



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE FLORESTAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL

BRUNO MAIA BARROSO BURNS

AVALIAÇÃO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA JOVEM DE *Khaya senegalensis* (Desr.) A. Juss. e *Khaya grandifoliola* C. DC.

Prof. Dr. ALEXANDRE MONTEIRO DE CARVALHO
Orientador

SEROPÉDICA, RJ
JULHO – 2024



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE FLORESTAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL

Bruno Maia Barroso Burns

AVALIAÇÃO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA JOVEM DE *Khaya senegalensis* (Desr.) A. Juss. e *Khaya grandifoliola* C. DC.

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Florestal, como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Florestal, Instituto de Florestas da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.

Prof. Dr. Alexandre Monteiro de Carvalho
Orientador

SEROPÉDICA, RJ
JULHO – 2024

AVALIAÇÃO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA JOVEM DE *Khaya senegalensis* (Desr.) A. Juss. e *Khaya grandifoliola* C. DC.

BRUNO MAIA BARROSO BURNS

APROVADA EM: 25/07/2024

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Alexandre Monteiro de Carvalho – UFRRJ
Orientador

Prof. Dr. Alexandre Miguel do Nascimento – UFRRJ
Membro

Prof. MSc. Rodrigo Octávio Pinto Borges – UFRRJ
Membro

Dedico a todos que fizeram parte da minha vida, principalmente aos familiares e amigos, os quais estiveram sempre me apoiando.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, por estar sempre me guiando ao longo de minha trajetória.

Gostaria de agradecer ao meu orientador, professor Alexandre Monteiro de Carvalho, por confiar no meu trabalho e acreditar no meu potencial, além de me instruir nesse processo como seu orientando, incentivando e auxiliando em meu desenvolvimento ao longo de minha trajetória acadêmica.

Agradeço aos meus pais Gerald e Marcia e também ao meu irmão Victor, por incentivarem e servirem de inspiração na minha vida.

Não poderia deixar de mencionar os meus companheiros de turma, em especial o Bernardo Coutinho, por estar sempre ao meu lado e pela sólida amizade que formamos. Também aos meus companheiros de república Gabriel Oki, João Victor, Diego Costa, Luan Figueroa e Pedro Lucas, pela convivência e acolhimento.

Com imensa gratidão, gostaria de mencionar a Gabriella Pereira por me encorajar, acompanhar e ter se tornado minha parceira.

Por fim, gostaria de agradecer a cada pessoa que tenha feito parte de minha vida, mesmo que de forma direta ou indireta.

RESUMO

O mogno africano é uma espécie nativa do continente africano que veio ao Brasil com intuito de substituir o mogno brasileiro. Apesar de possuir características semelhantes, a qualidade da madeira africana é diferente da brasileira, algumas características de suas espécies favorecem sua comercialização, como o crescimento no campo e formação de madeira mais acelerados. É estimado que no Brasil exista atualmente uma área de cinquenta mil hectares plantados com mogno africano, onde as maiores porções encontram-se nas regiões sudeste e centro-oeste. O estudo das propriedades da madeira é importante para determinar o destino final e uso da madeira. Através das propriedades mecânicas podemos determinar as resistências à diferentes esforços até o momento de ruptura, sua rigidez e deformação por meio de ensaios, como os que este estudo abordou: cisalhamento paralelo às fibras, flexão estática e compressão paralela às fibras. Portanto, mesmo tendo o conhecimento de que o mogno africano possui uma madeira de qualidade, o estudo de suas propriedades mecânicas faz-se necessário para determinar o seu uso, principalmente em estruturas. Desta forma o objetivo deste trabalho foi avaliar as propriedades mecânicas das espécies *Khaya senegalensis* e *Khaya grandifoliola* em plantios de 10 (*Khaya grandifoliola*) à 13 (*Khaya senegalensis*) anos. O material foi coletado em uma fazenda no município de Trancoso/BA, de propriedade da empresa Symbiosis Investimentos e Participações S.A.. Foram amostradas três árvores de cada espécie avaliada e de cada árvore, foram produzidos 2 corpos de provas para cada tipo de teste, totalizando 6 corpos de provas para cisalhamento; 6 corpos de provas para flexão estática e 6 corpos de provas para compressão. Foi avaliado que a espécie *Khaya senegalensis* apresentou propriedades mecânicas superiores a espécie *Khaya grandifoliola* e ambas mostraram resistências e rigidez (MOR e MOE) superiores do que algumas referências encontradas para o mogno brasileiro. Mesmo se tratando de indivíduos jovens as duas espécies obtiveram resultados satisfatórios com relação às propriedades avaliadas, indicando potencial de utilização, principalmente para fins estruturais leves como a fabricação de móveis por exemplo.

Palavras-chave: mogno africano; propriedades mecânicas da madeira; tecnologia da madeira; madeira para móveis.

ABSTRACT

The african mahogany is a native specie from the african continent, that came to Brazil to substitute the brazilian mahogany. Even having similar features, the african wood is different from the brazilian, some features improves the commercialization, like the growth in the field and the accelerated wood formation. It is estimated that in Brazil, nowadays, there is an area of fifty thousand hectares with african mahogany, and the biggest part is found at the southeast and mid-west regions. The study of wood properties is important to define the final destiny of the wood, because althrough its mechanical properties, we can determinate the resistance from different efforts until its rupture, its stiffness and deformation, through tests, like that study approached: shear parallel to the fibers tests, static flexion and compression parallel to the fibers tests. Therefore, even with knowing that the african mahogany has a great wood, the study of its mechanical properties is necessary to determine its use mainly in wood structures. Then, the objective of this study was to evaluate the mechanicals properties from the species *Khaya senegalensis* and *Khaya grandifoliola* in plantations between 10 (*Khaya grandifoliola*) to 13 (*Khaya senegalensis*) years. The material was collected in a farm located in Trancoso City – BA, that belongs to the company Symbiosis Investimentos e Participações S.A.. Were sampled three trees of each specie evaluated and from each tree, was made 2 tests bodies per kind of test, totalizing 6 tests bodies for shear test; 6 tests bodies for flexion test and 6 tests bodies for compression test. It was observed that the *Khaya senegalensis* specie has higher mechanicals properties results than the *Khaya grandifoliola* specie and both species showed a higher resistance and stiffness (MOR and MOE) than the brazilian mahogany in some references. Even though, they are young trees, both species got satisfactory results about the properties evaluated, indicating a use potencial, mainly for light structure purposes, like furniture fabrication, for example.

