

LILIANE CATARINA PEREIRA

**CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DA MADEIRA DE QUATRO ESPÉCIES
FLORESTAIS COMERCIAIS PARA INDUSTRIALIZAÇÃO**

Botucatu
2025

LILIANE CATARINA PEREIRA

**CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DA MADEIRA DE QUATRO ESPÉCIES
FLORESTAIS COMERCIAIS PARA INDUSTRIALIZAÇÃO**

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agrônômicas da Unesp Câmpus de Botucatu, para obtenção do título de Mestre em Ciência Florestal.

Orientador: Dr. Ricardo Marques Barreiros

Botucatu

2025

P436c

Pereira, Liliâne Catarina

Caracterização tecnológica da madeira de quatro espécies florestais comerciais para industrialização / Liliâne Catarina Pereira. -- Botucatu, 2025

82 p. : il., tabs., fotos

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu

Orientador: Ricardo Marques Barreiros

1. Madeira tropical. 2. Construção civil. 3. Sustentabilidade florestal. 4. Indústria madeireira. I. Título.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DA MADEIRA DE QUATRO ESPÉCIES FLORESTAIS COMERCIAIS PARA INDUSTRIALIZAÇÃO

AUTORA: LILIANE CATARINA PEREIRA

ORIENTADOR: RICARDO MARQUES BARREIROS

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



Prof. Dr. RICARDO MARQUES BARREIROS (Participação Presencial)
Ciência Florestal Solos e Ambiente / Faculdade de Ciências Agrônômicas - Unesp Botucatu



Prof. Dr. EMMANUEL ZULLO GODINHO (Participação Presencial)
Exatas / Centro Universitário Sagrado Coração



Prof.ª Dr.ª ELEN APARECIDA MARTINES MORALES (Participação Presencial)
Ciência e Tecnologia / UNESP Campus de Itapeva

Botucatu, 01 de setembro de 2025

*Dedico à minha família,
em especial ao meu filho
Gabriel Pereira Moura,
fonte inesgotável de amor
e inspiração.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus que me concedeu vida e sabedoria. Foi Ele quem me sustentou em cada passo, me concedeu saúde, resiliência e me guiou até a realização deste sonho.

Ao meu filho Gabriel e ao meu companheiro Michel Moura, agradeço profundamente pela paciência, pelo amor constante e por nunca soltarem minha mão, mesmo quando o caminho se tornou mais duro e desafiador.

Agradeço de forma especial à minha mãe Edna e ao meu pai José (in memoriam), cujo empenho e dedicação desde os primeiros passos da minha alfabetização foram fundamentais para que eu pudesse seguir em frente nos estudos ao longo de toda a minha trajetória de aprendizado.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Ricardo Marques Barreiros, minha mais sincera e profunda gratidão. Sua orientação atenta, sua confiança em meu trabalho e seu olhar generoso foram fundamentais para que este projeto se concretizasse. Suas contribuições intelectuais, sempre tão precisas e inspiradoras, enriqueceram não apenas esta pesquisa, mas também minha formação como pesquisadora e como ser humano.

Registro minha sincera gratidão à Empresa Futuro Florestal, que gentilmente disponibilizou todo o material analisado nesta pesquisa. Sua colaboração foi essencial para o desenvolvimento deste trabalho, e sua contribuição demonstra o compromisso com o avanço da ciência, da pesquisa florestal e da sustentabilidade.

Sou profundamente grata aos Professores: Dra. Carmen Regina Marcati; Dr. Eraldo Antonio Bonfatti Junior; Dr. Adriano Wagner Ballarin da Faculdade de Ciências Agrônomicas (FCA) – UNESP de Botucatu – SP, pela imensa generosidade em ceder os espaços laboratoriais de “Anatomia da Madeira e Casca”; “Química da Madeira” e “Propriedades Mecânicas da Madeira”, tornando possível a realização dos ensaios e análises que sustentam este trabalho. Mais do que a infraestrutura, recebi conhecimento valioso, partilhas significativas e aprendizados que levarei comigo por toda a vida.

Desejo registrar minha mais profunda gratidão novamente à Profa. Dra. Carmen Regina Marcati, que, ainda em 2005, quando eu era apenas uma jovem estudante do

curso técnico florestal, acreditou em meu potencial e me concedeu a oportunidade de estágio em seu laboratório. Esse gesto generoso abriu as portas para um caminho que transformou minha vida pessoal e profissional, permitindo que eu permanecesse e crescesse nesse ambiente científico até chegar ao mestrado. Minha trajetória só foi possível porque alguém, lá no início, acreditou em mim.

Aos técnicos Ailton de Lima Lucas e Edson Graciano Brito, dos laboratórios de “Propriedades Mecânicas” e “Secagem e Preservação da Madeira”, minha sincera gratidão pelo apoio técnico e pela gentileza com que tornaram o processo mais leve, eficiente e possível.

Agradeço à Rosangela, que acreditou em mim quando esta jornada parecia apenas uma ideia ousada, e que, desde então, esteve sempre ao meu lado, ouvindo minhas reclamações, dividindo minhas incertezas e, entre desabafos e provocações bem-humoradas, tornando o caminho mais leve e possível.

À minha amiga Taiza, obrigada por todo o suporte e, principalmente, por não abrir mão dos nossos cafés, que sempre recarregaram minhas energias. Esses momentos foram essenciais para manter meu psicológico em paz até a conclusão desta etapa.

Aos colegas e amigos de caminhada — Giovana, Bianca, Caio e Thiago, atualmente graduandos em Engenharia Florestal; e Débora, Juan, André e Andrielli, da pós-graduação — meu muito obrigada por compartilharem comigo não só o trabalho, mas também os momentos de cansaço, as pequenas vitórias e os laços que se fortalecem na adversidade. Vocês foram parte essencial desta história.

E, por fim, a todos os amigos e pessoas queridas que, de forma direta ou indireta, contribuíram para que esta etapa se concretizasse. Cada palavra de incentivo, cada gesto de cuidado e cada presença silenciosa fez toda a diferença. Este trabalho carrega um pouco de cada um de vocês. Expresso meus mais sinceros agradecimentos.

“A mente que se abre a uma nova ideia jamais volta ao seu tamanho original.”

– Albert Einstein –

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo avaliar o potencial tecnológico das madeiras de *Calophyllum brasiliense*, *Cariniana legalis*, *Khaya grandifoliola* e *Khaya senegalensis*, provenientes de plantios comerciais, visando aplicações na construção civil e em produtos de maior valor agregado. Foram analisadas propriedades físicas (densidade básica, retratibilidade e coeficiente de anisotropia), mecânicas (resistência à flexão e à compressão paralela às fibras), químicas (teores de extrativos, lignina, holocelulose e cinzas) e anatômicas (características estruturais e comprimento das fibras), permitindo uma visão abrangente do comportamento tecnológico de cada espécie. Os resultados evidenciaram variações significativas entre as madeiras avaliadas. *Khaya grandifoliola* apresentou desempenho superior em propriedades mecânicas, associando elevada resistência, rigidez e fibras longas, sendo indicada para aplicações estruturais de alta exigência e produção de celulose. *Khaya senegalensis* demonstrou desempenho intermediário, adequado a usos estruturais moderados, além de boa estabilidade dimensional, evidenciada pelos menores coeficientes de anisotropia e retrações mais moderadas. *Cariniana legalis* apresentou densidade relativamente elevada e desempenho consistente, configurando-se como alternativa para usos semi-estruturais. Por outro lado, *Calophyllum brasiliense* mostrou maior suscetibilidade a variações dimensionais, exigindo maior controle em processos de secagem e em ambientes sujeitos à oscilação de umidade. Conclui-se que todas as espécies estudadas apresentam potencial de aproveitamento na construção civil e na industrial, desde que respeitadas suas particularidades tecnológicas. Os resultados contribuem para ampliar as opções de espécies tropicais cultivadas, fomentando o uso sustentável de florestas plantadas e reduzindo a pressão sobre recursos florestais nativos, além de fornecer subsídios técnicos relevantes para a cadeia produtiva madeireira.

Palavras-chave: madeira tropical; propriedades tecnológicas; industrialização; sustentabilidade.

ABSTRACT

This study aimed to evaluate the technological potential of the woods of *Calophyllum brasiliense*, *Cariniana legalis*, *Khaya grandifoliola*, and *Khaya senegalensis*, originating from commercial plantations, with a focus on applications in civil construction and higher value-added products. Physical properties (basic density, shrinkage, and anisotropy coefficient), mechanical properties (bending strength and compression strength parallel to the grain), chemical properties (contents of extractives, lignin, holocellulose, and ash), and anatomical features (structural characteristics and fiber length) were analyzed, providing a comprehensive view of the technological behavior of each species. The results showed significant variations among the evaluated woods. *Khaya grandifoliola* presented superior performance in mechanical properties, combining high strength, stiffness, and long fibers, which makes it suitable for demanding structural applications and pulp production. *Khaya senegalensis* exhibited intermediate performance, suitable for moderate structural uses, in addition to good dimensional stability, evidenced by the lowest anisotropy coefficients and more moderate shrinkage values. *Cariniana legalis* showed relatively high density and consistent performance, making it a viable alternative for semi-structural applications. On the other hand, *Calophyllum brasiliense* proved more susceptible to dimensional variations, requiring greater control during drying processes and in environments subject to humidity fluctuations. It is concluded that all studied species present potential for use in civil construction and industrial applications, provided that their technological particularities are respected. The results contribute to expanding the range of cultivated tropical species, promoting the sustainable use of planted forests and reducing pressure on native forest resources, in addition to providing relevant technical support to the wood production chain.

Keywords: tropical wood; technological properties; industrialization; sustainability.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Desdobramento das toras: a) Esquema da retirada das toras e pranchas; b) Toras seccionadas; c) Pranchas de madeira	36
Figura 2 - Esquema de retiradas dos Corpos de Prova (cp) para as determinações das propriedades físicas, mecânicas, químicas e anatômicas.	37
Figura 3 - Esquema de retirada dos corpos de prova (cp) para as determinações das propriedades físicas, mecânicas, químicas e anatômica.....	38
Figura 4 - Método de Franklin: A) Orientação radial; B) Corpos de prova seccionados; C) Frascos com material dissociado.....	40
Figura 5 - Remoção de serragem para análise de composição química.....	41
Figura 6 - Determinação de Extrativos Totais: A) Extração em solventes no Soxhlet; B) Extração em água	42
Figura 7 - Determinação de Lignina	43
Figura 8 - Determinação da Holocelulose	45
Figura 9 - Determinação de Cinzas: A) Mufla de incineração; B) Resíduos de serragem e cinzas	46
Figura 10 - Aparato utilizado na determinação da Densidade Básica pelo método da balança hidrostática.....	47
Figura 11 - Determinação da Retratibilidade da Madeira: A) Esquema do corpo de prova; B) Seção longitudinal; C) Seção Tangencial; D) Seção radial.....	49
Figura 12 - Ensaio de flexão estática: A) Máquina universal de ensaios; B) Gráfico gerado pelo software	51
Figura 13 - Ensaio de compressão paralela às fibras: A) Extensômetro; B) Gráfico gerado pelo software	54
Figura 14 - Anatomia do lenho de <i>Calophyllum brasiliense</i> : A) Seção transversal; B) Seção longitudinal tangencial; C) Seção longitudinal radial.....	57
Figura 15 - Anatomia do lenho de <i>Cariniana legalis</i> : A) Seção transversal; B) Seção longitudinal tangencial; C) Seção longitudinal radial	58
Figura 16 - Anatomia do lenho de <i>Khaya grandifoliola</i> : A) Seção transversal; B) Seção longitudinal tangencial; C) Seção longitudinal radial.....	60

Figura 17 - Anatomia do lenho de <i>Khaya senegalensis</i> : A) Seção transversal; B) Seção longitudinal tangencial; C) Corte longitudinal radial	61
Figura 18 - Variação do comprimento das fibras ao longo do raio.....	62
Figura 19 - Comprimento das fibras entre as espécies	64
Figura 20 - <i>Boxplot</i> da Propriedade Química das Espécies de Madeira.....	68
Figura 21 - <i>Boxplot</i> da Densidade Básica das Espécies de Madeira.....	69
Figura 22 - <i>Boxplot</i> da Retradibilidade das Espécies de Madeira.....	70
Figura 23 - <i>Boxplot</i> do Coeficiente de Anisotropia das Espécies de Madeira	71
Figura 24 - <i>Boxplot</i> da Flexão das Espécies de Madeira.....	72
Figura 25 - <i>Boxplot</i> da Compressão Paralelas às Fibras das Espécies de Madeira.	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados silviculturais e dendrométricos referentes às quatro espécies em estudo.....	35
Tabela 2 - Resultados médios obtidos da caracterização tecnológica da madeira por espécies	66

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
2	OBJETIVOS	23
2.1	Objetivo Geral	23
2.2	Objetivos Específicos.....	23
3	REVISÃO DE LITERATURA.....	24
3.1	Uso da Madeira na Construção Civil.....	24
3.2	Estrutura Anatômica da Madeira	25
3.3	Composição Química da Madeira.....	26
3.3.1	Extrativos	27
3.3.2	Lignina	28
3.3.3	Holocelulose	28
3.3.4	Cinzas	29
3.4	Propriedades Físicas da Madeira	30
3.4.1	Densidade (Massa Específica).....	30
3.4.2	Retratibilidade da Madeira	32
3.5	Propriedades Mecânicas da Madeira	33
3.5.1	Resistência à Flexão (f_M)	33
3.5.2	Resistência à Compressão (f_c)	34
4	MATERIAL E MÉTODOS.....	35
4.1	Material	35
4.2	Métodos	38
4.2.1	Anatomia da Madeira.....	38
4.2.1.1	Descrição Anatômica	38
4.2.1.2	Análise das Fibras da Madeira	39
4.2.2	Composição Química da Madeira.....	40
4.2.2.1	Teor de Extrativos Totais.....	41
4.2.2.2	Teor de Lignina.....	43
4.2.2.3	Teor de Holocelulose	44
4.2.2.4	Teor de Cinzas	46
4.2.3	Propriedades Físicas.....	47
4.2.3.1	Densidade Básica.....	47
4.2.3.2	Retratibilidade da Madeira	48

4.2.4	Propriedades Mecânicas	50
4.2.4.1	Ensaio de Flexão Estática	50
4.2.4.2	Ensaio de Compressão Paralela às Fibras	53
4.2.5	Análise Estatística.....	55
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	56
5.1	Descrição Anatômica	56
5.1.1	<i>Calophyllum brasiliense</i> (guanandi) - Calophyllaceae.....	56
5.1.2	<i>Cariniana legalis</i> (jequitibá) - Lecythidaceae	57
5.1.3	<i>Khaya grandifoliola</i> (mogno-africano) - Meliaceae.....	59
5.1.4	<i>Khaya senegalensis</i> (mogno-africano) - Meliaceae.....	60
5.1.5	Variação do Comprimento das Fibras	61
5.2	Análise da Caracterização Tecnológica das Espécies	64
5.2.1	Propriedades Químicas	67
5.2.2	Propriedades Físicas	68
5.2.3	Propriedades Mecânicas	71
6	CONCLUSÃO	74
6.1	Considerações Finais	76
	REFERÊNCIAS.....	77

1 INTRODUÇÃO

O Brasil destaca-se internacionalmente pela elevada produtividade de seus plantios florestais, caracterizada pelo alto volume de madeira produzido por hectare e em ciclos de colheita relativamente curtos. Esse desempenho é resultado não apenas das condições favoráveis de clima e solo, mas também do contínuo investimento em pesquisa, desenvolvimento de técnicas de manejo florestal, melhoramento genético e práticas sustentáveis (Lima, 2022).

A base da produção florestal brasileira está concentrada em aproximadamente 9,93 milhões de hectares de florestas plantadas. Desse total, 75,8% correspondem a plantações de eucalipto (7,53 milhões de hectares) e 19,4% a pinus (1,93 milhão de hectares). Além dessas espécies amplamente cultivadas, há outras espécies nativas e exóticas de elevado valor, como seringueira, paricá, acácia, teca, guanandi, jequitibá e mognos africanos, totalizando cerca de 475 mil hectares (IBÁ, 2023).

No cenário global, o setor brasileiro de florestas plantadas tem se consolidado como referência em sustentabilidade, inovação e competitividade. Em 2022, a cadeia produtiva florestal representou cerca de 1,3% do Produto Interno Bruto (PIB) nacional, gerando uma receita bruta de R\$ 107,2 bilhões — o maior valor registrado desde 2012 (IBÁ, 2023).

Apesar dos avanços do setor, ainda existe significativa exploração extrativista de florestas nativas, especialmente para obtenção de madeira, o que tem contribuído para a redução desses recursos naturais. Diante desse desafio, torna-se fundamental e estratégico fomentar o desenvolvimento de estudos no cultivo e no uso de espécies florestais, tanto nativas quanto exóticas, com foco na produção sustentável de madeiras tropicais nobres por meio de florestas plantadas e da industrialização planejada. A viabilização econômica de espécies florestais alternativas requer estudos detalhados sobre suas propriedades tecnológicas, especialmente aquelas voltadas para usos industriais diversificados.

Com o aumento da demanda interna por madeira — impulsionada por sua ampla utilização em madeira serrada, painéis, móveis, embalagens e construção civil — muitas empresas têm direcionado esforços em estudos no melhoramento genético e o conhecimento técnico sobre suas espécies florestais, visando usos múltiplos e maior eficiência produtiva.

Nesse contexto, torna-se essencial compreender o comportamento tecnológico da madeira proveniente de espécies tropicais cultivadas no Brasil. A caracterização físico-mecânica, química e anatômica de madeiras proveniente de povoamentos com idades compatíveis com a colheita comercial permite ampliar seu aproveitamento industrial de forma racional e sustentável.

Assim, o presente trabalho teve como objetivo caracterizar as propriedades físicas, mecânicas, químicas e anatômicas das madeiras de quatro espécies de elevado potencial comercial: *Calophyllum brasiliense* (guanandi), *Cariniana legalis* (jequitibá), *Khaya grandifoliola* e *Khaya senegalensis* (mogno africanos), todas cultivadas no estado de São Paulo e colhidas entre 13 e 17 anos de idade. Ao investigar o potencial dessas espécies sob uma perspectiva integrada, busca-se contribuir para a diversificação e valorização do setor madeireiro nacional, com foco no uso sustentável de florestas plantadas. Ao integrar diferentes parâmetros tecnológicos, o estudo busca subsidiar o uso industrial dessas espécies, contribuindo para sua valorização e para a diversificação da base florestal plantada no Brasil.

A análise aprofundada das características tecnológicas dessas madeiras representa um passo estratégico na consolidação de fontes alternativas e sustentáveis de matéria-prima para a indústria. A madeira de guanandi, por exemplo, apresenta potencial para móveis planejados, revestimentos e peças estruturais leves; o jequitibá é indicado para pisos, esquadrias e painéis compensados; os mogno africanos, por sua aparência semelhante ao mogno verdadeiro, são amplamente valorizados em móveis de alto padrão, instrumentos musicais e acabamentos finos. Dessa forma, este estudo visa fornecer subsídios técnicos que incentivem o melhor aproveitamento dessas espécies e fomentem cadeias produtivas mais sustentáveis, contribuindo para a inovação e a competitividade do setor florestal brasileiro.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Este estudo teve como objetivo avaliar o potencial tecnológico das madeiras de *Calophyllum brasiliense*, *Cariniana legalis*, *Khaya grandifoliola* e *Khaya senegalensis*, provenientes de plantios comerciais e colhidas em idades compatíveis com o uso industrial, por meio da caracterização anatômica, química, física e mecânica, visando aplicações na construção civil e na indústria madeireira de maior valor agregado.

2.2 Objetivos Específicos

- Determinar a densidade básica e a retratibilidade das espécies, analisando sua estabilidade dimensional;
- Avaliar a resistência à compressão paralela às fibras e à flexão estática, estimando a performance estrutural das madeiras;
- Quantificar os teores de extrativos totais, lignina, holocelulose e cinzas, relacionando-os à durabilidade natural;
- Descrever as principais características anatômicas das madeiras e o comprimento das fibras ao longo do raio, relacionando-as à presença de madeira adulta ou não;
- Estabelecer comparações entre as espécies quanto às suas propriedades e desempenho tecnológico, por meio de análise estatística, identificando as mais promissoras para determinados usos na construção civil e na indústria.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Uso da Madeira na Construção Civil

Desde os tempos mais remotos, a madeira tem sido amplamente utilizada como material na construção civil, destacando-se por suas propriedades mecânicas e desempenho estrutural. Sua versatilidade, leveza e facilidade de manuseio a tornam uma escolha preferencial para diversas aplicações, desde estruturas primárias até acabamentos interiores (Lorenço; Branco, 2012). A madeira não apenas proporciona um excelente suporte estrutural, mas também contribui para o isolamento térmico e acústico, além de oferecer um apelo estético que é valorizado em projetos arquitetônicos (Buxbaum *et al.*, 2015).

