UNIVERSIDADADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E ENGENHARIAS DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS FLORESTAIS E DA MADEIRA

KATIÚCIA ANDREIA SILVA DE ARAUJO

CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DA MADEIRA JOVEM DE Tectona grandis

JERÔNIMO MONTEIRO ESPÍRITO SANTO 2022

KATIÚCIA ANDREIA SILVA DE ARAUJO

CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DA MADEIRA JOVEM DE Tectona grandis

Monografia apresentada ao Departamento de Ciências Florestais e da Madeira da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira Industrial Madeireira.

JERÔNIMO MONTEIRO ESPÍRITO SANTO

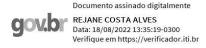
KATIÚCIA ANDREIA SILVA DE ARAUJO

CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DA MADEIRA JOVEM DE Tectona grandis

Monografia apresentada ao departamento de Ciências Florestais e da Madeirada Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira Industrial Madeireira.

Aprovada em 15 de Agosto de 2022.

COMISSÃO EXAMINADORA



Profa. D.Sc. Rejane Costa Alves Universidade Federal do Espírito Santo Orientadora



Prof. D.Sc. Pedro Gutemberg de Alcântara Segundinho Universidade Federal do Espírito Santo Examinador



Profa. D.Sc. Alice Soares Brito Instituto Federal do Norte de Minas Gerais Examinadora

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me sustentar em todos os momentos da minha vida.

A Universidade Federal do Espírito Santo e ao Departamento de Ciências Florestais e da Madeira, por todo conhecimento e aprendizado.

Aos meus pais, Robson Araújo e Andreia Campos, e ao meu padrasto, Robson Campos, por sempre sonharem comigo e me apoiarem em tudo. Essa conquista é de vocês.

As minhas avós Cirene Ramos, Creuza Santos e Raquel Couto, por semprevibrarem a cada passo conquistado e sonhado. E a toda minha família, que é grandepor sinal, obrigada pelo apoio.

Ao meu amigo e namorado Maison Trancozo, pelo carinho, paciência e por acreditar em mim e sempre estar me apoiando. Obrigada por tornar meus dias mais leves.

Aos meus padrinhos Ana Paula Gripa e WalcilianoTapias, obrigada por sempre estarem comigo e vibrando a cada conquista realizada.

A todos os amigos que ganhei em Alegre que tornaram meus dias mais felizes e a caminhada mais tranquila, em especial, Ana Clara H., Bruna Dutra, Carla Martins, Maressa Camillo, Maryana Camillo, Mayara Camillo, Paloma Miliorini, Paulo Victor, Paulo Correia e Sâmia Alves.

Aos meus amigos de classe, por toda ajuda, companheirismo e amizade, principalmente, Ana Paula Silva, Clara Gaspar e Fernanda Maffioletti.

A todos os professores e técnicos por todo conhecimento e conversas proporcionados durante o curso.

A todasas pessoas que de alguma forma contribuíram para que esse trabalho tenha sido realizado.

RESUMO

As florestas plantadas de teca têm se destacado visto a alta qualidade, trabalhabilidade e idade das plantações. O material utilizado no estudo, em formato de tábuas, é proveniente de florestas de 11 a 14 anos de idade, localizada no munícipio de Água Boa, Mato Grosso. Devido à grande ocorrência de nós e madeira de alburno no lote amostrado, os estudos foram direcionados para entender a influência dessas características nas propriedades físico-mecânicas estudadas. Determinou-se também os valores dinâmicos de módulo de elasticidade com a utilização de propagação de ondas ultrassônicas e de excitação. Como resultado foi possível concluir que, os valores de densidade básica não foram influenciados pela relação cerne/alburno. Quanto à densidade aparente, os maiores valores foram observados na madeira de cerne. Exceto o módulo de elasticidade (MOE), de modo geral, as propriedades mecânicas não foram influenciadas pela relação cerne/alburno. No entanto, os valores de compressão paralela às fibras (f_{c0}) e tração paralela às fibras (ft_0) diminuíram quando relacionados à presença de nós na madeira. Para os ensaios dinâmicos, apesar dos dois métodos se mostrarem eficientes e confiáveis para determinar o MOE, o método de propagação de ondas de excitação flexional foi o que obteve resultados mais próximos aos valores determinados para MOE estático.

Palavras-chave: teca, propriedades físico-mecânicas, propagação de ondas.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Corpos de prova de flexão antes do ensaio	21
Figura 2: Corpos de prova de compressão antes do ensaio	21
Figura 3: Corpos de prova de dureza antes do ensaio.	22
Figura 4: Corpos de prova de tração paralela às fibras antes do ensaio	22
Figura 5: Modo de captação e excitação longitudinal (A); modo de captaçã	0 6
excitação flexional (B) e modo de captação e excitação torcional (C)	24
Figura 6: Ensaio com ultrassom.	25
Figura 7: Gráfico de Boxplot para caracterização da densidade [Kg.m ⁻³] da madeira	a de
cerne e cerne-alburno (a) densidade básica; (b) densidade aparente a 12% de umida	ade
	28

LISTA DE TABELAS

TABELA 4.1: Resultados da caracterização física do lote da madeira de Tectona
grandis estudada
TABELA 4.2: Médias das amostras de cerne-alburno (mista) e cerne dos ensaios de
compressão paralela às fibras, tração paralela às fibras e dureza Janka30
TABELA 4.3: Médias do ensaio de compressão paralela às fibras, tração paralela às
fibras e dureza Janka30
TABELA 4.4: Resultados médios das amostras de cerne-alburno (mista) e cerne do
módulo de ruptura (MOR) e módulo de elasticidade (MOE), determinados por meio do
ensaio de flexão estática33
TABELA 4.5: Resultados determinados por meio do ensaio de flexão estática34
TABELA 4.6: Valores médios da densidade, velocidade e da elasticidade dinâmico
através do ensaio não destrutivo de ultrassom
TABELA 4. 7: Resultados médios obtidos por meio do ensaio de propagação de ondas
de excitação (Sonelastic)
TABELA 4.8: Comparação dos métodos dinâmicos38

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇAO	1
	1.1. O problema e sua importância	2
	1.2. Objetivo	3
	1.2.1. Objetivo geral	3
	1.2.2. Objetivos específicos	3
2.	REVISÃO DE LITERATURA	4
	2.1. Madeira Teca	4
	2.2. Características gerais da madeira	6
	2.3. Propriedades físicas da madeira	8
	2.3.1. Umidade	8
	2.3.2. Densidade básica	9
	2.3.3. Densidade aparente	10
	2.4. Propriedades mecânicas da madeira	11
	2.4.1. Flexão	12
	2.4.2. Compressão	13
	2.4.3. Dureza Janka	14
	2.4.4. Tração	15
	2.5. Propagação de ondas	16
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	17
	3.1. Descrição do material	17
	3.2. Propriedades físicas da madeira	18
	3.3. Propriedades mecânicas da madeira	19
	3.4. Propagação de ondas	22
	3.4.1. Propagação de ondas de excitação	23
	3.4.2. Propagação de ondas ultrassônicas	24

4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO		27	
	4.1.	Propriedades físicas da madeira	27	
	4.2.	Propriedades mecânicas da madeira	29	
5.	5. CONCLUSÃO		39	
6.	R	EFERÊNCIAS	40	

1. INTRODUÇÃO

A indústria madeireira vem se mostrando bastante promissora com a utilização de madeiras provenientes de reflorestamento (PACE *et al.*, 2018). O setor brasileiro possui uma área de plantio de 9,55 milhões de hectares, onde 216,6 milhões de m³são destinados para fins industriais (INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES – IBÁ, 2021).

Segundo o relatório do Ibá (2020), pela primeira vez o Setor Florestal Brasileiro atingiu uma receita bruta total na casa de R\$ 100 bilhões, contribuindo com cerca de 1,2% do PIB nacional. O aumento do PIB foi de 2,7% nos anos de 2010 a 2020, sendo este valor adicionado a cadeia produtiva. Atuando de forma sustentável gerando e riqueza compartilhada,apresentando um incremento de 10,2% do PIB (IBÁ, 2022). Em 2019, foram 1,3 milhões de postos de trabalho na cadeia de árvores plantadas, somando oportunidades para 3,75 milhões de brasileiros em todo o país (IBÁ, 2020).

As árvores plantadas são responsáveis por 91% de toda a madeira produzida para fins industriais no país (IBÁ, 2022). O Brasil tem a maior área plantada de teca da América Latina, com mais de 87.502 ha de plantações, espalhados pelos estados de Mato Grosso, Pará, Rondônia, Acre, Goiás, Minas Gerais, dentre outros. O Mato Grosso, seguido pelo Pará, concentra mais de 90% da área plantada no país (NASCIMENTO, 2021).Corroborando com o atual e importante apelo de preservação ecológica, a utilização de madeiras plantadas vem se tornando uma alternativa necessária para abastecer o mercado madeireiro.