Keywords: african mahogany; wood mechanicals properties; wood technology; wood furniture

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	1
2.1 Mogno africano.....	1
2.2 Propriedades mecânicas da madeira.....	4
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	4
3.1 Local de coleta do material.....	4
3.2 Material coletado.....	4
3.3 Confeção dos corpos de provas.....	5
3.4 Realização dos testes.....	6
3.4.1 Ensaio de cisalhamento paralelo às fibras.....	7
3.4.2 Ensaio de flexão estática.....	9
3.4.3 Ensaio de compressão paralela às fibras.....	11
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	14
5 CONCLUSÃO.....	18
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	18

1. INTRODUÇÃO

Segundo Delatorre et al. (2020) a madeira tem grande importância devido às suas propriedades tecnológicas, eficiência térmica e boa trabalhabilidade, o que faz com que seu uso seja bem diverso, por exemplo nas áreas de construção civil, indústria de papel e celulose e geração de energia. A madeira é um material que possui renovabilidade, o que gera e permite processos sustentáveis de consumo de uma matéria prima versátil, com diferentes aspectos estéticos e uma gama de características que podem se adaptar a inúmeras necessidades ou exigências do mercado.

De acordo com o ITTO (2024), o preço da madeira em tora varia entre aproximadamente R\$ 760,00 à R\$ 2745,27 o metro cúbico, dependendo da espécie, já a madeira serrada varia de R\$ 1.406,24 à R\$ 10.071,16 por metro cúbico. Com isso, nota-se que o mercado madeireiro é bem valorizado e, dependendo das variáveis do negócio, a produção de madeira é altamente lucrativa.

Embora seja amplamente utilizada no Brasil, a madeira frequentemente é negligenciada em termos de seu tratamento técnico. Os usuários deste material muitas vezes ignoram as propriedades mecânicas da madeira comercializada e usada (Dias e Larh, 2004).

As propriedades mecânicas da madeira são importantes para auxiliar na decisão sobre o uso ao qual será destinada o material ou matéria prima. Esta indicação pode variar não apenas a partir da espécie considerada, mas também a partir de outros fatores, como idade e a região de origem, onde foi implantado o plantio.

O estudo das propriedades físicas e mecânicas faz-se essencial para ampliar o entendimento sobre o potencial de uso da madeira, adaptando sua aplicação e oferecendo alternativas para substituir outras madeiras (Braz et al., 2013). Principalmente para estruturas e construções, o conhecimento da resistência e rigidez da madeira, quando submetida a diferentes solicitações de carga ou esforços, irá ajudar a definir qual espécie deve ou poderá ser inserida em cada parte ou peça de uma estrutura.

Sendo assim, considerando que o mogno africano vem sendo efetivado como uma espécie que possui potencial e bom valor no mercado nacional e internacional, tornam-se importantes os estudos e pesquisas com diferentes procedências deste material.

Em Minas Gerais, Brasil, o mogno africano gera vinte e cinco milhões de reais por ano para o estado e a média de preços de sua madeira serrada nos meses de março e abril de 2023 ficou próxima de R\$ 3.100,00 o metro cúbico (ITTO, 2024).

O presente estudo compreendeu a avaliação de propriedades mecânicas realizadas em corpos de prova de amostras da madeira das espécies *Khaya senegalensis* (Desr.) A. Juss. e *Khaya grandifoliola* C. DC., representantes de indivíduos com nomenclatura vulgar ou comum de mogno africano. A avaliação procurou contribuir para o levantamento de dados visando a melhor utilização da madeira.

Diante disso, reforça-se que o estudo das propriedades mecânicas dos mognos africanos é muito importante, pois através do conhecimento destas, serão definidas melhores utilizações, levando em consideração um conjunto de variáveis significativas para projetos que exijam esforços e solicitações da madeira.

Desta forma, o presente trabalho teve como objetivo, determinar as propriedades mecânicas da madeira de duas espécies de mogno africano, *Khaya senegalensis* e *Khaya grandifoliola*, amostrada em plantios entre 10 à 13 anos, localizados no sul da Bahia, Brasil, através de ensaios de cisalhamento paralelo às fibras, flexão estática e compressão paralela às fibras.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Mogno africano

O mogno africano e suas espécies possuem árvores nativas do continente africano que estão sendo cada vez mais empregadas no Brasil em substituição ao mogno brasileiro para fins comerciais, especialmente para a produção de madeira. Além disso, o termo "mogno africano" refere-se a diversas espécies do gênero *Khaya*, pertencente à família Meliaceae, que compartilham características que se assemelham ao mogno brasileiro (Vieira; Botelho; Costa, 2022).

O mogno africano foi inicialmente introduzido no norte brasileiro no ano de 1976 (Souza et al., 2020; Ribeiro; Ferraz Filho e Scolforo, 2017), no entanto, somente em 1989 a espécie espalhou-se pelo país (Souza et al., 2020) e, conseqüentemente, com o aumento da demanda por madeira teve maiores investimentos e áreas de plantio ampliadas (Ribeiro; Ferraz Filho; Scolforo, 2017).

Alguns exemplos de espécies mais cultivadas nacionalmente e internacionalmente são *Khaya anthotheca*, *Khaya grandifoliola*, *Khaya ivorensis*, *Khaya senegalensis* (Reis et al., 2019), *Khaya madagascariensis* e *Khaya nyasica* (Danquah et al., 2019), no entanto, as espécies *Khaya madagascariensis* e *Khaya nyasica* não são tão conhecidas quando comparadas às outras.

De acordo com Ferraz Filho (2021) estima-se que no Brasil há uma área de cinquenta mil hectares de mogno africano em todo país, porém, a maior parte encontra-se nas regiões sudeste e centro-oeste, com uma predominância das espécies *Khaya grandifoliola* com 66% e *Khaya senegalenses* com 33%.

As árvores do mogno africano geralmente crescem muito, com altura variando de 30 a 35 metros, podendo chegar a mais de 60 metros. Seus troncos podem ter até 2 metros de diâmetro e geralmente têm sapopemas na base para sustentação. As folhas são paripinadas e podem cair sazonalmente ou permanecer verdes o ano todo, dependendo da espécie (Ribeiro; Ferraz Filho e Scolforo, 2017).

A madeira do mogno africano é de boa qualidade e possui um grande potencial no mercado nacional e internacional, sendo uma das espécies mais exploradas do país, podendo ser usada em construções civis, móveis, indústria naval, painéis e laminados, além de outros usos (Souza et al., 2020; Reis et al., 2019).

O mogno africano foi inserido no Brasil devido a sua semelhança com a *Swietenia macrophylla*, também conhecida como o mogno brasileiro, com relação às suas propriedades madeiras e acomodamento às características do ambiente, desta forma, conquistando seu espaço no mercado (Silva, 2022). O mogno brasileiro, também é conhecido por ter grande valor, todavia, esta espécie possui uma praga conhecida por *Hypsipyla grandella*, a qual limita o seu cultivo consideravelmente, por causa dos severos danos que são causados (Maestri et. al 2020), enquanto o gênero *Khaya* não apresentou muitos registros de ataques dessa praga (Reis et al., 2019).

