



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"  
Campus de Botucatu



**JOSÉ ALVES DOS SANTOS JÚNIOR**

**POTENCIAL TECNOLÓGICO DA MADEIRA SERRADA DE PLANTIOS MISTOS**

**Botucatu**

**2026**



**JOSÉ ALVES DOS SANTOS JÚNIOR**

**POTENCIAL TECNOLÓGICO DA MADEIRA SERRADA DE PLANTIOS MISTOS**

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp Câmpus de Botucatu, para obtenção do título de Doutor em Ciência Florestal.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Luiz Longui

Coorientador: Dr. Israel Luiz de Lima

**Botucatu**

**2026**

S237p

Santos Júnior, José Alves dos

Potencial tecnológico da madeira serrada de plantios mistos / José Alves dos Santos Júnior. -- Botucatu, 2026

74 p. : il., tabs.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP),  
Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu

Orientador: Eduardo Luiz Longui

Coorientador: Israel Luiz de Lima

1. qualidade da madeira. 2. anatomia da madeira. 3. propriedades físico mecânicas. 4. trabalhabilidade. 5. plantios mistos. I. Título.


## CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: POTENCIAL TECNOLÓGICO DA MADEIRA SERRADA DE PLANTIOS MISTOS


AUTOR: JOSÉ ALVES DOS SANTOS JÚNIOR

ORIENTADOR: EDUARDO LUIZ LONGUI ORIENTADOR: ISRAEL LUIZ DE LIMA


Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em Ciência Florestal, pela Comissão Examinadora:

Documento assinado digitalmente  
 **EDUARDO LUIZ LONGUI**  
Data: 07/01/2026 18:52:47-0300  
Verifique em <https://validar.it.gov.br>


Pesquisador Dr. EDUARDO LUIZ LONGUI (Participação Virtual)  
Divisão de Dasonomia / Instituto Florestal do Estado de São Paulo

Documento assinado digitalmente  
 **MARCOS CESAR DE MORAES PEREIRA**  
Data: 07/01/2026 15:09:46-0300  
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. MARCOS CESAR DE MORAES PEREIRA (Participação Virtual)  
Departamento de Engenharia / UNESP / Câmpus de Itapeva - ICE

Documento assinado digitalmente  
 **OLÍVIA PEREIRA LOPES**  
Data: 07/01/2026 14:14:01-0300  
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Dra. OLÍVIA PEREIRA LOPES (Participação Virtual)  
Instituto de Ciências Agrárias / Universidade Federal de Uberlândia

Documento assinado digitalmente  
 **MICHELLY CASAGRANDE STRAGLIOTTO**  
Data: 07/01/2026 13:26:38-0300  
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Dra. MICHELLY CASAGRANDE STRAGLIOTTO (Participação Virtual)  
Embrapii Bioforest / UFOPA

Documento assinado digitalmente  
 **BRUNO MONTEIRO BALBONI**  
Data: 07/01/2026 14:55:06-0300  
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Dr. BRUNO MONTEIRO BALBONI (Participação Virtual)  
Recursos Florestais / Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz

Botucatu, 06 de janeiro de 2026.



Dedico esta tese aos meus pais, José e Maria do Amparo, pelo apoio incondicional, pelos ensinamentos e por sempre acreditarem em mim.

Às minhas irmãs, Polyana e Joelma, pela parceria, pelo incentivo e por estarem ao meu lado em todos os momentos.

E à minha avó, Obdália “ A Bida” (in memoriam), cuja presença, amor e valores continuam sendo parte de quem eu sou.



## **AGRADECIMENTOS**

Inicialmente, expresso minha gratidão a Deus pelo dom do conhecimento, por nunca ter me abandonado e por todas as conquistas alcançadas ao longo desta jornada.

À minha família, em especial à minha mãe, Maria do Amparo, ao meu pai, José Alves, e às minhas irmãs, Polyana Andrade e Joelma Andrade, dedico um agradecimento especial. Sempre tive o apoio de vocês em minhas escolhas, mesmo quando elas me levaram para longe. Sou profundamente grato por todo carinho, incentivo e confiança. Ao Gabriel Aguilar, agradeço pelo apoio e pelo carinho nos momentos difíceis no final dessa jornada.

À minha família de Botucatu, com quem dividi um lar, Paloma e Breno, agradeço pela convivência, pelo apoio e pelos momentos compartilhados ao longo dessa etapa.

Aos amigos de Botucatu-SP, que me proporcionaram momentos felizes e ofereceram grande apoio ao longo dessa caminhada, construindo comigo uma verdadeira segunda família. Estendo também meu agradecimento aos amigos que estão distantes, mas que, mesmo assim, permanecem presentes em meu coração.

Ao meu orientador, professor Eduardo Longui, e ao meu coorientador, Israel Lima, manifesto meu sincero reconhecimento pelo conhecimento transmitido, pela orientação e pelo apoio durante o desenvolvimento desta pesquisa. Esse suporte foi fundamental para minha formação e continua contribuindo para minha compreensão até hoje.

À UNESP, expresso minha gratidão pela infraestrutura e pelos equipamentos disponibilizados, que foram essenciais para a realização desta pesquisa.

Ao CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, agradeço a concessão da bolsa de estudos, fundamental para o desenvolvimento deste trabalho.



## RESUMO

A crescente demanda por madeira de origem sustentável tem impulsionado o interesse por sistemas de plantios mistos que combinam espécies nativas e exóticas, capazes de diversificar a produção, ampliar a oferta de madeira de qualidade e reduzir a pressão sobre florestas naturais. Apesar desse potencial, ainda há lacunas sobre como diferenças anatômicas e variações nas propriedades físicas e mecânicas de espécies jovens influenciam seu desempenho tecnológico, especialmente em processos industriais de usinagem. A integração dessas dimensões é fundamental para orientar o manejo, o beneficiamento e a seleção de espécies em sistemas produtivos tropicais. O objetivo desta tese foi avaliar a qualidade tecnológica da madeira de cinco espécies tropicais de plantios mistos e comerciais, sendo elas *Calophyllum brasiliense*, *Cariniana legalis*, *Cordia trichotoma*, *Khaya grandifoliola* e *Khaya senegalensis*. A tese foi estruturada em três capítulos que abordam, de forma complementar, a anatomia da madeira, as propriedades físicas e mecânicas e a trabalhabilidade em operações padronizadas de usinagem. A análise anatômica revelou diferenças estruturais marcantes entre as espécies. *Khaya grandifoliola* apresentou vasos de maior área e diâmetro, enquanto *Cordia trichotoma* exibiu raios e fibras de maiores dimensões. O conjunto de variáveis anatômicas permitiu identificar padrões funcionais distintos, refletindo estratégias divergentes entre condução, suporte e organização tecidual. A análise multivariada explicou mais de 70% da variação total e mostrou agrupamentos coerentes entre espécies com características estruturais semelhantes. No capítulo sobre propriedades físicas e mecânicas foram observados contrastes significativos entre densidade, resistência e rigidez. *Cariniana legalis* apresentou os maiores valores de densidade e de resistência à compressão. *Khaya grandifoliola* destacou-se pelo maior módulo de elasticidade, enquanto *Cordia trichotoma* exibiu os menores valores para a maioria das propriedades avaliadas. Os resultados confirmam a estreita relação entre a estrutura anatômica do lenho e o desempenho físico-mecânico. A avaliação da trabalhabilidade mostrou que as espécies respondem de maneira distinta às operações de aplainamento, desengrosso, lixamento, perfuração e pregação. *Cariniana legalis* e *Cordia trichotoma* apresentaram melhor qualidade no aplainamento. *Khaya senegalensis* registrou o maior número de defeitos no desengrosso. A perfuração resultou em levantamento da grã em todas as espécies, enquanto o fendilhamento por pregos apresentou desempenho amplamente satisfatório. Os resultados integrados demonstram que as diferenças anatômicas determinam o comportamento físico-mecânico e influenciam diretamente a trabalhabilidade. As evidências apresentadas contribuem para o entendimento da qualidade tecnológica em sistemas de plantios mistos e oferecem subsídios para o manejo florestal e o processamento industrial da madeira.

**Palavras-chave:** anatomia da madeira; propriedades físico mecânicas; trabalhabilidade; madeira tropical; plantios mistos.



## ABSTRACT

The growing demand for sustainably sourced wood has intensified interest in mixed-species plantations that combine native and exotic species, capable of diversifying production, increasing the supply of quality timber and reducing pressure on natural forests. Despite this potential, there are still gaps in the understanding of how anatomical differences and variations in the physical and mechanical properties of young wood influence its technological performance, especially in industrial machining processes. Integrating these dimensions is essential to guide management, processing and species selection in tropical production systems. The objective of this thesis was to evaluate the technological quality of wood from five tropical species grown in mixed and commercial plantations: *Calophyllum brasiliense*, *Cariniana legalis*, *Cordia trichotoma*, *Khaya grandifoliola* and *Khaya senegalensis*. The thesis is structured into three complementary chapters addressing wood anatomy, physical and mechanical properties and machinability under standardized testing conditions. The anatomical analysis revealed marked structural differences among species. *Khaya grandifoliola* exhibited larger vessel areas and diameters, while *Cordia trichotoma* showed larger ray dimensions and longer fibers. The set of anatomical variables allowed the identification of distinct functional patterns, reflecting divergent strategies related to conduction, support and tissue organization. Multivariate analysis explained more than 70 percent of the total variation and indicated coherent groupings among species with similar structural traits. The chapter on physical and mechanical properties showed significant contrasts in density, strength and stiffness. *Cariniana legalis* presented the highest values for density and compressive strength. *Khaya grandifoliola* stood out with the highest modulus of elasticity, while *Cordia trichotoma* displayed the lowest values for most evaluated properties. These findings confirm the strong relationship between wood anatomical structure and its physical and mechanical performance. The machinability assessment demonstrated that the species respond differently to planing, surfacing, sanding, drilling and nail-withdrawal tests. *Cariniana legalis* and *Cordia trichotoma* achieved the best performance in planing. *Khaya senegalensis* exhibited the highest incidence of defects during surfacing. Drilling resulted in grain raising across all species, while nail-withdrawal tests showed overall satisfactory performance. The integrated results demonstrate that anatomical differences determine physical and mechanical performance and directly influence machinability. The evidence presented contributes to advancing the understanding of technological quality in mixed-species plantations and provides practical support for forest management and industrial wood processing.

**Keywords:** wood anatomy; physical and mechanical properties; machinability; tropical wood; mixed plantations.



## SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO GERAL.....</b>	<b>15</b>
<b>CAPÍTULO 1 - PARÂMETROS ANATÔMICOS COMO PREDITORES DA QUALIDADE TECNOLÓGICA DA MADEIRA....</b>	<b>19</b>
1.1 INTRODUÇÃO.....	21
1.2 MATERIAL E MÉTODOS .....	22
1.2.1 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL VEGETAL .....	22
1.2.2 DELINEAMENTO DO ESTUDO .....	23
1.2.3 PROCEDIMENTOS ESPECÍFICOS .....	24
1.2.3.1 PREPARO DAS AMOSTRAS .....	24
1.2.3.2 SECÇÕES HISTOLÓGICAS .....	24
1.2.3.3 DISSOCIAÇÃO DO LENHO.....	24
1.2.3.4 AVALIAÇÃO ANATÔMICA.....	25
1.2.4 ANÁLISE DOS DADOS.....	26
1.3 RESULTADOS.....	26
1.4 DISCUSSÃO .....	33
1.5 CONCLUSÃO .....	34
REFERÊNCIAS .....	36
<b>CAPÍTULO 2 - PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DA MADEIRA SERRADA DE ESPÉCIES TROPICAIS EM PLANTIOS MISTOS.....</b>	<b>39</b>
2.1 INTRODUÇÃO.....	41
2.2 MATERIAIS E MÉTODOS .....	42
2.2.1 ÁREA DE ESTUDO E COLETA DE MATERIAIS.....	42
2.2.2 PREPARO DAS AMOSTRAS.....	43
2.2.3 ENSAIOS FÍSICOS .....	43
2.2.4 ENSAIOS MECÂNICOS.....	44
2.2.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA .....	45

2.3	RESULTADOS.....	45
2.4	DISCUSSÃO .....	51
2.5	CONCLUSÃO.....	53
	REFERÊNCIAS .....	54
	<b>CAPÍTULO 3 QUALIDADE DE USINAGEM DA MADEIRA DE ESPÉCIES TROPICAIS EM SISTEMAS MISTOS .....</b>	<b>56</b>
3.1	INTRODUÇÃO .....	58
3.2	MATERIAL E MÉTODOS .....	59
3.2.1	PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS.....	59
3.2.2	TESTES DE USINAGEM.....	60
3.2.2.1	APLAINAMENTO .....	60
3.2.2.2	DESENGROSSO.....	60
3.2.2.3	FURAÇÃO POR BROCA.....	60
3.2.2.4	FENDILHAMENTO POR PREGOS .....	61
3.2.2.5	LIXAMENTO .....	61
3.2.3	AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA SUPERFÍCIE .....	61
3.3	RESULTADOS .....	62
3.4	DISCUSSÃO .....	65
3.5	CONCLUSÃO.....	67
	REFERÊNCIAS .....	68
	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>71</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>73</b>

## INTRODUÇÃO GERAL

A crescente demanda por madeira de alta qualidade, aliada à necessidade de conservação dos recursos naturais, tem impulsionado o desenvolvimento de sistemas florestais de produção mais eficientes, diversificados e ambientalmente sustentáveis (Laurance; Sayer; Cassman, 2014). Nesse contexto, plantios mistos compostos por espécies nativas e exóticas emergem como estratégia promissora, ao integrarem elevada produtividade, diversidade funcional e maior resiliência ecológica (Paquette; Messier, 2010).

A combinação de espécies com distintas estratégias ecológicas e atributos tecnológicos amplia o potencial produtivo e reduz a pressão sobre formações florestais naturais (Lima *et al.*, 2011, 2025).. Espécies do gênero *Khaya* (mogno-africano), caracterizadas por rápido crescimento, ampla adaptabilidade edafoclimática e elevado valor comercial, consolidam-se como alternativa ao mogno nativo no mercado internacional. Em complemento, espécies nativas como *Calophyllum brasiliense* Cambess (guanandi), *Cariniana legalis* (Mart.) Kuntze (jequitibá-rosa) e *Cordia trichotoma* (Vell.) Arrab. ex Steud. (louro-pardo) apresentam reconhecido potencial tecnológico e relevância ecológica.

A seleção dessas espécies fundamenta-se em critérios silviculturais, ecológicos e tecnológicos. *C. brasiliense* destaca-se pela plasticidade ecológica e bom desempenho em ambientes úmidos, além de madeira de densidade intermediária com potencial para múltiplos usos estruturais e não estruturais (Barreiros; De Souza Júnior; Dias, 2024; Lima *et al.*, 2025). *C. legalis*, espécie clímax de grande porte e alto valor madeireiro, representa um padrão de madeira de maior densidade e elevada resistência mecânica, tradicionalmente empregada na construção pesada (Lima *et al.*, 2011; Oliveira *et al.*, 2018). *C. trichotoma* é amplamente reconhecida pela boa trabalhabilidade e estabilidade dimensional, características desejáveis para aplicações de maior valor agregado (Santos *et al.*, 2022).

Em conjunto, essas espécies abrangem distintos grupos sucessionais, padrões anatômicos e classes de densidade, permitindo explorar ampla variação estrutural e tecnológica sob um mesmo sistema silvicultural (Klein *et al.*, 2016; Salvadori *et al.*, 2013; Santos *et al.*, 2022). Tal heterogeneidade constitui base adequada para análises comparativas conduzidas sob condições experimentais comuns, possibilitando avaliar

como características contrastantes influenciam a eficiência produtiva e a sustentabilidade de plantios mistos (Pretzsch *et al.*, 2016; Steckel *et al.*, 2019).

Sob a perspectiva ecológica, sistemas mistos promovem complementaridade funcional entre espécies, favorecendo o uso mais eficiente de recursos como luz, água e nutrientes, em decorrência da estratificação do dossel e da diferenciação funcional (Bongers, 2020). Essa complementaridade pode resultar em maior produtividade total do sistema quando comparada a monocultivos, fenômeno associado a efeitos de facilitação e à redução da competição intraespecífica (Bongers, 2020). Do ponto de vista edáfico, a diversidade de espécies contribui para maior aporte e diversidade de serapilheira, melhoria na ciclagem de nutrientes e incremento da atividade biológica do solo, favorecendo a sustentabilidade de longo prazo do sítio florestal (Guo *et al.*, 2025).

A diversificação de espécies também apresenta implicações econômicas relevantes, ao permitir o escalonamento de colheitas, a diluição de riscos de mercado e a ampliação do portfólio de produtos madeireiros. A produção simultânea de madeira com diferentes densidades, classes de resistência e características anatômicas amplia oportunidades de inserção em múltiplos segmentos industriais, agregando valor à cadeia produtiva e estimulando a transição de modelos simplificados para arranjos silviculturais mais complexos e resilientes (Calvano *et al.*, 2025).

No contexto nacional, a relevância da madeira serrada deve ser analisada em função da expressiva dimensão econômica do setor brasileiro de árvores plantadas. Em 2024, a cadeia produtiva apresentou crescimento superior ao do PIB nacional, alcançando receita bruta da ordem de R\$ 240 bilhões e participação aproximada de 1% no PIB brasileiro. No comércio exterior, o setor registrou exportações recordes, com saldo amplamente positivo na balança comercial, sendo a madeira serrada responsável por parcela significativa da agregação de valor na cadeia florestal, ainda que a celulose permaneça como principal produto exportado (Indústria Brasileira de Árvores, 2025). Diante desse contexto de expansão e diversificação produtiva, a compreensão integrada da qualidade tecnológica da madeira torna-se elemento central para a consolidação de sistemas florestais sustentáveis. A qualidade da madeira resulta da interação entre características anatômicas, propriedades físicas e mecânicas e desempenho tecnológico durante o processamento (Bodig; Jayne, 1993; Zobel; Jett, 1995). A anatomia do xilema secundário constitui o nível estrutural

fundamental, influenciando diretamente a densidade, a permeabilidade, a estabilidade dimensional e a resistência mecânica. Elementos como vasos, fibras e raios definem padrões de condução, determinam a proporção de parede celular e condicionam a resposta da madeira às solicitações físicas e aos esforços mecânicos aplicados durante o uso (Lima *et al.*, 2025). Apesar de sua relevância, ainda são escassos estudos que integrem a organização anatômica à qualidade tecnológica de espécies tropicais nativas e exóticas cultivadas sob sistemas mistos.

As propriedades físicas e mecânicas constituem o segundo nível de avaliação da qualidade da madeira, fornecendo parâmetros essenciais para classificação estrutural e definição de usos industriais (Wentzel *et al.*, 2019). A densidade, a retração, o módulo de elasticidade, o módulo de ruptura e a resistência ao cisalhamento descrevem o comportamento do material sob diferentes solicitações, influenciando sua adequação para construção civil, componentes estruturais, marcenaria e produtos de maior valor agregado (Green; Winandy; Kretschmann, 1999). Entretanto, a variabilidade dessas propriedades depende da interação entre espécie, idade, ambiente de cultivo e características anatômicas formadoras da matriz lenhosa, reforçando a necessidade de análises comparativas conduzidas sob delineamento experimental comum.

