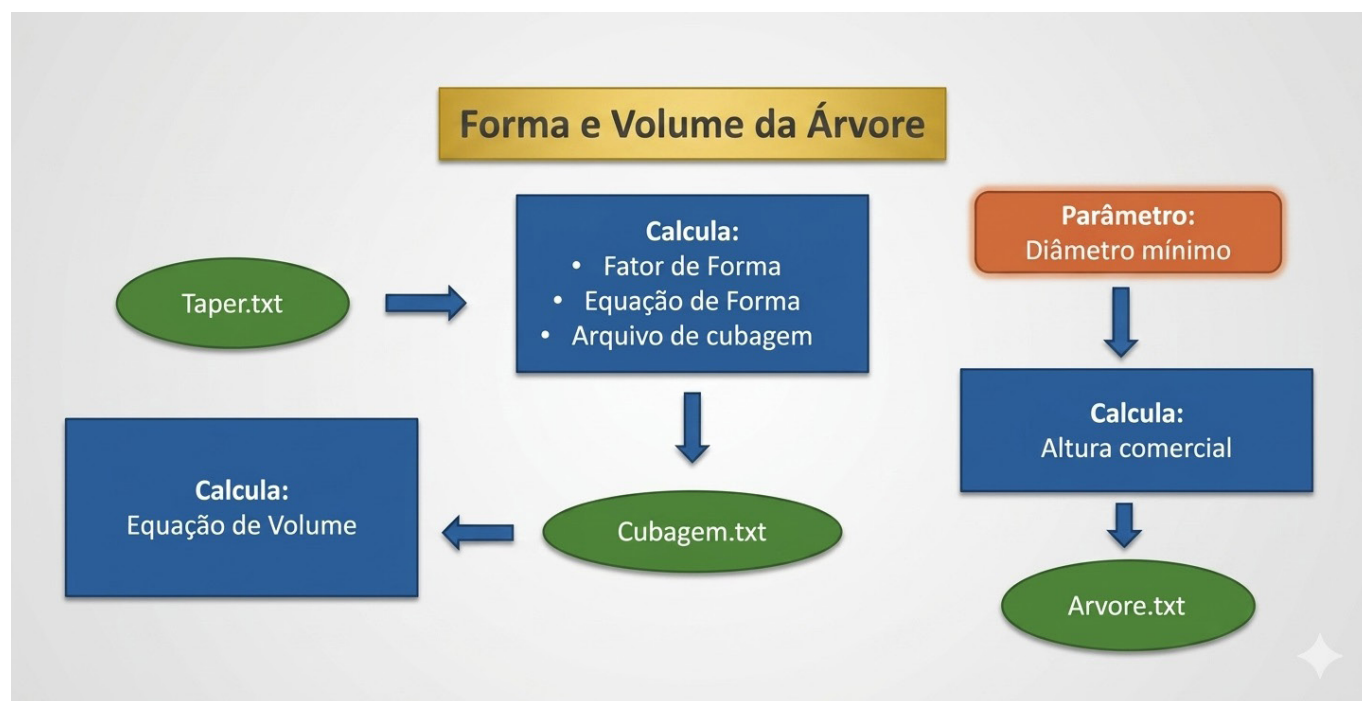


Figura 1 - Modelagem da árvore

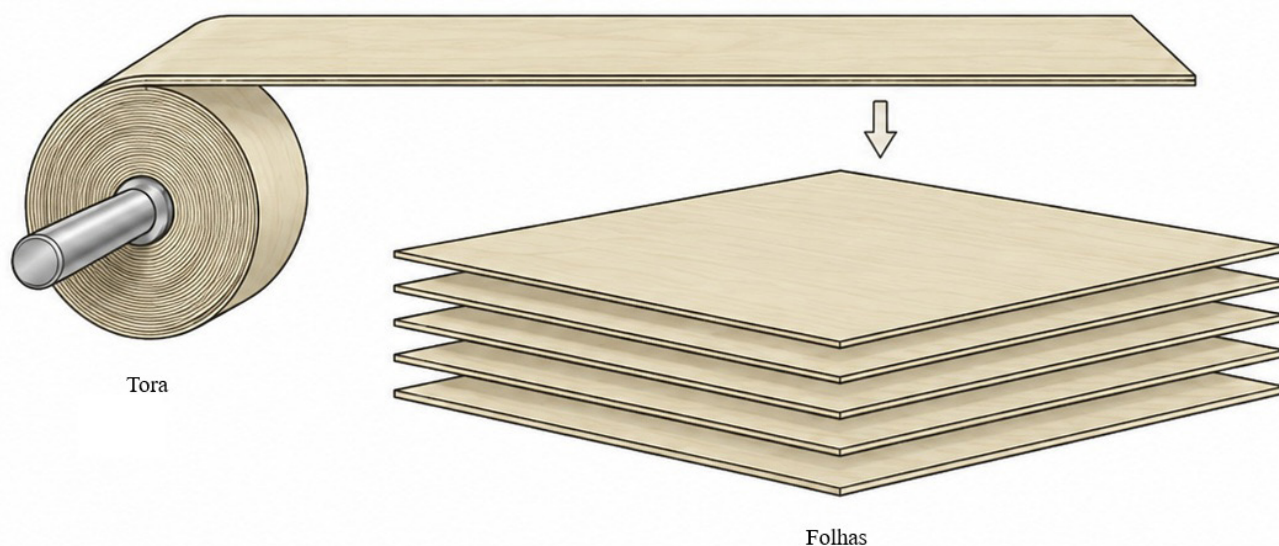


Figura 2 - Madeira laminada (folhas para painéis)

Os demais dados de entrada são as parcelas do inventário florestal, os dados de cubagem, a altura do toco (m) e a proporção de casca. A proporção de casca é um fator determinante no processo de laminação, pois constitui o resíduo a ser removido antes da laminação, juntamente com o resíduo do arredondamento da tora. O valor a ser inserido no algoritmo é a proporção média de casca, que pode apresentar menor exatidão nas toras localizadas na base e na extremidade das árvores.