O mogno africano também possui potencial para ser implementado em sistemas agroflorestais, sendo cultivado conjuntamente com culturas agrícolas. De acordo com Gonçalves et al. (2023), em um comparativo entre um monocultivo de *Khaya senegalensis* e a mesma espécie consorciada com outras culturas, sendo elas, milho e o mamão, estas mostraram ter uma alta taxa de sobrevivência, apresentando um percentual de 79%, 97% e 98,5%, respectivamente e além disso, um dos consórcios mostrou um melhor desenvolvimento do tronco da árvore de mogno. Plantios florestais manejados de forma sustentável têm várias funções ambientais cruciais em níveis nacional e internacional, desempenhando um papel

essencial no desenvolvimento sustentável, atendendo, assim, as necessidades do mercado consumidor (Ribeiro; Ferraz Filho e Scolforo, 2017).

Abaixo, nas Figuras 1 e 2 são apresentadas imagens de árvores de *Khaya grandifoliola* e *Khaya senegalensis*.



Figura 1. Exemplar de *Khaya grandifoliola*. Fonte: Autoria própria (2024).



Figura 2. Exemplar de *Khaya senegalensis*. Fonte: Autoria própria (2024).

2.2. Propriedades mecânicas da madeira

A análise das propriedades mecânicas da madeira permite prever ou sugerir diferentes usos para o material, considerando as demandas de esforço ao longo de sua utilização (Reis et al., 2019; Rolim e Piotto, 2018). Isso pode incluir suportar cargas, resistir ao desgaste por fricção ou atrito, ou lidar com condições ambientais variáveis, como umidade e temperatura, seja em ambientes externos expostos ou em ambientes internos protegidos (Rolim e Piotto, 2018).

A obtenção das características físicas e mecânicas da madeira pode ser realizada por meio de testes laboratoriais, utilizando instrumentos e maquinários especializados e seguindo padrões que detalham os métodos, processos, cálculos, formas e dimensões das amostras, entre outros aspectos (Silva, 2013). Alguns exemplos de ensaios são de compressão paralela às fibras, cisalhamento, flexão estática (Lima et al., 2022; Rolim e Piotto, 2018) e dureza janka (Rolim e Piotto, 2018), os quais segundo Schimleck et al. (2018) são ensaios classificados como destrutivos. Atualmente, uma série de pesquisa vêm sendo desenvolvidas para a determinação de propriedades mecânicas através de ensaios não destrutivos (Schimleck et al., 2018; Carvalho et al., 2017).

Algumas variáveis importantes a serem calculadas nas propriedades mecânicas são o módulo de ruptura (MOR) e o módulo de elasticidade (MOE). O MOR representa a resistência máxima aplicada a um corpo, a qual é definida através da razão entre carga máxima aplicada e a área do corpo que sofre esta carga. O MOE representa a rigidez de um corpo, obtida através de uma relação entre tensão aplicada e deformação causada. Segundo Klock (2000), valores de MOR e MOE podem classificar peças de madeiras para fins estruturais, quando estas apresentarem pouca capacidade de deformação e alta resistência.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Local de coleta do material

O material utilizado no presente estudo foi coletado na fazenda da empresa Symbiosis Investimentos e Participações S.A. localizada no município de Trancoso/BA. O local contém diversas espécies nativas e exóticas com idades variadas, em plantios consorciados entre diferentes espécies. As espécies amostradas e coletadas para o presente trabalho foram os mognos africanos *Khaya senegalensis* e *Khaya grandifoliola*.

3.2. Material coletado

Para a coleta do material amostrado foram selecionadas e abatidas três árvores de cada espécie de mogno africano estudada, sendo selecionadas visualmente uma árvore de menor diâmetro ou porte, uma de médio porte, e uma de boa conformação em termos de diâmetro, forma e porte.

As árvores amostradas variavam a idade entre 10 anos, para a espécie *Khaya grandifoliola*, à 12 para 13 anos na *Khaya senegalensis*. Estas foram identificadas e marcadas com uma numeração relativa ao número da árvore amostrada, seguido pelo número da tora e em seguida pelo número da tábuca.

A numeração adotada neste trabalho manteve a mesma identificação utilizada em uma amostragem maior, de dezesseis espécies da mesma fazenda, onde foram amostradas mais árvores.

De cada árvore foram seccionadas duas toras de dois metros de comprimento, as quais forneceram o material para a confecção de amostras na forma de peças serradas e consequentemente, corpos de provas para os ensaios.

Os corpos de prova foram selecionados de forma aleatória nas sub-amostras trazidas da fazenda, evitando-se peças com defeitos como rachaduras, nós mortos, desvios, arrancamentos e levantamentos de grã acentuados.

As sub-amostras foram confeccionadas cerca de 120 dias após empilhamento para secagem natural em ambiente coberto. Ensaio conduzido em paralelo a este estudo indicaram teores de umidade médio condizente com faixas de umidade de equilíbrio. A média de umidade para o *Khaya senegalensis* e *Khaya grandifoliola* foram de 14,7% e 13,05% consecutivamente.

3.3. Confeção dos corpos de provas

Após o corte das árvores, estas foram transportadas para uma serraria, dentro da própria fazenda, com maquinários apropriados para a realização do processamento das toras. As toras foram desdobradas em serra de fita horizontal movida a combustão e transformadas em tábuas e pranchas. Para a confecção dos corpos de prova de propriedades mecânicas foram confeccionadas pranchas diametrais de 60 mm de espessura, de cada tora processada.

Posteriormente, cada prancha foi resserrada para a obtenção de sub-amostras de 45 cm de comprimento, 60 mm de espessura e a largura variando de acordo com o diâmetro das toras, para serem transportadas.

As sub-amostras foram transportadas para o Laboratório de Processamento de Madeira (LPM), o qual está vinculado ao Departamento de Produtos Florestais (DPF), do Instituto de Florestas (IF), da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), localizada no município de Seropédica – Rio de Janeiro - Brasil, para a confecção dos corpos de prova das caracterizações mecânicas.

Com o auxílio de plaina desempenadeira, serra circular e plaina desengrossadeira, foram produzidos os corpos de prova para cisalhamento, flexão estática e compressão paralela (Figura 3).



Figura 3. Início da produção dos corpos de provas a partir da sub-amostra, utilizando a plaina desempenadeira. Fonte: Autoria própria (2024).

Para a confecção dos corpos de prova de cisalhamento e compressão paralela às fibras foram seguidos os procedimentos descritos no Anexo B do documento normativo NBR ABNT 7190:1997 – Projetos de Estruturas da Madeira. Já para os corpos de prova de flexão estática foram utilizados os procedimentos da norma ASTM D143: Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber D 143/2000 (ASTM, 2004).