A Tectona grandis é uma espécie arbórea da família Lamiaceae, nativa das florestas tropicais do continente asiático, sendo utilizada pela indústria moveleira, construção naval, construção civil, decoração, produção de laminados e compensados. A madeira é conhecida por possuir alta durabilidade devido à presença de extratos fenólicos e ácidos no cerne (KOKUTSE et al., 2006).

A teca é de fácil cultivo, com pouca sujeitabilidade às pragas e doenças, possuem o tronco revestido por uma casca resistente ao fogo e apresenta densidade aparente de 650 kg.m⁻³ (LIMA *et al.*, 2011). De acordo com os mesmos autores, possui satisfatória estabilidade dimensional e resistência às cargas de tração e flexão.

Portanto, apresenta um grande potencial econômico devido à alta qualidade e adaptabilidade, fazendo com que ocorra um aumento da sua utilização, principalmente na produção de móveis (MOREIRA *et al.*, 2021).

A madeira é um material heterogêneo e anisotrópico, mas possui boa trabalhabilidade quando comparada a outros materiais, o que a torna atrativa também no campo decorativo e ornamental (MORESCHI, 2014). No entanto, o conhecimento das propriedades físicas da madeira como a densidade, umidade, além das propriedades mecânicas como tração, flexão, compressão paralela às fibras e dureza Janka são essenciais para que a madeira seja adequada para o uso (JÚNIOR *et al.*, 2013).

A avaliação da madeira por métodos de ensaios não destrutivos é definida como a determinação das propriedades do material sem que alterem sua forma permanente (ROSS *et al.*, 1998). Este método de análise vem se mostrando uma ferramenta eficiente e promissora para a estimativa de propriedades das madeiras de forma rápida, e sem alterar o uso final do material. Ou seja, essencial para ser aplicado nas amostras em campo.

1.1. O problema e sua importância

As madeiras jovens de teca possuem uma relação grande de alburno/cerne. As madeiras de cerne em geral são utilizadas devido a sua durabilidade e resistência mecânica. Espera-se que madeira de cerne possui maiores valores de resistências quando comparadas a madeira de cerne-alburno (misto). Outra característica importante para a madeira jovem em questão é a abundante ocorrência de nós nas peças comerciais.

A presença de nós diminui a qualidade da madeira, o seu valor de uso, adaptabilidade e resistência. Para as propriedades mecânicas haverá interferência dos nós presentes na madeira, diminuindo a resistência quando comparadas madeiras sem presença de nós.

1.2. Objetivo

1.2.1. Objetivo geral

Caracterizar a madeira jovem de teca (Tectona grandis).

1.2.2. Objetivos específicos

Determinar as propriedades físicas da madeira e propriedades mecânicas;

Estimar o módulo de elasticidade com a utilização dos ensaios de propagação de ondas ultrassônicas e de excitação;

Determinar a influência docerne/alburno nas propriedades físico-mecânicas e acústicas da madeira;

Determinar a influência dos nós nas propriedades físico-mecânicas da madeira.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Madeira Teca

A Teca, conhecida cientificamente como *Tectona grandis* L.f., pertence à famíliaLamiaceae, ocorre naturalmente no centro e sul da Índia, atingindo altura de 35 m e DAP maior que 100 cm (FILHO*et al.*, 2003). É uma árvore de grande porte, caducifólia, copa arredondadae fuste cilíndrico revestido por uma casca grossa (SOUZA, 2019).

A produção mundial de teca é estimada em cerca de 3 milhões m³/ano, sendo os maiores produtores Indonésia, Mianmar, Índia e Sri Lanka, onde a maior parcela das madeiras produzidas são consumidas pelo mercado interno. Cerca de aproximadamente 500 mil m³/ano são comercializados no mercado internacional, dentre os importadores destacam-se: Alemanha, Arábia Saudita, Australia, Dinamarca, Emirados Árabes, Estados Unidos, Holanda, Itália, Japão e Reino Unido (REVISTA CÁRCERES FLORESTAL, 2016).

As primeiras plantações de *Tectona grandis* no Brasil tiveram início em 1971, região de Cáceres no estado do Mato Grosso, devido às condições favoráveis para o cultivo, boa adaptação às condições climáticas locais e um bom crescimento(DELGADO*et al.*, 2008). No Brasil possui cerca de9,55 milhões de hectares plantados destinadosà indústria de celulose, papel, painéis de madeira, piso laminado e carvão vegetal,gerando uma receita bruta de 116,6 bilhão de reais (IBÁ, 2021). A área plantada de teca cresce continuamente, passando de 65.440ha, plantados em 2010 para 93.957 ha, em 2018 (IBÁ, 2019).

No Brasil a expansão de *Tectona grandis* ocorreu em maior concentração nas regiões Centro-Oeste e Norte, destacando-se a região norte com 15.603,45 ha de

madeira. A espécie adaptou nos estados de Rondônia, Pará e o Centro-Oeste, com destaque o estado de Mato Grosso com 11.7277,28 ha de madeira (MOREIRA *et al.*, 2021).

As plantações de teca possuem grande produtividade e o valor pago pela madeira atende as expectativas de remuneração ao produtor rural, o qual resulta em estímulos para continuar empreendendo. Entretanto, as madeiras mais jovens que possuem menores diâmetros são comercializadas para aplicações menos nobres. Estima-se ainda que cerca de 70% da produção mundial seja destinadaapenas para o mercado da Índia (FIGUEIREDO, 2021).

A madeira de tecaé resistente à ação do sol, variação de temperatura, água da chuva e mar, além de ser resistentea agentes xilófagos eter boa trabalhabilidade. Todos esses fatores contribuem para que amesma seja utilizada principalmente na produção de móveis, estruturas, pisos, peças torneadas, construção naval e dormente (CARDOSO, 1991). O que é confirmado por Lopes *et al.* (2014), quando afirmam que a espécieapresenta diferença entre o cerne e alburno, sendo a madeira do cerne mais atrativa pela sua coloração amarela ou marrom-dourada e por possuir propriedade como boa durabilidade natural, boa usinagem, bom acabamento e alta estabilidade dimensional. Já a madeira de alburno apresenta boa usinagem, bom acabamento e alta estabilidade dimensional, porém, a sua durabilidade é menor que madeira de cerne, sendonecessária a utilização de preservantes (VIEIRA *et al.*, 2002).

As propriedades da madeira podem variar dependendo da região do plantio, idade, taxa de crescimento e o tipo da madeira, se ela é juvenil ou adulta (LOIOLA *et al.*, 2019). As variações entre as propriedades da madeira dos lenhos juvenil e adultos podem interferir no processo de industrialização e transformação da madeira em outros produtos (PALERMO *et al.*, 2013). O termo lenho juvenil está relacionado à fase jovem do câmbio vascular, por isso cronologicamente é a madeira mais velha formada na árvore, já o lenho adulto é formado pela atividade do câmbio fisiologicamente maduro (CÂMARA*et al.*, 2020). O lenho juvenil é formado na região central das árvores desde a base ao topo, já o lenho adulto é formado posteriormente ao juvenil e apresenta características e propriedades mais uniformes (FIRMINO *et al.*, 2017).

A teca é conhecida por sua resistência ao ataque xilófago, ótima relação resistência mecânica/peso e a sua estética (MOYA *et al.*, 2014). A madeira adulta é leve a moderadamente pesada, de dureza média, boa resistência mecânica e grande variabilidade no uso (PAES *et al.*, 2015). Entretanto tem ciclos mais curtos, a madeira tem uma maior proporção de alburno, o qual apresenta diferentes características em relação à cor e durabilidade a agentes degradadores quando comparado ao cerne (LOPES *et al.*, 2014).

2.2. Características gerais da madeira

A natureza das células é dependente da idade do tecido cambial, formando zonas distintas dentro de uma mesma árvore (SILVA, 2002). Portanto, há distinção entre o cerneque é localizado no interior e o alburno localizado na parte mais exterior do tronco, essa ocorrência é devido ao processo de envelhecimento do vegetal com a morte celular e sinais hormonais desconhecidos (CÂMARA*et al.*, 2020).

Quando se trata de madeira é pouco improvável que seja isenta de defeitos e um desses defeitos são os nós (SZÜCS et al., 2015). Os nós presentes nas peças as depreciam especialmente em razão da presença de grã irregular, o qual quando aplicado um esforço faz com que a madeira tenha instabilidade, além de dificultar a trabalhabilidade trazendo prejuízos em relação as ferramentas (HOPPE; FREDDO, 2003).