Com o passar do tempo, o uso da madeira na construção civil foi se aperfeiçoando e se especializando cada vez mais. Em obras civis, a madeira é utilizada em várias etapas, desde em usos temporários: fôrmas de concreto, andaimes e escoramentos, assim como em uso definitivo: esquadrias (portas e janelas), forros, pisos e estruturas de telhados. Para as estruturas de coberturas (telhados), a madeira serrada é responsável pela metade das madeiras comercializadas no estado de São Paulo, tais como: pilares, vigas, caibros, pranchas e tábuas (Silva *et al.*, 2022).

Segundo Souza (2012), o uso da madeira como pilares e vigas foi descoberto ainda na pré-história e em muitas civilizações, ainda antes mesmo da descoberta do fogo. Cada civilização teve sua importância na utilização da madeira na construção civil.

Os materiais obtidos dos fustes das árvores incluem desde madeiras roliças, pouco processadas e cortadas transversalmente, até peças serradas e beneficiadas. As madeiras roliças são comuns em usos temporários ou estruturas rurais, enquanto as serradas, processadas em serrarias, são transformadas em peças prismáticas como tábuas, caibros e vigas, amplamente usadas na construção (IPT, 2009).

Telles e Valle (2001) enfatizam que quase todos os edifícios no Brasil usaram madeira durante sua construção e a maioria deles as usaram pelo menos nas suas estruturas.

As madeiras beneficiadas passam por um processo de usinagem das peças serradas. Para cada operação desse processo, existem máquinas especializadas — manuais ou automáticas, simples ou complexas — que realizam diversos trabalhos

na peça de madeira até atingir o acabamento desejado. Essas peças são geralmente utilizadas em pisos, assoalhos, forros, tacos, móveis, entre outros (IPT, 2009).

Em obras pesadas externas, por exemplo, seu uso inclui as construções com peças de madeiras para estacas marítimas, pontes, obras imersas, postes, cruzetas, dormentes ferroviários, estruturas pesadas e vigamentos. Uma espécie de madeira das mais utilizadas para estes casos foi o angico-preto (*Anadenathera macrocarpa*). Em obras pesadas internas, semelhantes a estruturas de coberturas, utilizam-se madeiras serradas, tais como vigas, caibros, pranchas, ripas e tábuas. Uma espécie de madeira das mais utilizadas para estes últimos casos, por ser bastante dura e resistente, foi a peroba-rosa (*Aspidosperma polyneuron*) (IPT, 2013). Atualmente, ambas se encontram na lista das espécies protegidas por lei.

No caso de construções estruturais leves internas e externas usam-se peças serradas na forma de tábuas e pontalotes como andaimes, escoramentos e fôrmas para concreto. A espécie de madeira mais utilizada foi o pinheiro-do-paraná (*Araucária angustifolia*), que hoje é protegida por lei federal e tem sido substituída por espécies do gênero *Pinus*. Já para a construção leve interna decorativa, as peças de madeira serrada e beneficiada são usadas como forros, painéis, lambris e guarnições, onde a madeira apresenta desenhos em sua estrutura considerados decorativos. Geralmente são utilizadas as madeiras da família da Lauraceae, como as canelas (*Ocotea* spp., *Nectandra* spp. etc.), por conterem brilho natural (IPT, 2009). Nesses casos, essas espécies protegidas por lei carecem serem substituídas por outras de características semelhantes, com qualidade para os mesmos usos.

3.2 Estrutura Anatômica da Madeira

Em casos específicos, a madeira oferece alta resistência e flexibilidade para grandes estruturas, tornando esse material uma opção sustentável e eficiente para a construção contemporânea. Esses avanços ampliam o uso da madeira, combinando suas propriedades mecânicas, como baixa densidade e boa resistência, com técnicas modernas de processamento (Almeida *et al.*, 1996; INBEC, 2022)

A qualidade da madeira depende fortemente da organização dos seus elementos celulares, ou seja, do arranjo dos componentes físicos (macroscópicos e

microscópicos) e químicos. Essa combinação define a estrutura da madeira como uma engenhosa organização arquitetônica (Klock *et al.*, 2005).

As células que constituem a madeira são produzidas por um tecido meristemático denominado câmbio vascular, que se localiza entre o xilema secundário (madeira) e a casca interna, e é formado ao longo de todo o eixo axial da árvore (Klock *et al.*, 2005).

A madeira comercializada é, em geral, o xilema secundário, que é o tecido responsável pelo transporte de água e nutrientes, armazenamento e sustentação das árvores. Já a casca interna é o floema secundário. Ambos são tecidos vasculares contínuos que contribuem para o crescimento em diâmetro da árvore por meio da formação de novas células. Quando plenamente desenvolvido, o xilema secundário forma a madeira, uma importante matéria-prima para a indústria brasileira (Costa *et al.*, 2003).

A partir de determinada idade da árvore, normalmente entre 5 e 30 anos de vida, consoante com a espécie, no xilema começa a dar-se a transformação do alburno em cerne (Cruz; Nunes, 2005).

Existem dois grupos botânicos de madeira: folhosas (Angiospermas) e as coníferas (Gimnospermas); folhosas são as plantas com flores e frutos completos e que possuem elementos celulares, tais como elementos de vasos para a condução hídrica, parênquimas axial e radial, que armazenam substâncias orgânicas, e as fibras, que dão sustentação ao lenho; logo, a madeira das Angiospermas é caracterizada pela presença de diversos tipos celulares e, geralmente, por uma estrutura bem mais complexa que a das Gimnospermas (Costa *et al.*, 2003; Flora do Brasil, 2023).

Já as coníferas são aquelas que incluem plantas com um aglomerado de sementes em formato cônico. São madeiras que apresentam em sua composição as traqueídes, com função de condução de água e sustentação, e os elementos celulares parenquimáticos axiais e radiais, que armazenam substâncias orgânicas (Flora do Brasil, 2023).

3.3 Composição Química da Madeira

A madeira é um material de origem biológica. Assim sendo, é essencial o entendimento do comportamento da composição química de seus elementos celulares

para que se compreendam a sua composição, suas características e a transformação das substâncias que constituem a madeira (Klock *et al.*, 2005).

Segundo os mesmos autores pode-se considerar que, para a composição química elementar da madeira, não há diferenças entre as espécies. Seus principais elementos constituintes são o Carbono (C), o Hidrogênio (H), o Oxigênio (O) e o Nitrogênio (N). Também se encontram, em pequenas quantidades, o Cálcio (Ca), o Potássio (K), o Magnésio (Mg) e outros minerais em sua constituição.

Em nível macromolecular, ou seja, considerando a composição por grandes polímeros, a parede celular da madeira é formada principalmente por celulose e hemicelulose (juntas denominadas holocelulose), além da lignina. Enquanto a celulose e hemicelulose conferem resistência estrutural, a lignina atua promovendo rigidez, coesão entre as fibras e maior durabilidade do material (Fengel; Wegener, 1984).

3.3.1 Extrativos

Os extrativos da madeira são compostos químicos não estruturais, como resinas, óleos e taninos, que não fazem parte das principais macromoléculas (celulose, holocelulose e lignina). Sua concentração e composição variam conforme a espécie, idade e condições de crescimento da árvore, e eles são solúveis em solventes orgânicos ou em água. Embora representem uma pequena fração da madeira, esses compostos influenciam propriedades importantes, como resistência a fungos, insetos e intempéries, além de afetarem características como densidade, durabilidade, coloração e permeabilidade (Costa, 2019; Santos *et al.*, 2020).

Esses extrativos se dividem em solúveis em água (como taninos e ácidos fenólicos) e em solventes orgânicos (como resinas e óleos essenciais). Sua presença confere à madeira propriedades antibacterianas e antifúngicas, sendo especialmente valorizados em espécies que têm altos teores desses compostos, os quais são preferidos para móveis e construções expostas a xilófagos e condições climáticas adversas. A quantidade de extrativos pode ser influenciada pela localização e idade da árvore, impactando diretamente na qualidade e durabilidade do material (Sjöström, 1992; Klock *et al.*, 2005).

Teores elevados de extrativos na madeira são indesejáveis para a produção de carvão vegetal e celulose. Durante a carbonização, esses compostos reduzem o rendimento do carvão (Castro, 2011).

3.3.2 Lignina

A lignina é o segundo componente mais abundante nas plantas, exercendo funções cruciais no suporte mecânico, como resistência e rigidez, além de atuar na defesa contra microrganismos. Este polímero proporciona hidrofobicidade às paredes celulares, o que auxilia na minimização das variações dimensionais da madeira (Chabannes *et al.*, 2001).

Na indústria de celulose e papel, a lignina é considerada um componente indesejável, uma vez que seu elevado teor resulta em um maior consumo de reagentes durante o processo de produção (Gomide, 2006). Em contrapartida, na produção de energia e carvão vegetal, a lignina se destaca por seu elevado poder calorífico e resistência à degradação térmica, contribuindo de forma significativa e positiva (Pereira *et al.*, 2012).

A lignina impacta a resistência mecânica da madeira conforme sua concentração e interação com a celulose e hemiceluloses. Em madeiras densas, maior teor de lignina aumenta a resistência à compressão e ao desgaste, enquanto madeiras leves, com menos lignina, são mais flexíveis, mas menos resistentes. A lignina forma uma rede rígida entre as fibras de celulose, conferindo durabilidade e resistência a deformações e condições adversas (Martins *et al.*, 2020).

Derivados de madeira como compensado, MDF e OSB têm sido estudados com adesivos à base de lignina, visando alternativas mais sustentáveis aos sintéticos. A lignina, abundante e com propriedades adesivas naturais, pode, especialmente quando modificada, substituir total ou parcialmente adesivos à base de formaldeído, reduzindo a toxicidade e o uso de fontes fósseis. (Ferraz *et al.*, 2018).

3.3.3 Holocelulose

A holocelulose, constituída por celulose e hemiceluloses, representa a fração polissacarídica da parede celular da madeira, sendo de grande importância para as indústrias de papel, celulose, biomateriais e bioenergia (Zanon, 2020).

A celulose, principal componente, forma longas cadeias lineares de glicose organizadas em microfibrilas, conferindo alta resistência mecânica e estabilidade dimensional aos produtos derivados. Já as hemiceluloses, com estrutura amorfa e ramificada, contêm diferentes monossacarídeos e desempenham papel essencial na coesão da parede celular, contribuindo para propriedades físicas e químicas da madeira (Silva, 2019).

A remoção da lignina por processos químicos, como tratamentos alcalinos, ácidos ou com solventes, permite a obtenção da holocelulose de forma relativamente pura, o que favorece sua aplicação em diferentes segmentos industriais (Costa *et al.*, 2021).

Essa elevada pureza é especialmente desejável na produção de papéis de alta qualidade, fibras especiais e na fabricação de derivados químicos com elevado valor agregado. Além disso, o alto teor de hidroxilas na estrutura polimérica confere à holocelulose elevada capacidade de adsorção e reatividade química, tornando-a promissora para o desenvolvimento de biocombustíveis, nanocelulose, filmes biodegradáveis e substitutos de polímeros sintéticos (Pereira, 2022).

Com os avanços nas rotas de extração e modificação química, a holocelulose tem se destacado como uma alternativa sustentável aos derivados de petróleo, contribuindo para a redução dos impactos ambientais e favorecendo a transição para uma bioeconomia baseada em recursos renováveis (Zanon, 2020). A pesquisa contínua nesse campo é fundamental para o aprimoramento de suas propriedades e ampliação das aplicações tecnológicas.

3.3.4 Cinzas

Embora presentes em baixa concentração, geralmente inferiores a 1%, os minerais da madeira, denominados cinzas, exercem influência relevante em diversas aplicações industriais. Além de comprometerem o poder calorífico, as cinzas podem favorecer processos de incrustação, corrosão e formação de depósitos em equipamentos térmicos e metalúrgicos, impactando negativamente a eficiência e a durabilidade dos sistemas (Castro, 2011; Silva, 2020).

A composição mineral dessas cinzas, composta principalmente por silício, cálcio, potássio e magnésio, varia de acordo com a espécie, a idade da árvore, o

manejo silvicultural e as condições edafoclimáticas (Ferreira *et al.*, 2018; Martins, 2017).

Nas indústrias de papel, celulose e bioenergia, o controle do teor de cinzas torna-se fundamental, uma vez que valores elevados podem reduzir a qualidade do papel, interferir na recuperação química e prejudicar o desempenho da combustão em sistemas de geração de energia (Gomes *et al.*, 2021).

Segundo os mesmos autores, estratégias têm sido desenvolvidas para o aproveitamento das cinzas como subprodutos, incluindo o uso em fertilizantes e na formulação de materiais para a construção civil, ampliando seu potencial de valorização dentro do conceito de economia circular.

3.4 Propriedades Físicas da Madeira

Propriedades físicas são aquelas onde não há estímulo mecânico para sua determinação, ou seja, são as qualidades das características inerentes da madeira avaliadas de forma geral, tais como: aparência, cor, densidades aparente e básica e teor de umidade. Outra forma de avaliar a propriedade física da madeira é pelas alterações dimensionais dela com o ganho ou perda de água (Bauer, 2010).

Hellmesister (1983) enfatiza que as propriedades físicas mais estudadas da madeira são: umidade, densidades básicas e aparente e estabilidade dimensional (retração ou inchamento). A umidade da madeira é um importante índice para qualificar a madeira no sentido de verificar a umidade de um lote que está sendo comercializado. Nesse sentido, conhecer estas propriedades da madeira é de grande importância porque elas podem influenciar significativamente no desempenho e resistência da madeira utilizada estruturalmente (Calil, 1998).

3.4.1 Densidade (Massa Específica)

De modo geral, as propriedades da madeira dependem de suas características como comprimento e espessura das paredes das fibras, ângulo de microfibrilas, número de pontuações da parede celular, porcentagem de diferentes tipos de aglomeração de células etc. (Moreschi, 2012).

Dentre as propriedades físicas da madeira, a densidade se destaca como o melhor índice para qualificá-la, pois se correlaciona com várias outras de suas propriedades (Hellmeister, 1983).

A densidade (ou massa específica) se relaciona ao peso da madeira da seguinte forma: madeiras mais pesadas possuem maior densidade e, portanto, menos espaços vazios. E, ao contrário, madeiras mais leves são menos densas, pois há mais espaços vazios em sua estrutura (Moreschi, 2012).

Essa propriedade também define a distribuição do material lenhoso da madeira e está diretamente relacionada com a sua massa volumétrica aparente, além de ser fortemente influenciada pelo seu teor de umidade, o que influencia não apenas o peso da madeira, como já citado, como também o seu volume (Correia, 2009).

A norma NBR 7190 (ABNT, 1997) apresenta duas definições de densidade. Uma é a densidade aparente (ρ_{ap}) que é medida num determinado teor de umidade, cujos valores são apresentados em “Fichas de Madeira”, que são tomados a partir de amostras com umidade entre 12% e 15% (Pereira, 2013), que pode ser utilizada para classificação da madeira e nos cálculos de estruturas.

Outra é a densidade básica (ρ_{bas}), que é um importante parâmetro para avaliação da qualidade da madeira, sendo uma variável complexa, pois resulta da combinação de diversos fatores, tais como: dimensão das fibras, espessura da parede celular, volume dos vasos e parênquimas, proporção entre madeira do cerne e alborno e arranjo dos elementos anatômicos (Foelkel *et al.*, 1971).

A densidade básica pode ser determinada pela razão entre a massa seca e o volume saturado da madeira ou pelo método de máximo teor de umidade, em pequenas amostras. Este último método é simples e requer apenas a determinação da massa saturada e da massa seca da madeira, pois admite que a densidade da “substância madeira” é constante ($1,53 \text{ g/cm}^3$) (Foelkel *et al.*, 1971).

O tamanho das células também pode afetar diretamente a densidade da madeira. Células maiores possuem uma densidade menor e as células menores possuem uma densidade maior (Moreschi 2012).

A densidade básica em função da idade da árvore em geral aumenta rapidamente durante o período juvenil, depois mais lentamente até atingir a maturidade, quando permanece mais ou menos constante. Além disso, a madeira de

lenho tardio apresenta densidade básica maior que a de lenho inicial (Lobão *et al.*, 2004).

3.4.2 Retratibilidade da Madeira

A retratibilidade da madeira diz respeito às mudanças dimensionais causadas pela variação de umidade, que provoca expansão ou contração, principalmente nas direções tangencial e radial. Isso ocorre devido à estrutura celular e aos espaços capilares que armazenam água. A variação dimensional pode gerar deformações (empenamentos) e rachaduras, afetando a qualidade de produtos como móveis e pisos, entre outros. Essa instabilidade prejudica a estética, a funcionalidade e a resistência mecânica da madeira (Panshin; De Zeeuw, 1980).

A severidade do fenômeno da retratibilidade está atrelada à espécie botânica, condições de meio ambiente e secagem. Em localidades onde existe variação acentuada de umidade, é necessário o controle da retratibilidade, a fim de garantir a longa durabilidade dos produtos (Hillis, 1987).

A madeira é influenciada por variáveis como densidade, orientação das fibras, idade da árvore e método de secagem. Madeiras mais densas apresentam menor retratibilidade, pois suas células mais compactas limitam a movimentação de água. A orientação das fibras afeta diretamente as variações dimensionais, sendo maiores nas direções tangencial e radial do que na longitudinal. A secagem inadequada pode causar tensões internas, comprometendo a estabilidade e aumentando o risco de deformações (Siau, 1984).

A modificação química da madeira visa aumentar sua estabilidade dimensional, reduzindo a absorção de água e, conseqüentemente, a retração e o inchamento. Impregnações com ácidos, sais ou resinas atuam preenchendo espaços celulares, diminuindo os pontos de ligação com a água. Com isso, a variação dimensional da madeira durante ciclos de umedecimento e secagem é significativamente reduzida (Hill, 2006).

O coeficiente de anisotropia (CA) é uma medida fundamental que expressa a relação entre as contrações nas direções tangencial e radial da madeira, refletindo diretamente seu comportamento higroscópico e estabilidade dimensional. Quanto maior o valor do CA, maior a diferença entre as retratibilidades nas direções, indicando

um material mais suscetível a deformações diferenciais e, portanto, menos estável dimensionalmente (Glass e Zelinka, 2010; Lima *et al.*, 2021).

3.5 Propriedades Mecânicas da Madeira

O conhecimento das propriedades mecânicas da madeira reveste-se da maior importância, pois permite uma escolha mais eficaz das espécies de madeira a empregar em projetos de acordo com as suas aptidões naturais (Correia, 2009).

As propriedades mecânicas revelam o comportamento da madeira diante de esforços físicos, sendo diretamente influenciadas pela sua anisotropia e heterogeneidade. Estudá-las é essencial para avaliar a adequação de uma espécie às diferentes aplicações (Pereira, 2009).

A variabilidade das propriedades da madeira dentro de uma espécie pode estar associada ao material genético, condições edafoclimáticas (adaptação a diferentes tipos de solo e clima), sistema de implantação e condução das florestas, ritmo de crescimento e idade das florestas, entre outros (Busnardo *et al.*, 1987).

No estudo das propriedades mecânicas, consideram-se duas direções principais: paralela e normal às fibras. As aplicações da madeira estão geralmente associadas às resistências à compressão e à flexão (Moreschi, 2012).

3.5.1 Resistência à Flexão (f_M)

A resistência à flexão é como um indicador ou medida da flexibilidade ou rigidez de um material. Ela representa o quanto o material é flexível perante uma força exercida sobre ele (Bauer, 2010).

O ensaio de flexão corresponde a uma peça simplesmente apoiada, de vão igual a 21 vezes a altura da seção transversal da peça (ou corpo de prova), com carga aplicada no centro do vão e tendo por plano de flexão a direção perpendicular à direção dos raios medulares (Logsdon *et al.*, 2007).

A madeira é um material que possui elevada resistência à flexão estática, atingindo valores próximos dos verificados para a sua resistência à tração paralela às fibras (Correia, 2009).

3.5.2 Resistência à Compressão (f_c)

A compressão no sentido paralelo às fibras (f_{c0}) provoca o encurtamento da madeira ao longo do seu eixo longitudinal (Leggerini, 2007).

Quando a peça é solicitada por compressão paralela às fibras, as forças agem paralelamente à direção dos elementos anatómicos responsáveis pela resistência, o que confere uma grande resistência à madeira (Calil *et al.*, 2003).

No sentido perpendicular às fibras, a solicitação provoca o esmagamento das células lenhosas (Leggerini, 2007). Nessa direção, a madeira apresenta valores de resistência significativamente menores em comparação à compressão paralela, uma vez que o esforço é aplicado transversalmente ao comprimento celular, onde há menor capacidade de suporte (Calil, 1998). De acordo com Correia (2009), a resistência à compressão perpendicular é, em média, de 20% a 25% da obtida no sentido paralelo.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Material

Foram coletadas 24 árvores de reflorestamento homogêneo, de quatro espécies de madeiras nobres tropicais plantadas via mudas por sementes no município de Garça, estado de São Paulo, Brasil caracterizada com média de 688 metros de altitude, e coordenadas geográficas de latitude: 22° 12' Sul e longitude: 49° 39' Oeste. Para este estudo, o método de amostragem foi intencional, selecionando seis indivíduos entre os de maior diâmetro à altura do peito (DAP = 1,30 m) de cada espécie.