De cada sub-amostra foram produzidos dois corpos de prova para cada teste, logo, foram produzidos 6 corpos de provas para ensaios de cisalhamento, 6 corpos para ensaios de flexão e 6 corpos para ensaios de compressão, para cada espécie (*Khaya senegalensis* e *Khaya grandifoliola*).

Os corpos de provas foram classificados e identificados conforme disposto nas Tabelas 1 e 2 apresentadas a seguir:

Tabela 1. Classificação de espécie e identificação dos corpos de provas (*Khaya senegalensis*):

Espécie	Amostra
<i>Khaya senegalensis</i>	379.1
<i>Khaya senegalensis</i>	379.2
<i>Khaya senegalensis</i>	393.1
<i>Khaya senegalensis</i>	393.2
<i>Khaya senegalensis</i>	405.1
<i>Khaya senegalensis</i>	405.2

Tabela 2. Classificação de espécie e identificação dos corpos de provas (*Khaya grandifoliola*):

Espécie	Amostra
<i>Khaya grandifoliola</i>	290.1
<i>Khaya grandifoliola</i>	290.2
<i>Khaya grandifoliola</i>	302.1
<i>Khaya grandifoliola</i>	302.2
<i>Khaya grandifoliola</i>	306.1
<i>Khaya grandifoliola</i>	306.2

3.4. Realização dos testes

Para a realização dos testes, foi utilizada a máquina universal de ensaios, da marca Contenco UMC-300 (Figura 4), com o software Pavitest Madeira para ensaios em madeiras, que forneceu dados e controlou a realização dos ensaios. Adicionalmente foi utilizado o software Excel para realização de cálculos e análises dos dados.



Figura 4. Máquina de ensaios Contenco UMC-300. Fonte: Autoria própria (2024).

Com o auxílio de um paquímetro digital foram medidas as dimensões exatas de altura e largura de todos os corpos de provas (flexão, cisalhamento e compressão) (Figura 5) e em seguida inseridas uma de cada vez, na máquina, para iniciar os testes.



Figura 5. Medição de corpo de prova com paquímetro digital. Fonte: Autoria própria (2024).

3.4.1. Ensaios de Cisalhamento paralelo às fibras

Os ensaios foram realizados em corpos de prova com as dimensões de 5,0 x 2,0 x 3,0 x 5,0 x 6,4 cm, direcionando a maior dimensão em paralelo com as fibras (Figuras 6 a 8).

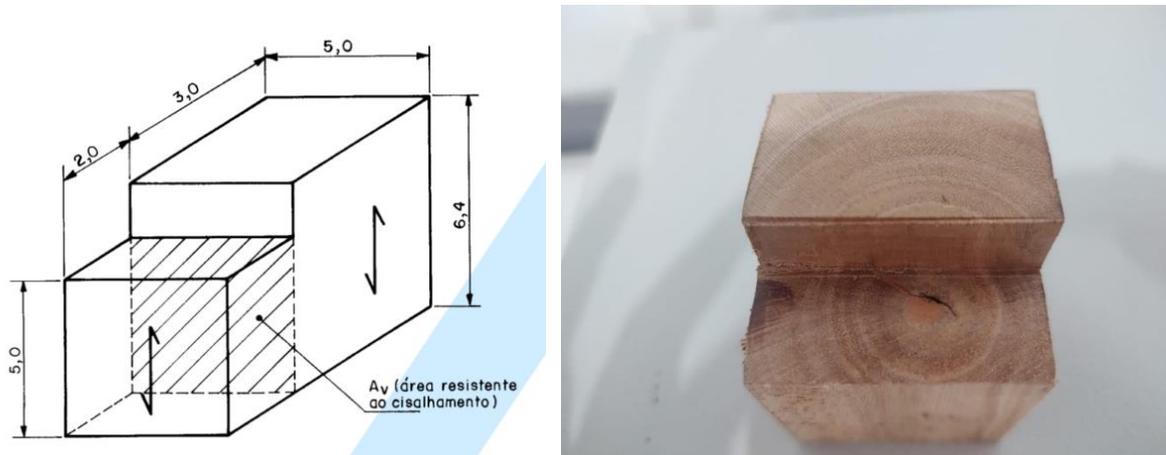


Figura 6. Corpo de prova de ensaio de cisalhamento visto de cima. Fonte: ABNT 7190:1997 (adaptado) e foto de autoria própria (2024).



Figura 7. Corpo de prova de ensaio de cisalhamento visto lateralmente. Fonte: Autoria própria (2024).

Para o teste de cisalhamento, os parâmetros fornecidos pelo software foram a carga máxima cisalhante aplicada ($Fv0, máx$) e o módulo de ruptura (MOR). O módulo de ruptura, que representa a máxima resistência ao cisalhamento, é calculado através da seguinte equação:

$$fv0 = \frac{Fv0, máx}{Av0}$$

onde:

$Fv0, máx$ representa a carga máxima cisalhante aplicada ao corpo de prova em kgf;
 $fv0$ representa a máxima resistência ao cisalhamento paralelo às fibras em kgf.cm⁻²;
 $Av0$ representa a área inicial da seção crítica do corpo de prova em um plano paralelo às fibras.



Figura 8. Detalhe de ensaio de cisalhamento paralelo às fibras. Fonte: Autoria própria (2024).

3.4.2. Ensaio de flexão estática

Os ensaios foram realizados em corpos de prova com as dimensões de 2,5 x 2,5 x 41,0 cm (Figuras 9 e 10).

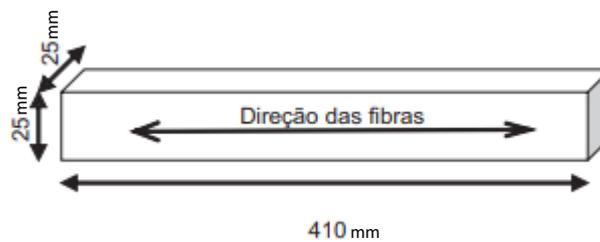


Figura 9. Corpo de prova para ensaio de flexão estática, referência: ASTM D143: Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber D 143/2000. Fonte: Moraes Neto et al. (2009) e foto de autoria própria (2024).



Figura 10. Ensaio de flexão estática. Fonte: Autoria própria (2024).

Para o teste de flexão estática, foram determinados os valores da resistência da madeira à flexão, considerado como MOR ou módulo de ruptura, dado pela máxima tensão que pode atuar no corpo de prova e determinado pela equação:

$$fM = \frac{M, \text{máx}}{We}$$

onde:

fM representa a resistência da madeira à flexão em MPa;

$M, \text{máx}$ representa o máximo momento aplicado ao corpo de prova, em newtons-metro;

We representa módulo de resistência elástico da seção transversal do corpo de prova, dado por $bh^2/6$, em metros cúbicos.