A seguir, são apresentados os principais cálculos utilizados pelo algoritmo.

### 2.1.1. Número de voltas por tora

O número de voltas na tora é calculado pela diferença entre o número total de voltas e o número de voltas do rolo resto, conforme a Equação 1.

$$n = \frac{d_{arr} - d_{rest}}{2 * es_{folha}} \quad (\text{Eq. 1})$$

sendo:

$n$  = número de voltas;  
 $d_{arr}$  = diâmetro da tora arredondada (mm);  
 $d_{rest}$  = diâmetro do rolo resto (mm);  
 $es_{folha}$  = espessura da folha (mm);

### 2.1.2. Comprimento de cada volta

O comprimento de cada volta é calculado pela Equação 2:

$$comp_{lam} = \pi * (d_{arr} - t * 2 * es_{folha}) \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde:

$comp_{lam}$  = comprimento da laminação (mm);  
 $t$  = número que itera as voltas, de 1 até  $n$ , para obter o comprimento de cada lâmina por volta;

### 2.1.3. Comprimento total da laminação

O comprimento total da laminação é dado pelo somatório de  $t$ 's comprimentos das laminas, e o número de folhas é dado pela Equação 3:

$$n_{folha} = \frac{\sum comp_{lam} / 1000}{comp_{folha}} \quad (\text{Eq. 3})$$

Onde:

$\sum comp_{lam} / 1000$  = comprimento total da laminação (m);  
 $comp_{folha}$  = comprimento da folha (m);  
 $n_{folha}$  = número de folhas;

### 2.1.4. Número de painéis compensados

O número de painéis compensados é calculado pela Equação 4:

$$n_{painel} = \frac{n_{folha}}{n_{folha\_comp}} \quad (\text{Eq. 4})$$

Onde:

$n_{painel}$  = número de painéis compensados;  
 $n_{folha\_comp}$  = número de folhas no painel compensado;

### 2.1.5. Volume com casca ( $vr$ ), volume sem casca ( $vr_{sc}$ ), volume da tora arredondada ( $vr_{arr}$ ) e volume do rolo resto ( $vr_{rest}$ )

A Equação 5 calcula o volume com os diâmetros com casca pela fórmula de Smalian.

$$vr = \frac{\pi}{40000} * \left( \frac{di_{casc2}^2 + di_{casc}^2}{2} \right) * comp_{tora} \quad (Eq. 5)$$

Onde:

di<sub>casc2</sub> = menor diâmetro da tora;

di<sub>casc</sub> = maior diâmetro da tora;

comp<sub>tora</sub> = comprimento da tora

A Equação 6 calcula o volume da tora sem casca.

$$vr_{sc} = \frac{\pi}{40000} * \left( \frac{di_{menor}^2 + di_{maior}^2}{2} \right) * comp_{tora} \quad (Eq. 6)$$

Onde:

di<sub>menor</sub> = menor diâmetro da tora sem casca;

di<sub>maior</sub> = maior diâmetro da tora sem casca;

A Equação 7 calcula o volume da tora arredondada (cilíndrica)

$$vr_{arr} = \frac{\pi}{40000} * d_{arr}^2 * comp_{tora} \quad (Eq. 7)$$

Onde:

d<sub>arr</sub> = diâmetro da tora arredondada;

E a Equação 8 calcula o volume de perda do rolo resto com o diâmetro de interrupção da laminação.

$$perd_{rest} = \frac{\pi}{40000} * d_{rest}^2 * comp_{tora} \quad (Eq. 8)$$

### 2.1.6. Rendimento da laminação

O rendimento é calculado pela Equação 9:

$$rend = \frac{n_{folha} * es_{folha} * comp_{tora} * comp_{folha}}{vr} \quad (Eq. 9)$$

### 2.1.7. Perda no descascamento (*perd<sub>desc</sub>*), perda no arredondamento (*perd<sub>arr</sub>*), perda no rolo resto (*perd<sub>rest</sub>*) e perda total (*perd<sub>tot</sub>*)

Para o cálculo das perdas, são usados os volumes obtidos no item 5, conforme a seguir.

$$perd_{desc} = vr - vr_{sc} \quad (Eq. 10)$$

$$perd_{arr} = vr_{sc} - vr_{arr} \quad (Eq. 11)$$

$$perd_{tot} = perd_{desc} + perd_{arr} + perd_{rest} \quad (Eq. 12)$$

## 2.2. Dados 1 (Análise)

Os dados para o teste foram obtidos de uma parcela circular com raio de 10 metros, proveniente de um inventário florestal de um povoamento de *Eucalyptus urograndis*, sem manejo, com aproximadamente 19 anos, localizado no município de Bambuí, MG (Tabela 1, Figura 3). A parcela contém 27 árvores vivas (não existe a árvore 21), além de 3 bifurcações e 25 perdas (falhas e árvores mortas).

Das 27 árvores, oito foram cubadas para gerar, por meio da modelagem dos fustes, a função de forma que informa o diâmetro ao longo do tronco. Esta função é necessária para segmentar as toras. Os valores dos parâmetros utilizados para o cálculo da laminação nas dimensões de um painel compensado tipo fenólico (naval), com 2,2 x 1,6 m, foram:

- Diâmetro do rolo resto (*d<sub>rest</sub>*) = 10 cm;
- Comprimento da tora (*comp<sub>tora</sub>*) = 2.25 m;
- Espessura da folha (*es<sub>folha</sub>*) = 2 mm;
- Comprimento da folha (*comp<sub>folha</sub>*) = 1.65 m;
- Número de folhas no compensado (*n<sub>folha,comp</sub>*) = 7.