O cerne contém mais compostos fenólicos e ácidos, e menos amido, apresentando a lignina mais condensada e com maior massa molecular (CÂMARA *et al.*, 2020). Os compostos acumulados, principalmente os compostos fenólicos do tipo flavonóide são responsáveis pela coloração do cerne (PEREIRA*et al.*, 2005).

O alburno, juntamente com o câmbio, representa a maior parte de atividade fisiológica no tronco: as células condutoras das zonas mais externas participam ativamente do transporte de líquidos, assim com as células parenquimáticas (BURGER; RICHTER, 1991). Essas células apresentam um material nutritivo devido ao amido, açúcares e lipídios presentes (CARMO, 2008). A madeira do alburno possui

maior permeabilidade e normalmente apresenta uma secagem mais rápida, quando comparado ao cerne (COSTA et al., 2017).

O alburno possui coloração clara, bem distinta do cerne cuja cor é marrom viva e brilhante, fazendo com que a teca seja uma madeira muito procurada para decoração de interiores e mobiliários finos (NASSER, 2019). Sabe-se que a madeira com maior quantidade de cerne é desejável para a produção de móveis e para suas aplicações na construção civil (PEREIRA *et al.*, 2013).

Finger *et al.* (2003) avaliaram árvore de teca proveniente do primeiro desbaste, e compararam madeiras de cerne e alburno. Concluíram quea utilização conjunta do cerne e do alburno não apresenta restrições sendo até extremamente vantajosa, pois o cerne e o alburno, juntos, contrastam-se gerando desenhos magníficos. Porém somente na região do alburno se faz necessário o tratamento impermeabilizante.

Kokutse *et al.* (2006) estudaram características da madeira de teca na direção medula casca. O cerne interno da teca foi menos resistente ao ataque de patógenos do que o cerne intermediário ou externo. Além de que o método de colorimetria usado para medir diferentes parâmetros de cor em madeira de teca funcionou bem, e uma relação altamente significativa foi encontrada entre durabilidade natural e leveza em uma ampla gama de amostras.

O nó inicia na região medular da árvore, impondo uma série de desvios ou descontinuidades no tecido lenhoso do tronco.Em sua origem, o nó apresenta integrado ao lenho, podendo apresentar alterações quanto sentido da grã da madeira (CARPINELLI, 2002).

Os nós presentes na madeira sãoconsiderados como um defeito, diminuindo a qualidade, o valor de uso, resistência e durabilidade. Para que ocorra diminuição do aparecimento de nós deve-se fazer o corte de galhosdurante o crescimento da árvore(SZÜCS *et al.*, 2015).

A ocorrência de nós na madeira influencia negativamente suavalorização, havendo com que ocorra depreciação, principalmente devido à presença de grã irregular nas proximidades, que no caso de esforços mecânicostrará instabilidade na trabalhabilidade da madeira (BUGER; RICHTER, 1991).

2.3. Propriedades físicas da madeira

As propriedades físicas são importantes na caracterização do material e o seu conhecimento é fundamental, pois encontra associado às diversas formas de transformação industrial, bem como as variadas formas de utilização da madeira para diferentes produtos (BONDUELLE *et al.*,2015).

Dentre as propriedades físicas da madeira estão:àumidade, densidade básica e densidade aparente. Essas propriedades são determinadas através de ensaios de laboratórios e seguem normas específicas. No Brasil utiliza a Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT(ARAUJO, 2002).

2.3.1. Umidade

O estudo da umidade da madeira é importante, pois ela afeta a diversas características do material como: o seu desempenho e utilização quanto à estabilidade dimensional, à trabalhabilidade, resistência mecânica e durabilidade natural (FIGUEROA, 2012). Além disso, a madeira tende a um equilíbrio em função da umidade e temperatura do ambiente em que se encontra (SZÜCS *et al.*, 2015).

O teor umidade se dá pela relação entre o peso da água contido na madeira e o peso da madeira no estado completamente seco, expresso em porcentagem (MORESCHI, 2014). O excesso de umidade pode levar a madeira a um crescimento mais rápido, porém provoca uma má qualidade, possuindo uma menor densidade média, cor menos atraente, empobrecimento da textura e perda de resistência mecânica (QUEIROZ, 2018).

A umidade está presente na madeira sendo classificada em função da água contida nos espaços celulares e intercelulares (água livre), água impregnada nas paredes celulares (água de impregnação) e água que participa da constituição química (MORESCHI, 2014).

A água livre presente na madeira está sujeita às forças capilares nos lumens celulares, espaços intercelulares e aberturas de pontuações. Já a água de adesão está

presente nas paredes celulares através de ligações de pontes de hidrogênio existentes nos polímeros da madeira (LOPES, 2018). Quando toda água livre é retirada, diz-se que a madeira atingiu o seu ponto desaturação das fibras (PSF). Uma vez atingido o PSF, a parede celular está completamente saturada de água e não existe mais água livre nos lumes das células (AMORIM *et al.*,2021).Portanto, a umidade está relacionada com as propriedades de resistência da madeira, a trabalhabilidade e suscetibilidade aos organismos xilófagos (DIAS, 2020).

2.3.2. Densidade básica

A densidade básica é considerada uma das principais propriedades físicas da madeira, por ser um forte indicador de qualidade (DIAS *et al.*, 2018). É expressa pela relação entre o peso absolutamente seco da madeira e seu volume quando está completamente saturado por água (FOELKEL *et al.*, 1971).

Segundo Magalhães *et al.*(2020) a densidade básica tem correlação com os espaçamentos utilizados nos plantios, proporcionando valores mais altos em espaçamentos maiores e densidades mais baixas em espaçamentos menores. De acordo com Bonduelle *et al.*(2015), as indústrias de base consideram esta propriedade como índice de qualidade importante, uma vez que está correlacionada com rendimento e com as características tecnológicas dos produtos.

Gil *et al.*(2018)avaliaram árvores de *Tectona* grandisde sete anos de idade, e determinaram os valores de densidade básica de 0,39 [g.cm⁻³] a 0,41 [g.cm⁻³], apresentando uma média de 0,40 [g.cm⁻³]. Dias *et al.*(2018) por sua vez encontraram valores de 0,510[g.cm⁻³] para a mesma espécie com treze anos de idade.

Lemos *et al.*(2019) realizaram um estudo utilizando madeira *Tectona grandis* L.f. com seis anos de idade proveniente de árvores de desbastes de plantios clonal e seminal. Os valores encontrados para densidade básica foram de 0,486 [g.cm⁻³]em plantios clonais, enquanto para plantios com sementes o valor médio foi de 0,454 [g.cm⁻³]. Já Mendoza *et al.*(2021) utilizaram árvores clonais provenientes de um

plantio de homogêneo de oito anos de idade e obtiveram a densidade básica de 0,556 [g.cm⁻³].

2.3.3. Densidade aparente

A densidade aparente é a massa específica convencional definida pela razão entre a massa e o volume com o mesmo teor de umidade (ABNT 7190, 1997). A densidade aparente é umas das propriedades mais importantes da madeira, pois está relacionada com as propriedades físicas e mecânicas, sendo referência para classificar e especificar a madeira para o seu melhor uso(MORESCHI, 2014).

Os autores Lopes *et al.* (2014) estudaram amostras de teca com espaçamentos de 4x2, 5x2 e 6x2 metros e compararam madeiras de cerne e alburno. Para madeira de cerne,o valor médio encontrado de densidades aparente foi de 0,594 [g.cm⁻³], 0,575 [g.cm⁻³] e 0,616 [g.cm⁻³] para os espaçamentos de 4x2, 5x2 e 6x2 metros respectivamente. Já para madeira de alburno, os valores médiosforam 0,663[g.cm⁻³], 0,605 [g.cm⁻³] e 0,624 [g.cm⁻³] para os espaçamentos de 4x2, 5x2 e 6x2 metros respectivamente. No estudo citado, não houve uma relação direta entre o parâmetro densidade aparente e espaçamento dos plantios florestais, o que pode ser justificado pelaárvore ter doze anos de idade, e provavelmente, composta por grande proporção de madeira juvenil.

Finger(2003) caracterizou a madeira de teca proveniente do primeiro desbaste na região do cerne, alburno e cerne-alburno e os valores de densidade aparente na região do cerne foi de 0,6281 [g.cm⁻³], do alburno foi de 0,6139 [g.cm⁻³] e cerne-alburno foi de 0,6188 [g.cm⁻³]. Mostrando as densidades determinadas para as três regiões não variaram entre si, e que as madeiras do primeiro desbaste poderiam ser utilizadas para estruturas leves.