Para o cálculo da rigidez da madeira, expressa pelo MOE ou módulo de elasticidade foi utilizada a equação descrita na norma ABNT 7190:1997. A equação está disposta abaixo:

$$E_{M0} = \frac{(F_{M,50\%} - F_{M,10\%}) L^3}{(V_{50\%} - V_{10\%}) 4 bh^3}$$

onde:

E_{M0} representa o módulo de elasticidade na flexão estática em MPa;

$F_{M,10\%}$ e $F_{M,50\%}$ são as cargas correspondentes a 10% e 50% da carga máxima estimada;

$V_{10\%}$ e $V_{50\%}$ são os deslocamentos no meio do vão correspondentes a 10% e 50% da carga máxima estimada $F_{M,est}$, em metros;

L representa o vão, ou seja, a distância entre os apoios do corpo de prova em cm. Para este teste utilizou-se 36,5 cm.

b e h correspondem, respectivamente, à largura e à altura da seção transversal do corpo de prova, em metros.

3.4.3. Ensaio de compressão paralela às fibras

Os ensaios foram realizados em corpos de provas com dimensões de 5,0 x 5,0 x 15,0 cm, como nas Figuras 11 e 12, abaixo:

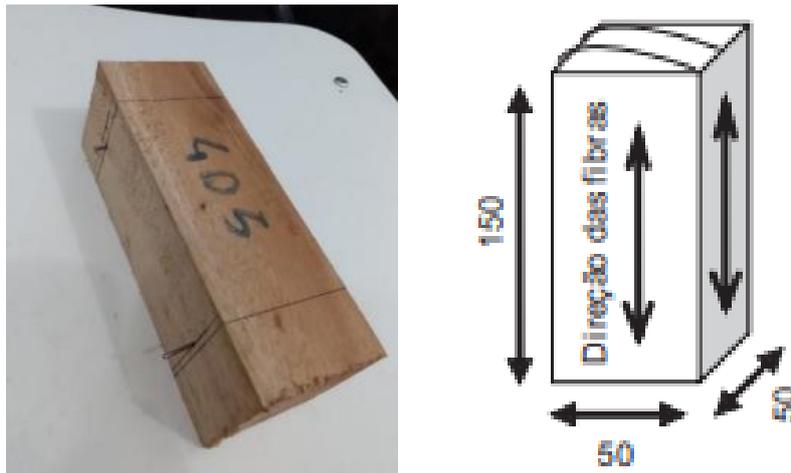


Figura 11. Corpo de prova para ensaio de compressão paralela às fibras. Fonte: Moraes Neto et al. (2009) e foto de autoria própria (2024).

Para o teste de compressão paralela, os resultados gerados pela máquina de ensaio e software foram o de carga máxima de compressão aplicada ao corpo de prova ($F_{c0, máx}$), módulo de ruptura (MOR) e o módulo de elasticidade (MOE). No entanto este ensaio foi realizado de duas diferentes formas, sendo que, metade dos corpos de provas foram testados sem o uso de extensômetros (Figura 12) e a outra metade foi testada com auxílio dos extensômetros na maior dimensão do corpo de prova e abertura de 90 mm (Figura 13), para obter o valor do MOE.



Figura 12. Ensaio de compressão paralela às fibras sem uso de extensômetros. Fonte: A autoria própria (2024).



Figura 13. Ensaio de compressão paralela às fibras com uso dos extensômetros. Fonte: A autoria própria (2024).

O MOR representa a resistência do corpo de prova à compressão paralela às fibras. Sendo assim, determinou-se a resistência à compressão paralela às fibras (f_{c0}) através da seguinte equação:

$$f_{c0} = \frac{F_{c0, \text{máx}}}{A}$$

onde:

F_{c0} refere-se a força máxima aplicada, durante o ensaio, aplicada ao corpo de prova em kgf;
 f_{c0} refere-se a resistência à compressão paralela às fibras em kgf.cm²
 A é a área da seção transversal comprimida em cm²

Além disso, o MOE foi calculado através da seguinte equação (ABNT 7190:1997):

$$E_{c0} = \frac{\sigma_{50\%} - \sigma_{10\%}}{\varepsilon_{50\%} - \varepsilon_{10\%}}$$

onde:

E_{c0} representa a rigidez ou módulo de elasticidade no sentido paralelo às fibras;
 $\sigma_{10\%}$ e $\sigma_{50\%}$ são as tensões de compressão as quais representam 10% e 50% da resistência máxima à compressão;
 $\varepsilon_{10\%}$ e $\varepsilon_{50\%}$ representam as deformações nas tensões $\sigma_{10\%}$ e $\sigma_{50\%}$.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados dos testes realizados no estudo encontram-se apresentados nas tabelas abaixo, sendo que as Tabelas 3, 5 e 7 mostram os valores obtidos nos testes de cisalhamento, flexão e compressão, respectivamente, da espécie *Khaya senegalensis*. As Tabelas 4, 6 e 8 estão em ordem respectiva, de cisalhamento, flexão e compressão e apresentam os resultados obtidos para a espécie *Khaya grandifoliola*.

Tabela 3. Valores das cargas máximas aplicadas aos corpos de prova de cisalhamento e valores de f_{c0} , da espécie *Khaya senegalensis*:

Amostra	Carga Máxima (kgf)	f_{c0} (MPa)
379.1	3060	11,74
379.2	2890	11,64
393.1	3090	11,56
393.2	3120	11,78
405.1	2520	9,56
405.2	2600	10,12
Média	2880	11,07
Desvio Padrão	261,61	0,97
CV%	9,08	8,78

Carga máxima = carga máxima aplicada pela máquina ao corpo de prova; f_{c0} = máxima resistência apresentada pelo corpo de prova após o ensaio; CV% = coeficiente de variação.

Tabela 4. Valores das cargas máximas aplicadas aos corpos de prova de cisalhamento e valores de f_{c0} , da espécie *Khaya grandifoliola*:

Amostra	Carga Máxima (kgf)	f_{c0} (MPa)
290.1	2420	9,13
290.2	2430	9,15
302.1	2410	9,20
302.2	2250	8,60
306.1	2490	9,59
306.2	2560	9,64
Média	2426,67	9,22
Desvio Padrão	103,28	0,38
CV%	4,26	4,10

Carga máxima = carga máxima aplicada pela máquina ao corpo de prova; f_{c0} = máxima resistência apresentada pelo corpo de prova após o ensaio; CV% = coeficiente de variação.