## 2.3. Dados 2 (Validação)

Os dados utilizados para validar o modelo correspondem aos apresentados nas Tabelas 1, 2, 3 e 4 de Bortoletto Júnior (2008).

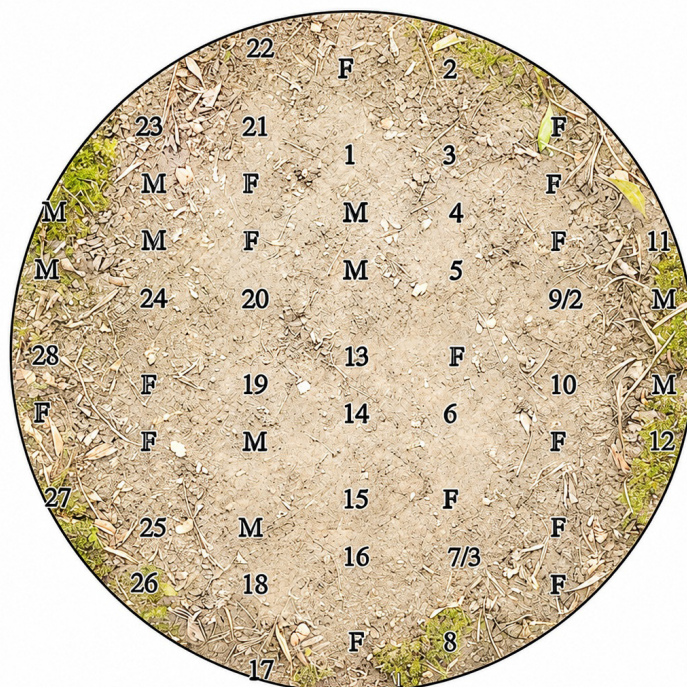
## 3. RESULTADOS

### 3.1. Dados 1 (Análise)

Na análise da parcela foram calculadas 503 folhas completas a partir de 125 toras, sendo que 50 toras não produziram folhas. Esse total

**Tabela 1** - Talhão, parcela e árvore, Diâmetro a altura do peito (Dap), altura total (Ht), altura comercial (m) e defeitos nas árvores

Talh	Parc	Arv	Dap(cm)	Ht(m)	Hc(m)	Obs
1	1	M				
1	1	M				
1	1	1	13,8	18,0	18,0	Galh. 3 m
1	1	F				
1	1	2	13,3	17,7	17,7	
1	1	3	15,7	17,1	17,1	Galh. 6.8 m
1	1	4	14,7	9,5	9,5	Galh. 1.3 m
1	1	5	32,6	29,0	23,8	Galh. 12.1 m
1	1	F				
1	1	6	15,1	20,0	4,6	Quebr.
1	1	F				
1	1	7	13,7	22,0	22,0	Bifurc.
1	1	7	5,6	22,0	22,0	Bifurc.
1	1	7	18,5	22,0	6,9	Bifurc.
1	1	8	26,7	24,0	16,3	Galh. 11.3 m
...	...	...	...	...	...	...



**Figura 3** - Parcela de 10 metros de raio, com 27 árvores vivas + 3 bifurcações, de eucalipto urograndis seminal, 10 mortas e 15 falhas (52 mudas plantadas), no espaçamento 3 x 2 m, com 19 anos, sem manejo (desuniforme, ataque de formigas, alta mortalidade)

**Tabela 2** - Frequência de toras por classe de volume, diâmetro arredondado (d), volume de toras (vr), conicidade, número de folhas, rendimento, folhas segregadas (segr\_folh), e percentual de segr\_folh

cl_v(m³)/tora	Toras**	D (cm)	V r(m³)**	Conic (cm/m)*	Folh **	Rend %	segr_folh (m)**	segr_folh %
0,000 - 0,025	40	9,6	0,57	0,65	0	0,0	7,0	5,5
0,025 - 0,050	68	16,3	2,57	0,83	102	29,5	81,2	14,2
0,050 - 0,075	36	20,7	2,18	1,09	147	50,0	42,4	8,7
0,075 - 0,100	20	24,6	1,70	1,25	138	60,2	24,8	6,6
0,100 - 0,125	7	27,8	0,76	1,38	63	61,6	8,2	4,9
0,125 - 0,150	3	30,9	0,40	1,49	37	68,1	2,8	3,1
0,150 - 0,175	1	34,9	0,17	1,58	16	69,7	1,6	4,1
<b>Total</b>	<b>175</b>		<b>8,36</b>		<b>503</b>	<b>44,7</b>	<b>168,0</b>	<b>9,0</b>

\* média na classe; \*\* total na classe.