Queiroz (2018) estudou a densidade da madeira de teca de cinco clones (MT-01, MT-02, MT-08, MT-80 e mais a madeira de árvore de origem seminal (MT-SE), com nove anos de idade sob os mesmos espaçamentos. Os valores encontrados para as

madeiras de clones e seminal foram 0,490[g.cm⁻³], 0,519 [g.cm⁻³], 0,530 [g.cm⁻³], 0,573 [g.cm⁻³] e 0,570 [g.cm⁻³], respectivamente, MT-01, MT-02, MT-08, MT-80 e MT-SE.

2.4. Propriedadesmecânicas da madeira

As propriedades mecânicas traduzem a resistência em relação ao peso da madeira. Dentre vários materiais, a madeira é sem dúvida um dos que possuem essa relação mais positiva, tendo assim uma grande vantagem para dimensionamentos estruturais. O que é confirmado por Stangerlin *et al.*(2008), quando afirmam que as propriedades mecânicas definem o comportamento da madeira quando submetida a esforços de natureza mecânica, permitindo comparar com outras madeiras de propriedades conhecidas a fim de conhecer a utilização (BRAZ *et al.*, 2013 apud STANGERLIN *et al.*, 2008).Latreille *et al.*(2018) também defendem que é a partir da resistência mecânica que a madeira é direcionada para o melhor uso.

A madeira é um material anisotrópico, e como forma de simplificação, a literatura reduz a mesma para ortotrópica, sendo possível assim caracterizá-la com maior exatidão dentre as três direções principais: a tangencial, radial e longitudinal às fibras (KLOCK, 2000). A NBR 7190 (1997) determina as propriedades mecânicas de forma a reduzir as direções tangenciais e radiais para normal às fibras, redução importante por questões de praticidade. Essa direção normal às fibras possui resistência reduzida quando comparada a direção longitudinal às fibras. Chegando a ser apenas 25% do valor encontrado para compressão na direção longitudinal, por exemplo.

As propriedades mecânicas analisam a destreza da madeira em suportar cargas, avaliando em duas direções principais: normal e paralela às fibras. Normalmente, para mensuração, são consideradas a resistência e a rigidez, que reportam a proporção existente entre tensões e deformações específicas na fase de comportamento elásticolinear. A resistência é a aptidão em suportar solicitações mecânicas propriamente ditas e a rigidez é a avaliação do módulo de elasticidade (LEONELLO *et al.*, 2011).

2.4.1.Flexão

O ensaio de flexão determina a resistência e a rigidez da madeira (ABNT 7190, 1997). A flexão consiste em uma carga aplicada sobre um corpo de prova que está sobre dois apoios, na metade de seu comprimento, para causar tensões e deformações mensuráveis até sua ruptura (DIAS, 2020).

Em relação às propriedades mecânicas, os módulos de ruptura (MOR) e o módulo de elasticidade (MOE) são parâmetros determinados no teste de flexão, sendo importante na caracterização tecnológica da madeira, pois eles fornecem a resistência do material para uma boa aproximação, na prática, em critérios de classificação (CEZARO *et al.*, 2016).

Inicialmente a madeira encontra em regime elástico, deforma de forma reversível, ou seja, possui a capacidade de voltar ao seu estado original (DIAS, 2020). A partir do ponto que a madeira deixa de ser elástica ela passa a ser plástica, ou seja, não apresenta mais a capacidade de retornar ao seu estado original mesmo quando a força que a deforma cessar (STANGERLIN *et al.*, 2010).

Avelino (2012) avaliou a madeira de teca jovemem três diferentes espaçamentos, visando a produção demóveis e observou diferenças significativas entre os valores obtidos para o módulo de ruptura e o módulo de elasticidade. De acordo com a autora, o espaçamento 4x2metros apresentou maior módulo de ruptura (MOR) 106 [MPa] e módulo de elasticidade 22.950 [MPa]. Já o espaçamento 5x2metros apresentou91 [MPa] e 23.694 [MPa] para o MOR e MOE, respectivamente, e para o espaçamento 6x2 metros apresentou o MOR de 96 [MPa] e o MOE 21.657 [MPa]. Mostrando que diversos fatores podem intervir na qualidade da madeira, dentre eles, o espaçamento do plantio.

Paes *et al.* (2015) estudaram um povoamento de *Tectona grandis* com idade entre seis e sete anos visando a produção de móveis. Os valores médios de MOR para as direções tangencial e radial foram, respectivamente, de 86,16 [MPa] e 88,52 [MPa]

e os valores de MOE foram 9.054,95 [MPa] e 9.897,90 [MPa], para amostras com aproximadamente com 12% de umidade.

Motta *et al.* (2013) utilizaram teca com quinze anos de idade afim de verificar o efeito do tratamento térmico na resistência à flexão. A madeira foi submetida a quatro diferentes tratamentos (normal, aquecida e congelada) e para esses tratamentos obtiveram-se o MOE E MOR, respectivamente 957,62 [MPa] e 96,84 [MPa] para o tratamento normal, 9,22 [MPa] e 90,13 [MPa] tratamento aquecido, 9,32 [MPa] e 92,66 [MPa] para o tratamento congelado e 10,09 [MPa] e 105,05 [MPa] para a secagem, demonstrando assim que os tratamentos térmicos não alteram significativamente as propriedades de resistência da madeira.

Souza (2019) caracterizou um povoamento homogêneo de *Tectona grandis* com quatorze anos de idade. O MOE e MOR proveniente dos sítios distintos foram, respectivamente, 10.755,61 [MPa] e 98,86 [MPa] para o sítio Alta Floresta, 10.772,97 [MPa] e 101,61 [MPa] para o sítio N. S. Livramento e 12.091,13 [MPa] e 109,69 [MPa] para Cáceres. Mostrando assim a influência da localização dos plantios nos resultados de elasticidade e ruptura da madeira.

2.4.2. Compressão

Segundo a ABNT 7190 (1997) os esforços correspondentes à compressão normal às fibras são determinados com a hipótese de comportamento elástico plástico da madeira levando em consideração a extensão do carregamento.

Quando aplicada a compressão normal às fibras a resistência é menor, pois ocorre esmagamento das fibrassendo esse valor um quarto da compressão paralela (LOURENCI, 2018).O ensaio de compressão normal às fibras é inicialmente linear no diagrama tensão versus deformação, posteriormente, há um aumento nas deformações em relação às tensões (DIAS, 1994).

Motta (2011) ao avaliar a madeira de teca com quinze anos de idade, cultivada no Vale do Rio Doce, encontrou uma resistência à compressão de 54,23 [MPa]. Já Guirardi (2020) estudou a madeira de desbaste de *Tectona grandis* com idades de seis, oito e dezoito anos de idade e encontrou resistências de 35,70 [MPa], 38,15 [MPa] e

44,23[MPa], respectivamente, sendo a maior resistência a madeira de dezoito anos de idade. Mostrando que geralmente a idade é um parâmetro influenciador.

Paes *et al.* (2015) estudaram um povoamento de *Tectona grandis* com idade entre seis e sete anos visando a produção de móveis, e obtiveram no ensaio de compressão paralela às fibras tensão de ruptura média de 39,23 [MPa].

Avelino (2012) ao utilizar a madeira de teca com onze anos de idade comparou valores de resistência à compressão paralela às fibras em plantios florestais com diferentes espaçamentos, 4x2, 5x2 e 6x2 metros e encontraram valores de 48, 09 [MPa], 44,19 [MPa] e 41,88 [MPa], respectivamente. Como conclusão, o autor destacou que a espécie se mostra compatível para confecção de móveis como assentos, móveis de apoio,entre outras aplicações.

2.4.3. Dureza Janka

A dureza é definida como a resistência que um corpo sólido apresenta à penetraçãode outros através da aplicação de uma determinada carga (FERNANDES; VITO, 2018), produzido pela penetração de uma semiesferade aço com área diametral de 1 [cm²] (MORESCHI, 2014).

A dureza Janka tem importância na caracterização mecânica de madeiras por ser um importante parâmetro de comparação entre espécies, além deapresentar boas correlações com outras importantes propriedades mecânicas da madeira, como por exemplo, a compressão paralela e normal as fibras (COLENCI, 2002).

Motta (2011) estudando a madeira de teca, com 15 anos de idade, avaliou a dureza Janka em amostras nas três direções principais da madeira, paralela às fibras, radial e tangencial, e encontrou valores de 49,13 [MPa], 47,86 [MPa] e 46,29 [MPa], respectivamente para o teor de umidade verde e 50,21 [MPa], 48,15 [MPa] e 47,66 [MPa] para a madeira a 12% de umidade.