A trabalhabilidade, por sua vez, representa a etapa final de avaliação da qualidade tecnológica, uma vez que envolve o comportamento da madeira frente às operações de usinagem, tais como: aplainamento, desengrosso, lixamento, furação e fendilhamento por pregos (ASTM D1666 - ASTM INTERNACIONAL, 2022). Esses processos traduzem a interação entre estrutura anatômica, propriedades físicas e parâmetros operacionais das ferramentas, determinando o acabamento superficial, a eficiência do processamento e o potencial de aplicação industrial (Laina *et al.*, 2017). Estudos aplicados à realidade brasileira ainda são limitados, especialmente para espécies emergentes em plantios mistos, tornando necessária a caracterização sistemática desse conjunto de atributos.

Considerando essas lacunas, a presente tese foi estruturada em três capítulos independentes e complementares. O primeiro capítulo caracteriza de forma quantitativa a anatomia da madeira das cinco espécies estudadas, descrevendo padrões estruturais e avaliando sua variação intra e interespecífica. O segundo capítulo apresenta a caracterização física e mecânica da madeira, discutindo as

implicações desses atributos para seu desempenho tecnológico e sua classificação segundo a NBR 7190-3 (ABNT, 2022). O terceiro capítulo avalia a trabalhabilidade da madeira nas principais operações de usinagem, identificando padrões de comportamento que auxiliam na escolha e no processamento industrial das espécies.

Em conjunto, os três capítulos oferecem uma abordagem integrada da qualidade tecnológica da madeira em plantios mistos, relacionando estrutura, propriedades e comportamento em processamento. Essa integração permite compreender a funcionalidade do lenho sob diferentes perspectivas e contribui para o uso sustentável de espécies tropicais, fornecendo subsídios para programas de melhoramento genético, planejamento silvicultural e desenvolvimento de tecnologias de processamento alinhadas à realidade da produção florestal brasileira.

## CAPÍTULO 1

### PARÂMETROS ANATÔMICOS COMO PREDITORES DA QUALIDADE TECNOLÓGICA DA MADEIRA

#### RESUMO

A anatomia da madeira desempenha papel central na determinação da qualidade tecnológica das espécies, influenciando diretamente propriedades como densidade, estabilidade dimensional, resistência mecânica e desempenho em processos industriais. Este estudo caracterizou a anatomia quantitativa de *Calophyllum brasiliense*, *Cariniana legalis*, *Cordia trichotoma*, *Khaya grandifoliola* e *Khaya senegalensis*, avaliando seis parâmetros estruturais: área de vaso, diâmetro de vaso, comprimento de vaso, comprimento de raio, largura de raio e comprimento de fibras. Foram avaliadas cinco espécies florestais, sendo analisados 12 indivíduos por espécie. Para cada variável anatômica foram realizadas medições microscópicas, e as médias por árvore foram submetidas à análise de variância (ANOVA), seguida do teste de Tukey. Os resultados revelaram diferenças marcantes entre as espécies. A área média dos vasos variou de 9529,5  $\mu\text{m}^2$  em *K. grandifoliola* a 3847,1  $\mu\text{m}^2$  em *C. legalis*, com valores intermediários em *C. trichotoma* (8651,8  $\mu\text{m}^2$ ), *C. brasiliense* (8112,4  $\mu\text{m}^2$ ) e *K. senegalensis* (4951,8  $\mu\text{m}^2$ ). O diâmetro dos vasos apresentou comportamento semelhante, variando de 101,1  $\mu\text{m}$  em *K. grandifoliola* a 66,0  $\mu\text{m}$  em *C. legalis*. O comprimento dos vasos oscilou entre 396,1  $\mu\text{m}$  em *C. brasiliense* e 225,7  $\mu\text{m}$  em *C. trichotoma*. O tecido radial mostrou o maior contraste estrutural, com *C. trichotoma* apresentando o maior comprimento médio de raio (773,7  $\mu\text{m}$ ) e a maior largura (100,0  $\mu\text{m}$ ), enquanto *C. brasiliense* exibiu os menores valores (195,5  $\mu\text{m}$  e 15,9  $\mu\text{m}$ , respectivamente). O comprimento das fibras reforçou a distinção entre espécies, variando de 1622,6  $\mu\text{m}$  em *C. trichotoma* a 1077,6  $\mu\text{m}$  em *C. brasiliense*, com *C. legalis* (1441,9  $\mu\text{m}$ ), *K. senegalensis* (1208,6  $\mu\text{m}$ ) e *K. grandifoliola* (1200,5  $\mu\text{m}$ ) ocupando posições intermediárias. Esses resultados mostram que as espécies apresentam arquiteturas anatômicas distintas que influenciam seu comportamento tecnológico: madeiras com vasos amplos e fibras longas tendem a apresentar maior permeabilidade e melhor desempenho em flexão, enquanto espécies com estrutura mais compacta tendem a ser mais estáveis e rígidas. A principal contribuição teórica deste estudo consiste em demonstrar que a variação microscópica entre vasos, fibras e raios configura padrões estruturais robustos, capazes de explicar o comportamento físico, mecânico e tecnológico das espécies, estabelecendo uma base sólida para estudos integrados de qualidade da madeira.

**Palavras-chave:** anatomia da madeira; qualidade tecnológica; vasos; raios; fibras; propriedades da madeira.

## ABSTRACT

Wood anatomy plays a central role in determining the technological quality of species, directly influencing properties such as density, dimensional stability, mechanical strength, and performance in industrial processes. This study characterized the quantitative anatomy of *Calophyllum brasiliense*, *Cariniana legalis*, *Cordia trichotoma*, *Khaya grandifoliola*, and *Khaya senegalensis*, evaluating six structural parameters: vessel area, vessel diameter, vessel length, ray length, ray width, and fiber length. Five forest species were evaluated, with 12 individuals analyzed per species. For each anatomical variable, microscopic measurements were performed, and the means per tree were subjected to analysis of variance (ANOVA), followed by Tukey's test. The results revealed marked differences among species. The mean vessel area ranged from 9529.5  $\mu\text{m}^2$  in *K. grandifoliola* to 3847.1  $\mu\text{m}^2$  in *C. legalis*, with intermediate values in *C. trichotoma* (8651.8  $\mu\text{m}^2$ ), *C. brasiliense* (8112.4  $\mu\text{m}^2$ ), and *K. senegalensis* (4951.8  $\mu\text{m}^2$ ). Vessel diameter showed a similar pattern, ranging from 101.1  $\mu\text{m}$  in *K. grandifoliola* to 66.0  $\mu\text{m}$  in *C. legalis*. Vessel length ranged from 396.1  $\mu\text{m}$  in *C. brasiliense* to 225.7  $\mu\text{m}$  in *C. trichotoma*. Radial tissue showed the greatest structural contrast, with *C. trichotoma* presenting the greatest mean ray length (773.7  $\mu\text{m}$ ) and width (100.0  $\mu\text{m}$ ), whereas *C. brasiliense* exhibited the lowest values (195.5  $\mu\text{m}$  and 15.9  $\mu\text{m}$ , respectively). Fiber length further reinforced the distinction among species, ranging from 1622.6  $\mu\text{m}$  in *C. trichotoma* to 1077.6  $\mu\text{m}$  in *C. brasiliense*, with *C. legalis* (1441.9  $\mu\text{m}$ ), *K. senegalensis* (1208.6  $\mu\text{m}$ ), and *K. grandifoliola* (1200.5  $\mu\text{m}$ ) occupying intermediate positions. These results demonstrate that the species exhibit distinct anatomical architectures that influence their technological behavior: woods with larger vessels and longer fibers tend to present greater permeability and better performance in bending, whereas species with a more compact structure tend to be more stable and rigid. The main theoretical contribution of this study is to demonstrate that microscopic variation among vessels, fibers, and rays forms robust structural patterns capable of explaining the physical, mechanical, and technological behavior of these species, thereby establishing a solid basis for integrated studies on wood quality.

**Keywords:** wood anatomy; technological quality; vessels; rays; fibers; wood properties.

## 1.1 INTRODUÇÃO

Este estudo parte da hipótese de que a anatomia da madeira constitui um fator central na determinação da qualidade tecnológica. A forma como os elementos celulares tais como vasos, fibras e raios se organizam no lenho determina, em escala microscópica, o comportamento da madeira diante de processos industriais e das propriedades físicas e mecânicas avaliadas. A anatomia deixa de ser apenas um conjunto descritivo de células e passa a atuar como um sistema funcional, no qual dimensões, proporções e arranjos estruturais produzem respostas tecnológicas específicas (Chen *et al.*, 2020; Fu *et al.*, 2025)(Chen *et al.*, 2020; Fu *et al.*, 2025).

Essa conclusão se apoia no princípio de que o xilema secundário não é um tecido indiferenciado. Vasos, fibras e raios formam uma arquitetura interna que controla a condução hídrica, a rigidez, a estabilidade dimensional e a permeabilidade do lenho, afetando diretamente etapas como secagem, usinagem, adesão, tratamento preservativo e desempenho mecânico (Al-musawi *et al.*, 2024; Li; Chen; Sang, 2022). Assim, compreender como essa estrutura varia entre espécies é essencial para interpretar porque materiais de origem florestal apresentam comportamentos tecnológicos tão distintos, mesmo quando submetidos às mesmas condições de processamento.

A literatura mostra que dimensões e proporções dos elementos anatômicos possuem forte relação com características tecnológicas. Vasos mais largos tendem a aumentar a permeabilidade e reduzir a resistência ao colapso. Fibras longas favorecem maior flexibilidade e melhor desempenho mecânico. Raios influenciam a condução transversal de umidade e a estabilidade das peças serradas. Além disso, diferenças anatômicas refletem adaptações ecológicas, mecanismos de tolerância ao ambiente e composições químicas distintas, envolvendo lignificação, espessura de parede celular e extrativos, fatores que também afetam a qualidade final do material (Denardi; Marchiori, 2005).

Apesar desse conhecimento consolidado, ainda persistem lacunas sobre como integrar, de forma sistemática, a variação anatômica ao desempenho tecnológico de espécies tropicais nativas e exóticas. Muitos estudos abordam apenas um conjunto de características, analisam espécies isoladamente ou carecem de comparações estruturais consistentes dentro de um mesmo delineamento experimental. Faltam

interpretações que conectem diretamente os padrões celulares às propriedades físicas, mecânicas e de trabalhabilidade, especialmente em espécies de relevância florestal cujo potencial industrial permanece subexplorado (Nascimento *et al.*, 2025).

A seleção das cinco espécies avaliadas neste estudo responde a essa necessidade: *Calophyllum brasiliense* Cambess (guanani) , *Cariniana legalis* (Mart.) Kuntze (jequitibá-rosa) e *Cordia trichotoma* (Vell.) Arrab. ex Steud (louro-pardo). representam espécies nativas com importância ecológica, diversidade estrutural e potencial de uso ainda pouco aproveitado, em parte devido à escassez de dados anatômicos precisos e aplicáveis. *Khaya grandifoliola* C. DC e *Khaya senegalensis* (Desr.) A. Juss. (mogno-aicano), por sua vez, são exóticas amplamente empregadas em plantios e apresentam crescente demanda industrial, o que exige a compreensão de sua base estrutural para orientar estratégias de manejo, secagem, usinagem e aplicação (Medeiros *et al.*, 2024a, 2024b). Comparar espécies com origens ecológicas e histórias evolutivas distintas permite identificar padrões anatômicos que explicam, de maneira funcional, suas diferenças tecnológicas.

Diante desse cenário, este estudo tem como objetivo caracterizar quantitativamente os elementos anatômicos do lenho de espécies florestais nativas e exóticas cultivadas em plantios mistos e comparar seus padrões estruturais. Considera-se que diferenças morfológicas marcantes geram padrões contrastantes de permeabilidade, resistência, estabilidade dimensional e trabalhabilidade, os quais podem ser identificados por meio da análise conjunta das variáveis anatômicas.

## 1.2 MATERIAL E MÉTODOS

### 1.2.1 Caracterização do material vegetal

O estudo foi conduzido a partir de amostras de madeira de cinco espécies florestais, sendo três nativas do Brasil (*C. brasiliense*, *C. legalis* e *C. trichotoma*) e duas exóticas africanas (*K. grandifoliola* e *K. senegalensis*). As árvores foram coletadas na Fazenda Enseada, localizada no município de Garça, SP (22°16'00.45" S; 49°40'36.61" O), a uma altitude de 628 metros. A região apresenta clima Cfa segundo a classificação de Köppen, caracterizado por verões quentes e úmidos e invernos secos, com precipitação anual média de 1320 mm e temperatura média anual de 20,7°C (Alvares *et al.*, 2013).

A seleção das árvores considerou uniformidade fenotípica, condições silviculturais e idade dos plantios, de modo a garantir comparabilidade entre indivíduos e representatividade dentro de cada espécie. Foram amostradas 12 árvores por espécie, totalizando 60 indivíduos. As informações silviculturais referentes ao espaçamento e idade dos plantios encontram-se sintetizadas na Tabela 1.

**Tabela 1 – Características dos plantios das espécies avaliadas**

<b>Espécie</b>	<b>Nome vulgar</b>	<b>Tipo</b>	<b>Espaçamento (m)</b>	<b>Idade (anos)</b>
<i>K. senegalensis</i>	Mogno-africano	Exótica	3 × 2	8
<i>K. grandifoliola</i>	Mogno-africano	Exótica	3 × 2	10
<i>C. legalis</i>	Jequitibá-rosa	Nativa	3 × 2	10
<i>C. brasiliense</i>	Guanandi	Nativa	3 × 2	13
<i>C. trichotoma</i>	Louro-pardo	Nativa	9 × 9	10

As diferenças de idade e espaçamento entre os plantios refletem as condições silviculturais específicas de cada espécie na área de estudo. Como o objetivo do trabalho foi comparar padrões anatômicos entre espécies, e não avaliar efeitos de manejo silvicultural, as árvores foram selecionadas com base na uniformidade fenotípica e sob condições ambientais semelhantes, uma vez que todos os indivíduos estavam inseridos na mesma área experimental.

De cada árvore, foi retirada a primeira tora com 1 metro de comprimento, localizada próxima à base do tronco. As toras foram identificadas individualmente e transportadas para o Laboratório de Engenharia da Madeira da ESALQ/USP, em Piracicaba, SP, onde foram seccionadas e preparadas para as análises anatômicas.

### 1.2.2 Delineamento do estudo

O estudo foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado (DIC), considerando cinco espécies como tratamentos (*C. brasiliense*, *C. legalis*, *C. trichotoma*, *K. grandifoliola* e *K. senegalensis*), com 12 árvores por espécie, totalizando 60 unidades experimentais.

Para cada indivíduo foram realizadas medições anatômicas dos elementos do lenho, incluindo dimensões de vasos, raios e fibras, seguindo a terminologia e os critérios propostos pelo IAWA Committee (1989). Para cada variável anatômica foram realizadas 50 medições por indivíduo, utilizadas para compor as médias por árvore.

Essas médias foram consideradas como unidades experimentais nas análises estatísticas.

### 1.2.3 Procedimentos específicos

#### 1.2.3.1 Preparo das amostras

As amostras de madeira, com aproximadamente 2 cm<sup>3</sup>, foram retiradas das toras em região intermediária entre a medula e a casca, a fim de minimizar a influência de variações ontogenéticas associadas à madeira juvenil e adulta. Posteriormente, as amostras foram submetidas a processo de amolecimento em solução de água e glicerina (4:1). O aquecimento controlado promoveu a condição necessária ao seccionamento uniforme no micrótomo, evitando fissuras ou deformações que comprometessem a integridade anatômica.

#### 1.2.3.2 Secções histológicas

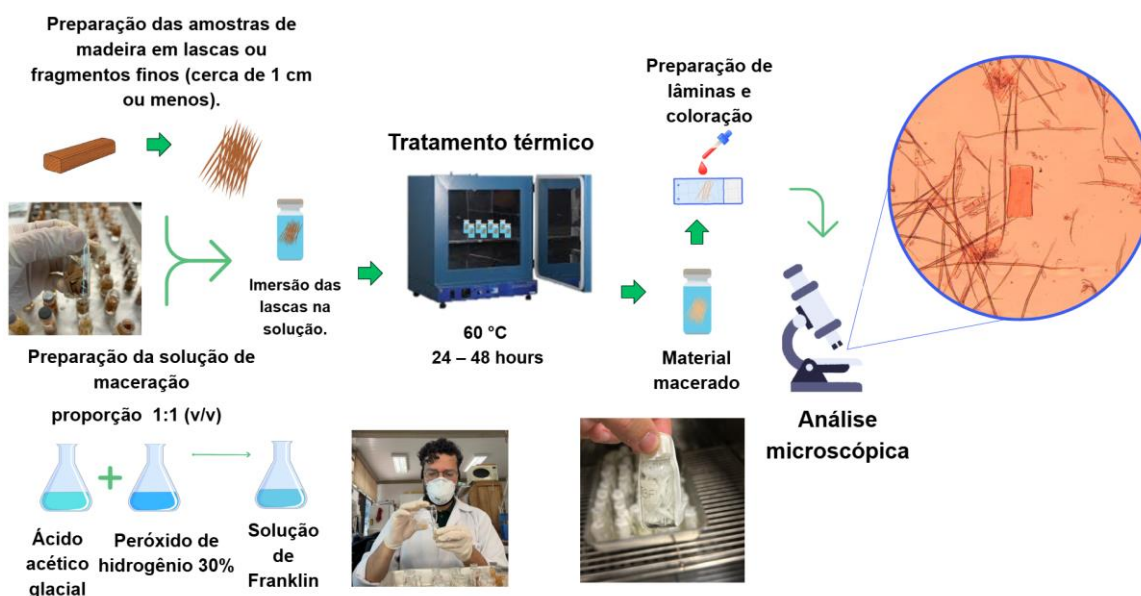
As secções histológicas foram obtidas nos planos transversal e longitudinal tangencial utilizando micrótomo de deslize, com espessura entre 20 e 25 µm. Após o corte, as secções foram clarificadas em solução de hipoclorito de sódio a 60% para remoção do conteúdo celular. Em seguida, procedeu-se à coloração com safrablau (Safranina + azul de astra) 1%, que realça a parede celular e facilita a identificação dos tecidos. As lâminas provisórias foram montadas em glicerina a 60% (v/v), de acordo com metodologias clássicas descritas por Johansen (1940) e (Sass, 1951).

#### 1.2.3.3 Dissociação do lenho

A dissociação dos elementos celulares foi realizada pelo método de Franklin modificado (FRANKLIN, 1945), amplamente utilizado para a separação de fibras e vasos (Figura 1). Fragmentos finos de madeira foram acondicionados em frascos tipo "Wheaton" contendo a solução peróxido de hidrogênio 100 volumes e ácido acético glacial (1:1) e mantidos em estufa a 60 °C por 48 horas. Após a dissociação completa, o material foi lavado em água corrente e corado com safranina alcoólica a 1%,

produzindo suspensões adequadas para observação microscópica dos elementos individuais (Figura 1).

**Figura 1 – Processo de maceração da madeira pelo método de Franklin, desde a preparação das amostras e tratamento térmico até a análise microscópica dos elementos celulares dissociados**



#### 1.2.3.4 Avaliação anatômica

As análises anatômicas seguiram as recomendações do IAWA Committee (1989). As mensurações foram realizadas em microscópio óptico modelo CX31 (Olympus Corporation, Tóquio, Japão), acoplado a um sistema digital de captura de imagens. As imagens obtidas foram processadas com o software semiautomático Image-Pro Express versão 6.3, que permitiu a mensuração precisa das variáveis anatômicas como área de vasos (AV), diâmetro de vasos (DV), comprimento de vasos (CPV), altura de raio (AR), largura de raio (LAR) e comprimento de fibras (CF).