**Tabela 3** - Frequência de toras por classe de volume, volume (vr), perdas por descascamento, por arredondamento, pelo rolo resto, folhas segregadas (segr\_folh) e perda total, percentuais

cl_v(m³)/tora	(m³)			%		
	vr	perd_desc	perd_arr	perd_rrest	segr_folh	perd_t
0,000 - 0,025	0,57	13,6	9,8	50,1	5,5	79,0
0,025 - 0,050	2,57	13,6	6,9	34,3	14,2	68,9
0,050 - 0,075	2,18	13,5	7,2	21,4	8,7	50,8
0,075 - 0,100	1,70	13,5	7,0	15,2	6,6	42,3
0,100 - 0,125	0,76	13,5	6,8	12,0	4,9	37,2
0,125 - 0,150	0,40	13,5	6,6	9,6	3,1	32,9
0,150 - 0,175	0,17	13,5	6,2	7,6	4,1	31,4
<b>Total</b>	<b>8,36</b>	<b>13,5</b>	<b>7,1</b>	<b>24,3</b>	<b>9,0</b>	<b>54,0</b>

**Tabela 4** - Resultados fornecidos por hectare

Arvores	865
falhas	801
vt(m <sup>3</sup> )	285
toras	5608
vr(m <sup>3</sup> )	253
folhas	15242
Painéis compensados	2152
receita(R\$)	215200
R\$/m <sup>3</sup>	849
perd_desc (m <sup>3</sup> )	34
perd_arr (m <sup>3</sup> )	18
perd_rrest (m <sup>3</sup> )	69
perd_t (m <sup>3</sup> )	121

resultou na produção de 71 painéis compensados. O volume das 175 toras foi de 8,36 m<sup>3</sup>. A perda na laminação foi de 101 folhas segregadas, totalizando 16,7% de folhas não aproveitadas. O rendimento médio da laminação foi de 44,7%, com variação de 29,5% na menor classe de volume de toras e 69,7% na maior classe, indicando que o rendimento aumenta conforme o diâmetro da tora (Tabela 2).

Na Tabela 3, são apresentadas as perdas percentuais associadas ao descascamento, arredondamento, ao rolo resto e a segregação. Essas perdas foram de 13,5%, 7,1%, 24,3% e 9% respectivamente, com uma perda total de 54%.

A Tabela 4 apresenta os resultados expandidos para 1 hectare, com 48% de falhas e uma grande heterogeneidade, o que resultou em baixa produtividade. A produção máxima foi de 2.152 painéis compensados, com um volume de 248 m<sup>3</sup>. A perda total em volume, considerando o descascamento, arredondamento e rolo resto, foi de 121 m<sup>3</sup>.

Considerando um preço de R\$ 100 por painel, a receita gerada seria de R\$ 215.200/ha, ou R\$ 849/m<sup>3</sup>. Vale destacar que, devido à alta taxa de árvores mortas na parcela, este valor poderia ser quase o dobro em um povoamento bem manejado.

Como os dados apresentados referem-se à produção potencial, não foram levados em consideração os defeitos nas árvores (como tortuosidade, rachaduras e problemas fitossanitários), nem as perdas no processamento (como rupturas das folhas ou danos durante a manipulação), além da seleção de toras, que envolve uma análise custo-benefício do número de folhas por tora.

Por exemplo, a indústria poderia optar por desconsiderar toras com potencial para produzir apenas 1, 2 ou 3 folhas, ou até mesmo desclassificar toras com diâmetros inferiores a um determinado limite.

Em relação ao faturamento, não foram considerados os custos associados à exploração florestal nem os custos de confecção dos painéis compensados até sua venda ao consumidor final, o que impossibilita o cálculo do lucro da atividade.

Uma relação que pode ser estabelecida é o potencial de produção de folhas em função do diâmetro menor com casca (Figura 4). Considerando os parâmetros fixos de diâmetro do rolo resto (10 cm), espessura da folha (2 mm) e comprimento da folha (1,65 m), observa-se que a produção de folhas é diretamente proporcional ao diâmetro da tora, que é considerado como o valor máximo alcançado.

Assim, o número de folhas pode ser utilizado como um indicador na seleção de toras. A análise sugere que toras com diâmetro inferior a 16 cm não geram folhas ou produzem apenas uma folha. Toras com diâmetro entre 16 e 18 cm geram duas folhas. Dessa forma, a indústria poderia processar toras com potencial de produzir um número

determinado de folhas, enquanto as demais toras seriam direcionadas para outros usos.

### 3.2. Dados 2 (Validação)

Para validar os resultados obtidos, foram utilizados os dados apresentados por Bortoletto Júnior (2008). Para isso, foi necessário calcular a proporção de casca e a proporção da perda por arredondamento para cada ensaio, considerando os diâmetros maior, menor e arredondado de cada tora (Tabela 5). Nos ensaios com lâmina de 2 mm de espessura, a proporção de casca e de perda por arredondamento foi de 0,07. Para a espessura de 3 mm, a proporção de casca foi também 0,07, enquanto a perda por arredondamento foi de 0,147.

As perdas absolutas em m<sup>3</sup> do rolo resto, descascamento, arredondamento e a perda total, observadas e calculadas, estão apresentadas na Tabela 6, assim como o número de folhas. Para calcular o número de folhas foram obtidos o volume da folha (0,98\*1\*0,002 = 0,00196 m<sup>3</sup>) do ensaio da Tabela 1 e volume da folha (1,225\*1,25\*0,003 = 0,00459375 m<sup>3</sup>) do ensaio da Tabela 2, ambos em Bortoletto Júnior (2008). O número de folhas é calculado por: nfolhs = [vr\_arr(m<sup>3</sup>) - vr\_rrest(m<sup>3</sup>)]/volume da folha, com vr\_arr e vr\_rrest obtidos das Tabelas 1 e 2 de Bortoletto Júnior (2008).

Para as toras analisadas no 1º ensaio (9 toras), a diferença no número total de folhas foi de 1 folha a menos, calculada pelo algoritmo e, para o 2º ensaio com 10 toras, foram 6 folhas a menos (139), em um total de 145 folhas processadas, encontrando-se diferenças de até 4 folhas por tora no 2º ensaio.

Com relação aos percentuais totais de perdas por descascamento, arredondamento e total para cada ensaio, a diferença entre os resultados do algoritmo e do processamento foi no máximo de 1,7% (27,4 - 25,7%), demonstrando alto grau de acerto. Desta forma, verificou-se que as perdas no processamento e o número de folhas calculados pelo algoritmo apresentaram boa exatidão em relação aos dados observados.