Avelino (2012) ao comparar madeira de teca, com 11 anos de idade, para dureza Janka diferentes espaçamentos, 4x2, 5x2 e 6x2 metrose direções (radial, tangencial e longitudinal, encontrou para a direção radial: 43,62 [MPa], 45,73 [MPa] e

40,21 [MPa]; tangencial: 44,88 [MPa], 45,27 [MPa] e 43,75 [MPa]; e na longitudinal: 53,23 [MPa], 48,49 [MPa] e 46,16 [MPa], respectivamente.

Guirardi (2020) avaliou as propriedades tecnológicas de madeira de desbastes da *Tectona grandis*. Os valores encontrados do ensaio de dureza Janka foram 38,74 [MPa], 42,66 [MPa] e 71,10 [MPa] para árvores com seis, oito e dezoito anos de idade, respectivamente.

2.4.4. **Tração**

O ensaio de tração tem como objetivo determinar a resistência e a rigidez, e é dado pela máxima tensão de tração que pode atuar em um trecho central de seção transversal (ABNT 7190, 1997).

Dias e Lahr (2004) estudando espécies nativas apresentaram importante contribuição ajustando um modelo para a relaçãoda densidade aparente e tração paralela às fibras. Segundo os mesmos autores para a relação da densidade aparente e resistência à tração as fibras, nos modelos analisados, o coeficiente de determinação r² apresentou valores estatisticamente não significativos. Portanto, evidencia uma fraca relação.

Motta (2011) encontrou para madeiras de teca com aproximadamente 15 anos, valores médios de resistência à tração normal igual a 3,82 [MPa] para amostras saturadas, e 5,30 [MPa] em amostras a 12% de umidade. Mostrando a influência da umidade no resultado.

Pinto (2007) estudou a madeira de teca aos 5, 10 e 30 anos de idade com objetivo de determinara melhor idade para o corte. Em relação à tração paralela as fibras os valores determinados foram 74,24 [MPa], 97,24 [MPa] e 129,59 [MPa]. Os resultados encontraram grande influência da idade na propriedade mecânica avaliada. A autora determinou ainda uma curva de ajuste com R²= 94 entre as duas variáveis.

2.5. Propagação de ondas

Os ensaios não destrutivos são utilizados para avaliar a uniformidade do material, além de ser de baixo custo onde os elementos analisados não são danificados, portanto, pode ser realizado repetidamente (CARRILLO *et al.*, 2019), proporcionandoo módulo de elasticidade dinâmico através de equipamentos como stress wave, ultrassom e vibração (SILVA, 2021).

Os módulos elásticos são fundamentais por estarem relacionados à descrição de outras propriedades mecânicas, como por exemplo, a tensão de escoamento e tensão de ruptura (CARRASCO *et al.*, 2017).

As avaliações não destrutivas são empregadas para a determinação das propriedades físicas e mecânicas em materiais como os metais e ligas metálicas para detectar os desfeitos e descontinuidade e no caso da madeira, são usados para verificar como afetam as características físicas e mecânicas (TARGA *et al.*, 2005).

A excitação por impulso é um ensaio que determina os módulos de elasticidade dinâmico e o amortecimento dos materiais através de frequências vibracionais naturais. O equipamento utilizado para a obtenção desses dados é o Sonelastic. Este excita frequências por meio de um pulsador, gerando um sinal no qual é tratado matematicamente para obter o espectro de frequência correspondente e em seguida calcular o módulo elástico dinâmico (PIZZOL *et al.*, 2017).

No ensaio com o sonelastic o corpo de prova vibra em diferentes modos e para cada modo há uma frequência fundamental característica. O modo de vibração é determinado através das condições de contorno, sendo a frequência fundamental determinada de acordo com a geometria, massa, dimensões e os módulos de elasticidade (OTANI *et al.*, 2015).

Já o método de propagação de ondas ultrassônicas é caracterizado por frequências acima de 20000 [Hz] e é constituído por um circuito eletrônico que transmite pulsos elétricos (SILVA, 2010). Estes são conduzidos através de cabos e são transformados em ondas elásticas pelo cristal piezelétrico localizado nos condutores. As vibrações mecânicas são geradas e transportadas pelo material, retardando o sinal emitido pelo gerador. O sinal retardado é recuperado por outro cristal piezelétrico e as

vibrações são amplificadas e transformadas novamente em pulsos elétricos para medir o tempo de propagação. Para calcular a velocidade, utiliza-se a distância e o tempo da onda sonora (CALEGARI, 2006).

Iwakiri *et al.*(2013) avaliaram o módulo de elasticidade dinâmico (MOE_d) de *Tectona* grandis de dezoito anos de idade no sentindo longitudinal e radialpor meio do equipamento Stress Wave Timer. No sentindo longitudinal o MOE_d na base foi de 13.187 [MPa], no meio 14.206 [MPa] e no topo 15.000 [MPa], já para a velocidade na base, meio e topo foram 4.665 [m.s⁻¹], 4.772 [m.s⁻¹] e 4.882 [m.s⁻¹], respectivamente.Ao avaliarem no sentido radial o MOE_d na medula foi de 13.341 [MPa] e na casca 14.993 [MPa], já para a velocidade os valores encontrados na medula e na casca foram, respectivamente, 4.719 [m.s⁻¹] e 4.835 [m.s⁻¹].

Carrasco *et al.*(2017) determinaram o módulo de elasticidade de 29 espécies de madeiras brasileiras por meio de sistema deensaios da Sonelastic da ATPC e entre essas espécies ele determinou a teca obtendo módulo de elasticidade dinâmico flexionalde 10.930[MPa].

Silva (2010)estudou a madeira de teca, aos 12 anos de idade, provenientes do município de Cáceres, Mato Grosso, em três densidades de plantios diferentes. Utilizou o método de propagação de ondas ultrassônico e o valor médio encontrado para o MOE_d foide 7.881,98 [MPa], a uma umidade de 12%. Já a velocidade de propagação da onda na direção longitudinal para teca, com a madeira na umidade equilíbrio, foi de 3.915 [m.s⁻¹].

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Descrição do material

A madeira utilizada nesta pesquisa proveniente de árvores de Tectona grandis, com idades de onze a quatorze anos, sendo o plantio localizado na fazenda de São Jorge, no município de Água Boa, Mato Grosso. Foram doadas ao Departamento de

Ciências Florestais e da Madeira (DCFM) da Universidade Federal do Espírito Santo – UFES, localizada no município de Jerônimo Monteiro.

3.2. Propriedades físicas da madeira

As propriedades físicas avaliadas foram: umidade, densidade básica, e densidade aparente. Todos os ensaios de propriedades físicas foram realizados de acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT NBR 7190 (1997).

Para a determinação da umidade, densidade aparente e densidade básica, os corpos de prova foram divididos em dois grupos, o primeiro grupo com madeira de cerne e o segundo com madeira de cerne-alburno (mista). Para cada grupo foram confeccionados vinte e nove corpos de prova retirados de forma aleatória no lote. As amostras foram pesadas em uma balança com exatidão de 0,01 [g] e medidos em direções longitudinal, tangencial e radial com a utilização de paquímetro com exatidão de 0,01 [mm], e logo após colocadas submersas em água com aplicação de vácuo por 31 diassaturandoaté não ter variação do peso.

Para a obtenção da umidade determinou-se a massa inicial (m_i) em uma balança de precisão com exatidão de 0,01 [g]. Para determinar a massa seca os corpos de provas foram colocados em uma estufa a uma temperatura máxima de $103^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ até o corpo de prova obter uma variação menor ou igual a 0,5%. Considera-se a massa final (m_f) a última variação, portanto, a umidade é obtida de acordo com a equação 1.

$$U_{\%} = \left[\frac{(m_i - m_f)}{m_f}\right] \times 100$$
 (Equação 1)

Onde,

m_i= Massa inicial da madeira, em gramas;

m_s= Massa da madeira final, em gramas.

A densidade básica é definida pela razão entre a massa seca e o volume saturado, sendo dada pela equação 2 (ABNT NBR 7190,1997).

$$\rho_{bas} = \frac{m_s}{v_{sat}} \quad \text{(Equação 2)}$$

Onde,

m_s= Massa seca, em quilogramas;

V_{sat}= Volume saturado, em metros cúbicos.

Já a densidade aparente é definida pela razão entre a massa e o volume dos corpos de prova com o teor de umidade de w% (ABNT NBR 7190, 1997), dada pela equação 3. E para a correção da densidade aparente foi utilizada a ISO 3130 (1975) com o teor de umidade de referência a 12% de acordo com a equação 4.

$$\rho_{ap} = \frac{m_{12}}{V_{12}} \qquad \text{(Equação 3)}$$

Onde,

M₁₂= Massa da madeira a 12%, em quilogramas;

 V_{12} = Volume da madeira a 12%, em metros cúbicos.

$$\rho_{12\%} = \rho_{\omega} \times \left[1 - \left(\frac{(1-k)(\omega-12)}{100}\right)\right] \qquad \text{(Equação 4)}$$

Onde,

k= Coeficiente volumétrico para mudança de 1% de umidade, e seu valor é igual a 0,85 \times 10⁻³ \times ρ_{ω} ;

 ρ_{ω} = Densidade aparente a $\omega_{\%}$ de teor de umidade, Kg.m⁻³; e

 ω = Teor de umidade em que se encontra o copo de prova, %.