Para os vasos, a área individual (A) foi utilizada para o cálculo do diâmetro equivalente (d), assumindo-se a aproximação de uma secção circular. O diâmetro equivalente foi obtido pela seguinte expressão:

$$d = \sqrt{\frac{4xA}{\pi}} \quad (1)$$

#### 1.2.4 Análise dos dados

Os dados anatômicos foram organizados em planilhas eletrônicas e submetidos inicialmente a análises estatísticas descritivas, incluindo média, desvio-padrão, valores mínimo e máximo e amplitude. Para a comparação entre espécies, os dados médios por árvore foram submetidos à análise de variância (ANOVA), considerando delineamento inteiramente casualizado, com cinco espécies como tratamentos e 12 árvores como repetições. Quando detectadas diferenças significativas ( $p \leq 0,05$ ), as médias foram comparadas pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. A normalidade dos resíduos e a homogeneidade das variâncias foram avaliadas previamente para verificar o atendimento aos pressupostos da ANOVA.

Além das análises univariadas, foram empregadas técnicas multivariadas com o objetivo de integrar as variáveis anatômicas e identificar padrões estruturais entre as espécies avaliadas. A Análise de Componentes Principais (PCA) foi utilizada para sintetizar a variação conjunta das variáveis anatômicas e visualizar a distribuição multivariada das espécies, considerando a contribuição relativa de cada característica (AV: área de vaso; DV: diâmetro de vaso; CPV: comprimento de vaso; AR: altura de raio; LR: largura de raio; CF: comprimento de fibra).

Complementarmente, aplicou-se análise de agrupamento hierárquico (dendrograma), utilizando distância euclidiana e método de Ward, com o objetivo de identificar grupos de similaridade anatômica entre as espécies. Todas as variáveis foram previamente padronizadas (z-score) para equalizar a escala entre os atributos. Essas abordagens ampliaram a compreensão dos padrões estruturais do xilema, permitindo integrar a variação anatômica das espécies avaliadas. Todas as análises estatísticas efetuadas foram realizadas utilizando o software R (R Core Team 2014).

### 1.3 RESULTADOS

A caracterização anatômica dos vasos revelou ampla variação entre as cinco espécies estudadas. A caracterização anatômica dos vasos apresentou ampla variação entre as cinco espécies estudadas, cujas médias e coeficientes de variação encontram-se na Tabela 2.

**Tabela 2 – Médias e coeficientes de variação (CV) dos parâmetros anatômicos relacionados aos elementos de vaso (AV - área de vaso, DV - diâmetro de vaso e CPV - comprimento de vaso) nas cinco espécies avaliadas**

<b>Espécie</b>	<b>AV (<math>\mu\text{m}^2</math>)</b>	<b>DV (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>CPV (<math>\mu\text{m}</math>)</b>
<i>C. brasiliense</i>	8112 <sup>(86,9)</sup> b	93.1 <sup>(44,0)</sup> b	396.2 <sup>(27,0)</sup> a
<i>C. legalis</i>	3847 <sup>(59,9)</sup> d	66.1 <sup>(34,9)</sup> c	331.2 <sup>(23,9)</sup> b
<i>C. trichotoma</i>	8652 <sup>(70,2)</sup> b	97.7 <sup>(39,4)</sup> ab	225.8 <sup>(24,0)</sup> d
<i>K. grandifoliola</i>	9530 <sup>(68,7)</sup> a	101.2 <sup>(43,1)</sup> a	394.2 <sup>(22,6)</sup> a
<i>K. senegalensis</i>	4952 <sup>(88,2)</sup> c	71.8 <sup>(47,2)</sup> c	287.2 <sup>(26,1)</sup> c

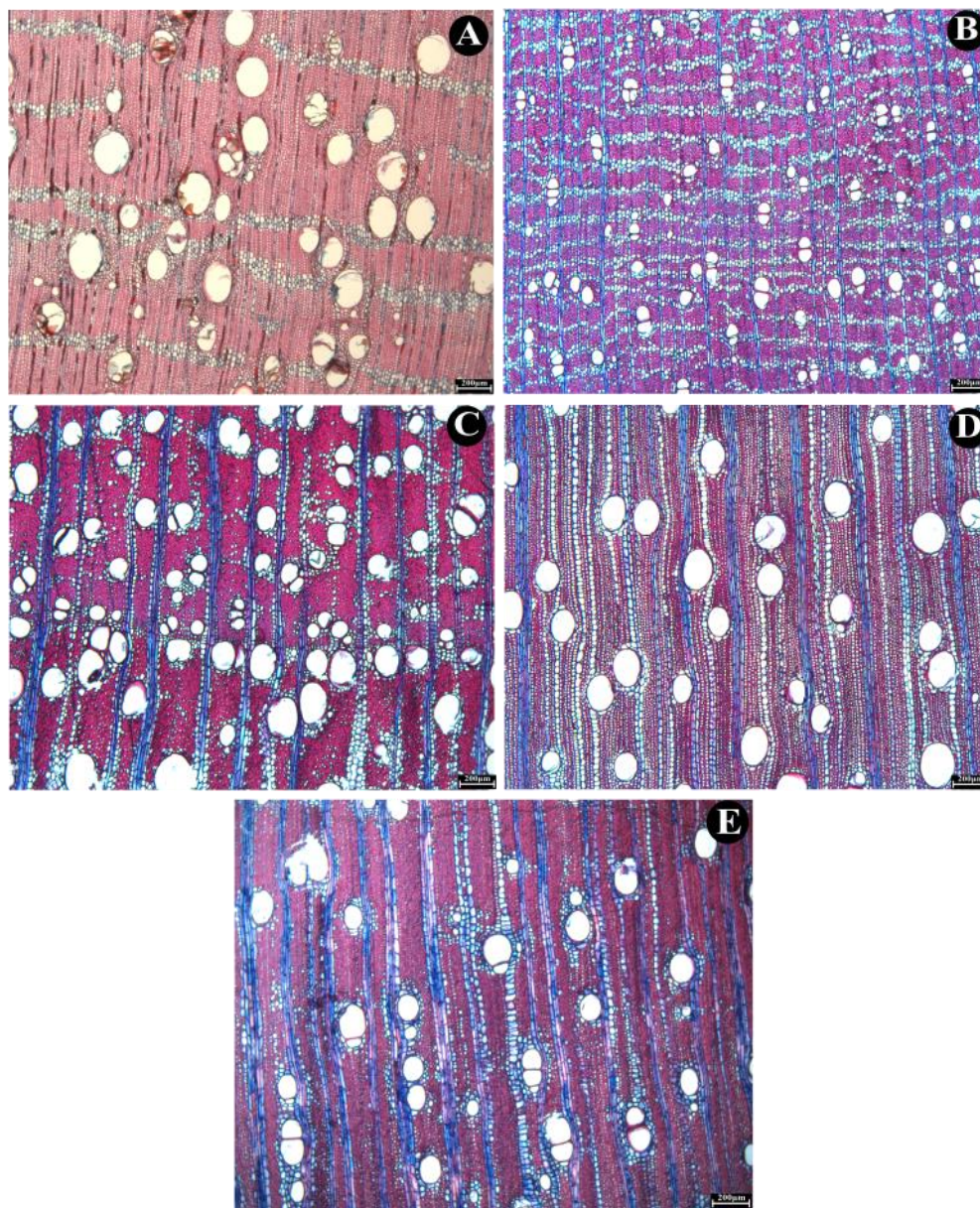
Médias seguidas por letras diferentes na mesma coluna indicam valores médios diferentes para o teste de Tukey (com nível de significância de 5%) e valores entre parentesis indicam o coeficiente de variação (%).

A *K. grandifoliola* apresentou os maiores valores de área de vaso (AV) e diâmetro de vaso (DV), indicando vasos de maior calibre. *C. trichotoma* e *C. brasiliense* também apresentaram valores elevados de AV e DV, padrão visível no corte transversal (Figura 2). Em contrapartida, *K. senegalensis* e *C. legalis* exibiram menores valores de AV e DV, caracterizando um sistema vascular de menor calibre, sem implicar redução no comprimento do vaso (CPV).

O comprimento dos vasos apresentou tendência distinta em relação à área e ao diâmetro dos vasos. Os maiores valores de comprimento de vaso (CPV) foram observados em *C. brasiliense* e *K. grandifoliola*, enquanto *C. trichotoma* registrou a menor extensão axial entre as espécies.

As variações anatômicas observadas nos elementos de vaso também são evidenciadas nos cortes transversais do lenho apresentados na Figura 2, que ilustram diferenças no calibre e na distribuição dos vasos entre as espécies avaliadas.

Figura 2 – Cortes transversais do lenho das cinco espécies avaliadas, evidenciando a distribuição e o calibre dos elementos de vaso



A – *Calophyllum brasiliense*; B – *Cariniana legalis*; C – *Cordia trichotoma*; D – *Khaya grandifoliola*; E – *Khaya senegalensis*. Escala: 200 µm.

A análise de variância indicou efeito significativo da espécie sobre todos os parâmetros relacionados aos vasos. A área de vaso (AV) apresentou  $F(4, 2995) = 119,42$ ;  $p < 0,001$ , com coeficiente de variação (CV) de 79,04%. O diâmetro de vaso (DV) apresentou  $F(4, 2995) = 113,01$ ;  $p < 0,001$ , com CV de 42,68%. Para o comprimento de vaso (CPV), observou-se  $F(4, 2995) = 463,62$ ;  $p < 0,001$ , com CV de 25,30%. Os testes de Tukey confirmaram a formação de grupos estatisticamente distintos, indicando que *K. grandifoliola* apresentou as maiores médias de área de

vaso, enquanto os maiores valores de diâmetro foram observados em *K. grandifoliola* e *C. trichotoma*. Para o comprimento de vaso, *C. brasiliense* e *K. grandifoliola* apresentaram as maiores médias.

O conjunto de variáveis relacionadas ao tecido radial e às fibras também apresentou variação entre as espécies. Os valores médios de comprimento e largura de raios, assim como o comprimento das fibras, estão apresentados na Tabela 3.

**Tabela 3 – Médias e coeficientes de variação (CV) dos parâmetros anatômicos relacionados aos tecidos radial e fibroso (AR - Altura de Raio, LR - Largura de Raio e CF - Comprimento de Fibra) nas cinco espécies avaliadas**

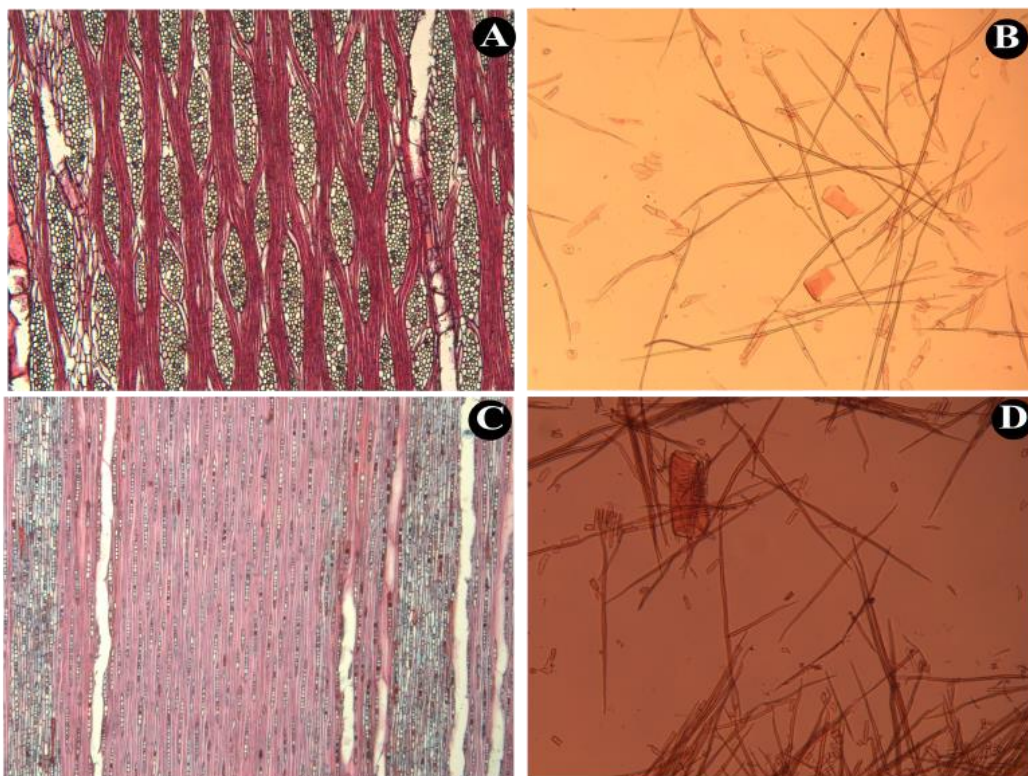
<b>Espécie</b>	<b>AR (<math>\mu\text{m}^2</math>)</b>	<b>LR (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>CF (<math>\mu\text{m}</math>)</b>
<i>C. brasiliense</i>	195,6 <sup>(52,1)</sup> c	15,9 <sup>(32,3)</sup> e	1078 (11,9) d
<i>C. legalis</i>	205,3 <sup>(38,3)</sup> c	23,1 <sup>(46,2)</sup> d	1442 (15,5) b
<i>C. trichotoma</i>	773,8 <sup>(43,0)</sup> a	100,0 <sup>(28,8)</sup> a	1623 (13,6) a
<i>K. grandifoliola</i>	379,9 <sup>(28,4)</sup> b	48,5 <sup>(33,1)</sup> c	1201 (19,4) c
<i>K. senegalensis</i>	372,6 <sup>(35,8)</sup> b	68,0 <sup>(35,4)</sup> b	1209 (13,7) c

Médias seguidas por letras diferentes na mesma coluna indicam valores médios diferentes para o teste de Tukey (com nível de significância de 5%) e valores entre parênteses indicam o coeficiente de variação (%).

Conforme os dados apresentados na Tabela 3, *Cordia trichotoma* se destaca amplamente por apresentar os maiores valores médios de altura de raio (AR), largura de raio (LR) e comprimento de fibra (CF) entre as espécies avaliadas, padrão também observado nas imagens anatômicas da Figura 3A. As demais espécies apresentaram valores substancialmente inferiores para os parâmetros radiais, enquanto *C. brasiliense* e *C. legalis* registraram os menores valores de altura e largura de raio.

*Calophyllum brasiliense* e *Cariniana legalis* exibiram menores valores de altura de raio (AR) e largura de raio (LR), enquanto *Khaya grandifoliola* e *K. senegalensis* ocuparam posições intermediárias. O comprimento das fibras (CF) seguiu tendência semelhante, com *C. trichotoma* apresentando fibras mais longas, superiores a 1600  $\mu\text{m}$ , e *C. brasiliense* registrando os menores valores.

**Figura 3 – Estruturas anatômicas do lenho de *Cordia trichotoma* e *Calophyllum brasiliense* em cortes longitudinais tangenciais e em macerado**

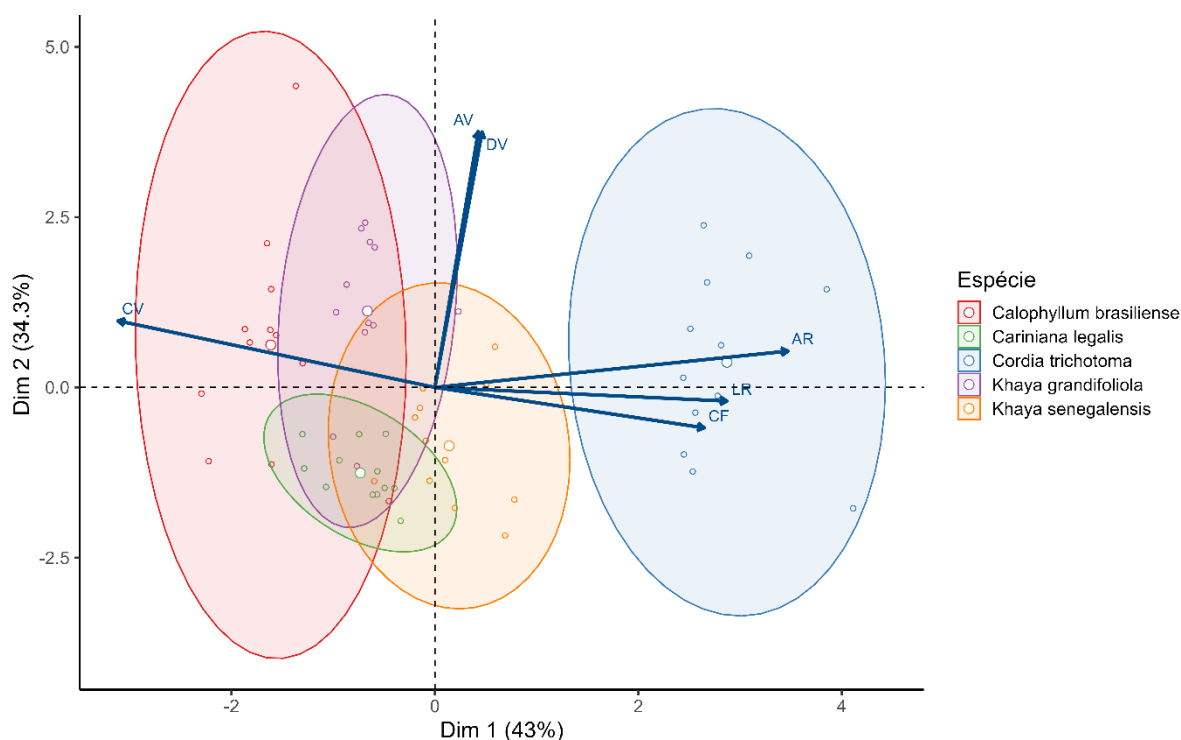


A – Corte longitudinal tangencial de *Cordia trichotoma*; B – Elementos anatômicos de *Cordia trichotoma* em macerado; C – Corte longitudinal tangencial de *Calophyllum brasiliense*; D – Elementos anatômicos de *Calophyllum brasiliense* em macerado. Escala: 200  $\mu\text{m}$ .

As diferenças foram corroboradas pela análise estatística. Para o comprimento de raio, o valor de F alcançou 1048,8 e o CV foi de 45,96%. A largura de raio apresentou o maior contraste relativo entre as espécies, com F igual a 1953,3 e CV de 37,2 %. O comprimento das fibras apresentou F igual a 729,59 e CV de 15,14 %, indicando maior uniformidade interna. Os testes de Tukey mostraram agrupamentos bem definidos, com *C. trichotoma* ocupando consistentemente as maiores médias e *C. brasiliense* e *C. legalis* situando-se nos limites inferiores da variação.

A Análise de Componentes Principais (PCA) evidenciou padrões estruturais consistentes entre as espécies, explicando 77,3% da variação nos dois primeiros eixos (figura 4). O PC1 (43%) foi associado principalmente às características estruturais do xilema secundário, com destaque para o comprimento dos raios (32,2%), o comprimento dos vasos (25,9%), a largura dos raios (22,0%) e o comprimento das fibras (18,7%). Esse eixo separou nitidamente *C. trichotoma*, espécie marcada pela presença de fibras mais longas e raios mais largos e altos.