A Tabela 1 compõe alguns dados silviculturais e dendrométricos sobre as espécies: *Calophyllum brasiliense* (guanandi); *Cariniana legalis* (jequitibá); *Khaya grandifoliola* (mogno-africano); *Khaya senegalensis* (mogno-africano).

Tabela 1 - Dados silviculturais e dendrométricos referentes às quatro espécies em estudo

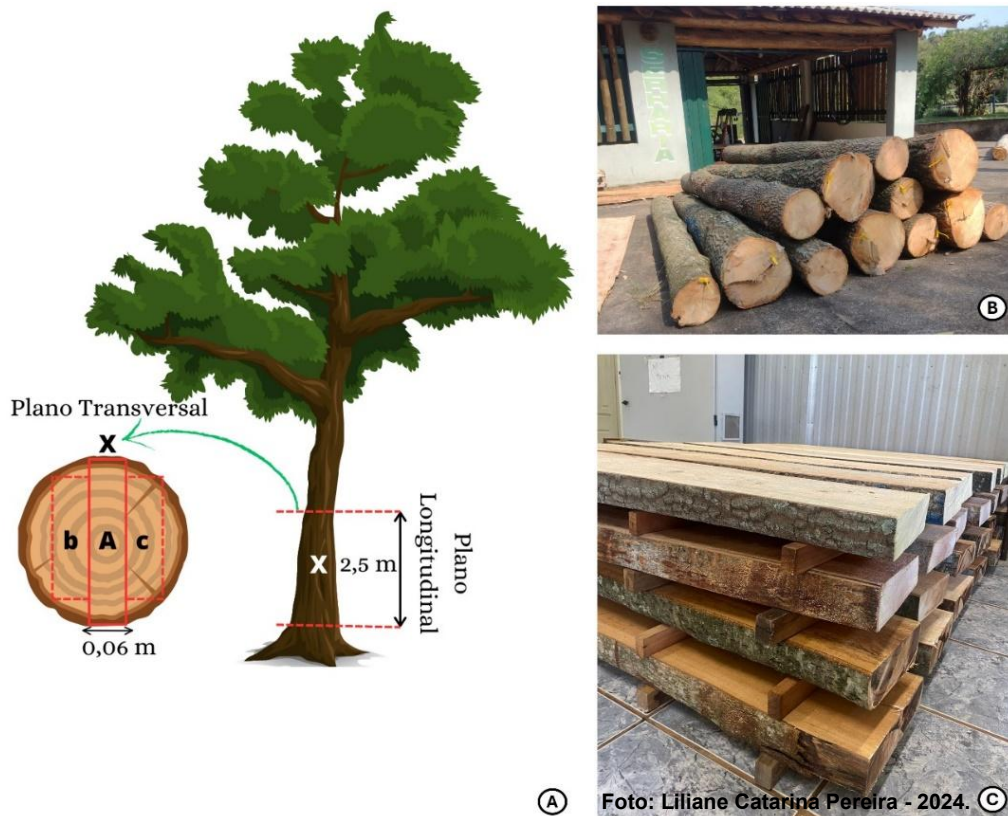
	<i>Calophyllum brasiliense</i>	<i>Cariniana legalis</i>	<i>Khaya grandifoliola</i>	<i>Khaya senegalensis</i>
Procedência da Semente	Mata Atlântica	Mata Atlântica	Plantios Brasileiros	Sementes Africanas
Data de Plantio	jan/2008	jun/2007	jan/2010	jan/2007
Espaçamento (m)	3x2	3x2	3x2	3x2
Diâmetro Médio (cm)	20,00	22,60	20,60	24,85
Altura Média (m)	15,00	17,48	20,13	16,75
Altura do Fuste (m)	5,00	8,78	10,12	7,80
Desbaste	Não	Sim	Sim	Sim
Idade do corte (set/2023)	15,7 anos	16,3 anos	13,7 anos	16,7 anos

Fonte: Futuro Florestal, 2024.

A Figura 1A ilustra o local de onde retirou-se a tora basal (“X”) em cada uma das árvores, bem como o local de onde retirou-se a prancha central (“A”) em cada uma das toras basais. A Figura 1B ilustra as toras, por exemplo, de mogno-africano, recém cortadas e empilhadas próximas à serraria da FAEF – Faculdade de Ensino Superior e Formação Integral, município de Garça-SP, onde foram beneficiadas em pranchas.

As pranchas tinham espessura de 0,06 m, comprimento de 2,5 m e largura variável, conforme o diâmetro total da tora. Assim que as pranchas foram serradas, elas foram transportadas até à cidade de Botucatu-SP, na Faculdade de Ciências Agronômicas (FCA) da Universidade Estadual Paulista (UNESP), no Laboratório de Secagem da Madeira, onde foram empilhadas para a secagem ao ar livre, conforme mostrado na Figura 1C. Além disso, foram produzidas outras duas pranchas paralelas à prancha central, denominadas "b" e "c", que não serão consideradas neste estudo, uma vez que o objetivo da pesquisa é analisar exclusivamente a porção central do tronco, ao longo do raio.

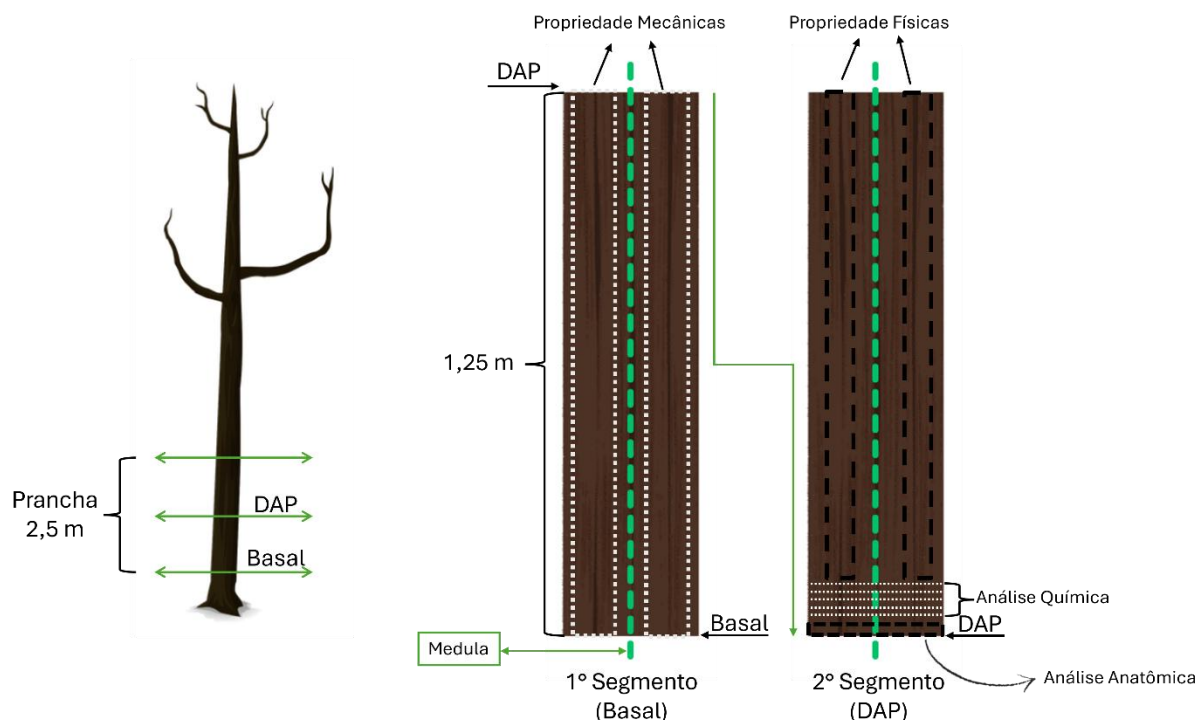
Figura 1 - Desdobramento das toras: a) Esquema da retirada das toras e pranchas; b) Toras seccionadas; c) Pranchas de madeira



Fonte: Elaboração própria.

As pranchas centrais das toras basais foram seccionadas ao meio, resultando em dois segmentos de 1,25 m de comprimento cada. O primeiro segmento (Basal) foi destinado às análises das propriedades mecânicas (flexão e compressão paralela), enquanto o segundo segmento foi reservado para as determinações das propriedades físicas, químicas e anatômicas, conforme ilustrado no esquema da Figura 2.

Figura 2 - Esquema de retiradas dos Corpos de Prova (cp) para as determinações das propriedades físicas, mecânicas, químicas e anatômicas



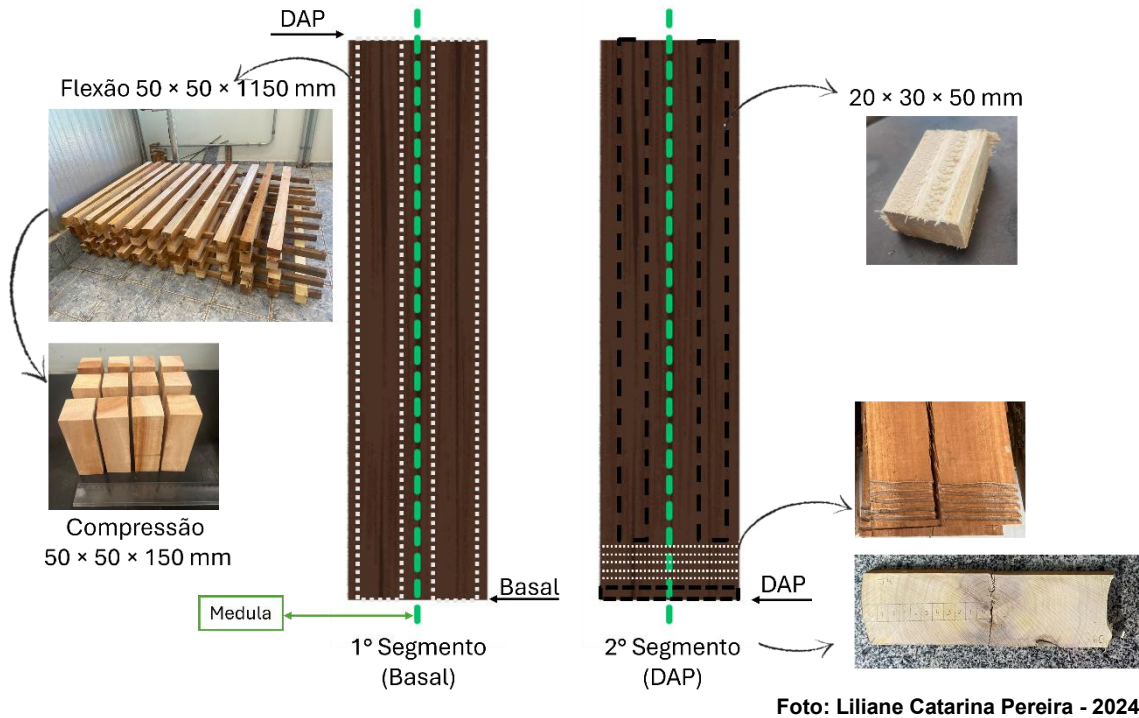
Fonte: Elaboração própria.

Para a avaliação das propriedades mecânicas, foram inicialmente retirados dois corpos de prova destinados ao ensaio de flexão estática, obtidos de cada lado entre a medula e a periferia. As peças apresentavam dimensões de 60 × 60 × 1250 mm, sendo posteriormente beneficiadas em marcenaria, resultando em corpos de prova finais com 50 × 50 × 1150 mm, em conformidade com a NBR 7190 (ABNT, 1997), conforme ilustrado na Figura 3. Após o ensaio de flexão, foram confeccionados dois corpos de prova para o ensaio de compressão paralela às fibras, com dimensões finais de 50 × 50 × 150 mm, beneficiados em marcenaria e selecionados de acordo com a qualidade e a orientação das peças. Esse procedimento foi repetido para cada indivíduo de cada espécie, resultando em um total de 48 corpos de prova para cada ensaio mecânico.

Para a determinação das propriedades físicas, foram retiradas vigotas e selecionados dez corpos de prova por indivíduo de cada espécie, totalizando 240 corpos de prova. Cada corpo de prova foi beneficiado com dimensões de 20 × 30 × 50 mm, orientado nas direções tangencial, radial e longitudinal, conforme especificado

no documento normativo NBR 1790 (ABNT, 1997), também ilustrado no esquema da Figura 3.

Figura 3 - Esquema de retirada dos corpos de prova (cp) para as determinações das propriedades físicas, mecânicas, químicas e anatômica



Fonte: Elaboração própria.

4.2 Métodos

4.2.1 Anatomia da Madeira

As análises da anatomia da madeira foram conduzidas no Laboratório de Anatomia da Madeira e Casca - LAMaC, no Departamento de Ciência Florestal, Solos e Ambiente, Área de Ciência Florestal da FCA - UNESP.

4.2.1.1 Descrição Anatômica

Para esta análise foram selecionados dois indivíduos de cada uma das quatro espécies estudadas, com base na média do diâmetro dos seis indivíduos coletados.

Amostras de madeira com aproximadamente 3 cm³ foram retiradas próxima da casca e armazenadas em água com glicerina para amolecimento e posteriormente cortadas em micrótomo de deslize, com espessura entre 15 e 20 µm, nas seções transversais e longitudinais (tangencial e radial). Esses cortes foram duplamente corados com Safranina e azul de astra aquoso 1:9 (Safrablau), e em seguida submetidos a uma sequência crescente de soluções etanólicas (30, 50, 70, 90, 96 e 100%). A fixação da coloração foi realizada com Acetato de N-butila. Os cortes foram então montados em lâminas permanentes, utilizando resina sintética (Entellan®), conforme descrito por Kraus e Arduin (1997), para a captura de imagens. As análises microscópicas qualitativas foram conduzidas utilizando um sistema de imagens acoplado a um microscópio de luz da marca Zeiss, seguindo as diretrizes do IAWA *Committee* (1989). Foram realizadas 30 medições para características anatômicas quantitativas, incluindo diâmetro e densidade de vasos por mm², altura e largura dos raios.

4.2.1.2 Análise das Fibras da Madeira

Para este procedimento, realizou-se a maceração da madeira (Franklin, 1945), utilizando os mesmos indivíduos selecionados para a análise das propriedades anatômicas. Em seguida, foram seccionados blocos de madeira de aproximadamente 1 cm³ na direção radial da prancha, conforme indicado pelas flechas na Figura 4A, do centro da medula até a casca. A identificação foi iniciada com "0" próximo à medula, conforme mostrado na Figura 4B, a fim de avaliar a evolução do comprimento e da espessura das fibras.

Figura 4 - Método de Franklin: A) Orientação radial; B) Corpos de prova seccionados; C) Frascos com material dissociado



Foto: Liliane Catarina Pereira - 2024.

Para esta análise, foi empregada a metodologia de dissociação de células de Franklin (1945), modificada por Kraus e Arduin (1997), que envolve a imersão de palitos de madeira em uma solução de Ácido Acético Glacial e Peróxido de Hidrogênio (1:1) a 60 °C em estufa por aproximadamente 24 horas. Posteriormente, os palitos foram lavados (Figura 4C) e armazenados em Safranina etanólica 50%. As lâminas foram preparadas utilizando glicerina 50% de forma semipermanente.

4.2.2 Composição Química da Madeira

As análises de composição química da madeira foram realizadas junto ao Departamento de Ciência Florestal, Solos e Ambiente, Área de Ciência Florestal, da FCA – UNESP, no Laboratório de Análises Químicas da Madeira. Estas análises foram realizadas de acordo com os documentos normativos especificadas pela TAPPI 264 cm-97 (TAPPI, 1999).

Para a preparação das amostras de serragem para as análises químicas laboratoriais, foram utilizadas as pranchas da parte central da tora da árvore, das quais foram retiradas serragens no sentido transversal da prancha, de modo a se obter

material ao longo da direção medula-câmbio, na altura do DAP, ou seja, a 1,30 m da base. Utilizando uma tupa manual, foram removidas porções profundas para obter as serragens necessárias para o estudo, como mostra a Figura 5.

Figura 5 – Remoção de serragem para análise de composição química



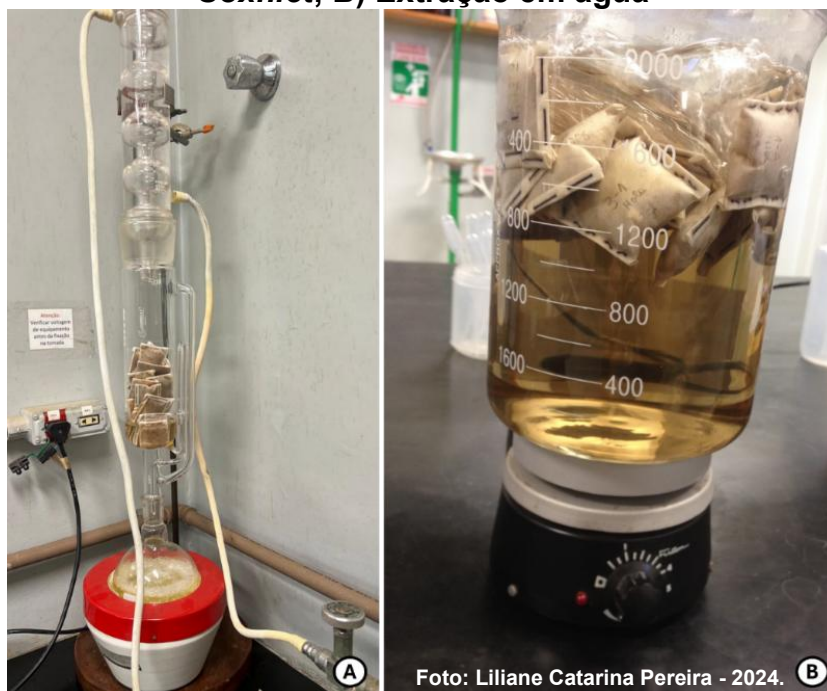
Como o tamanho das partículas da serragem não eram uniformes, elas foram submetidas a um processo de classificação em peneiras por 20 minutos. Esse processo dividiu a serragem em três frações distintas e uniformes, cuja parte utilizada para as análises químicas foi a que passou pela peneira de 60 *mesh* (com abertura de 0,250 mm) e ficou retida na peneira de 45 *mesh* (com abertura de 0,35 mm).

4.2.2.1 Teor de Extrativos Totais

A quantidade de extrativos totais da madeira foi determinada por meio de extrações sequenciais com solventes, conforme o método BRACELPA M3/69 (BRACELPA, 1974), com a modificação da substituição do benzeno por tolueno. As serragens, com umidade de armazenamento, foram pesadas em balança analítica de precisão (0,0001 g), sendo utilizada uma massa equivalente a 1,000 g (%a.s.), acondicionada em saquinhos de papel filtro identificados. Esses foram inseridos em um sistema de Soxhlet, composto por balão de fundo redondo (1000 mL), extrator e condensador. As amostras passaram por três etapas de extração: (1) com solução Álcool-Tolueno 1:2 por 8 horas em refluxo; (2) com Álcool Etílico 95% por mais 8 horas

(Figura 6A); e (3) em água fervente por 3 horas em béquer de 2000 mL aquecido em chapa (Figura 6B).

Figura 6 - Determinação de Extrativos Totais: A) Extração em solventes no Soxhlet; B) Extração em água



Após a conclusão desse procedimento, os saquinhos de papel filtro contendo a serragem foram deixados secar ao ar. Em seguida, as amostras de serragem foram removidas do papel filtro e transferidas para béqueres de 100 mL previamente tarados (secos em estufa a 103 ± 2 °C e pesados em balança analítica com precisão de 0,0001 g). Posteriormente, os béqueres foram colocados em uma estufa a 103 ± 2 °C, onde permaneceram por aproximadamente 24 horas.

Em sequência, os béqueres foram pesados novamente em uma balança analítica com precisão de 0,0001 g. A porcentagem de extrativos totais da madeira, em relação à serragem inicial, foi calculada utilizando a Equação 1.

Equação 1: Teor de Extrativos Totais

$$\%E = \frac{1,000 - PS}{1,000} * 100 \quad (1)$$

Onde:

$%E$ = Teor de Extrativos Totais, em porcentagem (%);

PS = Peso seco da amostra, em gramas (g).

4.2.2.2 Teor de Lignina

Para este procedimento de determinação de lignina total, pelo método padrão Klason pelo documento normativo TAPPI T 222 om – 98 (TAPPI, 1998) e segundo Gomide e Demuner (1986), os béqueres contendo as amostras de serragem livre de extrativos, com peso equivalente a 1,000 g (%a.s.), foram expostos a uma solução de Ácido Sulfúrico 72% (H_2SO_4) em uma quantidade de 15 mL, e mantidos em banho-maria termostático a 25 °C por 3 horas. Posteriormente, as amostras com a solução de ácido sulfúrico foram transferidas para um erlenmeyer de 1000 mL, e foram adicionados 560 mL de água destilada. O nível do líquido foi mantido constante durante todo o processo de fervura em Sebelin (bateria de chapas aquecedoras), por mais 4 horas, como demonstrado na Figura 7.