Tabela 5. Valores das cargas máximas aplicadas aos corpos de prova de flexão estática, valores de f_{c0} e do E_{M0} , da espécie *Khaya senegalensis*:

Amostra	Carga Máxima (kgf)	f_{c0} (MPa)	E_{M0} (MPa) ABNT
379.1	124,6	41,64	4148,35
379.2	128	52,00	6148,11
393.1	225,1	79,87	7283,06
393.2	229,6	77,65	7239,44
405.1	166,7	57,98	5424,79
405.2	185,5	60,78	5993,26
Média	166,9	61,65	6039,50
Desvio Padrão	50,27	14,80	1179,37
CV%	30,11	24,01	19,53

Carga máxima = carga máxima aplicada pela máquina ao corpo de prova; f_{c0} = módulo de ruptura apresentado pelo corpo de prova após o ensaio; E_{M0} = Módulo de elasticidade apresentado pelo corpo de prova após o ensaio segundo a ABNT 7190:1997; CV% = coeficiente de variação.

Tabela 6. Valores das cargas máximas aplicadas aos corpos de prova de flexão estática, valores de f_{c0} e do E_{M0} , da espécie *Khaya grandifoliola*:

Amostra	Carga Máxima (kgf)	f_M (MPa)	E_{M0} (MPa) ABNT
290.1	166,2	57,34	6058,52
290.2	182	59,17	5845,59
302.1	123,5	43,47	4885,30
302.2	137	44,88	5272,51
306.1	202,8	69,41	5850,73
306.2	180	60,06	5636,69
Média	175,5	55,72	5591,56
Desvio Padrão	27,63	9,88	436,44
CV%	15,75	17,73	7,81

Carga máxima = carga máxima aplicada pela máquina ao corpo de prova; fM = resistência máxima apresentada pelo corpo de prova após o ensaio; E_{M0} = Módulo de elasticidade apresentado pelo corpo de prova após o ensaio segundo a ABNT 7190:1997; CV% = coeficiente de variação.

Tabela 7. Valores das cargas máximas aplicadas aos corpos de prova de compressão paralela às fibras, valores do $fc0$ e $Ec0$, da espécie *Khaya senegalensis*:

Amostra	Carga Máxima (kgf)	fM (MPa)	$Ec0$ (MPa)
379.1	7360	27,69	-
379.2	8490	34,30	6150,10
393.1	9100	34,44	-
393.2	10720	42,90	8560,30
405.1	8770	32,43	-
405.2	9570	37,20	6581,00
Média	9001,67	34,83	7097,13
Desvio	1122,13	5,06	1285,33
Padrão	12,47	13,77	18,11
CV%			

Carga máxima = carga máxima aplicada pela máquina ao corpo de prova; fM = resistência máxima apresentada pelo corpo de prova após o ensaio; $Ec0$ = Módulo de elasticidade apresentado pelo corpo de prova após o ensaio; CV% = coeficiente de variação.

Tabela 8. Valores das cargas máximas aplicadas aos corpos de prova de compressão paralela às fibras, valores do $fc0$ e do $Ec0$, da espécie *Khaya grandifoliola*:

Amostra	Carga Máxima (kgf)	$fc0$ (MPa)	$Ec0$ (MPa)
290.1	8350	31,85	-
290.2	9180	35,70	7787,5
302.1	6780	25,82	-
302.2	8260	31,50	7059,7
306.1	8280	31,10	-
306.2	9510	36,60	8563,7
Média	8393,33	32,09	7803,63
Desvio Padrão	948,80	3,85	752,13
CV%	11,30	11,27	9,64

Carga máxima = carga máxima aplicada pela máquina ao corpo de prova; $fc0$ = resistência máxima apresentada pelo corpo de prova após o ensaio; $Ec0$ = Módulo de elasticidade apresentado pelo corpo de prova após o ensaio; CV% = coeficiente de variação.

Para todos os ensaios, a espécie *Khaya senegalensis* apresentou valores de cargas máximas e módulos de rupturas superiores em relação a espécie *Khaya grandifoliola* e um módulo de elasticidade superior no ensaio de flexão. No entanto, a espécie *Khaya senegalensis* foi inferior nas médias do módulo de elasticidade no ensaio de compressão paralela.

Nos Gráficos 1 e 2 os resultados foram agrupados para comparação das resistências máximas aplicadas aos corpos de provas.

Gráfico 1. Valores de resistências da *Khaya senegalensis*

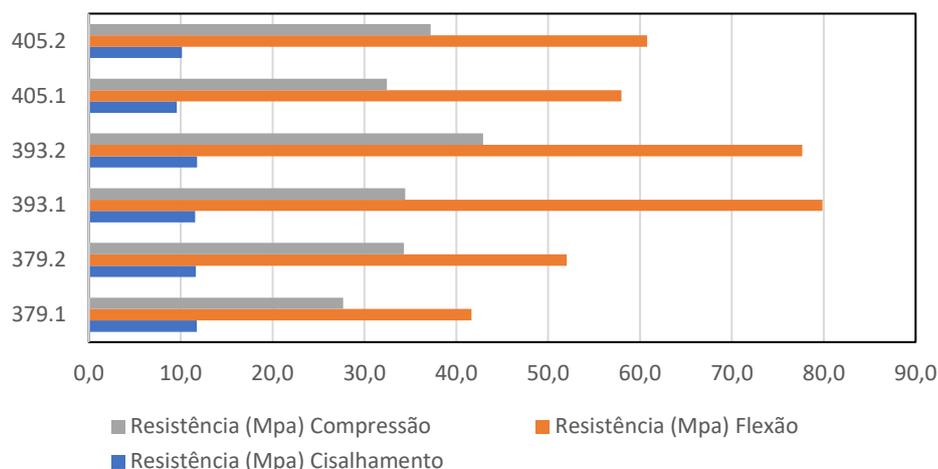
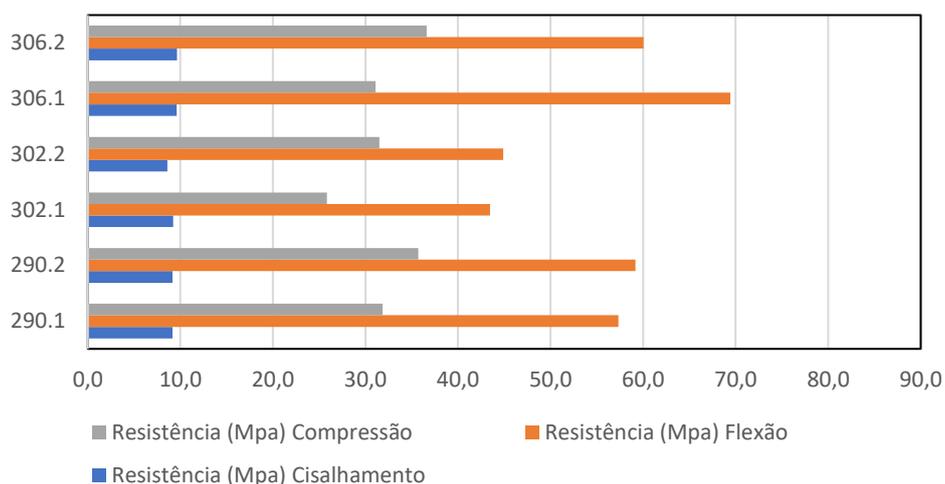