**Figura 4 – Biplot da Análise de Componentes Principais (PCA) realizada com as médias das variáveis anatômicas por árvore (AV: área de vaso; DV: diâmetro de vaso; CV: comprimento de vaso; AR: altura de raio; LR: largura de raio; CF: comprimento de fibra)**



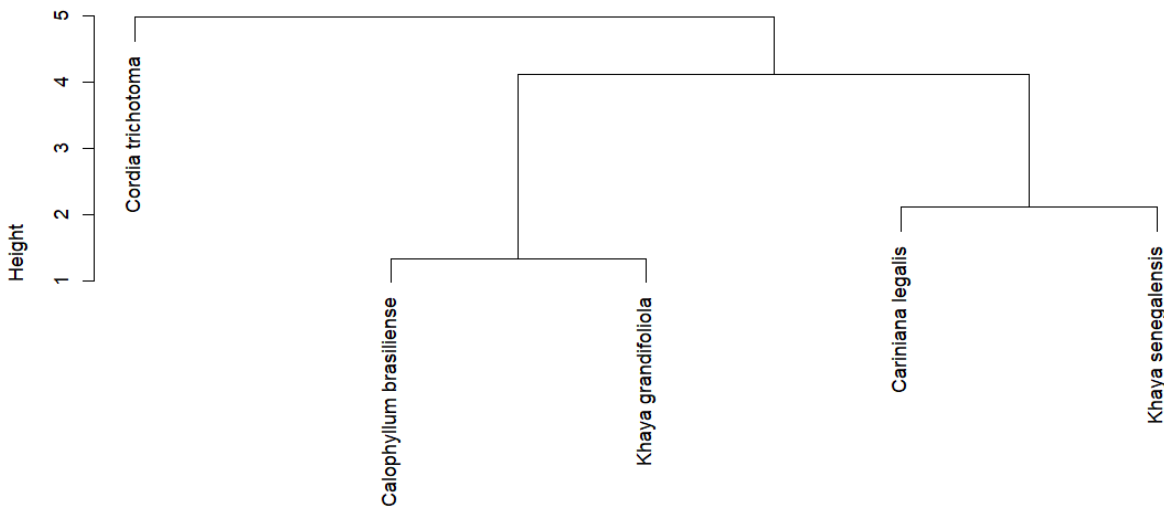
Os pontos representam as árvores de cada espécie e as elipses indicam a dispersão multivariada (95% de confiança) dentro de cada grupo. As setas correspondem às cargas das variáveis, indicando direção e intensidade de contribuição para os eixos principais.

O PC2 (34,3% da variância total) refletiu um gradiente hidráulico associado principalmente à área de vaso (AV) e ao diâmetro de vaso (DV), cujas contribuições para a formação desse eixo foram de 47,3% e 47,2%, respectivamente, destacando *C. brasiliense* e *K. grandifoliola* por seus maiores calibres vasculares. Os eixos subsequentes (PC3 e PC4), embora não representados graficamente por explicarem menor proporção da variância, capturaram contrastes secundários envolvendo fibras, raios e vasos. Em conjunto, os resultados mostram que a variação anatômica entre as espécies é determinada pela combinação entre atributos do sistema vascular, representados principalmente pela área e pelo diâmetro dos vasos, e características estruturais do lenho, como dimensões de raios e comprimento de fibras.

O dendrograma construído a partir da análise de agrupamento hierárquico permitiu visualizar a proximidade anatômica entre as cinco espécies, considerando o conjunto integrado de variáveis AV, DV, CV, AR, LR e CF (FIGURA 5). Utilizando

distância euclidiana e o método de Ward, o agrupamento mostrou uma separação consistente entre espécies com características anatômicas semelhantes, destacando padrões estruturais relevantes do xilema.

**Figura 5 – Dendrograma do agrupamento hierárquico das cinco espécies avaliadas, baseado nas variáveis anatômicas padronizadas.**



O agrupamento evidencia a proximidade estrutural entre as espécies considerando o conjunto integrado de atributos do sistema vascular, dos raios e das fibras.

De modo complementar à PCA, o dendrograma evidenciou que espécies de *Khaya* formam agrupamentos próximos devido às semelhanças na anatomia dos vasos, enquanto *C. trichotoma* tende a se distanciar das demais por apresentar fibras mais longas e raios mais desenvolvidos. Já *C. brasiliense* e *C. legalis* se posicionam de modo intermediário, exibindo combinação de atributos que as coloca entre os extremos hidráulicos e estruturais. Assim, o agrupamento reforça a coerência das análises multivariadas, fornecendo uma visão hierárquica da similaridade anatômica entre as espécies estudadas.

## 1.4 DISCUSSÃO

A integração dos resultados anatômicos apresentados nas Tabelas 2 e 3 e nas imagens da Figura 1 evidencia diferenças estruturais importantes entre as espécies avaliadas. No presente estudo, *K. grandifoliola* e *C. trichotoma* apresentaram maiores valores de área de vaso (AV) e diâmetro de vaso (DV) (Tabela 2), indicando vasos de maior calibre. Essa configuração estrutural sugere maior condutividade hidráulica e potencial facilidade de impregnação em tratamentos preservativos ou processos de modificação da madeira (Longui *et al.*, 2012). Ao mesmo tempo, vasos de maior calibre podem aumentar a suscetibilidade ao colapso durante a secagem e gerar maior heterogeneidade dimensional (Rogers, 2025; Romero *et al.*, 2023).

Em contraste, *C. legalis* e *K. senegalensis* apresentaram menores valores de área e diâmetro de vaso (Tabela 2), indicando um sistema vascular de menor calibre. Espécies com essa configuração anatômica tendem a apresentar maior estabilidade volumétrica e secagem mais previsível, pois a menor dimensão dos vasos reduz a suscetibilidade ao colapso e à formação de defeitos durante o processo de secagem (Alvarado; Terrazas, 2023; Lindorf, 1994).

O tecido radial também apresentou variações estruturais relevantes entre as espécies (Tabela 3). *C. trichotoma* destacou-se por apresentar maiores valores de altura de raio (AR) e largura de raio (LR), indicando um sistema radial mais desenvolvido. Raios mais altos e largos favorecem a condução transversal de umidade e podem influenciar diretamente o comportamento da madeira durante processos de secagem e usinagem (Elaieb *et al.*, 2019). Essa estrutura pode aumentar a movimentação transversal da madeira e gerar variações na textura superficial, mas também pode facilitar a difusão de adesivos em produtos engenheirados (Leal; Sousa; Pereira, 2006).

Diferenças também foram observadas no comprimento das fibras (CF) (Tabela 3). *C. trichotoma* e *K. grandifoliola* apresentaram os maiores valores para esse parâmetro, enquanto *C. brasiliense* registrou as menores médias. Fibras mais longas estão frequentemente associadas a maior capacidade de deformação e resistência mecânica, particularmente em esforços de flexão e tração (Xu *et al.*, 2023, 1998). Em contraste, fibras mais curtas e estruturas mais compactas, como em *C. brasiliense*,

estão associadas a maior rigidez e menor elasticidade (Dolça *et al.*, 2021; Kuciel; Mazur; Hebda, 2020).

A análise de componentes principais (PCA, Figura 3) permitiu integrar as variáveis anatômicas em um mesmo espaço multivariado, evidenciando padrões estruturais consistentes entre as espécies. O primeiro eixo esteve associado principalmente às dimensões dos raios e ao comprimento das fibras, enquanto o segundo eixo refletiu principalmente variações no sistema vascular, representadas pela área e pelo diâmetro dos vasos. Essa organização evidencia que as diferenças anatômicas entre as espécies resultam da combinação entre atributos estruturais do lenho e características do sistema de condução.

O dendrograma de agrupamento hierárquico (Figura 4) reforça esse padrão ao evidenciar a proximidade estrutural entre espécies com características anatômicas semelhantes. As espécies do gênero *Khaya* apresentaram maior proximidade entre si, refletindo similaridades nas dimensões dos vasos e na organização do tecido fibroso. Em contraste, *C. trichotoma* apresentou maior distância em relação às demais espécies, resultado associado principalmente aos maiores valores de altura e largura de raios e ao maior comprimento de fibras observados nesta espécie (Tabela 3). Esses agrupamentos indicam que a variação anatômica entre as espécies resulta da combinação de diferentes atributos estruturais do lenho.

Em síntese, a anatomia do lenho estabelece o fundamento para compreender as diferenças observadas nas propriedades tecnológicas das espécies avaliadas. A interação entre vasos, fibras e raios explica por que cada espécie responde de maneira distinta aos processos de secagem, mecanização, adesão e esforços mecânicos, condicionando diretamente seu potencial de uso industrial (Baraúna *et al.*, 2021; Chowdhury *et al.*, 2012).

## 1.5 CONCLUSÃO

A análise anatômica realizada neste estudo evidenciou diferenças estruturais significativas entre as cinco espécies avaliadas, considerando as dimensões dos vasos, raios e fibras. A caracterização quantitativa desses elementos permitiu identificar padrões anatômicos distintos entre as espécies, refletindo variações na organização estrutural do xilema secundário.

Os resultados indicaram que *C. trichotoma* apresentou os maiores valores de altura e largura de raios e de comprimento de fibras, distinguindo-se das demais espécies por apresentar um sistema radial mais desenvolvido e fibras mais longas. Por outro lado, *K. grandifoliola* e *C. brasiliense* destacaram-se pelos maiores valores de área e diâmetro de vasos, indicando vasos de maior calibre. Já *C.legalis* e *K. senegalensis* apresentaram menores valores de área e diâmetro de vasos, caracterizando um sistema vascular de menor calibre em comparação às demais espécies.

As análises multivariadas reforçaram esses padrões estruturais. A análise de componentes principais (PCA) evidenciou que a variação anatômica entre as espécies resulta principalmente da combinação entre dimensões do sistema vascular e características do tecido radial e fibroso. De forma complementar, o dendrograma de agrupamento hierárquico demonstrou a formação de grupos de espécies com maior similaridade anatômica, destacando a proximidade entre as espécies do gênero *Khaya* e a diferenciação estrutural de *C. trichotoma* em relação às demais.

De forma geral, os resultados demonstram que as espécies avaliadas apresentam estruturas anatômicas contrastantes, resultantes de diferenças nas dimensões celulares do lenho. A caracterização dessas variações fornece uma base anatômica importante para estudos posteriores que integrem propriedades físicas, mecânicas e tecnológicas da madeira.

## REFERÊNCIAS

AL-MUSAWI, Hajir *et al.* The Effect of Rays on the Mechanical Behaviour of Beech and Birch at Different Moisture and Temperature Conditions Perpendicular to the Grain. **Forests**, v. 15, n. 4, p. 584, 23 mar. 2024.

ALVARADO, Marco V.; TERRAZAS, Teresa. Tree species differ in plant economic spectrum traits in the tropical dry forest of Mexico. **PLOS ONE**, v. 18, n. 11, p. e0293430, 9 nov. 2023.

BARAÚNA, Edy Eime Pereira *et al.* Permeability of *Parkia gigantocarpa* as affected by wood anatomy. **BioResources**, v. 16, n. 3, p. 4924–4933, 17 maio 2021.

CHEN, Chaoji *et al.* Structure–property–function relationships of natural and engineered wood. **Nature Reviews Materials**, v. 5, n. 9, p. 642–666, 4 maio 2020.

CHOWDHURY, Md Qumruzzaman *et al.* Variation in anatomical properties and correlations with wood density and compressive strength in *Casuarina equisetifolia* growing in Bangladesh. **Australian Forestry**, v. 75, n. 2, p. 95–99, 15 jan. 2012.

DENARDI, Luciano; MARCHIORI, José Newton Cardoso. Anatomia ecológica da madeira de *Blepharocalyx salicifolius* (HBK) Berg. **Ciência Florestal**, v. 15, n. 2, p. 119–127, 30 jun. 2005.

DOLÇA, Celia *et al.* The Effect of Varying the Amount of Short Hemp Fibers on Mechanical and Thermal Properties of Wood–Plastic Composites from Biobased Polyethylene Processed by Injection Molding. **Polymers**, v. 14, n. 1, p. 138, 30 dez. 2021.

ELAIEB, Mohamed Tahar *et al.* Physical properties of four ring-porous hardwood species: influence of wood rays on tangential and radial wood shrinkage. **Madera y Bosques**, v. 25, n. 2, 1 nov. 2019.

FRANKLIN, G. L. Preparation of Thin Sections of Synthetic Resins and Wood-Resin Composites, and a New Macerating Method for Wood. **Nature**, v. 155, n. 3924, p. 51–51, 13 jan. 1945.

FU, Zongying *et al.* Wood elasticity and compressible wood-based materials: Functional design and applications. **Progress in Materials Science**, v. 147, p. 101354, jan. 2025.

ISASA, Emilie *et al.* Addressing controversies in the xylem embolism resistance–vessel diameter relationship. **New Phytologist**, v. 238, n. 1, p. 283–296, 3 abr. 2023.

JOHANSEN, Donald Alexander. Plant microtechnique. 1940.

KUCIEL, Stanisław; MAZUR, Karolina; HEBDA, Marek. The Influence of Wood and Basalt Fibres on Mechanical, Thermal and Hydrothermal Properties of PLA Composites. **Journal of Polymers and the Environment**, v. 28, n. 4, p. 1204–1215, 14 abr. 2020.

LEAL, Sofia; SOUSA, Vicelina B.; PEREIRA, Helena. Within and between-tree variation in the biometry of wood rays and fibres in cork oak (*Quercus suber*\_L.). **Wood Science and Technology**, v. 40, n. 7, p. 585–597, 18 set. 2006.

LI, Qingde; CHEN, Feng; SANG, Tonghui. Effects of wood fiber impulse-cyclone drying process on the UV-accelerated aging properties of wood-plastic composites. **PLOS ONE**, v. 17, n. 10, p. e0266784, 27 out. 2022.

LINDORF, Helga. Eco-Anatomical Wood Features of Species from a Very Dry Tropical Forest. **IAWA Journal**, v. 15, n. 4, p. 361–376, 1994.

LONGUI, Eduardo Luiz *et al.* ESTRUTURA DO LENHO DE *Plathymenia reticulata* E ALGUMAS IMPLICAÇÕES NA EFICIÊNCIA HIDRÁULICA E RESISTÊNCIA MECÂNICA. **FLORESTA**, v. 42, n. 2, p. 335, 14 maio 2012.

MEDEIROS, José Carlito Gonçalves De *et al.* Caracterização físico-química da madeira de *Khaya grandifoliola*. **AGROPECUÁRIA CIENTÍFICA NO SEMIÁRIDO**, v. 20, n. 2, p. 52–54, 10 jul. 2024a.

MEDEIROS, José Carlito Gonçalves De *et al.* Caracterização físico-química da madeira de *Khaya grandifoliola*. **AGROPECUÁRIA CIENTÍFICA NO SEMIÁRIDO**, v. 20, n. 2, p. 52–54, 10 jul. 2024b.

NASCIMENTO, Cristiano S. *et al.* Functional chemical, physical, and mechanical traits of Amazonian forest species from different ecological groups using NIR spectroscopy. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 55, p. 1–10, 1 jan. 2025.

ROGERS, George King. Variation in Vessel Element Diameters and Densities Across Habitats at the Community and Species Levels in Southeast Florida. **Biology**, v. 14, n. 4, p. 391, 9 abr. 2025.

ROMERO, Eunice *et al.* Wood anatomical spectrum of co-occurring species in early and late-successional tropical dry forest communities. **Trees**, v. 37, n. 6, p. 1609–1625, 1 dez. 2023.

SASS, John E. Response of Meristems of Seedlings to Benzene Hexachloride Used as a Seed Protectant. **Science**, v. 114, n. 2966, p. 466–466, 2 nov. 1951.

WANG, Huifang; ZHAO, Youke. Studies on pre-treatment by compression for wood impregnation III: effects of the solid content of low-molecular-weight phenol formaldehyde resin on the impregnation. **Journal of Wood Science**, v. 68, n. 1, p. 28, 13 dez. 2022.

XU, Hailong *et al.* Mechanical Properties Variation in Wood—Plastic Composites with a Mixed Wood Fiber Size. **Materials**, v. 16, n. 17, p. 5801, 24 ago. 2023.

XU, Heng *et al.* Effects of fiber length and orientation on elasticity of fiber-reinforced plywood. **Journal of Wood Science**, v. 44, n. 5, p. 343–347, 1 out. 1998.

## CAPÍTULO 2

### PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DA MADEIRA

### SERRADA DE ESPÉCIES TROPICAIS EM PLANTIOS MISTOS

#### RESUMO

A caracterização das propriedades físicas e mecânicas da madeira é fundamental para avaliar seu desempenho tecnológico e orientar o manejo de espécies cultivadas em plantios mistos. Este estudo analisou madeira serrada de cinco espécies florestais, três nativas (*Calophyllum brasiliense*, *Cariniana legalis* e *Cordia trichotoma*) e duas exóticas (*Khaya grandifoliola* e *Khaya senegalensis*), com o objetivo de quantificar sua variabilidade estrutural e identificar padrões relacionados à qualidade do material. Amostras provenientes de árvores individuais foram avaliadas quanto à densidade aparente, densidade básica, retração volumétrica, resistência à compressão paralela as fibras, resistência ao cisalhamento, módulo de ruptura e módulo de elasticidade. Os resultados evidenciaram diferenças significativas entre as espécies para quase todas as propriedades avaliadas. A densidade aparente variou de 0,47 g.cm<sup>-3</sup> em *Cordia trichotoma* a 0,70 g.cm<sup>-3</sup> em *Cariniana legalis*, enquanto a densidade básica apresentou valores entre 0,45 g.cm<sup>-3</sup> e 0,54 g.cm<sup>-3</sup>, com destaque para *C. legalis*, *C. brasiliense* e *K. senegalensis*. A resistência à compressão paralela apresentou amplitudes marcantes, variando de 28,5 MPa (*K. senegalensis*) a 37,4 MPa (*C. legalis*). A resistência ao cisalhamento oscilou entre 10,5 MPa em *C. trichotoma* e 13,0 MPa em *C. legalis*, enquanto o módulo de elasticidade variou de 2.706 MPa em *K. senegalensis* a 5.978 MPa em *K. grandifoliola*. O módulo de ruptura apresentou variação de 48,9 MPa em *C. brasiliense* a 69,6 MPa em *C. legalis*. A retração volumétrica não apresentou diferenças estatísticas entre as espécies, com média geral de 13,1%. A síntese dos resultados indica a formação de três padrões tecnológicos: espécies de maior densidade e resistência (*C. legalis* e *C. brasiliense*), espécies de desempenho intermediário (*K. grandifoliola* e *K. senegalensis*) e espécie de baixa resistência e menor densidade (*C. trichotoma*). Esses padrões demonstram que a variação das propriedades físicas e mecânicas está diretamente vinculada aos atributos estruturais do lenho e permitem inferir a adequação tecnológica de cada espécie para diferentes aplicações industriais. A principal contribuição teórica deste estudo reside na demonstração de que plantios mistos podem gerar materiais com ampla diversidade tecnológica, cuja variabilidade segue gradientes anatômicos previstos para madeiras tropicais, reforçando a necessidade de integrar conhecimentos estruturais, mecânicos e de manejo na avaliação de espécies nativas e exóticas.

**Palavras-chave:** densidade do lenho; desempenho estrutural; resistência tecnológica; caracterização físico-mecânica; silvicultura multiespécies.