A comparação gráfica entre os resultados dos ensaios em Bortoletto Júnior e os cálculos do algoritmo para perdas percentuais e o número de folhas é apresentada na Figura 5.

## 4. DISCUSSÃO

A comparação dos resultados obtidos neste estudo com aqueles presentes na literatura nem sempre é possível devido à variação nos parâmetros de maquinário utilizados, como o diâmetro do rolo resto, a espessura das lâminas, a proporção de casca, a intensidade do arredondamento pela conicidade da tora, bem como as diferenças nos diâmetros das toras.

Iwakiri et al. (2013) investigaram a produção e a qualidade da laminação em diferentes espécies de eucalipto e observaram rendimentos variando entre 41,37% e 67%, com variações significativas dependendo da espécie e das condições do processo. Bouaphavong et al. (2022) obtiveram uma taxa de recuperação média (rendimento) de 56,07% no processamento de 217 toras com 1 m de comprimento de Teca com 18 anos, mas com variação de 44% a 67%.

No caso desse estudo com os dados do item 3.1, o rendimento variou de 29,5%, na menor classe de volume de toras, a 69,7% na maior classe, com média de 44,7. O baixo rendimento de 29,5% justifica-se pelo grande número de toras (68) na classe de média 16,3 cm de diâmetro (Tabela 2).

Tavares et al. (2018), em um estudo com *Pinus patula* e *Pinus taeda*, reportaram rendimentos médios de 43,22% e 40,16%, respectivamente, com perdas por descascamento e arredondamento de 31,98% e 30,52%,

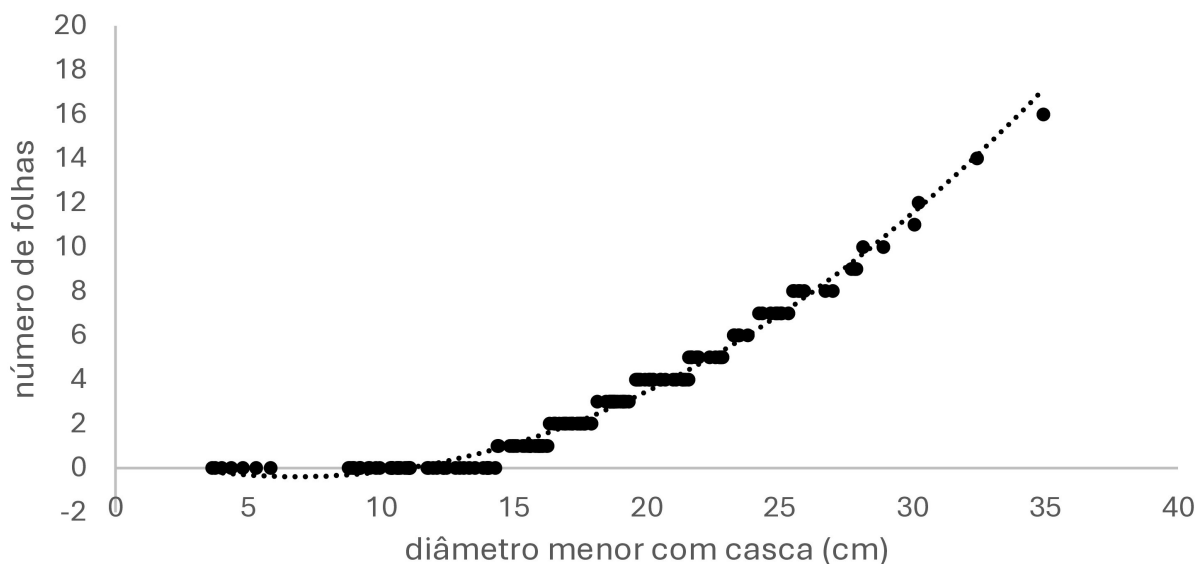


Figura 4 - Número de folhas de 0,002 x 2,25 x 1,65 m em função do diâmetro menor com casca

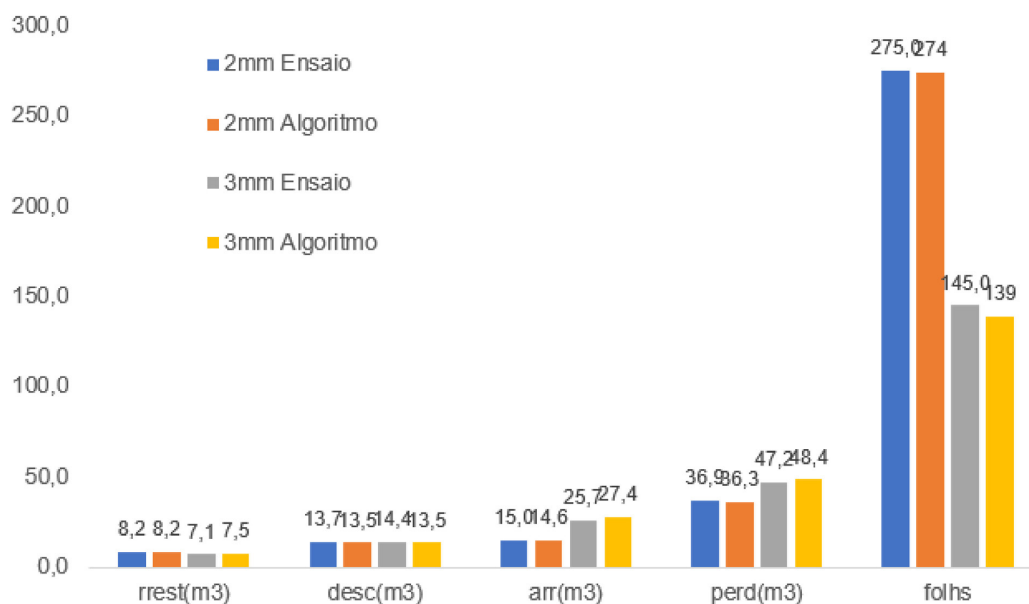


Figura 5 - Perdas e número de folhas dos ensaios com espessura 2 e 3 mm e os respectivos resultados do algoritmo