3.3. Propriedades mecânicasda madeira

Os ensaios de propriedades mecânicas realizados neste trabalho foram os de flexão, compressão, dureza Janka e tração paralela às fibras. Todos os ensaios foram determinados de acordo Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT NBR

7190 (1997), com adaptações nas dimensões para compressão paralela às fibras e dureza Janka.

Antes da realização dos ensaios, os corpos de provas ficaram na câmara climatizada, por aproximadamente 45 dias para obterem o equilíbrio de umidade. E em seguidas foram realizados os testes de resistência mecânica na máquina universal da EMIC (capacidade de 10.000 toneladas).

Após os ensaios mecânicos, as amostras que não estavam com 12% de umidade foram corrigidas de acordo com as equações 5 e 6, conforme orientações da norma NBR 7190 da ABNT (1997).

$$f_{12\%} = f_{u\%} \left[1 + \left(\frac{3(U_{\%} - 12)}{100} \right) \right]$$
 (Equação 5)

$$E_{12\%} = E_{u\%} \left[1 + \left(\frac{2(U_{\%} - 12)}{100} \right) \right]$$
 (Equação 6)

Onde,

 $f_{12\%}$ = Valor da resistência à 12% de umidade;

f_{u%}= Valor da resistência encontrada no teor de umidade ensaiado;

U_%= Umidade do corpo de prova no momento do ensaio; e

E_{u%}= Valor da rigidez encontrada no teor de umidade ensaiado.

Para o ensaio de flexão estática foram produzidos sessenta corpos de prova com as dimensões30 cm x 2 cm x 2 cm (comprimento, largura e espessura), figura 1. Devido à constante ocorrência de nós, as amostragens desse ensaio foram divididas em quatro grupos para efeito de comparação dos dados, sendo: cerne com nó (CCN), cerne sem nó (CSN), cerne-alburno com nó (MCN) e cerne-alburno sem nó (MSN). De cada grupo foram retiradas quinze amostras aleatórias do lote para a obtenção dos módulos de ruptura (MOR) e módulos de elasticidade (MOE).





Figura 1: Corpos de prova de flexão antes do ensaio.

Fonte: A autora.

Para o ensaio de compressão longitudinal às fibras foram produzidos sessenta corpos de prova com as dimensões 2cm x 3cm x 5cm (espessura, largura e comprimento), distribuídos de forma igual aos quatro grupos amostrados (CCN, CSN, MCN e MSN), figura 2.



Figura 2: Corpos de prova de compressão antes do ensaio.

Fonte: A autora.

Para o ensaio de dureza Janka também foram produzidos sessenta corpos de prova com as dimensões 3 cm x 3cm x 3cm (comprimento, largura e espessura), distribuídos de forma igual aos quatro grupos amostrados (CCN, CSN, MCN e MSN), figura 3.



Figura 3: Corpos de prova de dureza antes do ensaio.

Fonte: A autora.

Para o ensaio de tração paralela às fibras foram produzidos trinta e quatrocorpos de prova com as dimensões estabelecidas pela NBR 7190 (1997) e distribuídos em quatro grupos amostrados (CCN, CSN, MCN e MSN), figura 4.





Figura 4: Corpos de prova de tração paralela às fibras antes do ensaio.

Fonte: A autora.

3.4. Propagação de ondas

Para os ensaios de propagação de ondas foram realizados dois métodos de ensaio: os de propagação de ondas de excitação e o de propagação de ondas ultrassônicas. E a partir daí efetuados os testes estatísticos.

Ambos os ensaios foram realizados no Laboratório de Estruturas da Madeira (Lemad) do Departamento de Ciências Florestais e da Madeira (DCFM) da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), localizado no município de Jerônimo Monteiro – ES.

3.4.1. Propagação de ondas de excitação

Para a análise de propagação de ondas de excitação foram seguidas as determinações contidas na norma ASTM E-1876, em que os corpos de prova caracterizados levam em consideração aos modos de vibração longitudinal, flexional e torcional. Para tal, foi utilizado um suporte ajustável para barras, um pulsador, um captador direcional e um software específico do equipamento Sonelastic.

O equipamento Sonelastic calcula os valores dos módulos elásticos a partir das frequências naturais de vibração das amostras. As frequências são excitadas por meio do pulsador, seguido da captação da resposta acústica por um sensor. Aplica-se um tratamento matemático ao sinal (transformada de Fourier) para a obtenção do espectro de frequências correspondentes (OTANI e PEREIRA, 2013).

Para a realização do ensaio foi fornecida a massa, mensurada por uma balança digital com exatidão de 0,01 [g], e as dimensões com comprimento, largura e altura feitas pela média de três medições em cada face, com auxílio de um paquímetro com exatidão de 0,01 [mm].

Para o ensaio a barra foi ajustada a uma posição ficando apoiados na posição de 0,224 L (≈ 3,36 cm)ocorrendo uma vibração excitada pelabatida do pulsador.No ensaio flexional (figura5A), a excitação por cima e a captação por baixo, ambas no centro do corpo de provaobtendo o módulo de elasticidade através do método de vibração flexional. Já ensaio torcional (figura5B), a excitação realizada na parte superior e a captação pela parte inferior em lados opostos, ambos afastados da extremidade 0,32 multiplicados pelo seu comprimento, obtendo o módulo de elasticidade torcional (G).

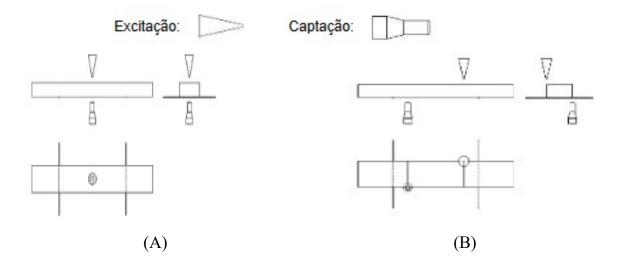


Figura 5: Modo de captação e excitação flexional (A) e modo de captação e excitação torcional (B). Fonte: ATCP – Engenharia Física, 2014.

3.4.2. Propagação de ondas ultrassônicas

O teste dinâmico foi realizado com base no princípio de ondas ultrassônicas, seguindo as prescrições da NBR 58000 (2007). O aparelho de ultrassom utilizado foi o V-Metter IV da marca *James Instruments*. Ele é dotado de dois transdutores piezelétricos que geram pulsos ultrassônicos na frequência do transdutor (500 kHz). O tempo de propagação do pulso é mostrado pelo equipamento, e a partir daí calculado o valor de velocidade de propagação da onda percorrida nas madeiras de teca. Ao todo foram ensaiadas 46 amostras de 3cmx1cm x 15cm (largura, espessura e comprimento respectivamente). Os testes dinâmicos foram realizados na direção longitudinal às fibras.

As amostras foram divididas em 2 grupos, o grupo com madeira de cerne e madeira de cerne-alburno (misto). Ao todo foram vinte e trêscorpos de prova para cada grupo. A partir do ensaio de propagação de ondas ultrassônicas foi possível obter o tempo (em s) de percurso onda, figura6.

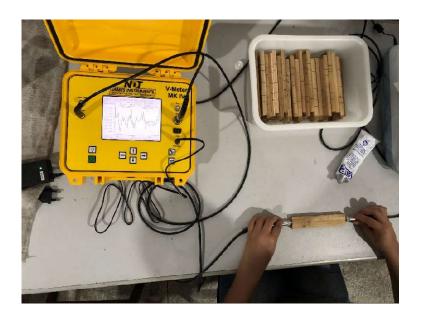


Figura 6: Ensaio com ultrassom.

Fonte: A autora.

O comprimento do CP foi determinado a partir do comprimento de onda (λ) , e respeitou as orientações da NBR 58000 (2007), a qual prescreve que o comprimento do corpo de prova (L) deve ser de no mínimo 3λ . Os cálculos foram realizados para a frequência de transdutor de 500 [kHz], que leva em consideração que λ é inversamente proporcional à frequência dos transdutores (λ = V_{onda} /frequência). Em corpo de prova do grupo cerne, o valor médio da relação L/ λ foi de 16,35, enquanto para o grupo cerne-alburno (misto) foi de 15,27.