Figura 7 - Determinação de Lignina



Após fervura, as placas de aquecimento foram desligadas e os erlenmeyers foram deixados em repouso por cerca de 24 horas, ou até que o processo de decantação da lignina resultante ocorresse. Em seguida, as amostras foram filtradas, utilizando um cadinho de vidro sinterizado (tipo “M” ou número “2”) previamente tarado

(seco em estufa e pesado em balança analítica com precisão de 0,0001 g). Com o auxílio de água quente (quase fervendo), o conteúdo remanescente no fundo do recipiente foi lavado.

As amostras foram colocadas em uma estufa a 103 ± 2 °C para secagem completa (aproximadamente 24 horas) e então pesadas em uma balança analítica com precisão de 0,0001 g. Por último, o teor de lignina insolúvel presente na madeira foi determinado em porcentagem utilizando a Equação 2.

Equação 2: Teor de Lignina

$$\%L = \frac{PS}{1,000} * 100 \quad (2)$$

Onde:

$\%L$ = Teor de Lignina, em porcentagem (%);

PS = Peso seco da amostra, em gramas (g).

4.2.2.3 Teor de Holocelulose

Para a determinação da holocelulose da madeira, efetuou-se uma deslignificação com clorito de sódio, de acordo com a norma brasileira NBR 11941 (NBR, 2014). Utilizou-se o equivalente a 2,000 g (%a.s.) de serragem para preparar o saquinho de papel filtro devidamente identificado e livre de extrativos totais. Após a secagem ao ar, as serragens foram removidas do papel filtro e transferidas para erlenmeyers de 125 mL, onde foram adicionados 55 mL de água destilada. Em seguida, utilizando duas buretas, adicionou-se 3 mL de Clorito de Sódio 20% (NaClO_2) e 2 mL de Ácido Acético 1:5 ($\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$). Os erlenmeyers foram então submetidos a um banho-maria numa temperatura de 70 a 80°C, como mostrado na Figura 8. O processo de adição das soluções de Clorito de Sódio e Ácido Acético foi repetido a cada 45 minutos, totalizando cinco ciclos de adição das soluções.

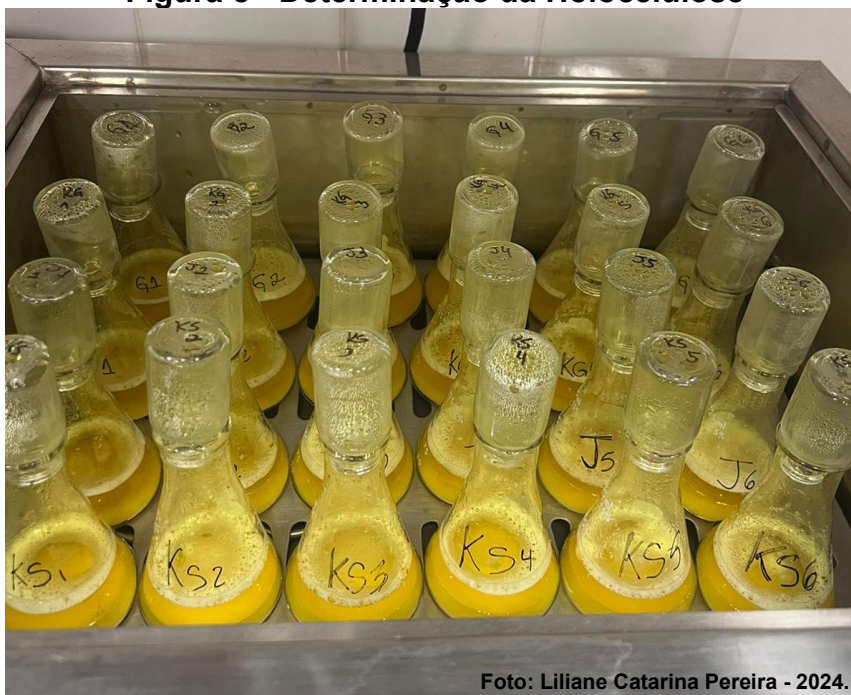
Figura 8 - Determinação da Holocelulose

Foto: Liliane Catarina Pereira - 2024.

Após a última titulação, respeitando o tempo de 45 minutos necessário para a reação das soluções, as amostras de holocelulose resultantes do procedimento foram filtradas, utilizando um cadinho de filtro sintetizado previamente tarado (seco em estufa a 103 ± 2 °C e pesado em balança analítica com precisão de 0,0001 g). Os resíduos foram lavados com água destilada quente. Em seguida, as amostras foram colocadas em uma estufa a 103 ± 2 °C para secagem completa e pesadas em uma balança analítica com precisão de 0,0001 g para determinar a holocelulose constituinte da madeira, utilizando a Equação 3.

Equação 3: Teor de Holocelulose

$$\%H = \frac{PS}{2,000} * 100 \quad (3)$$

Onde:

$\%H$ = Teor de Holocelulose, em porcentagem (%);

PS = Peso seco da amostra, em gramas (g).

4.2.2.4 Teor de Cinzas

Para esta determinação, foi utilizada a serragem da fração maior, ou seja, aquela que ficou retida na peneira de 60 *mesh* (com abertura de 0,250 mm). Após pesar o cadinho de porcelana, que foi mantido na mufla a 600 °C por 30 minutos, e a serragem seca em estufa, o material foi transferido para a incineração em forno mufla. O processo de queima ocorreu durante 3 horas a uma temperatura constante de 575 °C (Figura 9A). A Figura 9B ilustra a serragem e o resíduo resultante, conforme especificado pelo documento normativo TAPPI T 211 om-93 (TAPPI, 1993).

Figura 9 - Determinação de Cinzas: A) Mufla de incineração; B) Resíduos de serragem e cinzas



Foto: Liliane Catarina Pereira - 2024.

Após a incineração, o resíduo de cinzas foi pesado, e seu teor foi determinado pela Equação 4.

Equação 4: Teor de Cinzas

$$\%Cz = \frac{PCz}{PS} * 100 \quad (4)$$

Onde:

$\%Cz$ = Teor de Cinzas, em porcentagem (%);

PCz = Peso seco das cinzas, em gramas (g);

PS = Peso seco da serragem, em gramas (g).

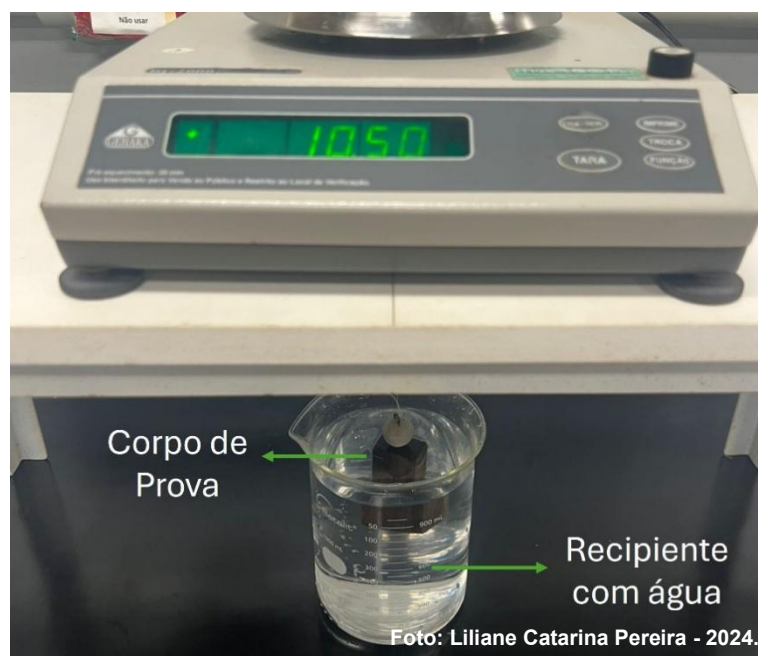
4.2.3 Propriedades Físicas

A caracterização física das madeiras foi realizada por meio da determinação da densidade básica e da estabilidade dimensional, utilizando-se 10 corpos de prova por indivíduo, totalizando 240 corpos de prova (4 espécies × 6 indivíduos × 10 corpos de prova), no Laboratório de Secagem e Preservação da Madeira, FCA – UNESP.

4.2.3.1 Densidade Básica

Este procedimento consiste inicialmente em submergir os corpos de prova em água até a sua saturação completa, ou seja, até que todos os espaços vazios estejam totalmente preenchidos por água. A densidade básica da madeira foi determinada pelo método da balança hidrostática, com pesagem por imersão em água, conforme a NBR 11941 (ABNT, 2003) (Figura 10).

Figura 10 - Aparato utilizado na determinação da Densidade Básica pelo método da balança hidrostática



Após a saturação, os corpos de prova foram pesados saturados e imersos numa balança hidrostática e depois colocados em estufa (103 ± 2 °C) por aproximadamente 5 dias para secagem completa. Durante esse processo, as

amostras foram pesadas repetida e diariamente em uma balança de precisão com resolução de 0,01 g até atingirem massa constante, correspondente a 0% de umidade.

A densidade básica foi calculada por meio do quociente entre massa seca e volume saturado do corpo de prova da madeira (Equação 5). A diferença de pesos saturado e imerso equivale ao volume do corpo de prova.

Equação 5: Densidade Básica

$$\rho_{bas} = \frac{PS}{PU - PI} \quad (5)$$

Onde:

ρ_{bas} = Densidade Básica da madeira, em gramas por centímetro cúbico (g/cm³);

PS = Peso da massa seca em estufa do corpo de prova, em gramas (g);

PU = Peso da massa saturada do corpo de prova, em gramas (g);

PI = Peso da massa imersa do corpo de prova, em gramas (g).

4.2.3.2 Retratibilidade da Madeira

Para o estudo de estabilidade dimensional, foi determinada apenas a retratibilidade da madeira, uma vez que tanto a retratibilidade quanto o inchamento são propriedades equivalentes. A determinação foi realizada de acordo com os procedimentos estabelecidos pelo documento normativo NBR 7190 (ABNT, 1997).

O método envolve a imersão em água até a saturação e a secagem controlada de corpos de prova de madeira. As variações dimensionais são registradas em três direções diferentes de suas seções (transversal, tangencial e radial), utilizando-se de paquímetro digital com duas casas decimais para as medições dos corpos de prova saturados e secos em estufa a 103 ± 2 °C, como mostra a Figura 11.

Figura 11 - Determinação da Retratibilidade da Madeira: A) Esquema do corpo de prova; B) Seção longitudinal; C) Seção Tangencial; D) Seção radial

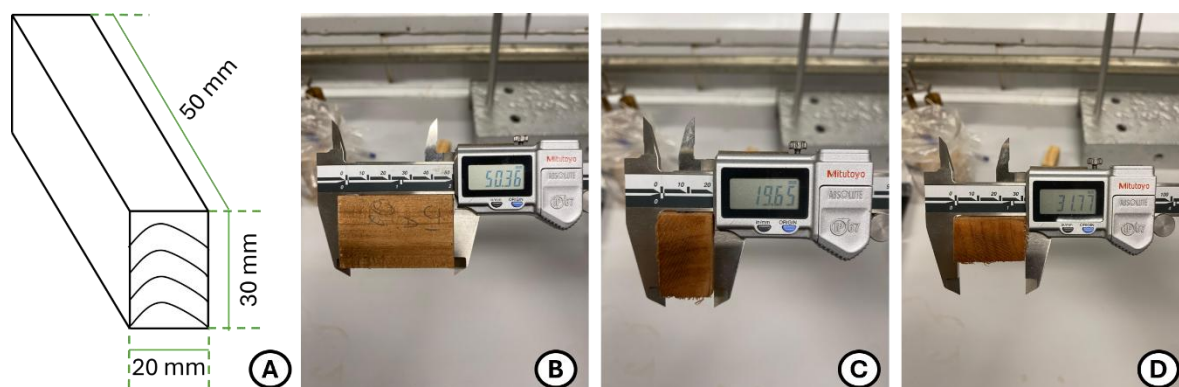


Foto: Liliane Catarina Pereira - 2024.

Fonte: Elaboração própria.

As medições realizadas nos corpos de prova nos planos tangenciais, radiais e longitudinais foram utilizadas nas Equações 6 a 10 para se determinar a retratibilidade da madeira linear nas respectivas direções, bem como a volumétrica e o Coeficiente de Anisotropia:

Equação 6: Retração Linear Tangencial (β_t)

$$\beta_{lt} = \frac{ut - st}{ut} * 100 \quad (6)$$

Equação 7: Retração Linear Radial (β_r)

$$\beta_{lr} = \frac{ur - sr}{ur} * 100 \quad (7)$$

Equação 8: Retração Linear Longitudinal (β_l)

$$\beta_{ll} = \frac{ul - sl}{ul} * 100 \quad (8)$$

Equação 9: Retração Volumétrica (β_v)

$$\beta_v = \beta_{lt} + \beta_{lr} + \beta_{ll} \quad (9)$$

Equação 10: Coeficiente de Anisotropia (CA)

$$CA = \frac{\beta_{lt}}{\beta_{lr}} \quad (10)$$

Onde:

β_{it} = Retração linear tangencial, em porcentagem (%);

β_{ir} = Retração linear radial, em porcentagem (%);

β_{ll} = Retração linear longitudinal, em porcentagem (%);

β_v = Retração volumétrica, em porcentagem (%);

u_t = Dimensão úmida tangencial, em centímetros (cm);

s_t = Dimensão seca tangencial, em centímetros (cm);

u_r = Dimensão úmida radial, em centímetros (cm);

s_r = Dimensão seca radial, em centímetros (cm);

u_l = Dimensão úmida longitudinal, em centímetros (cm);

s_l = Dimensão seca longitudinal, em centímetros (cm);

CA = Coeficiente de Anisotropia.

4.2.4 Propriedades Mecânicas

Os ensaios de resistência à compressão paralela às fibras e flexão estática, foram realizados junto ao Departamento de Engenharia Rural e Socioeconomia, Área de Engenharia Rural, no Laboratório de Ensaios de Materiais (LEM) da FCA – UNESP, em uma máquina universal de ensaios, com capacidade máxima de 30 kN.

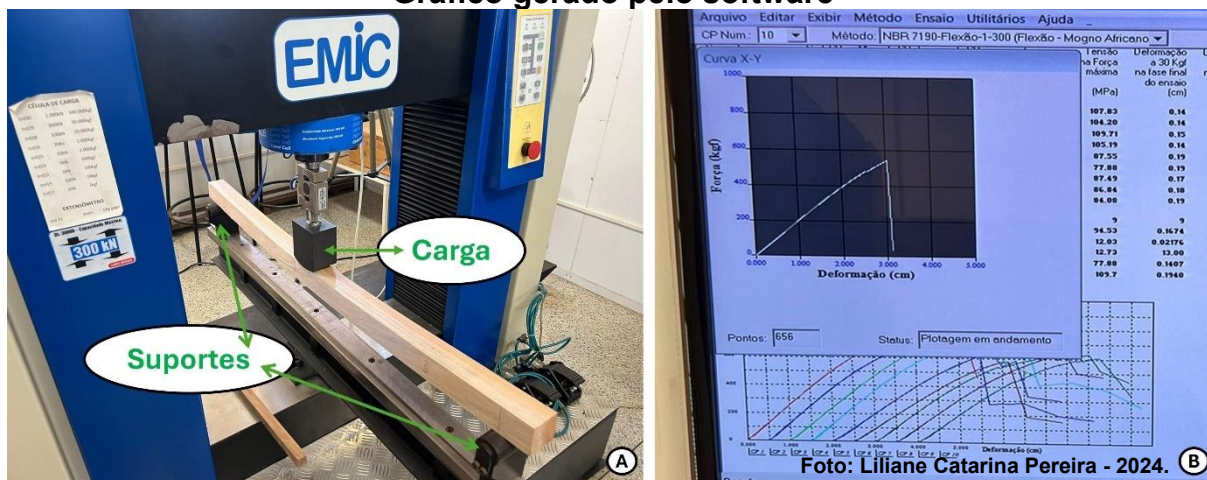
4.2.4.1 Ensaio de Flexão Estática

O ensaio de flexão, comumente realizado em corpos de prova em forma de viga, replica as condições reais de carga enfrentadas pela madeira utilizada como vigas em estruturas. Ele fornece dados essenciais sobre a resistência e à rigidez da madeira nesse tipo de solicitação, sendo crucial para o dimensionamento de vigas, por exemplo.

Os corpos de prova foram beneficiados a partir da prancha central das toras das árvores, conforme o documento normativo NBR 7190 (ABNT, 1997), que preconiza a dimensão em 50 x 50 x 1150 mm (largura, altura e comprimento).

Durante o procedimento, o corpo de prova é sustentado nas extremidades por dois suportes (apoios) e exposto a uma carga crescente na região central entre os apoios (Figura 12A). Durante o ensaio, é gerado um gráfico que representa a relação entre tensão e deformação do teste de flexão que é mostrado na Figura 12B.

Figura 12 - Ensaio de flexão estática: A) Máquina universal de ensaios; B) Gráfico gerado pelo software



Após o procedimento, algumas amostras de madeira foram retiradas de cada corpo de prova ensaiado, no intuito de obter o teor de umidade no momento do ensaio da flexão. Para tanto, essas amostras foram inicialmente pesadas em uma balança analítica com precisão de 0,01 g, antes de qualquer processo de secagem. Posteriormente, esses mesmos corpos de prova foram colocados em estufa a 103 ± 2 °C até atingirem peso constante, indicando secagem completa. O teor de umidade da madeira é definido como a proporção entre a massa da água presente nela e a massa da madeira seca. Expresso assim, pela Equação 11.

Equação 11: Teor de Umidade

$$TU\% = \frac{M_i - M_s}{M_s} * 100 \quad (11)$$

Onde:

$TU\%$ = Teor de umidade da madeira, em porcentagem (%);

M_i = Massa inicial da madeira, em gramas (g);

M_s = Massa da madeira seca em estufa, em gramas (g).

A NBR 7190 (ABNT, 1997) estabelece um teor de umidade padrão de referência de 12%. Portanto, os valores obtidos nos ensaios de propriedades mecânicas devem ser ajustados para essa umidade de referência, pois, mesmo após o condicionamento prévio das peças de madeira, elas não estabilizam exatamente em

12% de umidade. Dessa forma, é necessário realizar uma correção, aplicando a Equação 12.

Equação 12: Correção da Resistência

$$f_{12} = f_U * \left[1 + \frac{3 * (U - 12)}{100} \right] \quad (12)$$

Onde:

f_{12} = Resistência da madeira, ao teor de umidade de referência de 12%, em mega Pascal (MPa);

f_U = Resistência da madeira, ao teor de umidade U% em mega Pascal (MPa);

U = Teor de umidade da madeira no instante do ensaio, em porcentagem (%).

O módulo de elasticidade para a Flexão Estática (E_M), foi determinado pela Equação 13.

Equação 13: Módulo de Elasticidade à Flexão Estática

$$E_M = \frac{(P_{50} - P_{10}) * l^3 * 12}{(a_{50} - a_{10}) * b * h^3} \quad (13)$$

Onde:

E_M = Módulo de elasticidade à flexão, em mega Pascal (MPa);

P_{50} = Carga correspondente a 50% da carga de ruptura estimada, em quilograma força (kgf);

P_{10} = Carga correspondente a 10% da carga de ruptura estimada, em quilograma força (kgf);

l = Vão livre para o ensaio, em centímetro (cm);

a_{50} = Diferencial de flecha (entre meio e terço do vão) para carga P_{50} , em milímetro (mm);

a_{10} = Diferencial de flecha (entre meio e terço do vão) para carga P_{10} , em milímetro (mm);

b = Largura da viga, em milímetro (mm);

h = altura da viga, em milímetro (mm).

A resistência à flexão (f_M) foi determinada pelo módulo de ruptura (MOR) em que o corpo de prova de madeira pode atuar, e é expressa pela Equação 10.

Equação 14: Resistência a Flexão

$$f_M = \frac{M_{m\acute{a}x}}{W} \quad (14)$$

Onde:

f_M = Resistência à flexão, em mega Pascal (MPa);

$M_{m\acute{a}x}$ = Momento fletor máximo, dado por $M_{m\acute{a}x} = \frac{f_{m\acute{a}x}}{6}$

$f_{m\acute{a}x}$ = Carga máxima de ensaio (na ruptura), em quilograma força (kgf);

l = Vão da peça, em centímetro (cm);

W = Módulo de resistência da viga, dado por $W = \frac{b * h^2}{6}$

b = Base da viga, em centímetro (cm);

h = Altura da viga, em centímetro (cm).

4.2.4.2 Ensaio de Compressão Paralela às Fibras

Os corpos de prova utilizados neste ensaio foram usinados a partir daqueles testados em flexão estática. Os corpos de prova foram submetidos a um processo de preparação em marcenaria, seguindo as dimensões especificadas pela NBR 7190:1997 (ABNT, 1997). Esta norma estabelece as características dos corpos de prova para a avaliação da resistência à compressão paralela às fibras, os quais possuem uma seção transversal quadrada com o lado igual à espessura, sendo no mínimo 1,8 cm, e um comprimento correspondente a três vezes o lado da seção transversal. Para este trabalho, as dimensões nominais do corpo de prova foram de 50 x 50 x 150 cm (largura, altura e comprimento) para as quatro espécies estudadas.