Tabela 5 - Proporção de casca em relação aos diâmetros maior, menor e a proporção da perda em relação ao diâmetro arredondado nos ensaios de 2mm e 3mm

Tora	2 mm			3 mm		
	d_mai	d_men	d_arred	d_mai	d_men	d_arred
2A2	0,068	0,097	0,031	0,063	0,068	0,235
2B2	0,083	0,100	0,048	0,082	0,083	0,106
3A2	0,068	0,085	0,077	0,071	0,027	0,208
3B2	0,057	0,045	0,095	0,043	0,057	0,136
4B2	0,077	0,048	0,085	0,095	0,087	0,048
5A2	0,093	0,085	0,077	0,116	0,077	0,250
5B2	0,085	0,059	0,063	0,122	0,093	0,118
6A2	0,042	0,029	0,106	0,059	0,045	0,079
6B2	0,058	0,088	0,065	0,064	0,042	0,145
<b>Média</b>	<b>0,070</b>	<b>0,071</b>	<b>0,072</b>	<b>0,079</b>	<b>0,064</b>	<b>0,147</b>

enquanto os resultados na Tabela 3 mostraram perdas de 20,6%, o que pode ser devida a espécie, com espessuras de casca menores no eucalipto em relação ao pinus. Os valores em Tavares para perdas pelo manuseio e segregação foram de 7,78 e 14,04% comparados a perda de 9% com os dados do item 3.1.

Em Almeida et al. (2004) são apresentadas perdas e rendimentos percentuais para diferentes espécies de eucalipto, considerando cinco referências distintas. A média geral de rendimento encontrada por esses autores foi de 45,41%, um valor muito próximo ao rendimento de 44,7% obtido com os dados do item 3.1. Assim como as perdas médias, de 54,59% apresentadas por Almeida et al. (2004), enquanto a perda obtida com os dados do item 3.1 foi de 54%.

Na avaliação de rendimento deste estudo e das demais referências, perdas pelo descascamento, pelo rolo resto e pela segregação de laminas, serão sempre maiores para toras com menores diâmetros. Considerando que a troca de toras no maquinário representa um custo na operação, mais otimizado será o processo de laminação usando-se toras com maiores diâmetros, para maiores rendimentos e menor número de reposições de toras no torno. O que parece ser um desafio nesta operação, é definir o diâmetro limite para o custo benefício da atividade, o que envolve fatores externos a esse estudo, como o destino de toras não classificadas, a demanda a ser atendida, dentre outros.

Em relação à validação do algoritmo, os resultados comparados com os dados do item 3.2 de Bortoletto Júnior (2008), que processou toras diretamente, demonstram que, em florestas com características uniformes e modelos de taper bem ajustados, o algoritmo pode gerar simulações com erros de baixa magnitude. Essa constatação é suportada pelos resultados da Tabela 6, referente aos ensaios com laminas de 2 e 3 mm. Por este procedimento, é possível avaliar uma floresta plantada para obtenção de produtos laminados usando os dados do inventário florestal, incluindo a cubagem. Os demais parâmetros são referentes a especificação do produto e ao maquinário.

As atuais tecnologias, como lasers de escaneamento, demonstrado em Larysch et al. (2025), para obtenção do sólido de fustes da floresta e subsequente enquadramento de rolos de lâminas em segmentos do fuste, ainda não dispensam a metodologia apresentada neste estudo pois, para obter as perdas e número de folhas, um dos procedimentos são os cálculos apresentados.

Assim, o algoritmo proposto oferece uma ferramenta robusta para que produtores florestais e empresas fabricantes de painéis possam prever com um nível de precisão a produção e a receita antes da colheita e do processo de laminação. Essa capacidade de previsão antecipa decisões no planejamento da produção, como a escolha das toras a serem utilizadas, a gestão do estoque de painéis e o ajuste da produção conforme as metas de rendimento.

**Tabela 6** - Comparação de resultados obtidos por Bortoletto Júnior (2008) e pelo algoritmo de laminação para o 1º ensaio com 2 mm de espessura da folha, e o 2º ensaio, com 3 mm,