## ABSTRACT

The characterization of the physical and mechanical properties of wood is essential for evaluating its technological performance and guiding the management of species cultivated in mixed plantations. This study analyzed sawn wood from five forest species, three native (*Calophyllum brasiliense*, *Cariniana legalis*, and *Cordia trichotoma*) and two exotic (*Khaya grandifoliola* and *Khaya senegalensis*), with the objective of quantifying their structural variability and identifying patterns related to material quality. Samples obtained from individual trees were evaluated for apparent density, basic density, volumetric shrinkage, compression strength parallel to the grain, shear strength, modulus of rupture, and modulus of elasticity. The results revealed significant differences among species for almost all evaluated properties. Apparent density ranged from 0.47 g·cm<sup>-3</sup> in *Cordia trichotoma* to 0.70 g·cm<sup>-3</sup> in *Cariniana legalis*, while basic density ranged from 0.45 g·cm<sup>-3</sup> to 0.54 g·cm<sup>-3</sup>, with higher values observed for *C. legalis*, *C. brasiliense*, and *K. senegalensis*. Compression strength parallel to the grain showed marked variation, ranging from 28.5 MPa (*K. senegalensis*) to 37.4 MPa (*C. legalis*). Shear strength ranged from 10.5 MPa in *C. trichotoma* to 13.0 MPa in *C. legalis*, whereas the modulus of elasticity ranged from 2,706 MPa in *K. senegalensis* to 5,978 MPa in *K. grandifoliola*. The modulus of rupture ranged from 48.9 MPa in *C. brasiliense* to 69.6 MPa in *C. legalis*. Volumetric shrinkage did not show statistical differences among species, with an overall mean of 13.1%. The synthesis of the results indicates the formation of three technological patterns: species with higher density and strength (*C. legalis* and *C. brasiliense*), species with intermediate performance (*K. grandifoliola* and *K. senegalensis*), and a species with lower strength and lower density (*C. trichotoma*). These patterns demonstrate that variation in physical and mechanical properties is directly linked to the structural attributes of wood and allow the technological suitability of each species for different industrial applications to be inferred. The main theoretical contribution of this study lies in demonstrating that mixed plantations can generate materials with broad technological diversity, whose variability follows anatomical gradients predicted for tropical woods, reinforcing the need to integrate structural, mechanical, and silvicultural knowledge in the evaluation of native and exotic species.

**Keywords:** wood density; structural performance; technological strength; physical–mechanical characterization; multispecies silviculture.

## 2.1 INTRODUÇÃO

A produção sustentável de madeira depende de sistemas florestais capazes de conciliar produtividade, diversidade funcional e redução da pressão sobre florestas naturais. Nesse contexto, plantios mistos envolvendo espécies nativas e exóticas têm sido reconhecidos como uma estratégia promissora para aumentar a resiliência ecológica, melhorar o uso de recursos e ampliar a oferta de produtos florestais em diferentes categorias de qualidade (Fearnside, 2005; Laurance *et al.*, 2014). Esses sistemas reúnem o rápido crescimento e a previsibilidade produtiva de espécies exóticas ao valor ecológico, adaptabilidade e diversidade estrutural de espécies nativas, proporcionando benefícios ambientais, econômicos e tecnológicos simultaneamente (Davis; Jacobs; Dumroese, 2012; Hua *et al.*, 2022). A compreensão das propriedades tecnológicas da madeira nesses sistemas é fundamental para garantir o uso eficiente dos recursos florestais e orientar práticas de manejo sustentáveis.

O desempenho físico e mecânico da madeira está diretamente relacionado à sua estrutura anatômica e à composição dos tecidos que constituem o lenho. A densidade básica é amplamente reconhecida como um indicador-chave das propriedades mecânicas, por sintetizar a proporção relativa de parede celular e lume, influenciando variáveis como resistência à compressão, módulo de elasticidade e resistência ao cisalhamento (Zobel; Jett, 1995). Estudos recentes reforçam que a variação nessas propriedades resulta de uma combinação de fatores genéticos, ontogenéticos e ambientais que modulam a organização estrutural do xilema (Lima *et al.*, 2025; Marini *et al.*, 2021). Entretanto, a maior parte das investigações concentra-se em madeiras adultas ou amostras padronizadas, o que limita o entendimento sobre o comportamento da madeira serrada jovem produzida em plantios diversificados.

Ainda persistem lacunas significativas sobre como as propriedades físicas e mecânicas variam entre espécies tropicais cultivadas sob o mesmo ambiente e regime de manejo. Plantios mistos envolvendo espécies como *Calophyllum brasiliense* Cambess., *Cariniana legalis* (Mart.) Kuntze, *Cordia trichotoma* (Vell.) Arrab. ex Steud., *Khaya grandifoliola* C. DC e *Khaya senegalensis* (Desr.) A. Juss. são pouco avaliados em termos tecnológicos, apesar de seu potencial para suprir mercados que demandam madeira de qualidade e origem sustentável (Chaves *et al.*, 2015; Lima *et al.*, 2022, 2025). A ausência de estudos integrando propriedades físicas, mecânicas e

enquadramento normativo dificulta a definição de usos adequados, compromete a previsibilidade tecnológica e limita o avanço de programas de melhoramento genético e de manejo florestal direcionado à qualidade da madeira.

As cinco espécies analisadas nesse estudo apresentam estratégias ecológicas e padrões estruturais contrastantes que tornam possível compreender como diferenças na organização do lenho se traduzem em desempenho tecnológico da madeira serrada. A avaliação conjunta de espécies nativas de reconhecido valor estrutural e de espécies exóticas de crescimento acelerado permite explorar como densidade, rigidez e resistência surgem de combinações distintas de anatomia, crescimento e alocação de biomassa. A utilização de madeira serrada aproxima a análise das condições reais de uso, refletindo a variabilidade natural do material e ampliando a aplicabilidade dos resultados para setores industriais e para programas de manejo sustentável.

Considerando a crescente demanda por espécies alternativas para produção de madeira sólida, parte-se da hipótese de que as espécies avaliadas apresentam diferenças significativas em densidade, rigidez e resistência mecânica, refletindo variações no comportamento físico e estrutural da madeira.

Diante desse cenário, este estudo tem como objetivo caracterizar as propriedades físicas e mecânicas da madeira serrada de *C. brasiliense*, *C. legalis*, *C. trichotoma*, *K. grandifoliola* e *K. senegalensis* provenientes de plantios florestais, visando avaliar o desempenho tecnológico dessas espécies e seu potencial de enquadramento em classes estruturais estabelecidas por normas técnicas.

## **2.2 MATERIAIS E MÉTODOS**

### **2.2.1 Área de Estudo e Coleta de Materiais**

O estudo foi conduzido com amostras de cinco espécies florestais, sendo três nativas (*Calophyllum brasiliense*, *Cariniana legalis* e *Cordia trichotoma*) e duas exóticas (*Khaya grandifoliola* e *Khaya senegalensis*) (Tabela 1). As árvores foram coletadas em plantios mistos localizados na Fazenda Enseada, município de Garça, SP (22°16'00.45" S; 49°40'36.61" O), a uma altitude média de 628 m. O clima da região é classificado como Cfa, segundo Köppen, caracterizado por verões quentes e

úmidos e invernos amenos e secos, com precipitação média anual de 1.320 mm e temperatura média de 20,7 °C (ALVARES *et al.*, 2013).

**Tabela 1 – Informações dos plantios das espécies florestais avaliadas**

<b>Espécies</b>	<b>Origem</b>	<b>Espaçamento (m)</b>	<b>Idade (anos)</b>
<i>K. senegalensis</i>	Exótica	3 × 2	8
<i>K. grandifoliola</i>	Exótica	3 × 2	10
<i>C. legalis</i>	Nativa	3 × 2	10
<i>C. brasiliense</i>	Nativa	3 × 2	13
<i>C. trichotoma</i>	Nativa	9 × 9	10

Foram selecionadas 12 árvores por espécie, totalizando 60 indivíduos, provenientes de testes de progênies e procedência. A escolha considerou a uniformidade fenotípica e o estado fitossanitário das árvores. De cada indivíduo, foi retirada a primeira tora com 1,0 m de comprimento, correspondente à porção basal do fuste, a qual foi identificada e transportada para o Laboratório de Ensaio Mecânicos de Madeira e Derivados - LEMMAD da ESALQ/USP, para processamento e ensaios tecnológicos.

#### 2.2.2 Preparo das Amostras

As toras foram desdobradas em pranchas centrais de 7 cm de espessura, a partir das quais foram obtidos sarrafos de 5 × 5 × 100 cm. Desses sarrafos, extraíram-se os corpos de prova para os ensaios físicos e mecânicos, de acordo com as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e diretrizes complementares da ASTM D143-94.

Antes dos ensaios, todas as amostras foram acondicionadas em câmara climatizada (20 ± 2 °C e 65 ± 5% UR) até atingirem 12% de umidade de equilíbrio.

#### 2.2.3 Ensaio Físicos

Para a determinação das propriedades físicas da madeira, foram utilizados 12 corpos de prova por espécie, livres de defeitos visíveis. As amostras apresentaram dimensões nominais de 2 cm × 3 cm × 5 cm, correspondendo às direções tangencial, radial e longitudinal, respectivamente.

Inicialmente, os corpos de prova foram condicionados até atingirem aproximadamente 12% de umidade, sendo então utilizadas para a determinação da

densidade aparente ( $\rho_{ap}$ ), conforme a NBR 7190-3 (ABNT, 2022). As dimensões foram obtidas com paquímetro digital com precisão de 0,01 cm, e a massa determinada em balança semianalítica com precisão de 0,01 g.

Posteriormente, os mesmos corpos de prova foram utilizados para a determinação da densidade básica ( $\rho_{bas}$ ) pelo método da balança hidrostática, conforme a NBR 11941 (ABNT, 2003). Para isso, as amostras foram inicialmente saturadas em água por aproximadamente 30 dias e, em seguida, secas em estufa a  $103 \pm 2$  °C até atingirem massa constante.

Após a determinação da densidade básica, os mesmos corpos de prova foram empregados na avaliação da retração volumétrica ( $\epsilon_v$ ), conforme os procedimentos descritos na NBR 7190 (ABNT, 2022).

#### 2.2.4 Ensaio Mecânicos

Os ensaios mecânicos foram realizados em corpos de prova previamente condicionados em câmara climatizada a  $20 \pm 2$  °C e  $65 \pm 5\%$  de umidade relativa, até atingirem umidade de equilíbrio de  $12 \pm 1\%$ , conforme os procedimentos estabelecidos pela NBR 7190 (ABNT, 2022).

Os testes foram conduzidos em máquina universal de ensaios eletromecânica, controlada por computador, com capacidade máxima de 300 kN. As deformações foram registradas por meio de extensômetro mecânico padrão, com precisão de 0,001 mm.

A resistência à compressão paralela às fibras ( $f_{c_0}$ ) foi determinada em corpos de prova com dimensões de  $5 \times 5 \times 15$  cm, mediante aplicação de carga contínua até a ruptura. Os valores de resistência obtidos foram corrigidos para o teor de umidade de referência de 12%, conforme procedimento estabelecido na NBR 7190 (ABNT, 2022).

O ensaio de cisalhamento tangencial ( $f_{v_0}$ ) foi realizado em corpos de prova de  $2 \times 3 \times 5$  cm, também conforme a NBR 7190 (ABNT, 2022), com os resultados posteriormente ajustados para o teor de umidade de 12%.

A flexão estática foi conduzida em corpos de prova de  $2 \times 2 \times 35$  cm, mantendo-se a relação entre vão e altura ( $L/h = 15$ ), conforme os procedimentos descritos na ASTM D143-94. A partir das curvas tensão–deformação obtidas nesse ensaio foram determinados o módulo de elasticidade (MOE) e o módulo de ruptura (MOR). Os

valores foram posteriormente corrigidos para um teor de umidade de 12%, garantindo comparabilidade entre as espécies avaliadas.

De acordo com a NBR 7190 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1997), o valor característico da resistência à compressão paralela às fibras constitui o parâmetro de referência para a classificação da madeira nas classes de resistência, subsidiando a seleção da espécie mais adequada para aplicações estruturais (Eufrade Junior *et al.*, 2015).

### 2.2.5 Análise Estatística

A análise estatística foi conduzida com base na organização dos dados conforme os tratamentos e variáveis analisados. Para avaliar a normalidade da distribuição dos resíduos, foi aplicado o teste de Shapiro-Wilk ( $p > 0,05$ ). A homogeneidade das variâncias entre os grupos foi verificada por meio do teste de Bartlett ( $p > 0,05$ ). Nos casos em que os dados não apresentaram distribuição normal, optou-se pela transformação de Box-Cox para adequá-los aos pressupostos estatísticos. Quando a normalidade não foi alcançada mesmo após a transformação, procedeu-se com a utilização do teste não paramétrico de Kruskal-Wallis, complementado pelo teste de Dunn para comparações múltiplas entre os tratamentos.

Para os conjuntos de dados que atenderam aos critérios de normalidade, foi empregada a Análise de Variância (ANOVA one-way,  $p < 0,05$ ). Em situações em que diferenças significativas foram detectadas entre os tratamentos, o teste de Tukey ( $p < 0,05$ ) foi utilizado para identificar as fontes de variação. A média foi adotada como medida de tendência central para dados com distribuição normal, enquanto a mediana foi utilizada para descrever a tendência central em conjuntos de dados não paramétricos.

## 2.3 RESULTADOS

A análise de variância apresentada na Tabela 2 confirma diferenças estatisticamente significativas entre as espécies para a maioria das propriedades físicas avaliadas. Densidade aparente, densidade básica e retração volumétrica exibiram contrastes relevantes, evidenciando a magnitude biológica da variação estrutural entre as espécies. A retração volumétrica, embora não tenha apresentado

efeito significativo no teste F, mostrou amplitude considerável entre indivíduos, indicando variabilidade moderada dentro das espécies

**Tabela 2 – Valores médios das propriedades físicas da madeira das cinco espécies estudadas**

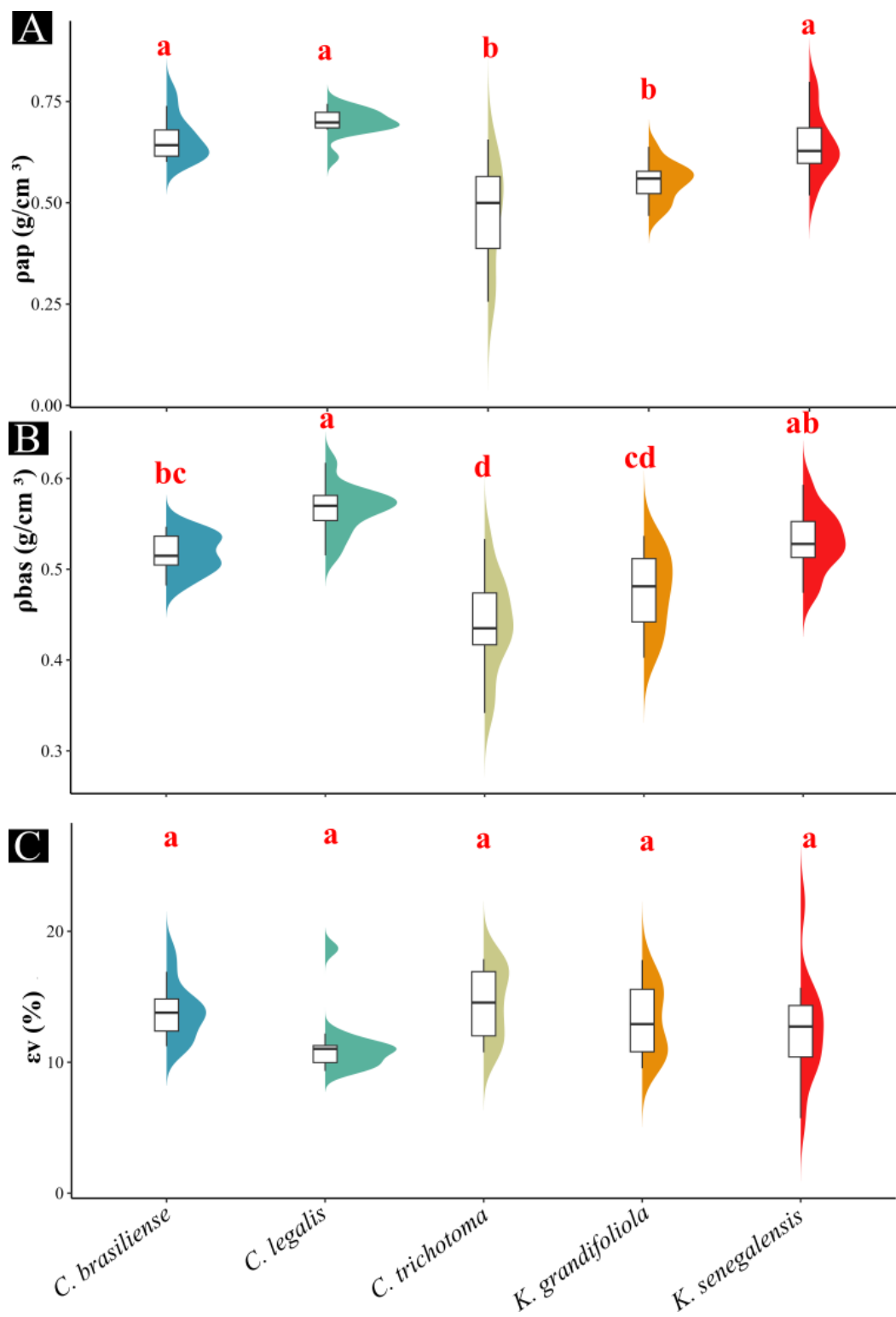
<b>Espécie</b>	<b>pap (g/cm<sup>3</sup>)*</b>	<b>pbas (g/cm<sup>3</sup>)*</b>	<b>ε<sub>v</sub> (%)<sup>ns</sup></b>
<i>C. brasiliense</i>	0,66 ± 0,06 a	0,51 ± 0,02 bc	13,89 ± 2,21
<i>C. legalis</i>	0,70 ± 0,03 a	0,57 ± 0,01 a	11,33 ± 2,47
<i>C. trichotoma</i>	0,47 ± 0,13 b	0,44 ± 0,05 d	14,57 ± 2,70
<i>K. grandifoliola</i>	0,55 ± 0,05 b	0,48 ± 0,04 cd	13,19 ± 2,73
<i>K. senegalensis</i>	0,65 ± 0,08 a	0,53 ± 0,03 a	12,66 ± 4,09

pap = densidade aparente, pbas = densidade básica, ε<sub>v</sub> = retração volumétrica.

A densidade aparente apresentou média geral de 0,60 g/cm<sup>3</sup>, com amplitude variando de 0,47 a 0,70 g/cm<sup>3</sup> nos valores médios. Os maiores valores médios foram observados em *C. legalis* (0,70 g/cm<sup>3</sup>), *C. brasiliense* (0,66 g/cm<sup>3</sup>) e *K. senegalensis* (0,65 g/cm<sup>3</sup>). Em contraste, *K. grandifoliola* (0,55 g/cm<sup>3</sup>) e *C. trichotoma* (0,47 g/cm<sup>3</sup>) apresentaram os menores valores.

A densidade básica acompanhou o mesmo padrão, com média geral de 0,51 g/cm<sup>3</sup> e predominância de valores mais elevados para *C. legalis*, *C. brasiliense* e *K. senegalensis*. A Figura 1 evidencia a elevada variabilidade de *C. trichotoma*, especialmente para densidade aparente e básica, sugerindo maior plasticidade anatômica da espécie, possivelmente relacionada a diferenças intrínsecas de crescimento ou a fatores ambientais que influenciaram o desenvolvimento do lenho.