O ensaio de compressão paralela avalia a capacidade da madeira de resistir às cargas aplicadas às suas fibras. É fundamental para entender a resistência da madeira sob o esforço de compressão, sendo essencial no projeto de colunas e elementos de suporte vertical. Quando as forças atuam na mesma direção do comprimento das fibras da madeira, esta apresenta uma resistência excepcional, uma propriedade amplamente utilizada no dimensionamento de pilares em construções. Este ensaio é considerado um dos mais importantes, pois o valor característico da resistência à compressão paralela às fibras ($f_{c0,k}$) permite classificar a madeira de acordo com as classes de resistência estabelecidas pela norma NBR 7190 (ABNT, 1997 - Projeto de Estruturas de Madeira). Para realizar essa avaliação, é empregado um extensômetro, um instrumento de medição de deformações, com sensibilidade de 0,001 mm, durante o ensaio, conforme mostra a Figura 13. Desse ensaio, é gerado um gráfico pelo *software* utilizado.

Figura 13 - Ensaio de compressão paralela às fibras: A) Extensômetro; B) Gráfico gerado pelo software

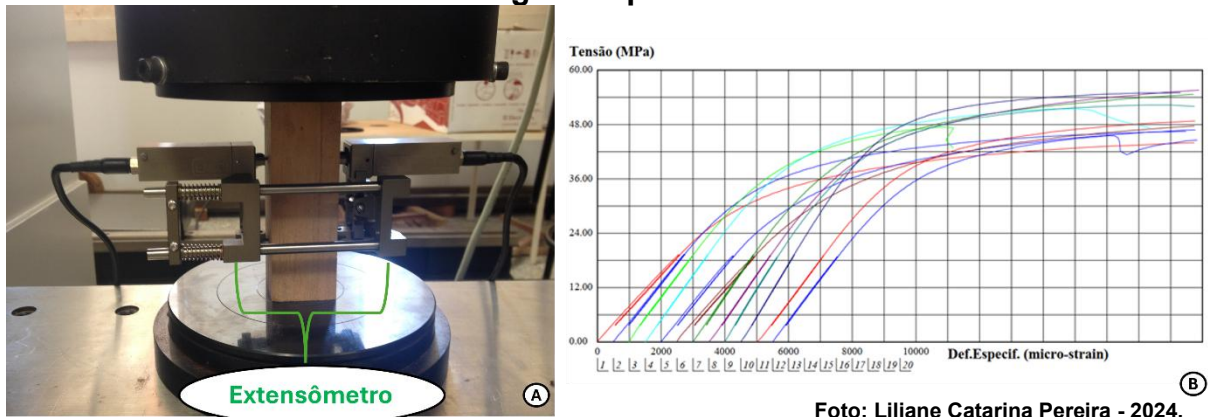


Foto: Liliane Catarina Pereira - 2024.

A resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}) foi obtida como a máxima tensão de compressão suportada por um corpo de prova com seção quadrada, conforme definido pela Equação 15.

Equação 15: Resistência à Compressão Paralela às Fibras

$$f_{c0} = \frac{f_{c0m\acute{a}x}}{A_c} \quad (15)$$

Onde:

f_{c0} = Resistência à compressão paralela às fibras da madeira, em Mega Pascal (MPa);

$f_{c0m\acute{a}x}$ = Máxima força de compressão aplicada ao corpo de prova durante o ensaio, em quilograma força (kgf);

A_c = área inicial da seção transversal comprimida, em milímetro quadrado (mm^2).

A rigidez foi determinada pelo módulo de elasticidade paralelo às fibras (E_{c0}), obtido a partir da reta secante traçada no trecho linear do diagrama tensão-deformação específica. Essa reta foi definida entre os pontos correspondentes a 10% e 50% da resistência máxima à compressão paralela às fibras, conforme estabelece a NBR 7190 (ABNT, 1997) e indicado na Equação 16.

Equação 16: Módulo de Elasticidade à Compressão Paralela às Fibras

$$E_{c0} = \frac{\sigma_{50} - \sigma_{10}}{\varepsilon_{50} - \varepsilon_{10}} \quad (16)$$

Onde:

E_{c0} = Rigidez da madeira à compressão paralela às fibras, em mega Pascal (MPa);

σ_{10} e σ_{50} = Tensões de compressão correspondentes a 10% e 50% da resistência f_{c0} , em mega Pascal (MPa);

ε_{10} e ε_{50} = Deformações específicas medidas no corpo de prova, em milímetro quadrado (mm^2).

4.2.5 Análise Estatística

A análise estatística é essencial na caracterização tecnológica da madeira, pois permite avaliar a consistência dos dados, identificar padrões de variação e estabelecer comparações confiáveis entre espécies. Neste trabalho, os procedimentos estatísticos foram aplicados para assegurar que as diferenças observadas refletissem propriedades reais dos materiais, e não variações ao acaso.

Inicialmente, os dados foram submetidos à verificação dos pressupostos fundamentais da estatística paramétrica. A normalidade das distribuições foi avaliada por meio do teste de Shapiro-Wilk, considerado adequado para amostras de pequeno e médio porte. Em todos os casos analisados, os resultados confirmaram a aderência dos dados à distribuição normal, o que possibilitou a utilização de métodos paramétricos.

Atendidos os pressupostos de normalidade e homocedasticidade, procedeu-se à análise de variância (ANOVA), ferramenta estatística empregada para verificar se existiam diferenças significativas entre as médias das espécies avaliadas. A ANOVA permite identificar variações globais, mas não indica diretamente quais grupos diferem entre si. Para essa finalidade, aplicou-se o teste de Tukey a 5% de significância, que realiza comparações múltiplas entre pares de médias, apontando as diferenças específicas com elevado poder estatístico e controle do erro tipo I.

Além da análise inferencial, foram calculadas estatísticas descritivas, como a média e o desvio-padrão, utilizadas para caracterizar a tendência central e a dispersão dos dados. Essas medidas foram organizadas em tabelas de resultados, servindo como base para a discussão das propriedades tecnológicas da madeira. Ainda que os pressupostos de normalidade tenham sido atendidos, optou-se por apresentar também gráficos *boxplot*. Esse recurso visual fornece uma síntese robusta da distribuição, destacando a mediana, os quartis e a presença de valores discrepantes, além de facilitar a interpretação comparativa entre espécies e propriedades.

Todas as análises foram realizadas no software R (R Core Team, 2023), ambiente amplamente utilizado em pesquisas científicas pela flexibilidade na execução de testes estatísticos e na elaboração de gráficos de alta qualidade.

Esse conjunto de procedimentos conferiu robustez às conclusões, sustentando a discussão científica e validando a aplicabilidade tecnológica das madeiras avaliadas.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

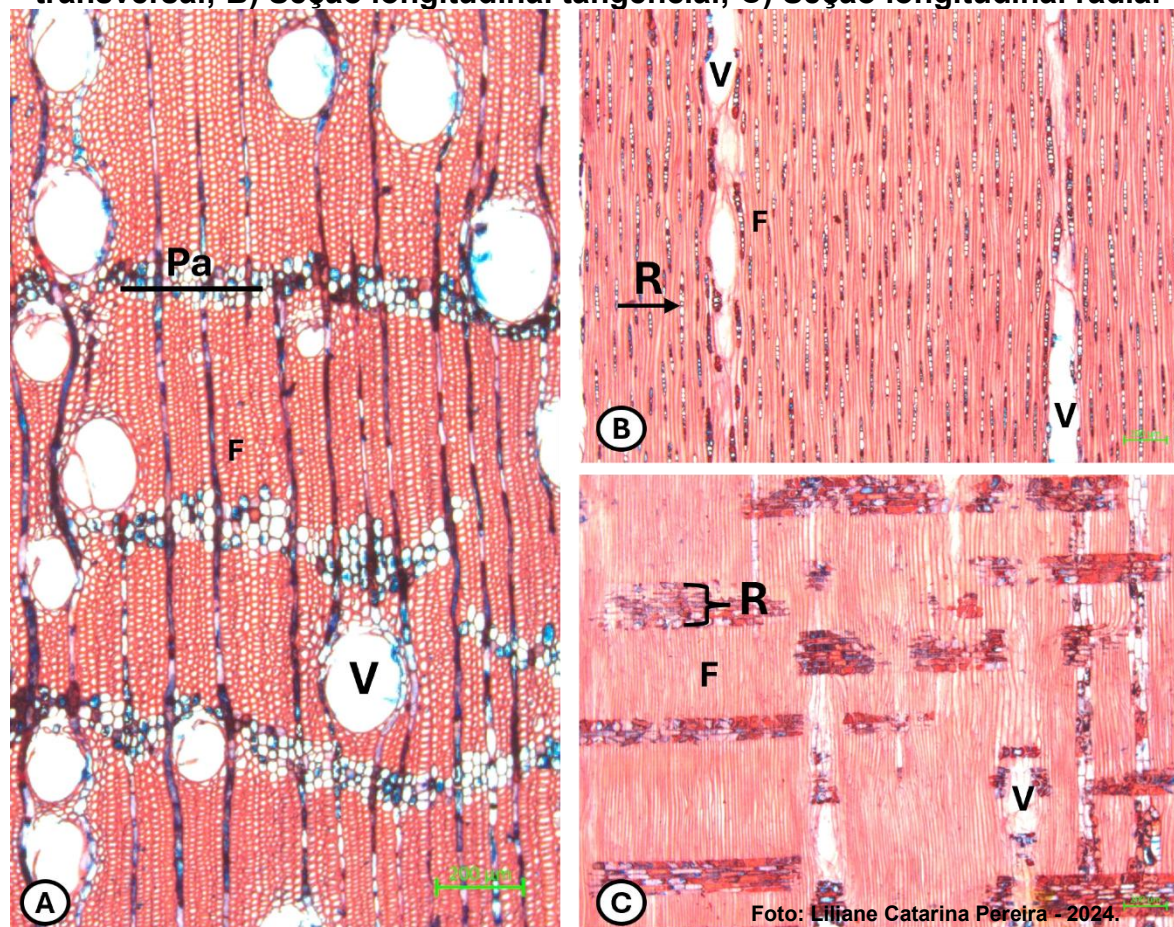
5.1 Descrição Anatômica

5.1.1 *Calophyllum brasiliense* (guanandi) - Calophyllaceae

O lenho da espécie de *Calophyllum brasiliense* Cambess. (guanandi, família Calophyllaceae) apresentou traços típicos da espécie, observa-se a porosidade difusa com vasos exclusivamente solitários (V), de contorno arredondado. As camadas de crescimento são visíveis e demarcadas por faixas marginais de parênquima axial (Pa), indicando sazonalidade no crescimento, como descrito por Metcalfe e Chalk (1950) e Tomazello Filho *et al.* (2008). O parênquima axial aparece tanto em faixas estreitas quanto em faixas confluentes, o que sugere variação funcional relacionada ao transporte e armazenamento, conforme discutido por Menezes *et al.* (2014), como mostra a Figura 14A.

Os raios são exclusivamente unisseriados, formados por células procumbentes com margens contendo 1 a 4 células eretas ou quadráticas (Figura 14 B e C). Esse padrão é típico de espécies do gênero *Calophyllum* e está em conformidade com o descrito pelo IAWA Committee (1989).

Figura 14 - Anatomia do lenho de *Calophyllum brasiliense*: A) Seção transversal; B) Seção longitudinal tangencial; C) Seção longitudinal radial



Vasos solitários (V) e Parênquima axial em faixas (Pa –); Raios unisseriados com células procumbentes e marginais eretas/quadráticas (→); Estrutura dos raios (}); Estrutura das fibras (F); Escala: A, B e C: 200μm.

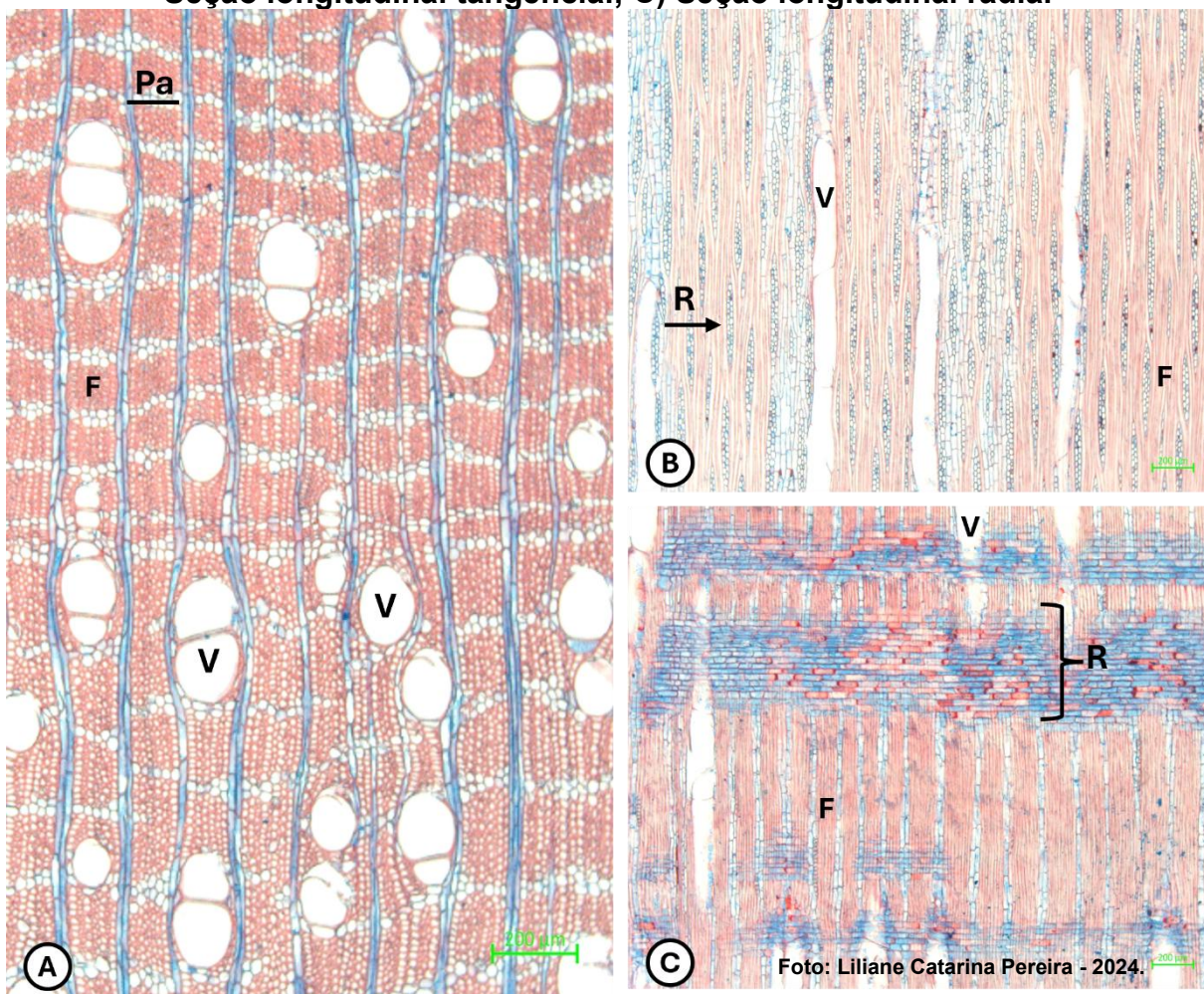
5.1.2 *Cariniana legalis* (jequitibá) - Lecythidaceae

As características anatômicas observadas na espécie de *Cariniana legalis* (Mart.) Kuntze (jequitibá-rosa, família Lecythidaceae) estão de acordo com descrições anteriores na literatura para essa espécie. A ausência ou indistinção das camadas de crescimento é comum em espécies de florestas tropicais úmidas e já foi relatada por Metcalfe e Chalk (1983). A porosidade difusa, vasos solitários e múltiplos, e a ausência de arranjo definido nos vasos também são coerentes com os padrões descritos por o IAWA Committee (1989).

O diâmetro médio do lúmen (114 μm) e a densidade de vasos (7 vasos/mm²) permanecem dentro da faixa citada por Alves e Angyalossy-Alfonso (2000) para espécies do mesmo gênero.

As fibras são não septadas, com paredes finas a espessas e pontuações simples, e o parênquima axial (Pa) é predominantemente reticulado irregular, com faixas estreitas que por vezes confluem, um padrão anatômico típico deste gênero, reforçado por Lima *et al.* (2011), como mostra a Figura 15A. Os raios de 1 a 3 células de largura, compostos exclusivamente por células procumbentes e não estratificados, observados na Figura 15B e C, estão em conformidade com os padrões descritos para a espécie.

Figura 15 - Anatomia do lenho de *Cariniana legalis*: A) Seção transversal; B) Seção longitudinal tangencial; C) Seção longitudinal radial



Vasos solitários e múltiplos (V); Parênquima axial reticulado irregular (Pa –); Raios de 1 a 3 células de largura, e não estratificados (→); Séries de células dos raios (}); Estrutura das fibras (F); Escala: A, B e C: 200µm.

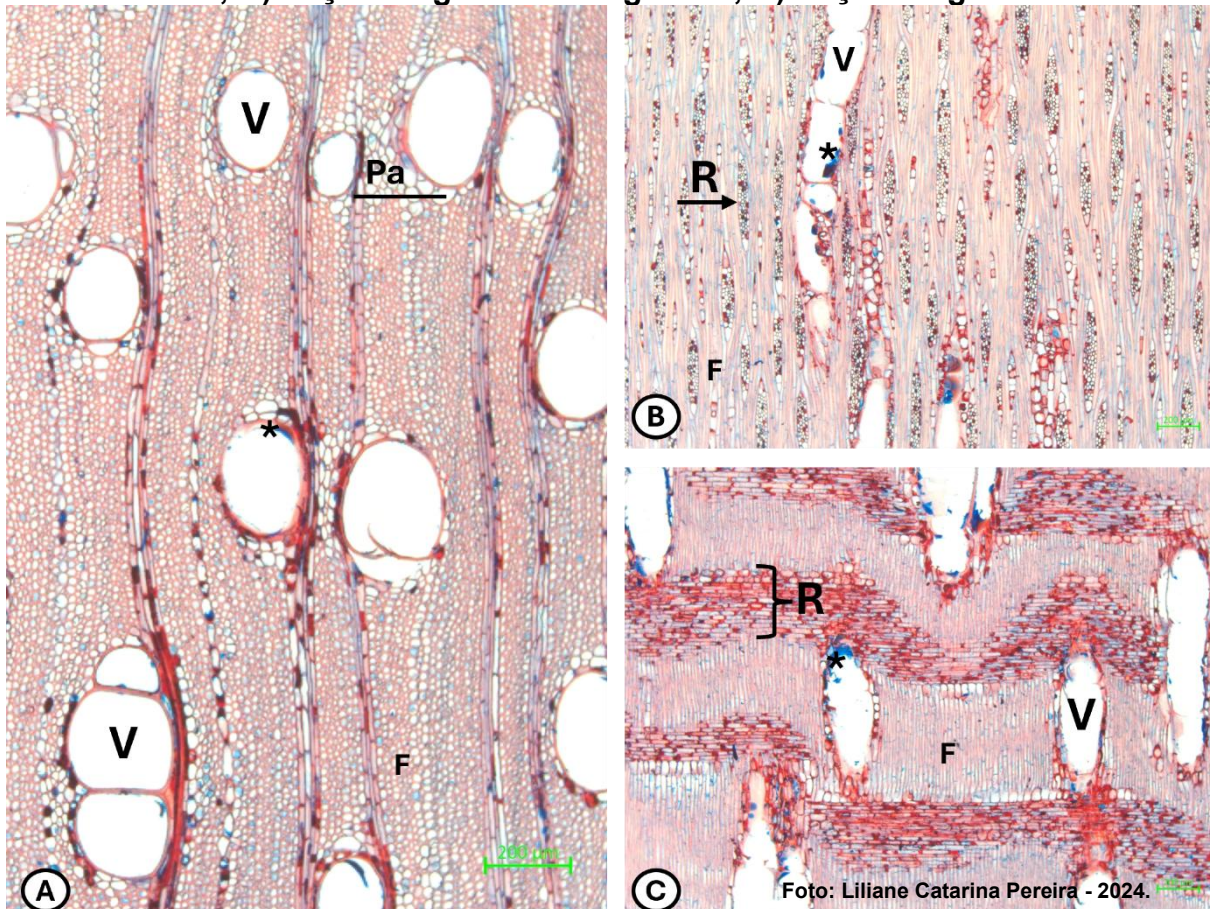
5.1.3 *Khaya grandifoliola* (mogno-africano) - Meliaceae

O lenho de *Khaya grandifoliola* C.DC. (mogno-africano, família Meliaceae) apresenta características anatômicas típicas da espécie e consistentes com a literatura. A ausência de camadas de crescimento definidas e a porosidade difusa são comuns em espécies tropicais de crescimento contínuo, como relatado por Metcalfe e Chalk (1983). A ocorrência de vasos solitários e múltiplos (V), confirma os padrões descritos por o IAWA Committee (1989), como mostra a Figura 16A.