Tora	Resultados em Bortoletto Júnior (2008)						Resultados do Algoritmo					
	vr (m³)	Rrest (cm)	Rrest (m³)	Desc (m³)	Arr (m³)	Perd (m³)	*folhs	Rrest (m³)	Desc (m³)	Arr (m³)	Perd (m³)	folhs
<b>2mm</b>												
2A2	0,103	10	0,008	0,016	0,009	0,033	35	0,008	0,014	0,013	0,035	34
2B2	0,099	10	0,008	0,017	0,011	0,036	32	0,008	0,013	0,014	0,035	32
3A2	0,103	10	0,008	0,015	0,018	0,041	32	0,008	0,014	0,015	0,037	33
3B2	0,091	10	0,008	0,009	0,018	0,035	28	0,008	0,012	0,015	0,035	28
4B2	0,079	10	0,008	0,010	0,012	0,030	25	0,008	0,011	0,012	0,031	24
5A2	0,105	10	0,008	0,018	0,016	0,042	32	0,008	0,014	0,017	0,039	33
5B2	0,095	10	0,008	0,013	0,011	0,032	32	0,008	0,013	0,014	0,035	30
6A2	0,096	10	0,008	0,007	0,021	0,036	30	0,008	0,013	0,015	0,036	30
6B2	0,092	10	0,008	0,013	0,013	0,034	29	0,008	0,012	0,012	0,032	30
<b>Total</b>	<b>0,864</b>		<b>0,071</b>	<b>0,118</b>	<b>0,129</b>	<b>0,319</b>	<b>275</b>	<b>0,071</b>	<b>0,117</b>	<b>0,127</b>	<b>0,314</b>	<b>274</b>
<b>%</b>			<b>8,2</b>	<b>13,7</b>	<b>15,0</b>	<b>36,9</b>		<b>8,2</b>	<b>13,5</b>	<b>14,6</b>	<b>36,3</b>	
<b>3mm</b>												
2A1	0,144	9	0,008	0,018	0,059	0,086	12	0,010	0,019	0,042	0,071	15
2B1	0,129	9,5	0,009	0,021	0,023	0,053	16	0,010	0,017	0,032	0,059	15
3A1	0,154	11,5	0,013	0,016	0,059	0,087	14	0,010	0,021	0,048	0,079	16
3B1	0,120	10	0,010	0,012	0,029	0,050	15	0,010	0,016	0,028	0,054	13
4A1	0,126	10	0,010	0,022	0,015	0,047	17	0,010	0,017	0,035	0,062	13
4B1	0,110	9,5	0,009	0,021	0,040	0,070	8	0,010	0,015	0,030	0,055	11
5A1	0,152	9	0,008	0,031	0,032	0,071	17	0,010	0,020	0,044	0,074	16
5B1	0,110	9,5	0,009	0,020	0,007	0,037	16	0,010	0,015	0,028	0,053	12
6A1	0,138	9	0,008	0,015	0,038	0,061	16	0,010	0,019	0,040	0,068	15
6B1	0,119	9,5	0,009	0,013	0,031	0,053	14	0,010	0,016	0,029	0,055	13
<b>Total</b>	<b>1,302</b>	<b>9,65</b>	<b>0,092</b>	<b>0,187</b>	<b>0,334</b>	<b>0,614</b>	<b>145</b>	<b>0,098</b>	<b>0,176</b>	<b>0,356</b>	<b>0,630</b>	<b>139</b>
<b>%</b>			<b>7,1</b>	<b>14,4</b>	<b>25,7</b>	<b>47,2</b>		<b>7,5</b>	<b>13,5</b>	<b>27,4</b>	<b>48,4</b>	

Rrest(cm): diâmetro do rolo resto; Rrest(m³): volume do rolo resto; Desc(m³): volume da casca; Arr(m³): volume do arredondamento; Perd(m³): volume de perda total (Rrest+Desc+Arr); folhs: número de folhas, Transferido para o texto (TARJA AMARELA).

A integração dessa ferramenta no planejamento de produção pode contribuir para a redução de perdas, aumento do rendimento e maior previsibilidade econômica.

## 5. CONCLUSÕES

O algoritmo para cálculo da laminação fornece resultados com boa exatidão quando aplicado a um conjunto de toras. Sua repetibilidade exige um maquinário devidamente calibrado e uniformidade na espessura da casca das toras. Em florestas plantadas, para que a exatidão seja mantida, é essencial, além da calibração do maquinário, ter acurácia na função de forma, que descreve o afilamento do tronco ao longo de sua altura.

Esse sistema computacional permite a previsão antecipada da produção de painéis compensados ou qualquer outro produto laminado que tenha peças de dimensões fixas, para que produtores florestais e indústrias de laminação possam planejar sua produção com base na demanda esperada, seja para florestas próprias ou adquiridas. A capacidade de prever os volumes de madeira processada e os rendimentos de laminação pode facilitar decisões, como a escolha das toras a serem adquiridas ou colhidas, otimizando tanto os custos quanto a eficiência operacional.

Além disso, a utilização deste algoritmo pode contribuir para uma maior transparência e eficiência na gestão florestal e no processo produtivo de madeira engenheirada, criando oportunidades para reduzir perdas e aumentar a rentabilidade.