Figura 1 – Propriedades físicas da madeira de cinco espécies tropicais: *Calophyllum brasiliense*, *Cariniana legalis*, *Cordia trichotoma*, *Khaya grandifoliola* e *Khaya senegalensis*



Cada gráfico mostra a distribuição dos valores individuais (half-violin) e o boxplot com mediana e quartis. (A) Densidade aparente ( $\rho_{ap}$ ), (B) densidade básica ( $\rho_{bas}$ ) e (C) variação volumétrica ( $\epsilon_v$ ). As letras sobre as barras indicam diferenças estatísticas significativas entre as médias pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). Para a variação volumétrica ( $\beta_v$ ), não foram observadas diferenças significativas entre as espécies ( $p > 0,05$ ).

A retração volumétrica ( $\epsilon_v$ ) apresentou média geral de 13,13%, com coeficiente de variação de 22,19%, mas sem diferenças estatísticas entre espécies. Apesar da amplitude observada, a estabilidade dimensional do grupo como um todo foi semelhante, indicando que, do ponto de vista higroscópico, não houve padrão divergente relevante entre as espécies avaliadas.

As diferenças das propriedades mecânicas entre as espécies avaliadas foram mais expressivas do que as observadas para as propriedades físicas. A Tabela 3 apresenta as médias e desvios-padrão das variáveis analisadas, que evidenciam contrastes nos valores de resistência, rigidez e comportamento estrutural.

**Tabela 3 – Valores médios das propriedades mecânicas da madeira das cinco espécies estudadas**

<b>Espécie</b>	<b><math>fc_0 \pm sd</math> (MPa)</b>	<b><math>MOR \pm sd</math> (MPa)</b>	<b><math>MOE \pm sd</math> (MPa)</b>	<b><math>fv_0 \pm sd</math> (MPa)</b>
<i>C. brasiliense</i>	34.76 ± 2.38	48.90 ± 12.15	4080 ± 1076	11.90 ± 1.93
<i>C. legalis</i>	37.36 ± 2.98	69.60 ± 10.86	4408 ± 942	12.97 ± 1.58
<i>C. trichotoma</i>	28.91 ± 4.65	58.57 ± 13.86	3932 ± 1190	10.52 ± 1.30
<i>K. grandifoliola</i>	36.02 ± 3.43	67.38 ± 8.74	5978 ± 1090	12.02 ± 2.12
<i>K. senegalensis</i>	28.52 ± 4.98	52.34 ± 8.82	2706 ± 600	12.31 ± 1.05

$fc_0$  = resistência à compressão paralela às fibras; MOR = módulo de ruptura em flexão estática; MOE = módulo de elasticidade em flexão estática;  $fv_0$  = resistência ao cisalhamento; sd = desvio-padrão

As maiores médias foram observadas em *C. legalis* (37,36 MPa), *K. grandifoliola* (36,03 MPa) e *C. brasiliense* (34,76 MPa). Em contraste, *C. trichotoma*

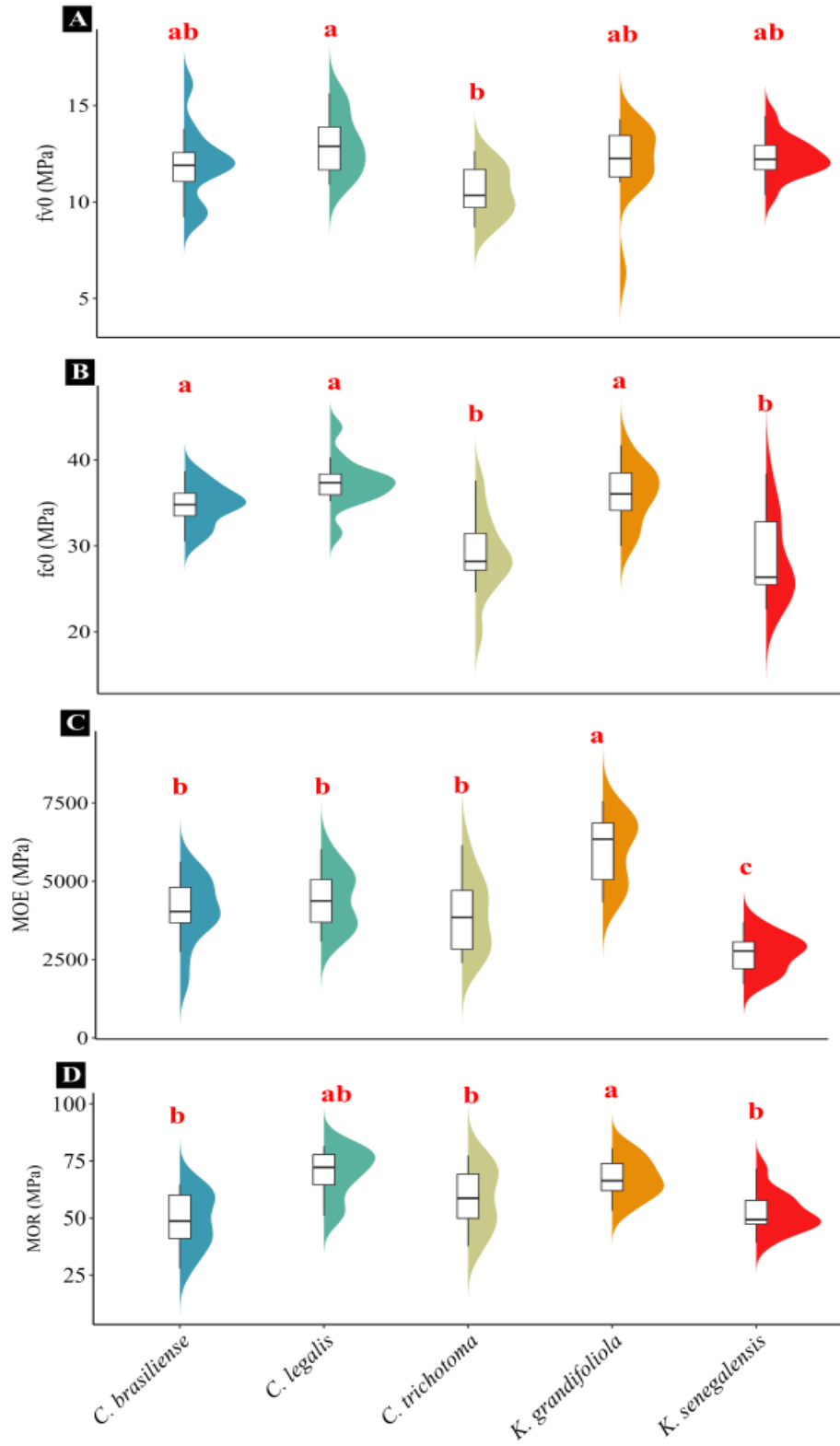
(28,91 MPa) e *K. senegalensis* (28,53 MPa) formaram o grupo de menor resistência. A Figura 2B mostra esse contraste de forma clara e estatisticamente consistente.

O módulo de elasticidade no ensaio de flexão estática foi a propriedade com maior contraste entre as espécies, refletido pelo quadrado médio mais elevado da ANOVA. Os valores variaram de 2.706 a 5.978. *K. grandifoliola* destacou-se amplamente como a espécie mais rígida, exibindo 5.978 MPa. *C. legalis* (4.408 MPa), *C. brasiliense* (4.080 MPa) e *C. trichotoma* (3.932 MPa) formaram um grupo intermediário, enquanto *K. senegalensis* apresentou o menor valor (2.706 MPa). Essa distribuição é apresentada na Figura 2C.

O módulo de ruptura (MOR) no ensaio de flexão estática variou de 48,90 a 69,60 MPa entre as espécies. As maiores médias foram observadas em *C. legalis* (69,60 MPa) e *K. grandifoliola* (67,38 MPa), que não diferiram estatisticamente entre si, compondo o grupo de maior resistência. *C. trichotoma* apresentou valor intermediário (58,57 MPa). Os menores valores foram registrados em *K. senegalensis* (52,34 MPa) e *C. brasiliense* (48,90 MPa), que formaram o grupo inferior, conforme indicado na Figura 2D.

Em conjunto, os resultados mostram que as espécies avaliadas exibem padrões distintos de densidade, rigidez e resistência mecânica, que refletem suas diferenças anatômicas internas. Madeiras mais densas, como *C. legalis* e *C. brasiliense*, apresentaram maior resistência e rigidez, enquanto espécies com menor densidade, como *C. trichotoma* e *K. grandifoliola*, exibiram valores inferiores. Esses contrastes estruturais fornecem a base biológica necessária para interpretar, no capítulo seguinte, como essas características influenciam o comportamento tecnológico e a trabalhabilidade das espécies.

**Figura 2 – Distribuição das propriedades mecânicas da madeira das cinco espécies estudadas**



Distribuição dos valores individuais (half-violin) e boxplot com mediana e quartis da resistência ao cisalhamento paralelo às fibras ( $f_{v0}$ ) da madeira de *Calophyllum brasiliense*, *Cariniana*

*legalis*, *Cordia trichotoma*, *Khaya grandifoliola* e *Khaya senegalensis*. As formas de violino representam a densidade de distribuição dos dados e os boxplots indicam a mediana e o intervalo interquartil. As letras sobre as barras indicam diferenças estatísticas significativas entre as médias pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

## 2.4 DISCUSSÃO

Os padrões identificados nas propriedades físicas e mecânicas mostram que as espécies estudadas se distribuem ao longo de um gradiente funcional claramente estruturado pela densidade básica, pela rigidez e pela resistência aos diferentes tipos de esforço. Os resultados sugerem que espécies mais densas apresentam desempenho mecânico superior, que espécies menos densas exibem propriedades compatíveis com usos moderados ou secundários e que espécies intermediárias combinam rigidez moderada com resistência relativamente equilibrada. Em síntese, os dados indicam que a qualidade tecnológica da madeira emerge da integração entre anatomia, massa específica e proporções de tecidos, formando um padrão contínuo estrutural coerente entre as espécies avaliadas.

A literatura há décadas aponta a densidade como preditor-chave das propriedades mecânicas da madeira, uma vez que madeiras mais densas possuem maior proporção de parede celular e menor fração de lume. Estudos clássicos e contemporâneos demonstram que valores mais altos de densidade tendem a estar associados a maiores resistências à compressão e módulo de elasticidade, especialmente em madeiras tropicais (Dlouhá *et al.*, 2018; Tekpetey; Riegel; Dekomien, 2015). Os resultados obtidos aqui apoiam essa estrutura teórica ao mostrar que *C. legalis* e *C. brasiliense* apresentaram simultaneamente maior densidade e maior resistência à compressão e ao cisalhamento, conforme sugerido por Niklas; Spatz, (2010) e mais recentemente demonstrado por Marini *et al.*, (2021). Por outro lado, os dados revelam nuances importantes: *K. grandifoliola*, mesmo com densidade moderada, exibiu o maior módulo de elasticidade, indicando que a rigidez pode ser influenciada por aspectos anatômicos além da densidade, como orientação das microfibrilas e proporção de fibras. Esse comportamento acrescenta inovação ao estudo ao demonstrar que, em espécies tropicais, os padrões mecânicos não seguem rigidamente as relações densidade–rigidez, mas resultam de combinações mais complexas de atributos estruturais.

Os processos que explicam esses padrões parecem estar ligados tanto à anatomia quanto à estratégia ecológica das espécies. Madeiras mais densas e resistentes, como *C. legalis*, tendem a apresentar maior proporção de fibras e paredes celulares mais espessas, o que eleva simultaneamente resistência e rigidez. Esse padrão é coerente com achados de Carvalho *et al.*, (2023) e Dória *et al.*, (2022), que descrevem essa espécie como estruturalmente robusta e adequada a usos de maior desempenho. Por outro lado, *C. trichotoma*, que apresentou os menores valores de densidade e resistência, tende a ser composta por maior proporção de lume e parênquima, reduzindo sua capacidade de suportar esforços mecânicos. Em *C. brasiliense*, Lima *et al.*, (2025) relataram que a madeira juvenil apresenta comportamento semelhante ao observado aqui, com rigidez moderada e desempenho adequado para usos semi-estruturais, reforçando que aspectos ontogenéticos influenciam as propriedades tecnológicas.

Outra explicação plausível para os valores observados é a forte presença de madeira juvenil em todos os materiais avaliados. A madeira juvenil tende a apresentar menor lignificação, menor proporção de paredes celulares e maior ângulo microfibrilar, o que reduz rigidez e resistência mesmo em espécies potencialmente densas. Rosa *et al.*, (2023) destacam que o avanço da idade tende a elevar substancialmente o módulo de elasticidade e o módulo de ruptura em espécies tropicais, indicando que parte das diferenças observadas aqui reflete o estágio ontogenético das árvores. Esses processos anatômicos e ecológicos sustentam a lógica dos padrões observados nos resultados, reforçando a confiabilidade das análises.

Se os padrões identificados e os processos inferidos estiverem corretos, as implicações tecnológicas são claras. Espécies como *C. legalis* e *C. brasiliense*, com densidade básica superior a  $0,55 \text{ g/cm}^3$  e resistência à compressão acima de 30 MPa, se enquadram nas classes de resistência D30 propostas pela NBR 7190-1 (ABNT, 2022), comparáveis a madeiras comerciais como cedro (*Cedrela spp.*) e tauari (*Couratari spp.*). Já *Cordia trichotoma* se enquadra na classe D20, adequada a usos leves, componentes secundários e produtos de maior valor agregado. As espécies do gênero *Khaya*, com desempenho intermediário, apresentam potencial para sistemas mistos de produção, em que rigidez, crescimento rápido e resistência mediana podem ser combinados de forma estratégica, alinhando produtividade e qualidade tecnológica, conforme diretrizes da NBR 7190-2 (ABNT, 2022).

Em síntese, a discussão demonstra que as propriedades físicas e mecânicas das espécies tropicais avaliadas emergem de interações estruturais complexas, envolvendo anatomia, densidade e processos ontogenéticos. A principal contribuição científica deste capítulo é mostrar que a variação tecnológica não é aleatória, mas organizada em padrões funcionais que refletem compromissos ecológicos e estruturais bem definidos. Esse entendimento amplia a capacidade de selecionar espécies para diferentes finalidades, otimizar o manejo de plantios mistos e orientar pesquisas futuras que integrem anatomia, propriedades tecnológicas e dinâmica do crescimento para prever o desempenho da madeira ao longo do tempo.

## 2.5 CONCLUSÃO

A caracterização das propriedades físicas e mecânicas da madeira serrada das espécies *C. brasiliense*, *C. legalis*, *C. trichotoma*, *K. grandifoliola* e *K. senegalensis* evidenciou diferenças significativas entre as espécies quanto à densidade, retração e resistência mecânica.

As espécies apresentaram variação nos valores de densidade aparente e densidade básica, refletindo diferentes padrões de comportamento físico da madeira. Entre as propriedades mecânicas, observaram-se diferenças nos valores de compressão paralela às fibras, cisalhamento e rigidez em flexão, indicando variações no desempenho estrutural entre as espécies avaliadas.

De modo geral, espécies com maior densidade apresentaram maiores valores de resistência e rigidez, enquanto espécies de menor densidade apresentaram valores inferiores para essas propriedades.

Esses resultados permitem caracterizar o comportamento físico e mecânico da madeira das espécies estudadas e fornecem informações importantes para a avaliação do seu potencial de utilização em aplicações estruturais e tecnológicas.

## REFERÊNCIAS

- ABNT. **NBR 7190: Projeto de estruturas de madeira**. Rio de Janeiro, 2022.
- CARVALHO, Ellen C. D. *et al.* Xylem anatomical traits determine the variation in wood density and water storage of plants in tropical semiarid climate. **Flora**, v. 298, p. 152185, jan. 2023.
- CHAVES, Rafael B. *et al.* On the need of legal frameworks for assessing restoration projects success: new perspectives from São Paulo state (Brazil). **Restoration Ecology**, v. 23, n. 6, p. 754–759, 4 nov. 2015.
- DAVIS, Anthony S.; JACOBS, Douglass F.; DUMROESE, R. Kasten. Challenging a Paradigm: Toward Integrating Indigenous Species into Tropical Plantation Forestry. *In: [S.l.: S.n.]*. p. 293–308.
- DLOUHÁ, Jana *et al.* Biophysical dependences among functional wood traits. **Functional Ecology**, v. 32, n. 12, p. 2652–2665, 4 dez. 2018.
- DÓRIA, Larissa Chacon *et al.* Functional trade-offs in volume allocation to xylem cell types in 75 species from the Brazilian savanna Cerrado. **Annals of Botany**, v. 130, n. 3, p. 445–456, 19 set. 2022.
- FEARNSIDE, PHILIP M. Deforestation in Brazilian Amazonia: History, Rates, and Consequences. **Conservation Biology**, v. 19, n. 3, p. 680–688, 7 jun. 2005.
- HUA, Fangyuan *et al.* The biodiversity and ecosystem service contributions and trade-offs of forest restoration approaches. **Science**, v. 376, n. 6595, p. 839–844, 20 maio 2022.
- LAURANCE, William F.; SAYER, Jeffrey; CASSMAN, Kenneth G. Agricultural expansion and its impacts on tropical nature. **Trends in Ecology & Evolution**, v. 29, n. 2, p. 107–116, fev. 2014.
- LIMA, Israel Luiz De *et al.* Wood Properties of 38-year-old *Cariniana legalis* (Mart.) Kuntze Based on Planting Spacing. **Colombia forestal**, v. 25, n. 2, p. 5–16, 1 jul. 2022.
- LIMA, Israel Luiz de *et al.* Physicomechanical properties of *Acacia mangium* Willd and *Calophyllum brasiliense* Cambess wood and their potential for industrial use. **Ciência Florestal**, p. e89491, 10 out. 2025.

MARINI, Lucas José *et al.* Estimativa da resistência e da rigidez à compressão paralela às fibras da madeira de Pinus sp. pela colorimetria. **Ambiente Construído**, v. 21, n. 1, p. 149–160, jan. 2021.

NIKLAS, Karl J.; SPATZ, Hanns-Christof. Worldwide correlations of mechanical properties and green wood density. **American Journal of Botany**, v. 97, n. 10, p. 1587–1594, out. 2010.

ROSA, Talitha Oliveira *et al.* STATIC BENDING STRENGTH AND STIFFNESS IN JUVENILE AND ADULT WOOD OF FAST-GROWING Pinus taeda L. **FLORESTA**, v. 53, n. 4, p. 461, 29 set. 2023.

TEKPETEY, Stephen Lartey; RIEGEL, Adrian; DEKOMIEN, Kerstin. Investigating Surface Quality of African Mahogany (*Khaya Ivorensis*) From Ghana using Stylus and Deflectometry Techniques. **Wood and Fiber Science**, v. 47, 2015.

ZOBEL, Bruce J.; JETT, Jackson B. **Genetics of Wood Production**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1995.

### CAPÍTULO 3

## QUALIDADE DE USINAGEM DA MADEIRA DE ESPÉCIES TROPICAIS EM SISTEMAS MISTOS<sup>1</sup>

### RESUMO

A trabalhabilidade da madeira representa um atributo essencial para avaliar sua aptidão tecnológica, uma vez que determina o comportamento do material frente às principais operações de usinagem. Neste estudo, foram avaliadas cinco espécies tropicais provenientes de plantios mistos, utilizando os testes padronizados de aplainamento, desengrosso, lixamento, furação por broca e fendilhamento por pregos. As notas atribuídas variaram entre 1 e 5, em que menores valores indicam melhor qualidade superficial. Os resultados evidenciaram diferenças marcantes entre as espécies. No aplainamento, *C. legalis* e *C. trichotoma* apresentaram o melhor desempenho, ambas com nota 2, enquanto as demais espécies receberam nota 3. No desengrosso, *C. trichotoma* e *K. grandifoliola* obtiveram nota 2, com menor ocorrência de arrancamento de fibras, ao passo que *K. senegalensis* apresentou nota 4, indicando superfície de menor qualidade. No lixamento, *C. brasiliense* e *C. trichotoma* exibiram apenas arrepiamento leve com nota 1, enquanto as demais apresentaram notas entre 2 e 3. O teste de fendilhamento por pregos resultou majoritariamente em nota 1 para todas as espécies, exceto *C. legalis*, que obteve nota 2. A furação por broca foi o teste mais crítico, com notas entre 3 e 4 para todas as espécies, refletindo a ocorrência de levantamento de grã e arrancamento leve a médio.