O diâmetro médio dos vasos (175 μm) e a densidade de 9 vasos/ mm^2 estão de acordo com os valores mencionados por Richter e Dallwitz (2000) para espécies deste gênero. A presença de gomas nos vasos (*) é característica marcante em Meliaceae, associada a processos de defesa e cicatrização (Alves; Angyalossy-Alfonso, 2000).

O parênquima axial (Pa) varia de escasso a vasicêntrico, com séries de 5 a 8 células, enquanto o parênquima radial apresenta de 1 a 5 células de largura, com corpo procumbente e margens de 1 a 2 células eretas/quadradas (Chattaway, 1955). Os raios não estratificados (Figura 16B), bem como a morfologia ondulada observada na imagem radial (Figura 16C), são consistentes com as descrições do gênero.

Figura 16 - Anatomia do lenho de *Khaya grandifoliola*: A) Seção transversal; B) Seção longitudinal tangencial; C) Seção longitudinal radial



Vasos solitários e Múltiplos (V), com porosidade difusa e depósitos de gomas (*); Raios de 1 a 5 células de largura (→); Padrão ondulado dos raios (}); Estrutura das fibras (F); Escala: A, B e C: 200μm.

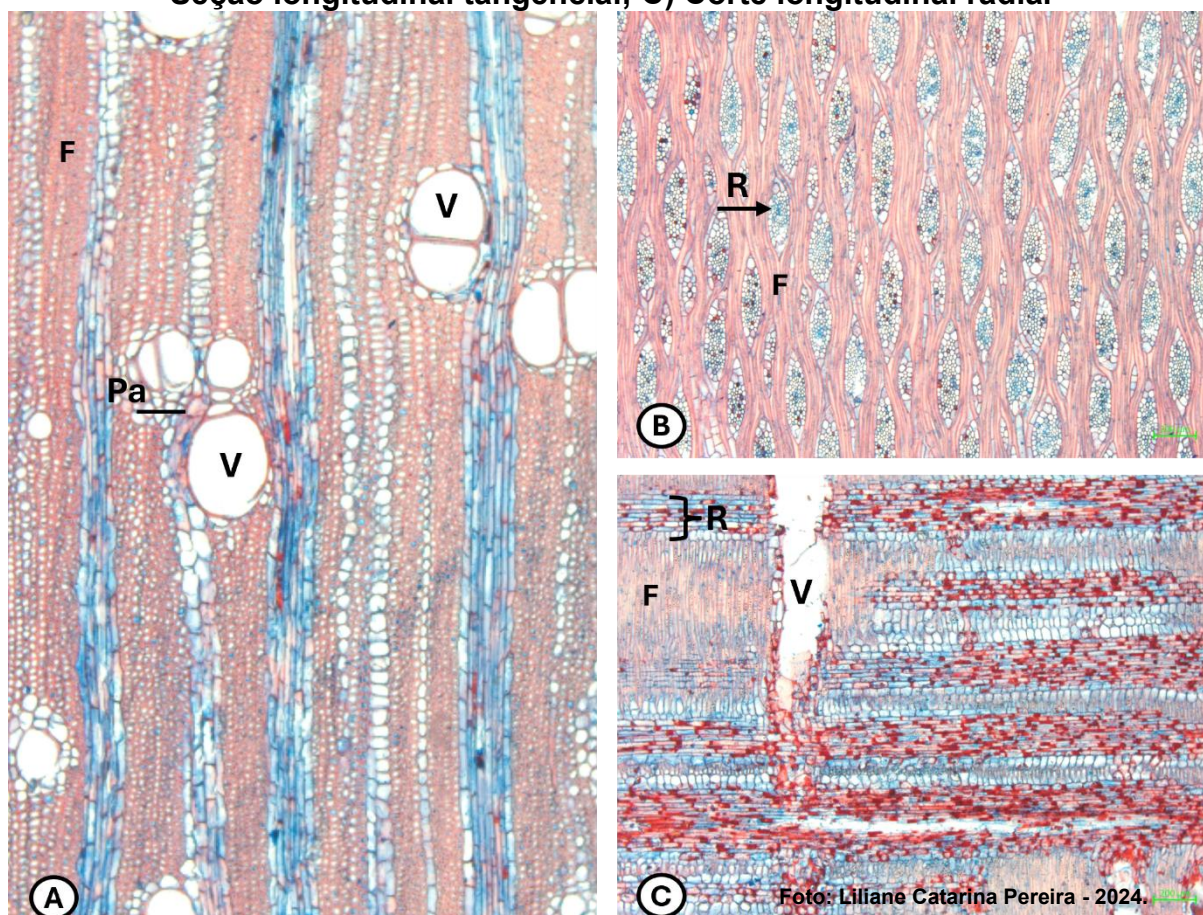
5.1.4 *Khaya senegalensis* (mogno-africano) - Meliaceae

Khaya senegalensis (Desr.) A. Juss. (mogno-africano, família Meliaceae) apresenta características anatômicas compatíveis com as descrições da literatura para espécies. A ausência de camada de crescimento e a porosidade dos vasos difusa estão em conformidade com o padrão anatômico de espécies tropicais (Metcalf e Chalk, 1983). A presença de vasos solitários e múltiplos com contorno arredondado reforça os critérios mencionados pelo IAWA Committee (1989).

O diâmetro médio dos vasos (152 μm) e a densidade (9 vasos/mm²) estão dentro dos limites observados por Richter e Dallwitz (2000) para a espécie. O parênquima axial é variável, incluindo formas escassas, vasicêntricas, aliformes losangulares, indicando alta variabilidade estrutural, como mostra a Figura 17A. Os

raios são não estratificados, mostrado na Figura 17B, reforçam a identificação da espécie e sua adaptação funcional.

Figura 17 - Anatomia do lenho de *Khaya senegalensis*: A) Seção transversal; B) Seção longitudinal tangencial; C) Corte longitudinal radial



Vasos solitários e Múltiplos (V) e Parênquima vasicêntrico e escasso (Pa –); Raios com 1 a 8 células de largura e não estratificados (→); Estrutura dos raios (}); Estrutura das fibras (F); Escala: A, B e C: 200µm.

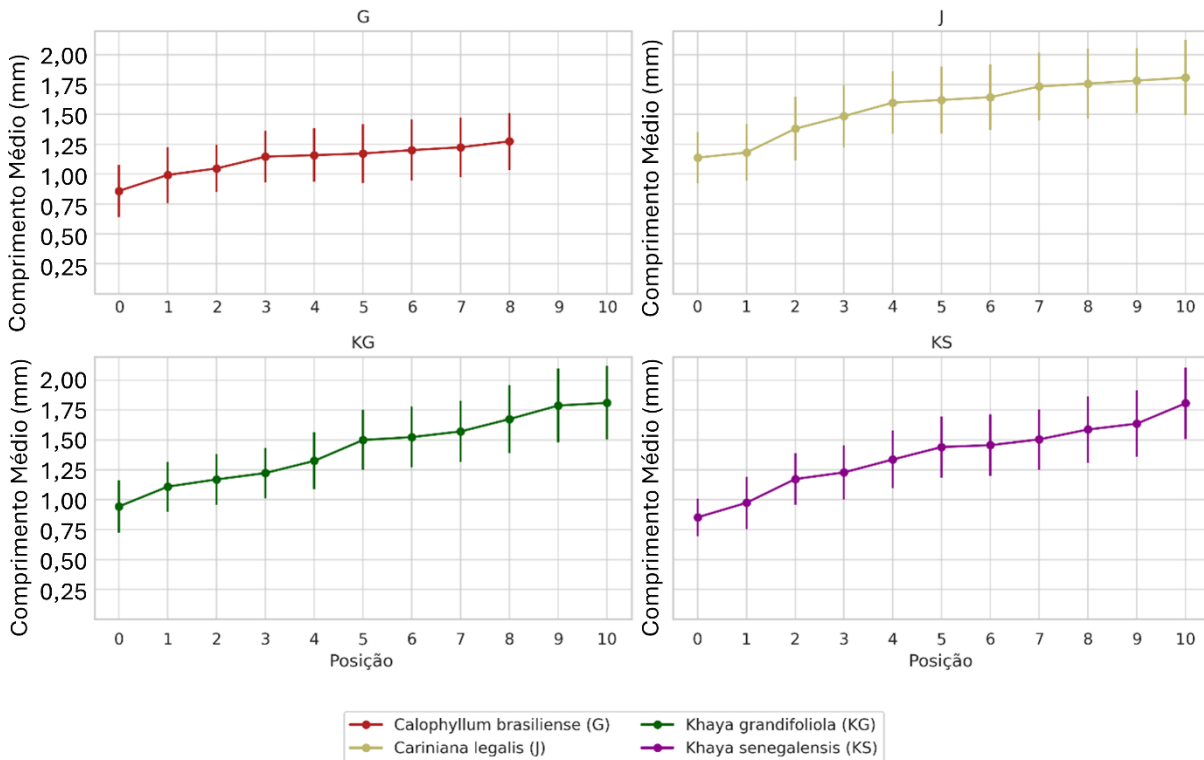
5.1.5 Variação do Comprimento das Fibras

O comprimento das fibras é um dos principais parâmetros anatômicos utilizados para avaliar a qualidade tecnológica da madeira, principalmente para fins industriais como a produção de papel, painéis e componentes estruturais. Esse comprimento tende a variar ao longo do raio da árvore, do cerne para a periferia, influenciado pela atividade cambial e pelo amadurecimento da madeira (Zobel e Van Buijtenen, 1989).

A Figura 18 mostra o comportamento da variação do comprimento das fibras das quatro espécies de madeira estudada ao longo do raio, da medula (posição 0) à

casca. Os resultados mostram um aumento sistemático no comprimento das fibras conforme a posição radial aumenta, refletindo a maturidade cambial.

Figura 18 - Variação do comprimento das fibras ao longo do raio



Fonte: Elaboração própria.

Esse comportamento está amplamente documentado na literatura anatômica da madeira. Segundo Foelkel *et al.* (1971) e Zobel e Van Buijtenen (1989), o alongamento das fibras ao longo do raio é um reflexo da maturação do câmbio vascular, resultando em células mais longas e bem formadas nas regiões mais externas da tora. Esta variação também está associada ao grau de maturidade da madeira, ou seja, a madeira juvenil (próxima à medula) tende a apresentar fibras mais curtas do que a madeira adulta (mais próxima da casca).

A espécie de *Calophyllum brasiliense* apresenta a menor média de comprimento de fibras entre as espécies, mesmo nas posições mais periféricas, com valores variando aproximadamente de 0,85 a 1,30 mm. Esses resultados estão em conformidade com Monteiro *et al.* (2018) e Bassa *et al.* (2005), que indicam comprimentos entre 0,95 a 1,25 mm para esta espécie. O crescimento é discreto e

relativamente linear, o que sugere uma baixa plasticidade cambial e uma menor diferenciação estrutural ao longo do raio.

Cariniana legalis exibe fibras mais longas em toda a extensão radial, especialmente a partir da posição 4, alcançando médias superiores a 1,80 mm. A amplitude de variação e o crescimento ao longo do raio estão de acordo com os dados de Pereira *et al.* (2000), que apontam fibras entre 1,30 a 1,65 mm. A maior variação nos desvios padrão indica uma heterogeneidade anatômica significativa ao longo do raio.

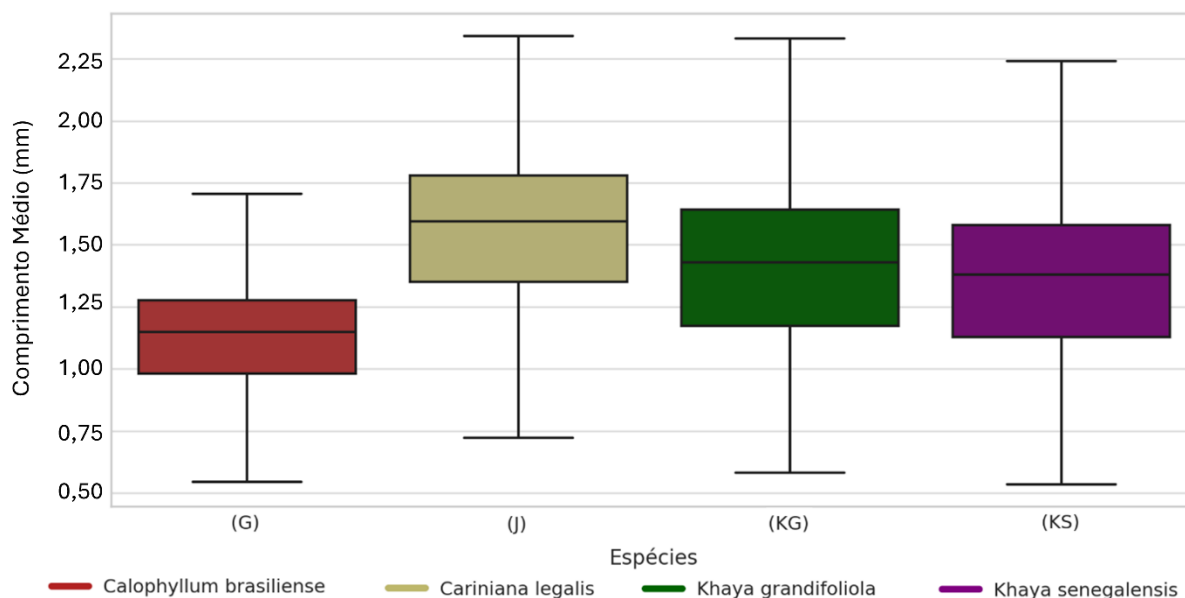
Já a *Khaya grandifoliola* apresenta um dos maiores comprimentos de fibras já nas primeiras posições, com um crescimento acentuado até alcançar valores superiores a 1,80 mm. Esse padrão confirma o alto potencial tecnológico da madeira desta espécie, como indicado por Kokutse *et al.* (2004) e Akinyemi *et al.* (2018), que observaram comprimentos entre 1,25 mm e 1,55 mm. A progressão contínua indica boa atividade cambial e formação de madeira adulta de alta qualidade.

Khaya senegalensis apresenta comportamento semelhante ao de *K. grandifoliola*, embora com um crescimento radial mais gradual. Os comprimentos finais se aproximam de 1,80 mm, estando bem alinhados com os dados de Silva *et al.* (2020) e Akinyemi *et al.* (2018) (1,20 mm a 1,50 mm). O perfil homogêneo sugere uma estrutura bem-organizada e um câmbio eficiente, ideal para aplicações que exigem resistência mecânica e estabilidade dimensional.

A variação do comprimento das fibras ao longo do raio é um indicativo anatômico e funcional do estágio de maturação da madeira. Espécies como *Khaya grandifoliola* e *Cariniana legalis* demonstram desempenho superior, com fibras longas e desenvolvimento contínuo, o que as torna particularmente adequadas para uso estrutural e em polpa de celulose de alto rendimento.

As espécies também foram analisadas separadamente, permitindo uma comparação visual das variações ou semelhanças nas distribuições do comprimento das fibras, como ilustra a Figura 19.

Figura 19 - Comprimento das fibras entre as espécies



Fonte: Elaboração própria.

A análise do comprimento médio das fibras ao longo do raio demonstrou variação significativa entre as espécies de madeira avaliadas. *Calophyllum brasiliense* apresentou os menores valores, com crescimento discreto e linear, evidenciando baixa diferenciação anatômica e confirmando dados da literatura (Monteiro *et al.*, 2018; Bassa *et al.*, 2005). Em contraponto, *Cariniana legalis* e *Khaya grandifoliola* exibiram incrementos expressivos ao longo das posições radiais, com médias que ultrapassam 1,80 mm, denotando alta atividade cambial e heterogeneidade estrutural (Pereira *et al.*, 2000; Kokutse *et al.*, 2004). *Khaya senegalensis*, embora com crescimento mais gradual, também atingiu altos valores, refletindo organização anatômica eficiente (Silva *et al.*, 2020). Esses resultados reforçam o uso potencial das espécies do gênero *Khaya* e de *Cariniana legalis* em aplicações que exigem fibras longas, como celulose e componentes estruturais.

5.2 Análise da Caracterização Tecnológica das Espécies

A Tabela 2 apresenta o conjunto dos resultados médios obtidos na caracterização tecnológica das quatro espécies de madeira avaliadas. Os dados englobam propriedades químicas, físicas e mecânicas que, em conjunto, fornecem uma visão abrangente do comportamento tecnológico das madeiras estudadas.

No bloco de propriedades químicas, estão reunidos os teores de extrativos, lignina, holocelulose e cinzas. Estes parâmetros, além de influenciarem processos como secagem, colagem e acabamento, também têm papel relevante na durabilidade natural das madeiras. Assim, variações entre espécies podem indicar potenciais vantagens ou limitações de cada material em determinadas aplicações.

As propriedades físicas contemplam a densidade básica (ρ_{bas}) e os coeficientes de retratibilidade (tangencial, radial, longitudinal e volumétrica), bem como o coeficiente de anisotropia (CA). Esses indicadores estão diretamente associados à estabilidade dimensional das madeiras frente a variações de umidade, sendo críticos para seu desempenho em produtos sujeitos a ciclos de secagem e umedecimento. A inclusão do CA, por exemplo, facilita a avaliação comparativa entre espécies, uma vez que valores reduzidos estão vinculados a maior estabilidade dimensional.

No que se refere às propriedades mecânicas, são apresentados os módulos de elasticidade e resistência tanto para a flexão estática quanto para a compressão paralela às fibras. Tais parâmetros expressam a capacidade da madeira em resistir a esforços estruturais, fornecendo subsídios para sua aplicação em elementos construtivos e em produtos que demandam resistência à deformação. A análise simultânea desses valores permite verificar não apenas a rigidez, mas também a resistência máxima suportada por cada espécie.

Além dos valores médios, a tabela apresenta as letras do teste de Tukey ($p \leq 0,05$), que permitem identificar diferenças estatisticamente significativas entre as espécies para cada propriedade analisada. Essa informação é essencial para destacar contrastes de desempenho que não seriam evidenciados apenas pela observação das médias. Em complemento, os coeficientes de variação (CV) fornecem uma medida da dispersão relativa dos dados, indicando o grau de precisão e confiabilidade das estimativas obtidas.

Tabela 2 - Resultados médios obtidos da caracterização tecnológica da madeira por espécies

TABELA DOS RESULTADOS														
	Propriedade Química				Propriedade Mecânica				ρ_{bas} (g/cm ³)	Propriedade Física				CA
					Flexão		Compressão paralela às Fibras			Estabilidade Dimencional				
	E (%)	L (%)	H (%)	Cz (%)	E _{M0} (MPa)	f _{M0} (MPa)	E _{CO} (MPa)	f _{CO} (MPa)		β_{It} (%)	β_{Ir} (%)	β_{Il} (%)	β_v (%)	
<i>Calophyllum brasiliense</i>	5,26 ^a	28,32 ^a	68,47 ^a	0,94 ^a	8329 ^a	62,2 ^a	9353 ^a	50,3 ^a	0,604 ^a	6,4 ^a	2,8 ^a	0,3 ^a	9,25 ^a	2,29 ^a
CV	19,16	7,25	3,45	28,49	17,51	28,28	14,40	8,29	16,50	24,93	19,91	19,96	18,68	12,87
<i>Cariniana legalis</i>	8,75 ^b	25,85 ^a	68,56 ^a	1,76 ^b	7811 ^a	72,2 ^a	8462 ^a	50,6 ^a	0,580 ^a	5,9 ^a	3,5 ^b	0,2 ^a	9,9 ^a	1,72 ^a
CV	16,95	5,11	5,58	25,18	11,62	18,88	16,49	3,80	13,25	8,75	10,00	40,02	4,78	14,05
<i>Khaya grandifoliola</i>	7,88 ^b	18,44 ^b	68,77 ^a	0,54 ^a	11828 ^b	94,2 ^b	11756 ^b	59,2 ^b	0,506 ^a	7,0 ^a	4,7 ^c	0,8 ^a	11,7 ^b	1,55 ^a
CV	15,48	23,53	5,07	12,54	8,18	11,75	12,07	10,19	8,11	26,06	11,11	39,76	15,18	23,97
<i>Khaya senegalensis</i>	10,6 ^c	19,96 ^b	64,15 ^a	1,44 ^b	7433 ^a	77,5 ^a	7458 ^a	47,2 ^a	0,567 ^a	6,5 ^a	4,7 ^c	0,2 ^a	11,6 ^b	1,40 ^a
CV	18,04	6,03	11,10	26,83	13,23	7,49	5,59	9,35	5,26	15,05	6,60	43,62	12,71	14,51

Propriedade Química = E: Teor de Extrativos (%); L: Teor de Lignina (%); H: Teor de Holocelulose (%); Cz: Teor de Cinzas (%).

Propriedades Mecânicas = E_{M0}: Módulo de Elasticidade na Flexão (MPa); f_{M0}: Tensão Máxima na Flexão (MPa); E_{CO}: Módulo de Elasticidade na Compressão Paralelas às Fibras (MPa); f_{CO}: Tensão Máxima na Compressão Paralela às Fibras (MPa).