## 6. REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira da Indústria de Madeira Processada Mecanicamente – ABIMCI. (2024) Recuperado em 11 de novembro de 2024, de [https://abimci.com.br/o-mercado-de-compensados-no-brasil-e-tema-de-painel-no-woodtrade-brazil/?utm\\_source=chatgpt.com](https://abimci.com.br/o-mercado-de-compensados-no-brasil-e-tema-de-painel-no-woodtrade-brazil/?utm_source=chatgpt.com)
- Almeida, R. R., Bortoletto Júnior, G., & Jankowsky, I. P. (2004). Produção de lâminas a partir da madeira de clones do híbrido *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*. *Scientia Forestalis*, (65), 49-58.
- Andrade, V. C., Terra, D. L. C. V., & Carvalho, S. P. C. (2022). Análise de regressão do perfil do fuste de *Corymbia citriodora* formado em área de Cerrado. *Ciência Florestal*, 32(3), 1500-1527. <https://doi.org/10.5902/1980509866721>.
- Bonazza, M., Sampietro, J. A., Vivian, M. A., Silvestre, R., & Modes, K. S. (2022). Efeito da idade, sortimento e tempo de estocagem na densidade verde da madeira de *Pinus taeda* L. *Ciência Florestal*, 32(2), 735-756. <https://doi.org/10.5902/1980509848083>.
- Bonato Júnior, A. I., Rocha, M. P., Juízo, C. G. F., & Klitzke, R. J. (2017). Efeito do sistema de desdobro e das classes diamétricas no rendimento em madeira serrada de *Araucaria angustifolia*. *Floresta e Ambiente*, 24(0), e00100414. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.100414>.
- Bortoletto Júnior, G. (2008). Avaliação da qualidade da madeira de *Pinus merkusii* para produção de lâminas. *Scientia Forestalis*, 36(78), 95-103.
- Bouaphavong, D., Jirusombuti, S., Vineen, T., Phonetip, K., & Soukphaxay, K. (2022). Veneer recovery of plantation-grown teak using spindleless lathetechnology. *International Journal of Recent Scientific Research*, 13(07), 1711-1715. <https://doi.org/10.24327/ijrsr.2022.1307.0358>.
- Cunha, A. B., França, M. C., Almeida, C. C. F., Gorski, L., da Cruz, R. C., & Santos, D. (2015). Avaliação do rendimento em madeira serrada de *Eucalyptus benthamii* e de *Eucalyptus grandis* por meio do desdobro tangencial e radial. *Floresta*, 45(2), 241-250. <https://doi.org/10.5380/RF.V45I2.32570>.
- Exame. (2022). *Edifícios de madeira revolucionam construção civil*. Recuperado em 11 de novembro de 2024, de <https://exame.com/negocios/edificios-de-madeira-revolucionam-construcao-civil/>
- Iwakiri, S., Matos, J. L. M., Prata, J. G., Trianoski, R., & Silva, L. S. (2013). Evaluation of the use potential of nine species of genus *Eucalyptus* for production of veneers and plywood panels. *Cerne*, 19(2), 263-269. <https://doi.org/10.1590/S0104-77602013000200010>.
- Juízo, C. G., Rocha, M. P., & Bila, N. F. (2014). Avaliação do rendimento em madeira serrada de eucalipto para dois modelos de desdobro numa serraria portátil. *Floresta e Ambiente*, 21(4), 543-550. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.062213>.
- Kozak, A., Munro, D. D., & Smith, J. G. H. (1969). Taper functions and their applications in forest inventory. *Forestry Chronicle*, 45(4), 278-283. <https://doi.org/10.5558/tfc45278-4>.
- Larysch, E., Frey, J., Schindler, Z., Sprengel, L., Hillenmeyer, K., Kohnle, U., Seifert, T., & Spiecker, H. (2025). Quantifying and mapping the ready-to-use veneer volume of European beech trees based on terrestrial laser scanning data. *European Journal of Forest Research*, 144(5), 1081-1098. <https://doi.org/10.1007/s10342-025-01796-z>.
- Manhica, A. A., Rocha, M. P., & Timofeiczky Júnior, R. (2013). Eficiência operacional na serragem de Pinus utilizando modelos de corte em uma pequena serraria. *Cerne*, 19(2), 339-346. <https://doi.org/10.1590/S0104-77602013000200019>.
- Melo, C. (2023). ESG na construção civil: porque a madeira é o concreto do futuro. Exame. Recuperado em 11 de novembro de 2024, de <https://exame.com/esg/esg-na-construcao-civil-por-que-a-madeira-e-o-concreto-do-futuro/>
- Modes, K. S., Bortoletto Júnior, G., Santos, L. M. H., Bento, A. R., & Vivian, M. A. (2014). Rendimento em laminação da madeira de *Schizolobium amazonicum* em torno desfolhador do tipo tracionado. *Ciência da Madeira*, 5(2), 151-157. <https://doi.org/10.12953/2177-6830.v05n02a09>.
- Modes, K. S., Cozer, V., Dobner Júnior, M., & Vivian, M. A. (2023). Propriedades físico-mecânicas de painéis compensados com a madeira de *Cupressus lusitanica* Mill. *Ciência Florestal*, 33(3), e74002. <https://doi.org/10.5902/1980509874002>.
- Rocha, G. C., Moraes, W. S., Moraes, T. P. E., Barreto, M. I. S. B., Marchesan, R., Monteiro, T. C., & Moraes, C. B. (2024). Madeira de clones de Eucalyptus como matéria prima para a produção de painéis compensados. *Scientia Forestalis*, 52, e3926. <https://doi.org/10.18671/scifor.v52.03>.
- Rocha, M. P., & Tomaselli, I. (2002). Efeito do modelo de desdobro na qualidade da madeira serrada de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus dunnii*. *Cerne*, 8(2), 70-83.
- Schumacher, F. X., & Hall, F. S. (1933). Logarithmic expression of timber-tree volume. *Journal of Agricultural Research*, 47(9), 719-734.
- Silva, M. L. M., Binoti, D. H. B., Gleriani, J. M., & Leite, H. G. (2009). Ajuste do modelo de Schumacher e Hall e aplicação de redes neurais artificiais para estimar volume de árvores de eucalipto. *Revista Árvore*, 33(6), 1133-1139. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622009000600015>.
- Tavares, E. L., Hillig, E., Bednarczuk, E., Machado, J. F., & Mustefaga, E. (2018). Massa específica da madeira, rendimento da laminação e qualidade das lâminas de *Pinus patula* Schlttdl & Cham. *Ciência da Madeira*, 9(2), 103-112. <https://doi.org/10.12953/2177-6830/rcm.v9n2p103-112>.
- Tupinambá-Simões, F., Pascual, A., Guerra-Hernández, J., Ordóñez, C., Barreiro, S., & Bravo, F. (2025). Combining hand-held and drone-based lidar for forest carbon monitoring: insights from a Mediterranean mixed forest in central Portugal. *European Journal of Forest Research*, 144(4), 925-940. <https://doi.org/10.1007/s10342-025-01772-7>.

## CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

TCCC: conceituação, análise formal, investigação, metodologia, software, validação, escrita – primeira redação, escrita – edição; LFF: recursos, software, escrita – revisão.