As diferenças observadas demonstram que a trabalhabilidade é influenciada por atributos estruturais da madeira, como textura, orientação da grã e uniformidade anatômica. A análise comparativa entre espécies revela que a resposta à usinagem constitui expressão direta da organização do lenho e representa um componente fundamental para a compreensão do desempenho tecnológico da madeira em sistemas florestais mistos.

**Palavras-chave:** usinagem da madeira; textura; grã; desempenho tecnológico; ASTM D1666-11.

---

<sup>1</sup> Este capítulo foi submetido para publicação na revista **Maderas. Ciencia y Tecnología** com o título “*Machinability Quality of Tropical Wood Species in Mixed-Species Systems*”.

## ABSTRACT

Wood workability represents an essential attribute for evaluating its technological suitability, as it determines the behavior of the material during the main machining operations. In this study, five tropical species from mixed plantations were evaluated using standardized tests of planing, thicknessing, sanding, drilling, and nail splitting. Scores ranged from 1 to 5, where lower values indicate better surface quality. The results revealed marked differences among species. In the planing test, *C. legalis* and *C. trichotoma* showed the best performance, both receiving a score of 2, whereas the other species received a score of 3. In the thicknessing test, *C. trichotoma* and *K. grandifoliola* obtained a score of 2, with a lower occurrence of torn grain, while *K. senegalensis* received a score of 4, indicating a lower-quality surface. In the sanding test, *C. brasiliense* and *C. trichotoma* showed only slight fuzziness with a score of 1, whereas the remaining species received scores between 2 and 3. The nail-splitting test resulted predominantly in a score of 1 for all species, except *C. legalis*, which received a score of 2. Drilling was the most critical test, with scores between 3 and 4 for all species, reflecting the occurrence of grain raising and slight to moderate tear-out. The observed differences demonstrate that workability is influenced by structural attributes of wood, such as texture, grain orientation, and anatomical uniformity. The comparative analysis among species reveals that the machining response is a direct expression of wood organization and represents a fundamental component for understanding the technological performance of wood in mixed forest systems.

**Keywords:** wood machining; texture; grain; technological performance; ASTM D1666-11.

### 3.1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda por madeira de qualidade em mercados industriais tem intensificado o interesse por compreender os fatores que determinam a trabalhabilidade do material, especialmente em espécies tropicais (Bodig; Jayne, 1993; Zobel; Jett, 1995). Do ponto de vista teórico, essa propriedade é controlada pela estrutura anatômica do lenho e pelas propriedades físicas e mecânicas associadas, que governam sua resposta às operações de corte desgaste e conformação (Belleville; Ashley; Ozarska, 2016; Laina *et al.*, 2017). A forma como fibras, vasos e raios se organizam no tecido, aliada à densidade e à anisotropia da madeira, influencia decisivamente a eficiência da usinagem e a qualidade superficial obtida (Emmerich; Wülfing; Brischke, 2019). Nesse cenário, entender a base estrutural da trabalhabilidade torna-se essencial para otimizar o processamento e ampliar o aproveitamento industrial.

A trabalhabilidade compreende operações fundamentais como aplainamento, desengrosso, lixamento, furação e fixação mecânica, cada uma exigindo interações específicas entre ferramenta e material. A literatura aponta que textura, orientação da grã, proporção de fibras, espessura da parede celular e presença de extrativos são fatores determinantes na ocorrência de defeitos como arrepiamento, arrancamento de fibras, levantamento da grã e fendilhamento (Belleville; Ashley; Ozarska, 2016; Ibrisevic *et al.*, 2023). Madeiras de textura fina tendem a produzir superfícies mais regulares, enquanto espécies com grã irregular ou entrecruzada apresentam maior suscetibilidade a rupturas e falhas durante o corte (Bodig; Jayne, 1993). Esses elementos estruturais explicam por que espécies fisiológica ou anatomicamente semelhantes podem gerar comportamentos tecnológicos contrastantes (Andrade *et al.*, 2022).

Apesar dos avanços no estudo da usinagem, grande parte das pesquisas concentra-se em espécies isoladas ou provenientes de florestas naturais e sistemas monoespecíficos, o que limita a compreensão sobre o comportamento tecnológico de madeiras oriundas de plantios mistos (Emmerich; Wülfing; Brischke, 2019; Junqueira *et al.*, 2021). Nesses sistemas, a coexistência de espécies nativas e exóticas com diferentes padrões anatômicos, densidades e propriedades mecânicas cria um mosaico estrutural que pode resultar em respostas diversificadas durante a usinagem (Moya *et al.*, 2015). Essa variabilidade tem implicações diretas na eficiência industrial,

na taxa de aproveitamento da madeira e na definição de parâmetros operacionais adequados para o processamento (Liu; Kuchma; Krutovsky, 2018).

A avaliação da trabalhabilidade em espécies tropicais de plantios mistos adquire relevância estratégica para a produção sustentável, especialmente diante da crescente demanda por madeira de qualidade e da necessidade de ampliar o uso de espécies nativas em sistemas produtivos (Paquette; Messier, 2010). A compreensão integrada das respostas tecnológicas possibilita selecionar espécies mais aptas ao beneficiamento, identificar potenciais limitações durante o processamento e propor soluções industriais que reduzam defeitos superficiais, retrabalhos e perdas materiais.

Parte-se da hipótese de que diferenças anatômicas e físico-mecânicas entre as espécies resultam em padrões distintos de usinagem, manifestados em níveis variados de qualidade superficial, resistência ao corte e ocorrência de defeitos. Espera-se ainda que espécies com maior homogeneidade estrutural e textura mais fina apresentem melhor desempenho durante as operações de usinagem.

Diante desse contexto, este estudo tem como objetivo avaliar a trabalhabilidade da madeira de cinco espécies tropicais provenientes de plantios mistos. Ao relacionar o desempenho nas operações de usinagem com as características estruturais da madeira, busca-se contribuir para a compreensão dos fatores que influenciam a qualidade superficial e o comportamento tecnológico dessas espécies.

## **3.2 MATERIAL E MÉTODOS**

### **3.2.1 Preparação das Amostras**

Para este estudo, foram utilizadas 15 toras de 1 metro de comprimento, retiradas da base de árvores das espécies *Calophyllum brasiliense* Cambess, *Cariniana legalis* (Mart.) Kuntze, *Cordia trichotoma* (Vell.) Arrab. ex Steud., *Khaya grandifoliola* C. DC e *Khaya senegalensis* (Desr.) A. Juss. sendo três toras de cada espécie.

As toras selecionadas para o estudo foram desdobradas no Horto Florestal de Manduri-SP. As amostras foram preparadas com dimensões de 8x4x3 cm<sup>3</sup> (comprimento x largura x espessura) e umidade média de 12%, conforme determinado por secagem em estufa a 103 ± 2 °C até peso constante. Todas as amostras foram

armazenadas em ambiente controlado (temperatura de  $20 \pm 2$  °C e umidade relativa de  $65 \pm 5\%$ ) por 48 horas antes dos testes para garantir a estabilização da umidade.

### 3.2.2 Testes de Usinagem

#### 3.2.2.1 Aplainamento

O teste de aplainamento foi realizado utilizando uma plaina de superfície modelo Invicta Delta, equipada com três facas de carbonato de tungstênio. A máquina foi configurada com uma velocidade de rotação de 3460 RPM e velocidade de avanço de  $9\text{m}/\text{min}^{-1}$ . As superfícies frontal e traseira de cada amostra foram aplainadas, e o processo foi repetido três vezes para garantir a consistência dos resultados. A escolha desses parâmetros foi baseada em estudos anteriores que indicam que essa combinação de velocidade e avanço minimiza defeitos superficiais, como arrepiamento e arrancamento de fibras (Laina *et al.*, 2017).

#### 3.2.2.2 Desengrosso

Após o aplainamento, as amostras foram submetidas ao teste de desengrosso utilizando uma desengrossadeira modelo Invicta DME, com potência de 5 hp e velocidade de rotação de 1730 RPM. As amostras foram reduzidas a uma espessura final de 2 cm, com remoção uniforme de material em ambas as faces. O processo foi realizado em três passadas para evitar sobrecarga da máquina e danos às amostras.

#### 3.2.2.3 Furação por Broca

O teste de furação foi realizado utilizando uma furadeira de bancada modelo FBS 16 Schulz, com velocidade de rotação de 1720 RPM e potência de 0,37 cv. Foi empregada broca específica para madeira, com 12 mm de diâmetro, para a execução de furos com 10 cm de profundidade, espaçados em 1 cm entre si. O ensaio foi conduzido a 1 cm da extremidade da amostra, e cada furo foi realizado em passada única, a fim de minimizar o aquecimento da broca e possíveis alterações na qualidade da superfície usinada.

Para eliminar a influência do desgaste da ferramenta nos resultados, utilizou-se uma broca nova para cada espécie, de modo que todos os furos foram realizados

com ferramenta sem uso prévio, garantindo uniformidade nas condições de corte. A escolha desses parâmetros baseou-se na ASTM D1666 (2022), que recomenda velocidades de rotação mais elevadas (até 3600 RPM) para madeiras de maior densidade.

#### 3.2.2.4 Fendilhamento por pregos

Para o teste de fendilhamento, pregos de aço 15x15 com 15 mm de comprimento e 2 mm de diâmetro foram utilizados. Cinco pregos foram inseridos na superfície de cada amostra, com espaçamento de 10 mm entre eles e a 1 cm da extremidade. A inserção foi realizada manualmente com martelo de massa padronizada, mantendo-se o operador durante todo o ensaio e garantindo profundidade uniforme de 15 mm para todos os pregos. A avaliação do fendilhamento foi realizada visualmente, com base na presença de fissuras ou rachaduras ao redor dos pregos.

#### 3.2.2.5 Lixamento

O teste de lixamento foi realizado utilizando uma lixadeira vertical com lixa de grão 120, comprimento de 3,10 m e largura de 14 cm. A máquina foi configurada com uma potência de 5 kW, e as amostras foram lixadas em ambas as faces com movimentos perpendiculares à direção da grã. O processo foi realizado em três passadas para garantir um acabamento uniforme.

#### 3.2.3 Avaliação da Qualidade da Superfície

A qualidade da superfície usinada foi avaliada com base na norma ASTM D1666, (2022) que classifica a superfície em uma escala de 1 a 5, onde 1 representa uma superfície isenta de defeitos e 5 representa arrancamento forte de fibras (Tabela 1). A atribuição das notas foi realizada por três avaliadores treinados, de forma independente. Nos casos de divergência, procedeu-se a uma avaliação conjunta para definição consensual da classificação final, com o objetivo de reduzir a subjetividade inerente ao método visual.

**Tabela 1 – Notas atribuídas para cada qualidade da superfície da madeira usinada**

<b>Nota</b>	<b>Qualidade da superfície usinada</b>
1	Superfície isenta de quaisquer defeitos
2	Presença de arrepimento leve a médio
3	Presença de arrepimento forte e arrancamento leve
4	Presença de arrepimento forte e arrancamento médio
5	Presença de arrancamento forte, independentemente da presença de arrepimento

Fonte: ASTM D 1666 (2022)

### 3.3 RESULTADOS

A avaliação da trabalhabilidade das cinco espécies evidenciou diferenças claras no comportamento da madeira durante as operações de usinagem. As notas atribuídas a cada teste são apresentadas na Tabela 2, seguindo a escala da ASTM D1666-11 (2022), em que valores mais baixos correspondem a melhor qualidade superficial e menor incidência de defeitos.

**Tabela 2 – Notas médias atribuídas à qualidade da superfície nos testes de trabalhabilidade das cinco espécies avaliadas, segundo a escala da ASTM D1666 (2022)**

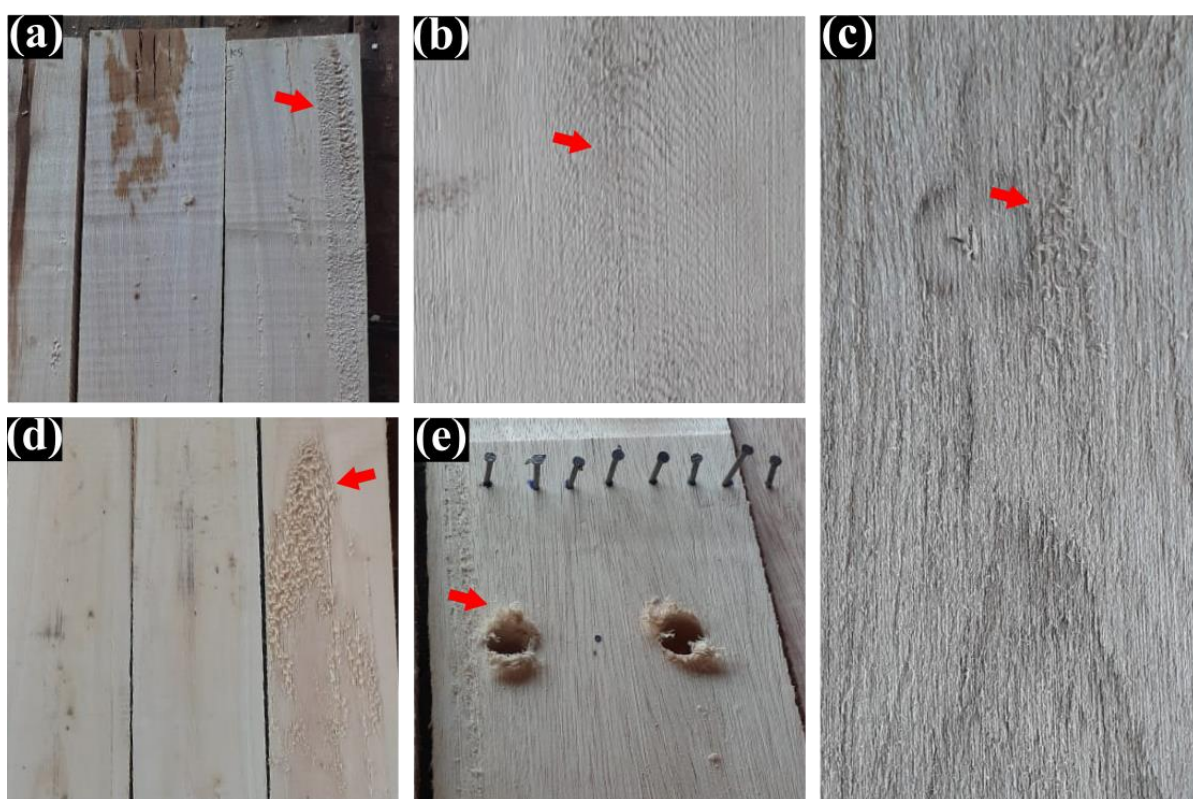
<b>Espécie</b>	<b>Aplainamento</b>	<b>Desengrosso</b>	<b>Broca</b>	<b>Fendilhamento por pregos</b>	<b>Lixamento</b>
<i>C. brasiliense</i>	3	3	3	1	2
<i>C. legalis</i>	2	3	4	2	3
<i>C. trichotoma</i>	2	2	3	1	2
<i>K. grandifoliola</i>	3	2	3	1	3
<i>K. senegalensis</i>	3	4	4	1	3

Valores correspondem às notas atribuídas pelos avaliadores, em escala de 1 a 5, em que 1 indica superfície isenta de defeitos e 5 indica arrancamento severo de fibras.

## Aplainamento

No aplainamento, *C. legalis* e *C. trichotoma* apresentaram as superfícies de melhor qualidade, ambas com nota 2, indicando apenas arrepiamento leve a médio. As imagens mostram superfícies relativamente regulares nessas espécies, com pouca ruptura superficial (Figura 1B e Figura 1C). As demais espécies receberam nota 3, caracterizada por arrepiamento forte e arrancamento leve a médio das fibras, como ilustrado para *K. senegalensis* e *C. brasiliense* (Figura 1A e Figura 1D). A diferença entre os grupos reflete variações anatômicas associadas ao tipo de grã, textura e anisotropia da madeira, fatores amplamente reconhecidos como determinantes da qualidade no aplainamento.

**Figura 1 - trabalhabilidade da madeira das cinco espécies**



(A) *Khaya senegalensis* no teste de aplainamento, evidenciando regiões de arrancamento de fibras; (B) *Cariniana legalis* com superfície aplainada e presença de leves marcas de faca; (C) *Cordia trichotoma* apresentando defeitos mais acentuados após o aplainamento; (D) *Khaya senegalensis* no ensaio de desengrosso, destacando áreas de arranque superficial; e (E) *Khaya grandifoliola* e *Cariniana legalis* nos ensaios de perfuração por broca, mostrando arrepiamento forte de fibras.

## Desengrosso

O desengrosso apresentou padrões semelhantes aos observados no aplainamento, porém com maior intensidade de defeitos. As notas variaram entre 2 e 4. *C. trichotoma* e *K. grandifoliola* receberam nota 2, demonstrando desempenho mais favorável, com superfície relativamente homogênea e com menor presença de arrancamento. Em contraste, *K. senegalensis* apresentou a pior performance, com nota 4 e presença evidente de arrepiamento forte e arrancamento médio, visível na Figura 1D. *C. brasiliense* e *C. legalis* apresentaram notas intermediárias (3), indicando qualidade moderada da superfície.

## Furação por broca

A furação por broca foi o teste que apresentou maiores níveis de defeitos. Todas as espécies receberam notas entre 3 e 4, evidenciando presença de levantamento da grã e arrancamento leve a médio das fibras. A Figura 1E evidencia esse comportamento, em especial nas espécies de *Khaya*. As diferenças observadas refletem a interação entre a orientação da grã e a ação axial da ferramenta, uma vez que a perfuração perpendicular às fibras tende a provocar ruptura irregular em espécies com textura mais grossa ou com maior variabilidade anatômica.

## Fendilhamento por pregos

O teste de fendilhamento por pregos resultou em desempenho amplamente satisfatório. Todas as espécies receberam nota 1, exceto *C. legalis*, que apresentou arrepiamento superficial leve e foi classificada com nota 2. Observou-se ausência de rachaduras expressivas ou fendilhamentos, indicando boa integridade estrutural do lenho no plano transversal (Figura 1E). Esse comportamento sugere facilidade de pregação e baixa tendência a fraturas induzidas por fixadores mecânicos.

## Lixamento

No lixamento, a maioria das espécies apresentou superfícies isentas de riscamento e com acabamento satisfatório. *C. brasiliense* e *C. trichotoma* obtiveram notas mais baixas, reflexo da presença apenas de arrepiamento leve. As demais espécies apresentaram arrepiamento mais intenso, embora sem arrancamento

significativo, mantendo notas dentro de uma faixa de bom desempenho para operações de acabamento fino. O comportamento apresentado sugere influência direta da textura e da uniformidade da grã, determinantes para a abrasão durante o lixamento.