Após a realização do ensaio, obteve-se o tempo de propagação da onda dado pelo ultrassom, e a partir daí calculado o valor de velocidade de propagação da onda, utilizando a equação 7.

$$V = \frac{L}{(t)}$$
 (Equação 7)

Onde,

V= Velocidade de propagação da onda, m.s⁻¹;

t= Tempo, em segundos; e

L= comprimento da peça, em metros.

Como muitos autores consideram os valores de constante de rigidez (CR) aproximado aos valores do módulo de elasticidade dinâmico (E_{din}) (COSTA, 2012), este trabalho utilizou a equação 8 para o módulo de elasticidade dinâmico (E_{din}), o qual foi determinado na direção longitudinal dos corpos de prova.

$$E_d = V_0^2 \times \rho \times 10^{-6} (\text{Equação 8})$$

Em que:

 V_0^2 = Velocidade de propagação da onda, m.s⁻¹;

 ρ = Densidade da madeira, Kg.m⁻³.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para melhor orientação do leitor, deve-se esclarecer que neste capítulo estão apresentados e discutidos os resultados das propriedades físicas no subitem 4.1, propriedades mecânicas no subitem 4.2, bem como os ensaios não destrutivos têm seus resultados e discussões presentes no item 4.3.

4.1. Propriedades físicas da madeira

Na Tabela 4.1 são apresentados os valores de umidade, densidade aparente a 12% de umidade e densidade básica da madeira teca. Nesta tabela é possível observar que o lote conteve tábuas com madeira de cerne e mistas (cerne-alburno), e por este motivo as análises foram realizadas para as duas amostragens.

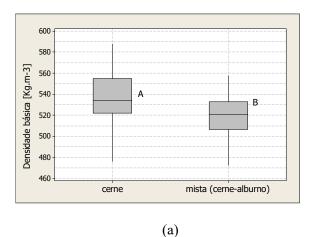
TABELA 4.1: Resultados da caracterização física do lote da madeira de *Tectona grandis* estudada.

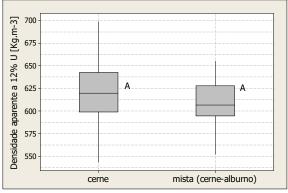
AMOSTRAS	Umidade	D.b.	D.ap.12% U
	[%]	[Kg.m ⁻³]	[Kg.m ⁻³]
Cerne	14,40B	535,77 A	617,26 A
	(12,64;16,28)*;	(533,95;537,59)*	(615,40;619,11)*;34,51**
Course allburge	15,5 A	520,7 B	607,35 A
Cerne-alburno	(13,71;17,35)*;0,55**	(518,84; 522,55)*:18,27**	(605,53;609,16)*;23,12**

Médias seguidas pela mesma letra na vertical, não diferem estatisticamente entre si (Tukey; p > 0.05). ou %. * Representam os valores contidos no intervalo de confiança (95% CI),e **Desvio padrão em kg.m⁻³.

Fonte: A autora (2022).

Na Figura 4.1 são apresentados os gráficos de Boxplot para as caracterizações de densidade básica e densidade aparente a 12% de umidade, divididos em dois grupos de amostragem.





(a) (b)
Figura 7: Gráfico de Boxplot para caracterização da densidade [Kg.m⁻³] da madeira de cerne e cernealburno (a) densidade básica; (b) densidade aparente a 12% de umidade.
Fonte: A autora (2022).

É possível notar com base na Tabela 4.1 e na Figura 8 que, os valores de densidade básica tiveram maiores variações para o grupo de madeiras de cerne, quando comparados com o grupo de madeiras cerne-alburno. Já para a densidade aparente a 12% de umidade, as mesmas foram estatisticamente equivalentes.

Ao avaliar a densidade básica da madeira observou-se valores estatisticamente semelhantes pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, com médias variando de 535,77 [Kg.m⁻³] para as amostras de cerne e 520,69 [Kg.m⁻³] para as madeiras mistas. Já para a densidade aparente a 12% de umidade (figura 7), os valores obtidos foram de 617,26 [Kg.m⁻³] para as madeiras de cerne e 607,35 [Kg.m⁻³] para as madeiras de alburno-cerne. As variações da densidade básica são devidas às diferenças presente na estrutura anatômica e na quantidade de substâncias presentes por unidade de volume, podendo ter influência da idade da árvore, clima em que a mesma está plantada, inclinação do plantio, entre vários outros fatores (FREITAS *et al.*, 2016).

O estudo da densidade da madeira é essencial para indicarpossíveis destinações, podendo ser tanto para uso estrutural, bem como na produção de móveis ou produção de outrosprodutos de maior valor agregado (BONDUELLE *et al.*, 2015).

Iwakiri *et al.*(2013) utilizaram lamelas de madeira de *Tectona grandis* com 18 anos e obtiveram a determinação da densidade aparente a 12% de umidade de 618 [Kg.m⁻³]. Chagas *et al.* (2014) avaliaram plantios de teca comerciais do município de Santo Antônio do Leverger -MT com idades de 4 anos, 6 anos e 12 anos para a densidade básica, e encontraram valores de512 [Kg.m⁻³], 506 [Kg.m⁻³] e 518 [Kg.m⁻³],

respectivamente. Já para densidade aparente apresentou aos 4 anos (527 Kg.m⁻³), aos 6 anos (514 Kg.m⁻³) e aos 12 anos (522 Kg.m⁻³). Mostrando que apesar de variarem de acordo com a idade das plantações, essas variações foram pequenas e a madeira permaneceu dentro da classificação de média densidade.

Queiroz (2018) avaliou cinco clones e mais a árvore de origem seminal de madeiras de teca com nove anos de idade, e obteve densidade básica média variando de 410,27 [Kg.m⁻³] a 488,55 [Kg.m⁻³], já para densidade aparente obteve uma média variando de 490,11[Kg.m⁻³] a 572,60 [Kg.m⁻³].

Oliveira *et al.*(2020)estudaram três clones diferentes de teca com idade de doze anos e compararam suas propriedades. Entre os clones encontraram valores da densidade básica média entre 506 [Kg.m⁻³] a 579[Kg.m⁻³].

Mendoza *et al.* (2021) avaliaram árvores clonais provenientes de um plantio de oito anos localizado no estado do Mato Grosso e obtiveram um valor médio da massa específica básica variando de 534,5 [Kg.m⁻³] a 577,3 [Kg.m⁻³] para um intervalo de confiança com 95% de probabilidade, sendo a média final de 555,9 [Kg.m⁻³].

4.2. Propriedades mecânicas da madeira

No presente trabalho foram realizados os ensaios mecânicos em corpos de prova com 14,4 a 15%, e os valores foram corrigidos para 12% de umidade. Devido à constante ocorrência de nós na amostragem enviada pela empresa, osgrupos foram divididos sem excluir essa característica do lote, ficando os seguintes grupos: cerne com nó (CCN), cerne sem nó (CSN), cerne-alburno com nó (MCN) e cerne-alburno sem nó (MSN). Diante essas características foram realizadas as comparações.

Na Tabela 4.2 são apresentados os valores médios das amostras para os ensaiosde compressão (f_{c0}), tração (f_{t0}) e dureza Janka (D.J), todos corpos de prova orientados paralelamente às fibras.

TABELA 4.2: Médias das amostras de cerne-alburno (mista) e cerne dos ensaios de compressão paralela às fibras, tração paralela às fibras e dureza Janka.

Amostras	$\mathbf{f_{c0}}$	\mathbf{f}_{t0}	D.J.
	[MPa]	[MPa]	[MPa]
MISTA	53,54 A	62,35 A	42,82 A
	(10,19)*	(8,64)*	(8,74)*
CERNE	50,84 A	60,50 A	41,01 A
	(10,43)*	(11,93)*	(6,80)*

Médias seguidas pela mesma letra na vertical, não diferem estatisticamente entre si (Tukey; p > 0,05).

Fonte: A autora (2022).

Na Tabela 4.3 são apresentados os valores de compressão paralela às fibras (f_{c0}) , tração paralela às fibras (f_{t0}) e dureza Janka.

TABELA 4.3: Médias do ensaio de compressão paralela às fibras, tração paralela às fibras e dureza Janka.

Amostras	$\mathbf{f_{c0}}$	\mathbf{f}_{t0}	D.J.
	[MPa]	[MPa]	[MPa]
MCNI	57,41 A	65,11 A	40,66 A
MSN	(6,58)*	(4,90)*	(5,06)*
MCN	49,66A B	59,59 A B	44,98 A
	(11,82)*	(10,83)*	(11,11)*
CON	56,23 A	67,23 A	41,23 A
CSN	(11,34)*	(8,72)*	(5,25)*
CON	45,45 B	51,86 B	40,79 A
CCN	(5,88)*	(9,95)*	(8,26)*

Médias seguidas pela mesma letra na vertical, não diferem estatisticamente entre si (Tukey; p > 0.05).