Gráfico 2. Valores de resistências da *Khaya grandifoliola*



Para o ensaio de cisalhamento, os resultados mostraram-se abaixo aos valores encontrados por Silva (2013), que relata valores de resistência de aproximadamente 15,00 MPa e coeficiente de variação de 12,75%, para a espécie *Khaya ivorensis*, com árvores de 30 anos e também obtiveram valores de compressão de 49,62 MPa e coeficiente de variação de 24,62%.

França et al. (2015) também encontrou resultados superiores utilizando as espécies *Khaya senegalensis* e *Khaya ivorensis* com idades de 19 anos, apresentando resultados de 18,6 e 12,6 MPa, respectivamente, para o cisalhamento e na compressão também mostrou resultados maiores, com uma resistência de 43,1 e 46,1 MPa.

Com relação a resistência na flexão, França et al. (2015), obteve resultados de resistências máximas e módulo de elasticidade de 78,4 e 9.577 MPa para a espécie *Khaya ivorensis* e 83,2 e 10.169 MPa para *Khaya senegalensis*, enquanto no presente trabalho encontrou-se a maior média de resistência na espécie *Khaya senegalensis*, com um valor de 61,65 MPa. Além disso, a maior rigidez notada neste estudo, foi a espécie *Khaya senegalensis*, com um valor de médio de 6039,50 MPa, o qual se refere a norma da ABNT.

Além da idade, os resultados encontrados no presente trabalho também podem ter sido influenciados por terem sido testados corpos que estivessem próximos à medula da árvore e

também pelo sentido da grã ser entrecruzada. Assim, podendo causar uma resistência tanto maior, quanto menor, dependendo do tipo de ensaio e o sentido das fibras em que foi ensaiado. Inclusive, a diferença de idade entre as duas espécies testadas também é um fator que pode ter afetado na diferença dos resultados.

De acordo com o Serviço Florestal Brasileiro (2024), espécies que apresentam para o cisalhamento uma resistência entre 7,6 à 11,47 MPa, são classificadas como de resistência média e, as que suportam esforços de compressão entre 29,22 e 48,24 MPa são classificadas como de média resistência. Por fim, com relação ao módulo de elasticidade, as espécies que apresentam um valor aproximadamente de 9.414 à 12.847 MPa, são consideradas médias.

A *Switenia macrophylla*, mogno-brasileiro, possui resistências à ruptura para cisalhamento, flexão estática e compressão paralela iguais a 8,73, 55,11 e 31,68 MPa, respectivamente e apresenta um módulo de elasticidade de 6.470 MPa (SFB, 2024).

Ao comparar o mogno africano ao mogno brasileiro, nota-se que o mogno africano se apresentou como superior em relação às suas propriedades mecânicas tanto em outras literaturas, quanto neste trabalho, o qual utilizou árvores mais jovens.

Diante destas análises e comparações, pode-se perceber que as espécies estudadas, mesmo apresentando resultados abaixo do encontrado em outras literaturas, estas ainda foram consideradas de média qualidade. No entanto estes resultados são condizentes a madeiras com alta incidência de madeira juvenil.

5. CONCLUSÃO

Com base nos resultados encontrados, conclui-se que a espécie *Khaya senegalensis* em comparação a *Khaya grandifoliola*, demonstrou superioridade com relação às propriedades mecânicas. As duas espécies possuem grande potencial de crescimento e melhoria destas propriedades, pois os resultados obtidos no presente estudo relacionam-se com a alta incidência de madeira ou lenho juvenil.

Apesar da baixa idade das árvores, a qualidade da madeira indica potencial de qualidade média à boa quanto às propriedades mecânicas, indicando e confirmando possibilidades de uso estrutural leve, como movelaria e esquadrias.

Ao ser comparado com o mogno brasileiro, os mognos africanos avaliados apresentaram características mecânicas superiores a dados da literatura, mesmo com a alta porcentagem de madeira juvenil.

A continuação dos estudos sobre mogno africano é válida, visto que suas madeiras possuem grande potencial para a indústria consumidora de madeira.

6. REPEFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190: projeto de estruturas de madeiras.** São Paulo, 1997. Disponível em: https://www.academia.edu/34645241/NBR_7190_Projetos_De_Estrutura_De_Madeira

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard methods of small Clear specimens of timber.** In: _____. Annual book of ASTM standards. Danvers, 2004. p. 23-53 (Designation: D 143-2000).

Brasília – DF. SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO (SFB). **Laboratório de Produtos Florestais: Banco de dados de madeiras brasileiras.** Serviço Florestal Brasileiro, 2024. Disponível em: <https://lpf.florestal.gov.br/pt-br/madeiras-brasileiras?start=120> Acesso em: 21 jul. 2024.

Braz, R. L.; Oliveira, J. T. D. S.; Rodrigues, B. P.; Arantes, M. D. C. (2013). PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DA MADEIRA DE *Toona ciliata* EM DIFERENTES IDADES. **Floresta**, v. 43, n. 4, p. 663, 2013. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/287517933_PROPRIEDADES_FISICAS_E_MECANICAS_DA_MADEIRA_DE_Toona_ciliata_EM_DIFERENTES_IDADES.

CARVALHO, A. G.; ZANUNCIO, A. J. V.; SILVA, C. M. S. D.; CARNEIRO, A. D. C. O.; PAULA, M. O. D. (2017). Método de ressonância para predição das propriedades mecânicas das madeiras de *Eucalyptus urophylla* e *Pinus oocarpa* termoretificadas. **Revista Matéria** (Rio de Janeiro), v. 22, n. 1, p. e11772, 2017. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/YfW7jdgRNHLKHQyDyRC4JWc/abstract/?lang=pt>

DANQUAH, J. A.; APPIAH, M.; OSMAN, A.; PAPPINEN, A. Distribuição geográfica do importante complexo de mogno econômico global: uma revisão. **Pesquisa e Revisão Anual em Biologia**, v. 34, n. 3, p. 1-22, 2019. Disponível em: <https://erepo.uef.fi/handle/123456789/8329>

DELATORRE, F. M.; CUPERTINO, G. F. M.; SANTOS JUNIOR, A. J. D.; SILVA, A. M. D.; DIAS JÚNIOR, A. F.; CARVALHO, A. M. de. Comportamento da madeira de Ingá (*Inga edulis* Mart) frente a ensaios de usinagem. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 8, p. e352985119, 2020. DOI: 10.33448/rsd-v9i8.5119. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/5119>. Acesso em: 5 jun. 2024.