Propriedade Física = ρ_{bas} : Densidade básica (g/cm³); β_{It} : retração linear tangencial (%); β_{Ir} : retração linear radial (%); β_{Il} : retração linear longitudinal (%); β_v : retração volumétrica (%) e CA: Coeficiente de Anisotropia; CA: 1,2 a 1,5 (ótimo); 1,6 a 1,9 (bom); > 2,0 (ruim).

CV: Coeficiente de variação (%).

Médias seguidas por letras iguais na mesma coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância ($p \leq 0,05$).

5.2.1 Propriedades Químicas

A análise das propriedades químicas evidenciou diferenças significativas entre as espécies, destacando particularidades importantes para o desempenho tecnológico e a durabilidade natural da madeira.

Os teores de extrativos apresentaram diferenças significativas ($p < 0,05$), sendo maiores em *Khaya senegalensis* (10,6%), seguida por *Cariniana legalis* (8,75%) e *Khaya grandifoliola* (7,88%), enquanto *Calophyllum brasiliense* apresentou os menores valores (5,26%). Esses resultados indicam que *Khaya senegalensis* e *Cariniana legalis* se destacam pelo maior acúmulo de compostos secundários, como taninos e resinas, que aumentam a resistência natural ao ataque biológico, mas podem prejudicar processos industriais, como colagem e secagem (Pereira *et al.*, 2003; Hill, 2006).

Quanto à lignina, também houve diferença significativa entre as espécies ($p < 0,05$), com destaque para *Calophyllum brasiliense* (28,32%) e *Cariniana legalis* (25,85%), que apresentaram valores superiores em relação às espécies do gênero *Khaya*. Esse resultado está em consonância com a literatura, que associa a lignina à maior rigidez, estabilidade dimensional e resistência ao ataque biológico (Fengel e Wegener, 1989).

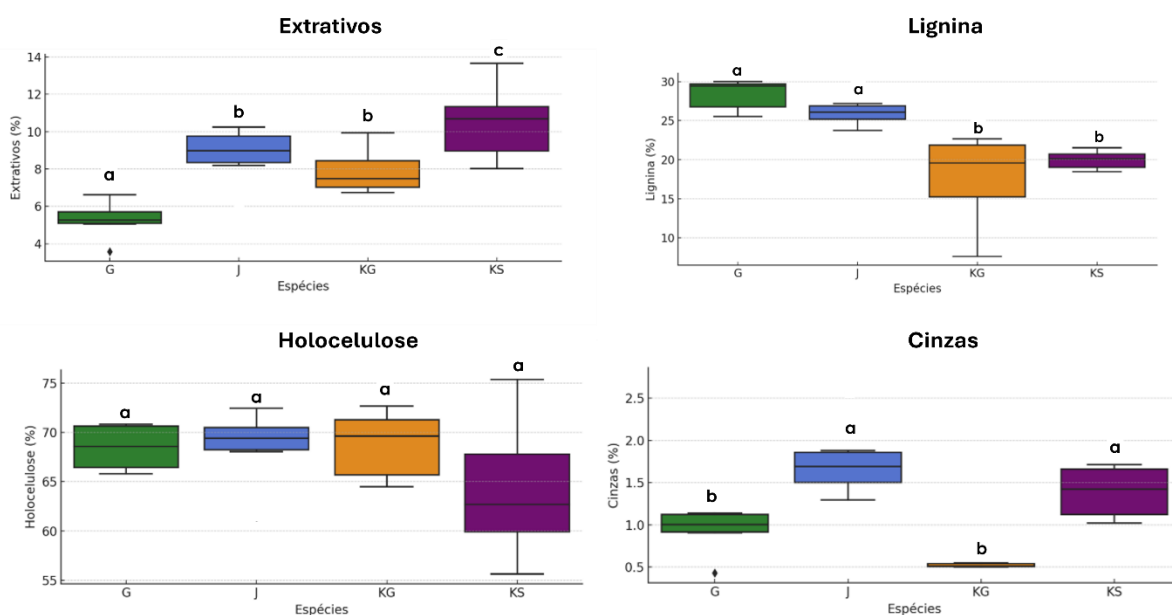
Para a holocelulose, não houve diferença estatística significativa entre as espécies ($p > 0,05$), com valores variando de 64,15% a 68,77%. A estabilidade desse parâmetro indica proporções semelhantes de celulose e hemiceluloses, componentes essenciais para a resistência mecânica e a estabilidade estrutural (Sjöström, 1992).

No caso do teor de cinzas, verificou-se diferença significativa ($p < 0,05$), sendo mais elevado em *Cariniana legalis* (1,76%) e *Khaya senegalensis* (1,44%), seguido de *Calophyllum brasiliense*, enquanto *Khaya grandifoliola* apresentou o menor valor. Esse comportamento indica maior concentração de minerais em *Cariniana legalis* e *Khaya senegalensis*, o que pode provocar desgaste de ferramentas e incrustações em fornos industriais (Castro, 2011; Silva, 2020).

De forma integrada, os resultados demonstram que extrativos, lignina e cinzas diferiram estatisticamente entre as espécies, enquanto a holocelulose permaneceu estável, reforçando que cada componente químico exerce influência distinta no desempenho tecnológico das madeiras estudadas.

O gráfico da Figura 20 apresenta a distribuição dos principais componentes químicos entre os indivíduos das quatro espécies analisadas, com a indicação das diferenças significativas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Figura 20 - Boxplot da Propriedade Química das Espécies de Madeira



Fonte: Elaboração própria.

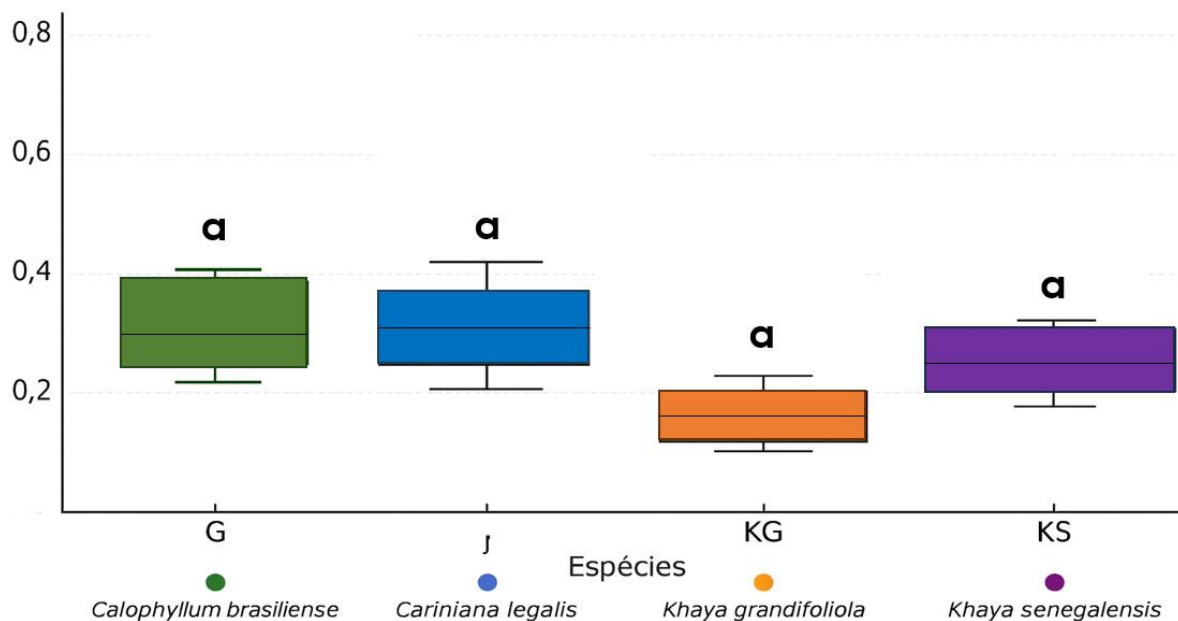
5.2.2 Propriedades Físicas

A caracterização física das espécies revelou diferenças relevantes em densidade, retratilidade e estabilidade dimensional, aspectos fundamentais para compreender seu desempenho tecnológico e aplicações potenciais.

A densidade básica (ρ_{bas}) variou de 0,506 a 0,604 g/cm³, sem diferença estatística significativa entre as espécies ($p > 0,05$). Apesar dessa proximidade, a literatura destaca que variações anatômicas e na proporção de tecidos impactam diretamente no desempenho físico e mecânico (Glass e Zelinka, 2010; Lima *et al.*, 2021). Nesse contexto, *Cariniana legalis* (J) apresentou a maior densidade básica, característica que confere maior resistência e rigidez, enquanto *Khaya grandifoliola* (KG) registrou a menor densidade, indicando madeira mais leve, de fácil usinagem, porém menos resistente. *Calophyllum brasiliense* (G) e *Khaya senegalensis* (KS) situaram-se em valores intermediários, conciliando boa trabalhabilidade e desempenho físico satisfatório.

O gráfico da Figura 21 apresenta a variação da densidade entre os indivíduos das quatro espécies avaliadas, evidenciando diferenças no comportamento físico, tanto na uniformidade quanto na leveza ou robustez dos materiais.

Figura 21 - Boxplot da Densidade Básica das Espécies de Madeira

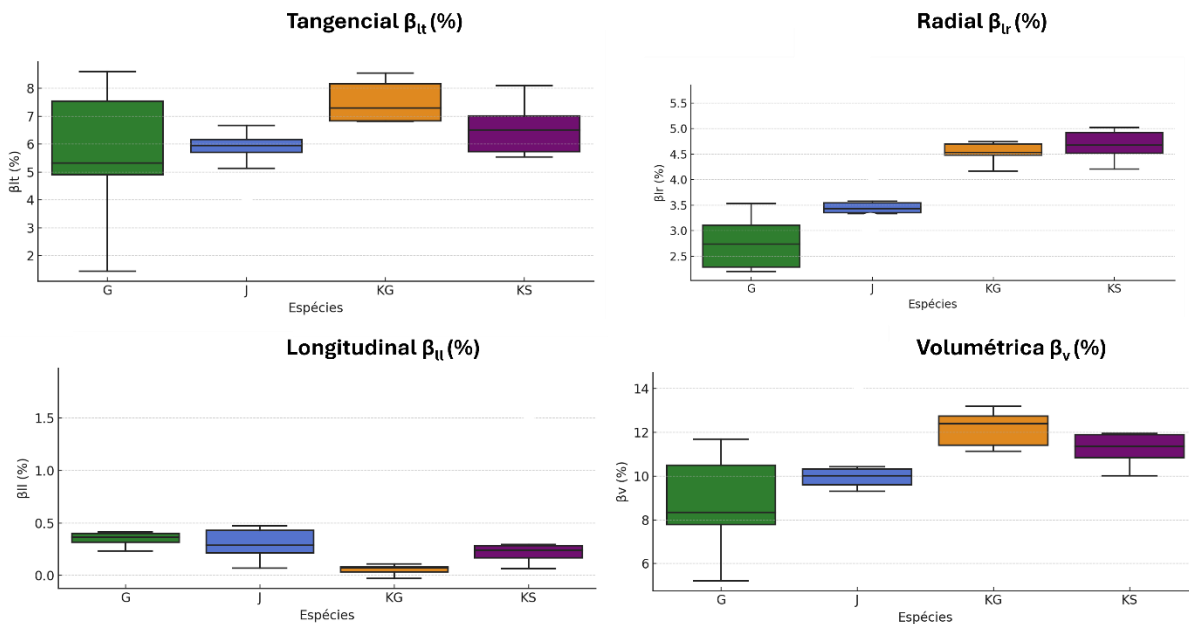


Fonte: Elaboração própria.

A retratibilidade evidenciou diferenças significativas entre as espécies ($p < 0,05$). Os maiores valores de retração tangencial (β_{lt}) e radial (β_{lr}) foram observados em *Khaya grandifoliola* (KG) (7,0% e 4,7%) e *Khaya senegalensis* (KS) (6,5% e 4,7%), resultando também em maiores valores de retração volumétrica (β_v : 11,7% e 11,6%, respectivamente). Esses resultados indicam maior susceptibilidade dessas espécies às variações dimensionais frente a mudanças de umidade, exigindo maior cuidado nos processos de secagem e aplicação em ambientes sujeitos a variações higroscópicas. Em contrapartida, *Calophyllum brasiliense* (G) apresentou menores valores de retração radial e volumétrica, evidenciando maior estabilidade dimensional, enquanto *Cariniana legalis* (J) manteve valores intermediários, próximos aos de *Calophyllum brasiliense* (G).

O gráfico da Figura 22 ilustra a distribuição da retratibilidade entre as espécies.

Figura 22 - Boxplot da Retradibilidade das Espécies de Madeira



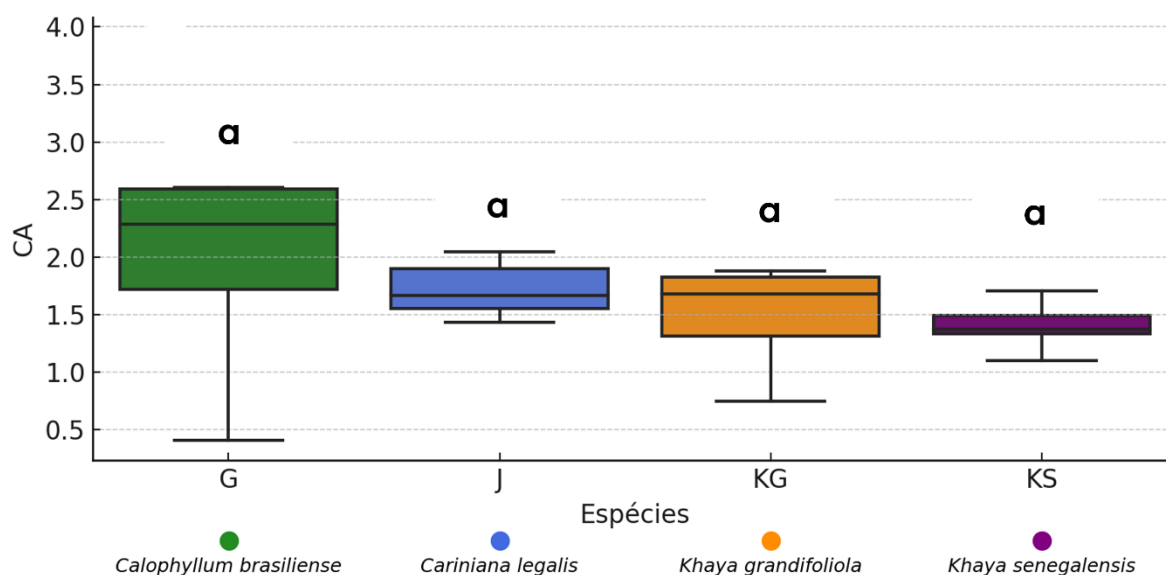
Fonte: Elaboração própria.

Já para o coeficiente de anisotropia (CA) não houve diferença estatística significativa entre as espécies ($p > 0,05$). Apesar disso, os valores indicam que os melhores resultados foram observados nos gêneros de *Khaya* (KS e KG) 1,40 e 1,55 respectivamente, classificados como “ótimos” e indicativos de alta estabilidade dimensional. A espécie de *Cariniana legalis* (J) apresentou valor considerado “bom” (1,72), enquanto *Calophyllum brasiliense* (G) alcançou o maior CA (2,29), classificado como “ruim”, sugerindo maior propensão a defeitos como empenamento e rachaduras quando submetido a variações ambientais (Glass e Zelinka, 2010; Lima *et al.*, 2021).

De forma integrada, os resultados confirmam que as espécies do gênero *Khaya* apresentam maior movimentação dimensional, mas *Khaya senegalensis* (KS) se destaca pela estabilidade relativa (baixo CA), enquanto *Khaya grandifoliola* (KG) combina baixa densidade com boa trabalhabilidade. Já *Cariniana legalis* (J) confirma sua aptidão para usos estruturais de maior exigência, em razão da densidade mais elevada e da estabilidade moderada. E *Calophyllum brasiliense* (G), embora apresente menor desempenho físico, pode ser aproveitada em aplicações menos críticas, como mobiliário, revestimentos e usos internos.

O gráfico da Figura 23 apresenta a variação do Coeficiente de Anisotropia (CA) entre as espécies, com indicação das diferenças significativas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Figura 23 - Boxplot do Coeficiente de Anisotropia das Espécies de Madeira



Fonte: Elaboração própria.

5.2.3 Propriedades Mecânicas

A flexão estática foi avaliada por meio do módulo de elasticidade (E_{M0}) e da resistência à flexão (f_{M0}). Esses parâmetros são fundamentais para caracterizar a rigidez da madeira e sua capacidade de suportar esforços transversais antes da ruptura (Glass e Zelinka, 2010; Lima *et al.*, 2021).

Os resultados demonstraram diferenças significativas entre as espécies ($p < 0,05$). *Khaya grandifoliola* (KG) apresentou os maiores valores ($E_{M0} = 11.828$ MPa; $f_{M0} = 94,2$ MPa), confirmando sua superioridade em rigidez e resistência, associada à elevada densidade e à predominância de fibras de paredes espessas (Kokutse *et al.*, 2004).

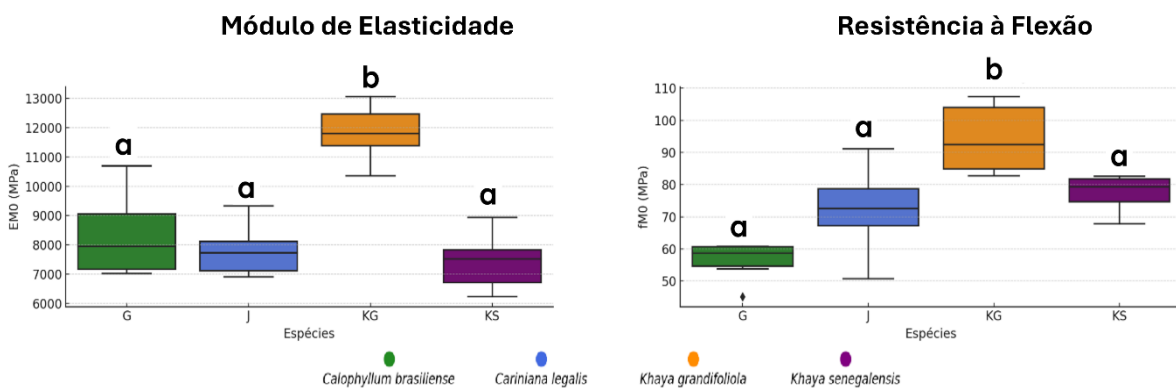
Khaya senegalensis (KS) apresentou valores intermediários, porém superiores aos de *Cariniana legalis* (J) e *Calophyllum brasiliense* (G), destacando-se pela resistência à flexão ($f_{M0} = 77,5$ MPa). Esse desempenho indica viabilidade para aplicações estruturais de média exigência (Silva *et al.*, 2020).

Cariniana legalis (J) apresentou resultados moderados ($E_{M0} = 7.811$ MPa; $f_{M0} = 72,2$ MPa), adequados para usos semi-estruturais (Pereira *et al.*, 2000).

Calophyllum brasiliense (G) obteve os menores valores ($E_{M0} = 8.329$ MPa; $f_{M0} = 62,2$ MPa), restringindo-se a aplicações menos exigentes, como móveis leves e componentes internos (Monteiro *et al.*, 2018).

A tendência observada confirma a correlação positiva entre densidade e desempenho mecânico, reforçando o uso preferencial de *Khaya grandifoliola* (KG) em estruturas de maior exigência. A Figura 24 apresenta os *boxplots* do módulo de elasticidade (E_{M0}) e resistência à flexão (f_{M0}), com indicação das diferenças significativas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Figura 24 - Boxplot da Flexão das Espécies de Madeira



Fonte: Elaboração própria.

Já para a compressão paralela às fibras foi avaliada por meio do módulo de elasticidade (E_{C0}) e da resistência à compressão (f_{C0}), propriedades que refletem a capacidade da madeira em suportar esforços aplicados no sentido longitudinal, típicos em peças estruturais.

As análises revelaram diferenças significativas entre as espécies ($p < 0,05$). *Khaya grandifoliola* (KG) novamente se destacou, com os maiores valores ($E_{C0} = 11.756$ MPa; $f_{C0} = 59,2$ MPa), além de baixa variabilidade, confirmando consistência no desempenho mecânico (Kokutse *et al.*, 2004).