### 3.4 DISCUSSÃO

Os padrões observados nos testes de usinagem revelam que as cinco espécies apresentam comportamentos tecnicamente distintos, determinados por suas características anatômicas e estruturais. Três tendências principais surgem dos resultados. Primeiro, espécies com menor variabilidade angular na orientação longitudinal das fibras, associada à textura fina, exibem melhor desempenho global, especialmente nos testes de aplainamento, desengrosso e lixamento. Segundo, a furação com broca se mostrou o processo mais sensível às diferenças anatômicas, evidenciando maior propensão ao arrancamento de fibras. Terceiro, o fendilhamento por pregos foi o teste menos afetado pelas diferenças estruturais, indicando que todas as espécies possuem boa integridade no plano transversal. Esses padrões sugerem que a trabalhabilidade da madeira não resulta de uma propriedade isolada, mas da interação entre grã, textura, densidade e organização dos elementos anatômicos.

Do ponto de vista teórico, os resultados confirmam padrões amplamente discutidos na literatura sobre usinagem da madeira. Pesquisas anteriores indicam que a uniformidade anatômica, a baixa variabilidade de orientação das fibras e a textura fina tendem a reduzir defeitos durante o corte, enquanto madeira com grã entrecruzada ou textura grossa apresenta maior risco de arrancamento e irregularidades superficiais (Belleville; Ashley; Ozarska, 2016; Delatorre *et al.*, 2020; Kollmann; Côté; Côté, 1968). Os resultados obtidos neste estudo corroboram essas proposições, ao demonstrar que *C. trichotoma*, espécie de textura relativamente fina e grã predominantemente direita, apresentou desempenho superior em várias etapas da usinagem. A inovação deste trabalho reside na comparação simultânea entre espécies nativas e exóticas provenientes de plantios mistos, permitindo identificar combinações de características anatômicas que influenciam diretamente o processamento mecânico da madeira, algo ainda pouco abordado em estudos sobre sistemas multiespécies.

As diferenças de desempenho observadas entre as espécies podem ser explicadas por processos anatômicos que regulam a interação entre a ferramenta de corte e os elementos celulares. O arrepiamento e o arrancamento de fibras, comuns nos testes de aplainamento e desengrosso, estão associados ao ângulo de ataque das lâminas e à resistência diferencial entre fibras longitudinais e parênquima (Cruz *et al.*, 2020). Madeiras com paredes celulares mais espessas e fibras longas tendem a resistir à tração perpendicular ao corte, reduzindo o risco de arrancamento. Por outro lado, a presença de grã irregular ou entrecruzada, mesmo quando associada a textura fina, favorece a ruptura não controlada, especialmente em operações que exigem maior força de corte, como a furação com broca. Esse comportamento explica os maiores defeitos observados em *K. senegalensis*, cuja estrutura anatômica apresenta variações na orientação das fibras e maior heterogeneidade da textura (Tekpetey; Riegel; Dekomien, 2015).

A furação com broca destacou-se como o teste mais sensível às diferenças celulares, pois envolve a ruptura contínua da parede celular em múltiplos planos anatômicos. O levantamento da grã, observado em todas as espécies, decorre da interação entre a força de corte e o arranjo dos vasos e fibras no plano transversal (Taques; Arruda, 2016). Nos casos em que a ferramenta atravessa zonas com vasos de maior diâmetro ou transições súbitas entre fibras e parênquima, há aumento da probabilidade de arrancamento, fenômeno amplamente documentado na literatura sobre usinagem (Zamarian; Albuquerque; Matos, 2012). A textura fina de *C. brasiliense* ameniza parcialmente esse efeito, ao passo que a textura variável das espécies de *Khaya* intensifica a ruptura, evidenciando a importância da anatomia no desempenho sob esforço perpendicular.

As implicações desses resultados são relevantes para o processamento industrial da madeira proveniente de plantios mistos. A identificação de espécies com desempenho superior em etapas-chave da usinagem orienta estratégias de beneficiamento e seleção de material para usos específicos. Espécies de melhor trabalhabilidade, como *C. trichotoma*, apresentam potencial para produtos de alto valor agregado que exigem acabamento fino, enquanto aquelas com maior propensão a defeitos, como *K. senegalensis*, podem demandar ajustes nos parâmetros operacionais ou destinação a produtos em que a qualidade superficial é menos determinante. A compreensão dos processos anatômicos que governam a

trabalhabilidade permite ainda otimizar o aproveitamento da madeira, reduzir retrabalho e minimizar perdas, contribuindo para maior eficiência industrial.

Em síntese, a análise da trabalhabilidade evidencia que as diferenças no desempenho entre as espécies refletem diretamente sua anatomia e organização estrutural. O estudo demonstra que a resposta da madeira às operações de usinagem resulta da integração entre grã, textura, densidade e disposição dos elementos celulares, oferecendo uma perspectiva abrangente sobre a qualidade tecnológica das espécies avaliadas. Esses achados fornecem subsídios não apenas para o processamento industrial, mas também para programas de manejo e melhoramento genético que considerem a trabalhabilidade como atributo desejável. A incorporação de espécies com diferentes comportamentos nos sistemas de plantios mistos amplia as possibilidades de uso da madeira e reforça a importância de investigações integradas entre anatomia, propriedades tecnológicas e desempenho em usinagem.

### 3.5 CONCLUSÃO

A avaliação da trabalhabilidade das cinco espécies permitiu identificar padrões consistentes que refletem a interação entre estrutura anatômica e resposta aos processos de usinagem. As diferenças observadas nos testes de aplainamento, desengrosso, lixamento, furação e fendilhamento indicam que cada espécie apresenta um conjunto próprio de atributos que determina sua aptidão tecnológica. De modo geral, *C. trichotoma* e *C. legalis* demonstram maior estabilidade superficial durante o corte e o processamento abrasivo, enquanto *K. senegalensis* apresenta maior suscetibilidade a defeitos, especialmente em operações de desengrosso e furação.

Os resultados sugerem que características como textura fina, grã mais uniforme e menor variação na orientação das fibras contribuem para um melhor desempenho em processos de usinagem. Em contraste, espécies com grã entrecruzada, maior densidade ou maior presença de extrativos exibem maior propensão a defeitos superficiais, exigindo maior controle operacional e ajustes nos parâmetros de corte. Essa relação entre estrutura e desempenho confirma que a trabalhabilidade não é um atributo isolado, mas sim uma manifestação direta da organização anatômica e da mecânica interna da madeira.

A boa performance observada no teste de fendilhamento por pregos evidencia que todas as espécies possuem integridade estrutural satisfatória para operações de

fixação, o que amplia sua aplicabilidade em usos secundários e em produtos de maior valor agregado. Ao mesmo tempo, a tendência ao levantamento da grã durante a furação ressalta a necessidade de cuidados específicos na etapa de perfuração, sobretudo em espécies com textura mais grossa ou maior heterogeneidade anatômica.

Em síntese, os resultados demonstram que as espécies avaliadas possuem potencial tecnológico para diferentes aplicações industriais, desde produtos que exigem maior qualidade superficial até usos que toleram pequenas irregularidades, desde que adotadas técnicas adequadas de usinagem. A compreensão da trabalhabilidade amplia a eficiência do processamento, reduz perdas durante o beneficiamento e orienta a escolha de espécies para aplicações específicas dentro de sistemas de plantios mistos.

As evidências geradas nesse estudo reforçam a importância de integrar características anatômicas, físicas e mecânicas à avaliação da trabalhabilidade, permitindo interpretações mais completas sobre o comportamento tecnológico da madeira. Essa abordagem contribui para o avanço do conhecimento sobre espécies nativas e exóticas, oferecendo subsídios para programas de manejo, melhoramento genético e seleção de materiais em cadeias produtivas que demandam madeira de alto desempenho.

## REFERÊNCIAS

ANDRADE, Anna Carolina de Almeida *et al.* Influence of basic wood density on the specific cutting energy. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 7, p. e13511729674, 18 maio 2022.

ASTM INTERNACIONAL. **ASTM D1666 - Test Methods for Conducting Machining Tests of Wood and Wood-Base Panel Materials**. West Conshohocken, PA: ASTM International, , 1 ago. 2022.

BELLEVILLE, Benoit; ASHLEY, Philip; OZARSKA, Barbara. Wood machining properties of Australian plantation-grown Eucalypts. **Maderas. Ciencia y tecnología**, n. ahead, p. 0–0, 2016.

BODIG, Jozsef; JAYNE, Benjamin A. **Mechanics of Wood and Wood Composites**. Malabar, Florida: [S.n.].

CRUZ, Thiago Moreira *et al.* Análise da superfície usinada da madeira de clones de *Toona ciliata* M. Roemer var. australiano. **Ciência Florestal**, v. 30, n. 3, p. 809–818, 1 set. 2020.

DELATORRE, Fabíola Martins *et al.* Comportamento da madeira de Ingá (*Inga edulis* Mart) frente a ensaios de usinagem. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 8, p. e352985119, 7 jul. 2020.

EMMERICH, Lukas; WÜLFING, Georg; BRISCHKE, Christian. The Impact of Anatomical Characteristics on the Structural Integrity of Wood. **Forests**, v. 10, n. 2, p. 199, 24 fev. 2019.

IBRISEVIC, A. *et al.* Effects of Cutting Parameters and Grain Direction on Surface Quality of Three Wood Species Obtained by CNC Milling. **Bulletin of the Transilvania University of Brasov. Series II: Forestry • Wood Industry • Agricultural Food Engineering**, p. 127–140, 21 dez. 2023.

JUNQUEIRA, Amanda Arantes *et al.* Lumber Potential of Tropical Species in a Mixed Plantation: Assessment at 50 Months. **Floresta e Ambiente**, 2021.

KOLLMANN, Franz F. P.; CÔTÉ, Wilfred A.; CÔTÉ, Wilfred A. **Defects and Abnormalities of Wood**. New York, USA: [S.n.].

LAINA, Rubén *et al.* Effect of the anatomical structure, wood properties and machining conditions on surface roughness of wood. **Maderas. Ciencia y tecnología**, n. ahead, p. 0–0, 2017.

LIU, Corsa Lok Ching; KUCHMA, Oleksandra; KRUTOVSKY, Konstantin V. Mixed-species versus monocultures in plantation forestry: Development, benefits, ecosystem services and perspectives for the future. **Global Ecology and Conservation**, v. 15, p. e00419, jul. 2018.

MOYA, Róger *et al.* Evaluation of chemical compositions, air-dry, preservation and workability of eight fastgrowing plantation species in Costa Rica. **Madera y Bosques**, v. 21, 9 nov. 2015.

PAQUETTE, Alain; MESSIER, Christian. The role of plantations in managing the world's forests in the Anthropocene. **Frontiers in Ecology and the Environment**, v. 8, n. 1, p. 27–34, 20 fev. 2010.

TAQUES, Adjenane Corrêa; ARRUDA, Tatiana Paula Marques de. Usinagem da madeira de angelim pedra (*Hymenolobium petraeum*). **Revista De Ciências Agro-Ambientais**, v. 14, n. 1, 2016.

TEKPETEY, Stephen Lartey; RIEGEL, Adrian; DEKOMIEN, Kerstin. Investigating Surface Quality of African Mahogany (*Khaya Ivorensis*) From Ghana using Stylus and Deflectometry Techniques. **Wood and Fiber Science**, v. 47, 2015.

ZAMARIAN, Esoline Helena; ALBUQUERQUE, Carlos Eduardo Camargo de; MATOS, Jorge Luis Monteiro de. USINAGEM DA MADEIRA DE BRACATINGA PARA USO NA INDÚSTRIA MOVELEIRA. **FLORESTA**, v. 42, n. 3, p. 631, 1 out. 2012.

ZOBEL, Bruce J.; JETT, Jackson B. **Genetics of Wood Production**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1995.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente tese demonstra que a qualidade tecnológica da madeira resultante de plantios mistos depende de um conjunto integrado de fatores estruturais, físicos, mecânicos e operacionais. A análise conjunta dos três capítulos evidencia que as diferenças observadas entre as espécies não podem ser compreendidas isoladamente, mas emergem da interação entre a organização anatômica do lenho, o comportamento da madeira frente aos esforços físicos e mecânicos e sua resposta às operações de usinagem. Os resultados mostram que cada espécie combina esses atributos de forma distinta, resultando em perfis tecnológicos específicos que orientam seu potencial de uso.

As avaliações anatômicas revelaram padrões estruturais consistentes entre as espécies, destacando como a configuração dos vasos, a morfologia dos raios e o alongamento das fibras condicionam a eficiência hidráulica, a estabilidade dimensional e a resistência mecânica. Esses padrões não apenas explicam diferenças tecnológicas identificadas nos capítulos seguintes, mas também demonstram que o desempenho da madeira em aplicações industriais é, em grande medida, determinado pela sua arquitetura celular. Assim, a anatomia atua como o núcleo estrutural que fundamenta a compreensão da qualidade do material.

As propriedades físicas e mecânicas aprofundam essa interpretação ao revelar que a densidade, a retração e a resistência da madeira organizam-se em gradientes funcionalmente coerentes com os padrões anatômicos identificados. Espécies de lenho mais denso ou com maior proporção de parede celular apresentam desempenho superior em propriedades estruturais, enquanto espécies mais leves tendem a apresentar maior facilidade de processamento e menor rigidez. A classificação segundo critérios normativos evidencia ainda que, mesmo diante da variabilidade natural das espécies tropicais, é possível enquadrar a madeira de plantios mistos em classes de resistência adequadas a diferentes aplicações, fortalecendo seu potencial econômico e industrial.

A análise da trabalhabilidade, por sua vez, confirma que a resposta da madeira às operações de usinagem está diretamente associada à estrutura anatômica e às propriedades físicas e mecânicas. Testes como aplainamento, desengrosso, lixamento e furação revelam que a interação entre a orientação da grã, a textura do

lenho e a densidade influencia a formação de defeitos, a qualidade do acabamento e a eficiência do processamento. Esses achados ressaltam a importância de integrar características tecnológicas desde o planejamento florestal até o beneficiamento industrial, garantindo racionalização do uso da matéria-prima e redução de perdas.

Em conjunto, os três capítulos demonstram que os plantios mistos podem fornecer madeira de qualidade adequada a diferentes finalidades, desde aplicações estruturais até produtos de maior valor agregado. A complementaridade entre espécies nativas e exóticas amplia as possibilidades de uso da madeira, diversifica a produção e contribui para práticas de manejo mais sustentáveis. As evidências apresentadas reforçam que a adoção de sistemas florestais mistos não apenas aumenta a resiliência ecológica e funcional dos plantios, mas também aprimora a oferta de madeira com atributos tecnológicos diferenciados.

Do ponto de vista científico, esta tese avança ao integrar níveis estruturais e tecnológicos normalmente avaliados de forma isolada. A articulação entre anatomia, propriedades físicas e mecânicas e trabalhabilidade permite compreender o lenho como um sistema funcional e interdependente, oferecendo uma base robusta para pesquisas futuras nas áreas de qualidade da madeira, melhoramento genético, processamento industrial e manejo florestal. Além disso, os resultados contribuem para a consolidação de modelos de produção que conciliem desempenho tecnológico, conservação ambiental e sustentabilidade produtiva, oferecendo novas perspectivas para a silvicultura tropical.

## REFERÊNCIAS

- ASTM INTERNACIONAL. **ASTM D1666 - Test Methods for Conducting Machining Tests of Wood and Wood-Base Panel Materials**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 1 ago. 2022.
- BARREIROS, Ricardo Marques; DE SOUZA JÚNIOR, Walter; DIAS, Kelly Bossardi. Quality of guanandi wood (*Calophyllum brasiliense* Camb.) after heat treatment. *In: Seven Congress*, 5 jul. 2024.
- BODIG, Jozsef; JAYNE, Benjamin A. **Mechanics of Wood and Wood Composites**. Malabar, Florida: [S.n.].
- BONGERS, Franca J. Functional-structural plant models to boost understanding of complementarity in light capture and use in mixed-species forests. **Basic and Applied Ecology**, v. 48, p. 92–101, nov. 2020.
- CALVANO, Silvana *et al.* Adding Value to Wood-Based Products: A Systematic Literature Review on Drivers. **Forests**, v. 16, n. 4, p. 590, 28 mar. 2025.
- GREEN, David W.; WINANDY, Jerrold E.; KRETSCHMANN, David E. **Mechanical properties of wood**. Madison, WI: [S.n.].
- GUO, Jiahuan *et al.* Positive effects of species mixing on biodiversity of understory plant communities and soil health in forest plantations. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 122, n. 11, 18 mar. 2025.
- INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório anual IBÁ 2025**. Brasília, DF: [S.n.].
- KLEIN, Danieli Regina *et al.* Aspectos gerais e silviculturais de *Cordia americana*, *Aspidosperma polyneuron*, *Toona ciliata* e *Kahaya* spp. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 15, n. 2, p. 155–164, 15 ago. 2016.
- LAINA, Rubén *et al.* Effect of the anatomical structure, wood properties and machining conditions on surface roughness of wood. **Maderas. Ciencia y tecnología**, n. ahead, p. 0–0, 2017.
- LAURANCE, William F.; SAYER, Jeffrey; CASSMAN, Kenneth G. Agricultural expansion and its impacts on tropical nature. **Trends in Ecology & Evolution**, v. 29, n. 2, p. 107–116, fev. 2014.

LIMA, Israel Luiz de *et al.* Variação radial da densidade básica e dimensões celulares da madeira de *Cariniana legalis* (Mart.) O. Kuntze em função da procedência. **CERNE**, v. 17, n. 4, p. 517–524, dez. 2011.

LIMA, Israel Luiz de *et al.* Physicomechanical properties of *Acacia mangium* Willd and *Calophyllum brasiliense* Cambess wood and their potential for industrial use. **Ciência Florestal**, p. e89491, 10 out. 2025.

OLIVEIRA, Ivanka Rosada de *et al.* Effect of tree spacing on growth and wood density of 38-year-old *Cariniana legalis* trees in Brazil. **Southern Forests: a Journal of Forest Science**, v. 80, n. 4, p. 311–318, 2 out. 2018.

PAQUETTE, Alain; MESSIER, Christian. The role of plantations in managing the world's forests in the Anthropocene. **Frontiers in Ecology and the Environment**, v. 8, n. 1, p. 27–34, 20 fev. 2010.

PRETZSCH, H. *et al.* Mixing of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and European beech (*Fagus sylvatica* L.) enhances structural heterogeneity, and the effect increases with water availability. **Forest Ecology and Management**, v. 373, p. 149–166, ago. 2016.

SALVADORI, Sergio Luiz *et al.* Análise de sobrevivência e crescimento de *Cordia trichotoma*, Boraginaceae, Lamiales, no sul de Mato Grosso Do Sul - Brasil. **Ciência Florestal**, v. 23, n. 4, p. 735–742, 13 dez. 2013.

SANTOS, Aline Pinto dos *et al.* Genetic variability and predicted gain in progeny tests of native Atlantic Forest timber species: *Cariniana legalis*, *Cordia trichotoma*, and *Zeyheria tuberculosa*. **Annals of Forest Research**, v. 65, n. 1, p. 85–96, 10 out. 2022.

STECKEL, M. *et al.* Transgressive overyielding in mixed compared with monospecific Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and oak (*Quercus robur* L., *Quercus petraea* (Matt.) Liebl.) stands – Productivity gains increase with annual water supply. **Forest Ecology and Management**, v. 439, p. 81–96, maio 2019.

WENTZEL, Maximilian *et al.* Physico-Mechanical Properties of Thermally Modified *Eucalyptus Nitens* Wood for Decking Applications Fizi č ka i mehani č ka svojstva toplinski. n. September, 2019.

ZOBEL, Bruce J.; JETT, Jackson B. **Genetics of Wood Production**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1995.