DIAS, F. M.; LAHR, F. A. R. Estimativa de propriedades de resistência e rigidez da madeira através da densidade aparente. **Scientia forestalis**, v.[s.l.], n. 65, p. 102-113, 2004. Disponível em: <https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr65/cap10.pdf>.

FERRAZ FILHO, A. C.; RIBEIRO, A.; BOUKA, G. U., JUNIOR, M. F.; TERRA, G. Destaques da plantação de mogno no Brasil. **Floresta e Ambiente**, v. 28, n. 3, p. e20200081, 2021. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/floram/a/ztXCHhScKxkN3GT4rmWpn3z/>.

FRANÇA, T. S. F. A.; ARANTES, M. D. C.; VIDAURRE, G. B.; OLIVEIRA, J. T. D. S.; BARAÚNA, E. E. P. Características anatômicas e propriedades físico-mecânicas das madeiras de duas espécies de mogno africano. **Cerne**, v. 21, n. 4, p. 633-640, 2015. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cerne/a/R5JgLL9q6dqSGBLL5PjBJBr/abstract/?lang=pt>.

GONÇALVES, K. D. S. T.; SOUSA, H. R. S.; MARIANO, D. C.; EBLING, A. A.; NETO, C. F. O.; OKUMURA, R. S. Qualidade de povoamentos de Mogno africano na Amazônia Oriental. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 16, n. 3, p. 1-17, 2023. Disponível em: <https://periodicos.unicesumar.edu.br/index.php/rama/article/view/10030>.

KLOCK, U. **Qualidade da madeira juvenil de Pinus maximinoi H. E. Moore**. 2000. 275 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2000. Disponível em: <https://www.celso-foelkel.com.br/artigos/outros/UMBERTO%20KLOCK%20TESE%204%2008.pdf>.

LIMA, V. D. S.; NASCIMENTO, S. L.; SANTOS, M. C.; NASCIMENTO, B. L. M.; CÉSAR, S. F.; DIAS, J. M. S. Avaliação das propriedades físicas e mecânicas da madeira de paricá (*Schizolobium amazonicum*) utilizada na indústria de compensados no Estado do Maranhão. **Research, Society and Development**, v. 11, n.9, p. e46911932065-e46911932065, 2022. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/32065>.

MAESTRI, M. P.; AQUINO, M. G. C.; RABELO, L. K. L. A praga do mogno brasileiro: *Hypsipyla grandella* Zeller. **Revista Biodiversidade**, v. 19, n. 3, 2020. Disponível em: <https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/biodiversidade/article/view/10815>.

MORAES NETO, S. P. de; et al. **Propriedades mecânicas da madeira de cinco procedências de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* implantadas no cerrado do Distrito Federal, DF**. Planaltina, DF : Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento - Embrapa Cerrados, 2009.

ORGANIZAÇÃO INTERNACIONAL DE MADEIRAS TROPICAIS (ITTO). **Relatório do Mercado de Madeira Tropical**, 2024. Disponível em: https://www.itto.int/market_information_service/?err=1&Return_URL=%2Fmarket_informati_on_service%2F%3Ffrom%3Dlogin_input#login1000295 Acesso em: 29 abr 2024.

REIS, C. A. F.; et al. **Mogno-africano (*Khaya* spp.): atualidades e perspectivas do cultivo no Brasil**. Brasília, Embrapa, 2019, 378 p. Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1112698>.

RIBEIRO, A.; FERRAZ FILHO, A. C.; SCOLFORO, J. R. S. O cultivo do mogno africano (*Khaya* spp.) e o crescimento da atividade no Brasil. **Floresta e Ambiente**, v. 24, p. e00076814, 2017. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/floram/a/KSDnnYH3DMFBsNbGwVK5w8d/?format=pdf&lang=pt>.

RIBEIRO, A.; FERRAZ FILHO, A. C.; FONSECA, P. Plantações de mogno-africano no Brasil – avanços e necessidades. In: CONGRESSO PLANTAÇÕES FLORESTAIS, 48, 2023, Piracicaba: **Série Técnica IPEF**, 2023. p. 358 – 361 26. Disponível em: <https://www.ipef.br/publicacoes/stecnica/nr48/ipef-sertec-48.pdf>

ROLIM, S. G.; PIOTTO, D. Silvicultura e tecnologia de espécies da mata atlântica. Belo Horizonte, **Editora Rona**, 2018. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/326262183_Silvicultura_e_Tecnologia_de_Especies_da_Mata_Atlantica.

SCHIMLECK, L. R.; MATOS, J. L. M.; TRIANOSKI, R.; PRATA, J. G. Comparação de métodos para estimar propriedades mecânicas da madeira por espectroscopia NIR. **Journal of**

Spectroscopy, v. 10, n. 12, p. 1-10, 2018. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2018/4823285>.

SILVA, G. R. D. **SUBSTRATOS ELABORADOS COM RESÍDUOS ORGÂNICOS E SOLOS DO BIOMA CERRADO PARA A PRODUÇÃO DE MUDAS DE MOGNO AFRICANO**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Florestal) – Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão, Imperatriz, 2022. Disponível em: <https://repositorio.uemasul.edu.br/bitstreams/7b75183b-2bca-4ae4-9918-cee8fb44db75/download>.

SILVA, L. V. M. S. D. **Propriedades físicas e mecânicas da madeira de mogno africano (Khaya ivorensis A. Chev.)**. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2013. Disponível em: <https://rima.ufrjr.br/jspui/handle/20.500.14407/5347>

SOUZA, A. D. G.; SMIDERLE, O. J.; CHAGAS, E. A.; ALVES, M. S.; FAGUNDES, P. R. D. O. (2020). Crescimento, nutrição e eficiência no transporte, absorção e uso de nutrientes no mogno africano. **Revista Ciência Agronômica**, v. 51, n. 2, p. e20196711, 2020. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rca/a/vSBC4Rv369tcyp3BKQZHRYH/abstract/?lang=pt#>.

VIEIRA, C. R.; BOTELHO, R. A.; Costa, P. P. D. C. Dejetos de Suíno no Crescimento Inicial de Mudas de Mogno Africano. **Ensaios e Ciência C Biológicas Agrárias e da Saúde**, v. 26, n. 2, p. 185–190, 2022. Disponível em: <https://ensaioseciencia.pgsscogna.com.br/ensaiociencia/article/view/9467>.

* * *