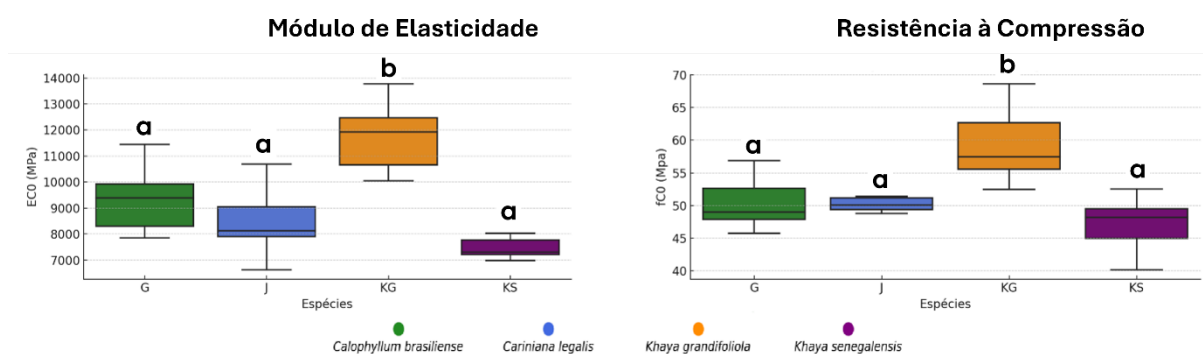
Cariniana legalis (J) e *Calophyllum brasiliense* (G) apresentaram valores intermediários de E_{C0} (8.462 e 9.353 MPa, respectivamente) e resistências próximas ($f_{C0} = 50,6$ e 50,3 MPa), evidenciando comportamento satisfatório para usos de média exigência estrutural (Pereira *et al.*, 2000; Monteiro *et al.*, 2018).

Khaya senegalensis (KS) obteve os menores valores de E_{C0} e f_{C0} (7458 MPa e 47,2 MPa), revelando menor rigidez e resistência, ainda que com baixa dispersão nos

resultados de resistência, o que indica homogeneidade no desempenho (Silva *et al.*, 2020).

Os resultados de compressão corroboram a relação direta entre densidade, estrutura anatômica (predomínio de fibras) e desempenho mecânico (Glass e Zelinka, 2010; Lima *et al.*, 2021). A Figura 25 apresenta os *boxplots* de módulo de elasticidade (E_{CO}) e resistência à compressão (f_{CO}), com indicação das diferenças significativas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Figura 25 - *Boxplot* da Compressão Paralelas às Fibras das Espécies de Madeira



Fonte: Elaboração própria.

De forma geral, a comparação entre os resultados das propriedades mecânicas evidencia a superioridade de *Khaya grandifoliola* (KG) em ambos os esforços, flexão e compressão paralela às fibras, consolidando-a como a espécie de maior potencial para aplicações estruturais de alta exigência. *Khaya senegalensis* (KS) apresentou desempenho intermediário, com destaque para a flexão, sendo indicada para estruturas de média exigência. *Cariniana legalis* (J) obteve valores consistentes, embora inferiores aos das espécies do gênero *Khaya*, configurando-se como alternativa viável para usos semi-estruturais. Já *Calophyllum brasiliense* (G) apresentou os menores valores nos dois ensaios, restringindo seu uso a aplicações de menor exigência mecânica.

6 CONCLUSÃO

Este estudo confirmou que a caracterização tecnológica das madeiras de *Calophyllum brasiliense*, *Cariniana legalis*, *Khaya grandifoliola* e *Khaya senegalensis*, provenientes de plantios comerciais e colhidas em idades compatíveis com o uso industrial, atendeu plenamente ao objetivo geral proposto, reunindo evidências consistentes que fundamentam seu aproveitamento na construção civil e na indústria madeireira de maior valor agregado.

No aspecto físico, *Khaya grandifoliola* e *Khaya senegalensis* demonstraram maior estabilidade dimensional, evidenciada pelos menores coeficientes de anisotropia e retrações mais moderadas, configurando-se como madeiras confiáveis para aplicações internas e estruturais leves, em que a estabilidade frente às variações higroscópicas é determinante. *Calophyllum brasiliense*, por sua vez, apresentou maior suscetibilidade às variações dimensionais, exigindo maior controle em processos de secagem e uso em ambientes sujeitos à oscilação de umidade. Já *Cariniana legalis* mostrou comportamento intermediário, com estabilidade razoável, embora inferior às espécies do gênero *Khaya*.

Quanto ao desempenho mecânico, *Khaya grandifoliola* destacou-se pelos mais elevados valores de resistência à flexão e à compressão, além de módulo de elasticidade superior, consolidando-se como espécie de alto desempenho para aplicações estruturais de maior exigência. *Khaya senegalensis* apresentou desempenho intermediário, adequado a usos moderadamente estruturais. *Cariniana legalis* e *Calophyllum brasiliense* revelaram resistência satisfatória para aplicações de menor exigência, como elementos secundários, mobiliário e acabamentos internos.

As análises químicas evidenciaram diferenças significativas nos teores de extrativos, lignina, holocelulose e cinzas. O teor elevado de extrativos em *Khaya senegalensis* pode representar desafios industriais nos processos de acabamento e colagem. Já o maior teor de lignina em *Calophyllum brasiliense* está associado a maior rigidez e durabilidade natural, embora possa limitar sua trabalhabilidade. Esses resultados reforçam que, além do desempenho físico e mecânico, as particularidades químicas devem ser consideradas no planejamento do uso industrial de cada espécie.

A caracterização anatômica e a análise do comprimento das fibras complementaram a avaliação tecnológica. *Khaya grandifoliola* e *Cariniana legalis* apresentaram fibras mais longas, favorecendo maior resistência mecânica e indicando

potencial para produção de celulose de alto rendimento. Em contraste, *Calophyllum brasiliense* apresentou fibras mais curtas e menor plasticidade cambial, limitando seu uso em aplicações estruturais de alta performance, mas ainda viável para usos de menor exigência tecnológica.

Portanto, conclui-se que todas as espécies estudadas possuem potencial de aproveitamento industrial, cada qual com suas especificidades. *Khaya grandifoliola* e *Khaya senegalensis* se mostram promissoras para aplicações estruturais e tecnológicas de maior demanda, enquanto *Calophyllum brasiliense* e *Cariniana legalis* podem atender eficientemente demandas menos rigorosas, como mobiliário, painéis e componentes internos.

Dessa forma, este trabalho reforça a importância da diversificação da base florestal plantada no Brasil, oferecendo informações técnicas que subsidiam decisões estratégicas, fomentam cadeias produtivas mais sustentáveis e contribuem para a redução da pressão sobre florestas nativas, posicionando as espécies estudadas como alternativas viáveis no caminho rumo a um futuro ambientalmente responsável e economicamente competitivo.

6.1 Considerações Finais

Embora este trabalho tenha alcançado plenamente o objetivo de caracterizar tecnologicamente as madeiras de *Calophyllum brasiliense*, *Cariniana legalis*, *Khaya grandifoliola* e *Khaya senegalensis*, os resultados também abrem espaço para novas frentes de investigação que podem complementar e ampliar as contribuições aqui apresentadas.

No âmbito anatômico, estudos mais detalhados da espessura das paredes celulares de fibras e vasos, assim como da área dos elementos vasculares, poderiam refinar a compreensão da relação entre estrutura microscópica e desempenho físico-mecânico, fortalecendo o elo entre anatomia e tecnologia da madeira.

Quanto ao aprimoramento tecnológico, a aplicação de processos de termorretificação se apresenta como alternativa promissora para aumentar a estabilidade dimensional, a durabilidade natural e a resistência biológica das espécies, tornando-as mais competitivas para usos externos e de maior exigência.

Em relação às propriedades mecânicas, recomenda-se a realização de ensaios adicionais, como o ensaio de tração paralela às fibras, que permitiria avaliar a resistência à ruptura e o alongamento sob esforço longitudinal, fornecendo parâmetros ainda mais completos para o dimensionamento estrutural.

Por fim, no campo da química da madeira, sugere-se a realização de diferentes cozimentos para obtenção de celulose, a fim de avaliar o rendimento, a qualidade da polpa e o potencial de aplicação industrial, especialmente para espécies que apresentaram fibras mais longas e, portanto, maior aptidão para esse fim.

Essas propostas visam não apenas complementar os resultados obtidos, mas também fortalecer a base de conhecimento científico sobre as espécies analisadas, oferecendo novos subsídios técnicos que podem ampliar as possibilidades de aproveitamento industrial e consolidar o papel dessas madeiras na diversificação da base florestal plantada no Brasil.

REFERÊNCIAS

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11941: Madeira: determinação da densidade básica**. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190. Projeto de Estruturas de madeira – Anexo B**. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.
- AKINYEMI, A. B., *et al.* **Wood properties of *Khaya* species in Nigeria**. International Journal of Forestry Research. 2018
- ALMEIDA, A. S. *et al.* **Madeira engenheirada: potencial para a construção de estruturas sustentáveis**. 2022. Disponível em: <https://www.inbec.com.br>. Acesso em: 12 nov. 2024.
- BASSA, A. G. M., *et al.* **Propriedades físico-mecânicas da madeira de *Calophyllum brasiliense***. Cerne. 2005.
- BAUER, L. A. F. **Materiais de Construção**. v. 2. 5. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos Científicos, 2010.
- BRACELPA - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CELULOSE E PAPEL. **M-3/69: Preparação de madeira livre de extrativos**. São Paulo, 1974a.
- BUSNARDO, C. A.; GONZAGA, J. V.; FOELKEL, C. E. B.; MENOCELLI, S.; RIOCELL, S. A. **Em Busca da Qualidade Ideal da Madeira de Eucalipto para Produção de Celulose. VI Altura Ideal de Amostragem para Avaliação da Densidade Média para Árvores de *Eucalyptus grandis***. In: CONGRESSO ANUAL DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CELULOSE E PAPEL, São Paulo, 1987. Anais... São Paulo: ABCP, 1987. p. 17-33.
- BUXBAUM, J.; GORMAN, S. **Wood: An Essential Material for Sustainable Construction**. Journal of Sustainable Building, v. 14, n. 2, p. 45-58, 2015.
- CALIL, C. J. **Estrutura de Madeira. Escola de Engenharia de São Carlos (Notas de Aula)**. Publicações EESC/USP. São Carlos, 1998.
- CALIL, C. J.; LAHR, F. A. R.; DIAS, A. A. **Dimensionamento de Elementos Estruturais de Madeira**. São Carlos: Editora Manole, 2003.
- CASTRO, J. A. **A carbonização da madeira e seus efeitos na produção de carvão vegetal**. São Paulo: Editora XYZ, 2011.
- CHABANNES, B.; LACROIX, M.; LEMEE, L. **Lignin: properties, production and applications**. Paris: Éditions Techniques, 2001.
- CHATTAWAY, M. M. **Crystals in hardwoods**. Tropical Woods, 102, 55–74, 1955.

- CORREIA, S. E. **Análise e Dimensionamento de Estruturas de Madeira**. 2009. 163 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade do Porto, Porto, 2009.
- COSTA, C. G.; CALLADO, C. H.; CORADIN, V. T. R.; GUERREIRO, S. M. C. **Anatomia Vegetal**. Livro: 5. Xilema. Universidade Federal de Viçosa, 2003.
- COSTA, J. F. *et al.* **Produção de biocombustíveis a partir de holocelulose da madeira: desafios e perspectivas**. Revista Brasileira de Bioenergia, v. 15, n. 3, p. 105-118, 2021.
- COSTA, J. P. **Composição química e propriedades dos extrativos da madeira**. Revista Brasileira de Química, v. 52, n. 3, p. 55-68, 2019.
- CRUZ, H.; NUNES, L. **A madeira como material de construção. Núcleo de Estruturas de Madeira**. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2005.
- FENGEL, D.; WEGENER, G. **Wood: Chemistry, Ultrastructure, Reactions**. Walter de Gruyter, 1984.
- FENGEL, D.; WEGENER, G. **Wood: chemistry, ultrastructure, reactions**. Berlin: Walter de Gruyter, 1989.
- FERRAZ, A.; BUENO, J. L.; BIANCHI, M. L. **Lignina como matéria-prima para adesivos sustentáveis: avanços e perspectivas**. Revista Árvore, v. 42, n. 2, p. e420208, 2018.
- FERREIRA, R. C. *et al.* **Efeitos do teor de cinzas sobre a qualidade do papel produzido a partir de diferentes tipos de madeira**. Revista Brasileira de Papel e Celulose, v. 40, n. 2, p. 120-133, 2018.
- FLORA DO BRASIL. Disponível em:
<http://floradobrasil.jbrj.gov.br/reflora/listaBrasil/PrincipalUC/PrincipalUC.do?lingua=pt#CondicaoTaxonCP>. Acesso em: 22 maio 2023.
- FOELKEL, C. E. B.; BRASIL, M. A. M.; BARRICHELO, L. E. G. **Métodos para determinação da densidade básica de cavacos para coníferas e folhosas**. IPEF, Piracicaba, n. 2/3, p. 65-74, 1971.
- 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, 1945.
- GLASS, S. V.; ZELINKA, S. L. **Moisture relations and physical properties of wood**. In: *Wood handbook: wood as an engineering material*. Madison: Forest Products Laboratory. p. 4.1–4.19, 2010.
- GOMES, D. F. *et al.* **Aproveitamento das cinzas da madeira em processos industriais: aplicações e desafios**. *Journal of Forest Biomaterials*, v. 22, n. 4, p. 88-101, 2021.

GOMIDE, J. L. **A lignina na indústria de celulose e papel**. São Paulo: Editora Técnica, 2006.

GOMIDE, J. L.; DEMUNER, B. J. **Determinação do teor de lignina em material lenhoso: método Klason modificado**. *O Papel*, v. 47, n. 8, p. 36-38, 1986.

HELLMEISTER, J. C. **Madeira e suas características**. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, São Carlos, 1983. Anais... São Carlos: USP, EESC, SET, LAMEM. v. 1, p. 37-42.

HILL, C. A. S. **Wood modification: chemical, thermal and other processes**. John Wiley e Sons, 2006.

HILLIS, W. E. **Drying of wood**. New York: Springer-Verlag, 1987.

IAWA - INTERNATIONAL ASSOCIATION OF WOOD ANATOMISTS. **List of microscopic features for hardwood identification**. *IAWA Bulletin*, Leiden, v. 10, n. 3, p. 219-332, 1989.

IBÁ: INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório Anual de Florestas Plantadas 2023**. Brasília, 91 p. Disponível em: <https://www.iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-anual-iba2023-r.pdf>. Acesso em: 16 set. 2024.

INBEC. **História e evolução de materiais como concreto, aço e madeira**. Pós-Graduação - Especialização em Engenharia, Arquitetura, 2022. Disponível em: <https://www.inbec.com.br>. Acesso em: 12 nov. 2024.

IPT - INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Catálogo de madeiras brasileiras para a construção civil**. São Paulo: IPT, 103 p, 2013.

IPT - INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Madeira: uso sustentável na construção civil**. 2. ed. São Paulo: IPT, 99 p, 2009.

KLOCK, U.; MUÑIZ, G. I. B.; HERNANDEZ, J. A.; ANDRADE, A. S. **Química da madeira**. 3. ed. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2005.

KOKUTSE, A. D. *et al.* **Properties of Khaya grandifoliola wood: Relationship between growth conditions and mechanical properties**. *Journal of Tropical Forest Science*. v. 16, n. 3, p. 435–446, 2004.

KRAUS, J. E.; ARDUIN, M. **Manual básico de métodos em morfologia vegetal**. Rio de Janeiro: EDUR, 1997. 198 p.

LEGGERINI, M. R. C. **Resistência dos materiais I**. 2007. p. 135. (Notas de aula) Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul – PUCRS. Faculdade de Engenharia. Departamento de Engenharia Civil, 2007.

LIMA, A. A. **Uso de sensoriamento remoto para a estimativa de biomassa em floresta plantada de *Pinus elliottii* var. *elliottii***. 2022. 97 f. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu-SP, 2022.

LIMA, J. T. *et al.* **Propriedades da madeira e suas aplicações**. Viçosa, MG: Editora UFV, 2021.

LOBÃO, M. S.; LUCIA, R. M. D.; MOREIRA, M. S. S.; GOMES, A. **Caracterização das propriedades físico-mecânicas da madeira de eucalipto com diferentes densidades**. *Revista Árvore*, Viçosa - MG, v. 28, n. 6, p. 889-894, 2004.

LOGSDON, N. B.; FINGER, Z.; ROSA, L. M. **Caracterização da madeira de cambará, *Vochysia guianensis* Aubl.** *Engenharia Civil*, Cuiabá, n. 29, p. 57-69, 2007.

LORENÇO, P. B.; BRANCO, J. M. **Dos abrigos da pré-história aos edifícios de madeira do século XXI**. História da construção – Arquiteturas e técnicas construtivas. Guimarães, p. 201-213, 2012.

MARTINS, A. L. **Fatores que influenciam o teor de cinzas da madeira e suas implicações na produção de energia**. *Energia Renovável*, v. 14, n. 3, p. 35-46, 2017.

MARTINS, F. R.; SANTOS, R. D.; FERREIRA, A. L. **A lignina e seu impacto nas propriedades mecânicas da madeira**. Belo Horizonte: Editora Florestal, 2020.

MENEZES, M. N.; LIMA, I. L. A.; e ALVES, E. S. **Anatomia da madeira de *Calophyllum brasiliense* em diferentes ambientes do bioma Mata Atlântica**. *Revista Árvore*, 38(2), 211–219, 2014.

METCALFE, C. R.; CHALK, L. **Anatomy of the Dicotyledons**. Oxford: Clarendon Press, 1950.

METCALFE, C. R.; CHALK, L. **Anatomy of the dicotyledons: wood structure and conclusion of the general introduction**. 2. ed. Oxford: Clarendon Press, 1983. v. 2.

MONTEIRO, T. C. *et al.* **Caracterização tecnológica da madeira de *Calophyllum brasiliense* Cambess**. *Floresta e Ambiente*, v. 25, n. 2, e20150085, 2018.

MORESCHI, J. C. **Propriedades tecnológicas da madeira**. 4. ed. Curitiba: Universidade Federal do Paraná – UFPR, 2012.

NBR 11941:2014. **Madeira – Determinação da holocelulose**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2014.

PANSHIN, W. R.; DE ZEEUW, C. **The hygroscopicity and dimensional stability of wood**. *Wood Science and Technology*, v. 14, n. 2, p. 45-58, 1980.

- PEREIRA, A. F. **Madeiras brasileiras – Guia de combinação e substituição**. São Paulo: Blücher, 2013.
- PEREIRA, H.; SILVA, M.; COSTA, A. **Propriedades da lignina e seu uso em energia e carvão vegetal**. Rio de Janeiro: Editora Universitária, 2012.
- PEREIRA, J. C. D. *et al.* **Qualidade da madeira de eucalipto para produção de celulose**. IPEF, v. 64, p. 35–55, 2003.
- PEREIRA, J. C. D.; BRAZOLIN, S.; BERGER, R. **Caracterização física e anatômica da madeira de jequitibá-rosa (*Cariniana legalis*) e suas relações com propriedades mecânicas**. Revista Árvore, v. 24, n. 4, p. 453–460, 2000.
- PEREIRA, L. M. **Inovações tecnológicas na produção de papéis e biomateriais derivados da holocelulose**. *Journal of Forest Science*, v. 48, n. 2, p. 45-59, 2022.
- PEREIRA, S. S. C. **Avaliação experimental das principais propriedades mecânicas de peças estruturais em madeira antiga**. 2009. 180 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade do Porto - Porto, 2009.
- SANTOS, T. A. *et al.* **Efeito dos extrativos da madeira sobre a resistência a pragas e decomposição**. *Ciência Florestal*, v. 28, n. 4, p. 543-558, 2020.
- SIAU, J. F. **Wood: influence of moisture on physical properties**. *Forest Products Journal*, v. 34, n. 2, p. 29-35, 1984.
- SILVA, J. M. *et al.* **Propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Khaya senegalensis* cultivada no Brasil**. Revista Árvore, v. 44, e4437, 2020.
- SILVA, J. P. **Influência do teor de cinzas da madeira na eficiência dos processos industriais**. *Ciência Florestal*, v. 30, n. 1, p. 50-62, 2020.
- SILVA, J. R.; ALMEIDA, P. A.; ZENID, G. J. **O uso da madeira na construção civil: características e aplicações**. *Revista Brasileira de Engenharia Civil*, v. 12, n. 1, 2022.
- SILVA, R. F. **A importância da holocelulose na indústria de papel e celulose: propriedades e aplicações**. *Ciência e Tecnologia da Madeira*, v. 22, n. 1, p. 25-33, 2019.
- SJÖSTRÖM, E. **Wood chemistry: fundamentals and applications**. 2. ed. San Diego: Academic Press, 1992.
- SOUZA, L. G. **Análise comparativa do custo de uma casa unifamiliar nos sistemas construtivos de alvenaria, madeira de lei e wood frame**. Especialize (IPOG). Florianópolis-SC, Instituto de Pós-graduação, 2012.

TAPPI - TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. **Acid insoluble lignin in wood and pulp**. Atlanta: 1999. Norma TAPPI T 222 om-83.

TAPPI - TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. **T 211 om-93: Preparação de amostras de madeira para análise de substâncias solúveis em álcool-benzeno**. 1993.

TAPPI - TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. **T 222 om-98: Preparation of wood for chemical analysis**. 1998.

TOMAZELLO FILHO, M.; GONÇALVES, F. G.; LATORRACA, J. V. F. **Avaliação da madeira de guanandi (*Calophyllum brasiliense*) para fins industriais**. *Cerne*, 14(2), 122–129, 2008.

ZANON, L. S. **Estudo do processo de extração e utilização de holocelulose para a produção de novos materiais**. *Química Verde*, v. 18, n. 4, p. 77-88, 2020.