Fonte: A autora (2022).

Para o ensaio de compressão, os valores determinados para resistência a compressão paralela as fibras (f_{c0}) foram estatisticamente equivalentes quando divididos em madeiras de cerne (50,84 MPa) e cerne-alburno (53,53 MPa), sem considerar a presença ou não de nó (tabela 4.2). No entanto, quando levado em

^{*} Desvio padrão em MPae **Coeficiente. de variação em %.

^{*} Desvio padrão em MPae **Coeficiente. de variação em %.

consideração os quatro grupos de ocorrência (CCN, CSN, MCN e MSN), os valores se diferenciam pelo teste de Tukey a 5% de significância. Os maiores valores para f_{c0} foram encontrados para os corpos de prova sem a ocorrência de nó, mostrando assim, a presença de nós é prejudicial à resistência da madeira e diminui em média 9,6% e 6,7% o valor de sua resistência para os grupos de madeira cerne e mista (cernealburno), respectivamente.

A madeira para o uso industrial e comercial apresenta uma incidência grande de nós e outros defeitos, os quais comprometem o desempenho mecânico e a qualidade, proporcionando surgimentos patológicos, como por exemplo, fissuras em elementos estruturais na madeira (SANTOS 2016). Por este motivo recomenda-se que, as madeiras com nós sejam utilizadas para utilizações que não tenham comprometimento das peças, como por exemplo, móveis que não necessitem de grandes esforços estruturais.

Pinto (2007) estudou a madeira de teca proveniente da cidade de Cáceres com diferentes idades e encontrou valores médios de f_{c0} de 39,14 [MPa], 43,68 [MPa] e 56,40 [MPa] para madeira de 5 anos, 10 anos e 30 anos, respectivamente. Mostrando a variação existente entre as madeiras com idades diferentes, nesse estudo as madeiras com 5 e 10 anos foram estatisticamente semelhantes e diferenciando das madeiras provenientes do plantio de 30 anos.

Avelino (2012) também estudou a madeira teca e realizou a caracterização de madeira proveniente de plantio com onze anos, e três espaçamentos diferentes. Os espaçamentos estudados foram os de 6x2, 5x2 e 4x2 metros, e encontrou 41,88 [MPa], 44,19 [MPa] e 48,09 [MPa], respectivamente para f_{c0} .

Benedetti (2018) avaliou plantios de *Tectona grandis*para a avaliação da compressão paralela às fibras em madeiras com aproximadamente 9,4, 9,5 anos, 14,4 e 18,7 anos de idadee do estado de Mato Grosso. A compressão paralela média para as madeiras foram de 34,04 [MPa], 41,71 [MPa], 38,54 [MPa] e 41,98 [MPa] respectivamente. Mostrando que os valores médios variaram entre si, no entanto, não foram maiores para as mais velhas, conforme esperávamos, mostrando ter outras variáveis que também influenciam esse valor da resistência.

Para o ensaio de tração paralela às fibras, assim como aconteceu no ensaio de compressão, os valores determinados para resistência a tração paralela as fibras (f_{t0}) foram estatisticamente equivalentes quando divididos em madeiras de cerne (60,50 MPa) e cerne-alburno (62,35 MPa), sem considerar a presença ou não de nó (tabela 4.2). No entanto, quando levado em consideração os quatro grupos de ocorrência, os valores se diferenciam pelo teste de Tukey a 5% de significância. Os maiores valores para f_{t0} foram encontrados para os corpos de prova sem a ocorrência de nó, mostrando que a presença de nós diminuiu os valores das resistências em média 4,2% e 10,0% respectivamente para os grupos de madeira mista e cerne.

Pinto (2007) utilizou madeira de teca do estado de Mato Grosso e obteve para a resistência à tração um valor médio para idade de 5 anos (79,24 MPa), aos 10 anos (97,24 MPa) e 30 anos (129,59 MPa). Mostrando assim a influência da idade na determinação dessa variável.

Motta (2011) ao estudar madeira de Tectona grandis com idade de aproximadamente 15 anos do estado de Minas Gerais, encontrou valores de tração normal às fibras para madeira verde 3,82 [MPa] e para a madeira a 12% de umidade 5,30 [MPa], mostrando assim a influência da umidade nessa propriedade.

Para o ensaio de dureza Janka, observa-se um comportamento diferente quando comparado aos ensaios anteriores. A resistência à dureza Janka não sofreu interferência da ocorrência dos nós nos corpos de prova. Este fato pode ser explicado por se tratar de um ensaio realizado pontualmente no corpo de prova, com a introdução de uma semiesfera de seção diametral 1 [cm²], portanto, a esfera não atingiu o nó presente e por consequência não tiveram diferenças estatísticas.

Avelino (2012) utilizou madeira de *Tectona grandis* oriunda de plantio em Cáceres- MT, em diferentes espaçamentos visando o uso em movelaria e não encontrou diferença significativa para dureza Janka. No espaçamento de 6x2, 5x2 e 4x2 metros encontrou valores de 46,16 [MPa], 48,49 [MPa]e 53,23 [MPa], respectivamente.

Benedetti (2018) realizou ensaio de dureza Janka deplantio de *Tectona grandis* proveniente da fazenda de Mutum com 9,5 anos de idade, determinou os valores de 40 [MPa] e 42,07 [MPa] para amostras orientadas no sentido radial e tangencial,

respectivamente. Estudou também a mesma espécie em florestas da fazenda Panflora com 18,7 anos de idade, e encontrou valores de 35,60 [MPa] para dureza Janka em amostras orientadas radialmente, e 35,20 [MPa] para amostras na direção tangencial. Mostrando assim que para os casos estudados pelo autor, os valores não diferenciaram entre si em função das direções normais à fibra.

Na Tabela 4.4 são apresentados os valores médios de amostras mistas (cernealburno) e cernes em considerar a presença ou não de nó para o módulo de ruptura (MOR) e o módulo de elasticidade (MOE), calculado a partir do ensaio de flexão estática.

Para o ensaio de flexão estática, os valores determinados para módulo de ruptura (MOR) foram estatisticamente semelhantes quando divididos em madeiras de cerne 95,06 [MPa] e cerne-alburno 103,37 [MPa], sem considerar a presença ou não de nó (tabela 4.4).

TABELA 4.4:Resultados médios das amostras de cerne-alburno (mista) e cerne do módulo de ruptura (MOR) e módulo de elasticidade (MOE), determinados por meio do ensaio de flexão estática.

AMOSTRAS	MOR [MPa]	MOE [MPa]
MICTA	103,37 A	10488 A
MISTA	(17,66)*	(1604,1)*
CEDNE	95,06 A	8834,04 B
CERNE	(16,11)*	(2092,41)*

MOR: módulo de ruptura; MOE: módulo de elasticidade estático; *: dentro da mesma coluna as médias que possuírem as mesmas letras em maiúscula não diferem estatisticamente ao nível de significância de 5% pelo teste Tukey.**: Desvio Padrão [MPa]; ***: Coeficiente de variação [%] Fonte: A autora (2022).

Na Tabela 4.5 são apresentados os valores médiosde módulo de ruptura (MOR) e módulo de elasticidade (MOE) calculadoa partir doensaio de flexão estática.para a madeira de cerne com nó (CCN), cerne sem nó (CSN), cerne-alburno com nó (MCN) e cerne-alburno e sem nó (MSN).

A partir da Tabela 4.5 é possível perceber que a influência da relação cerne/alburno se torna mais importante que a própria ocorrência de nó na madeira. E ainda que, as madeiras mistas possuem maiores valores de MOR e MOE que a madeira cerne. Tal evidência é justificado por se tratar de madeira juvenil.

TABELA 4.5: Resultados determinados por meio do ensaio de flexão estática.

	CF	ERNE	MIS	STA
AMOSTRAS	COM NÓ (CCN)	SEM NÓ (CSN)	COM NÓ (MCN)	SEM NÓ (MSN)
MOR	87,21 B	100,39 A B	99,20 A B	107,53 A
[MPa]	(7,26)**	(18,91)	(19,26)	(15,44)
MOE	8551,19 B	9116,90 A B	10374,50 A	10601,40 A
[MPa]	(1572,34)	(2534,84)	(1921,5)	(1269,2)

MOR: módulo de ruptura; MOE: módulo de elasticidade estático; *: dentro da mesma linha as médias que possuírem as mesmas letras em maiúscula não diferem estatisticamente ao nível de significância de 5% pelo teste Tukey.**: Desvio Padrão [MPa]; ***: Coeficiente de variação [%]

Fonte: A autora (2022). (2534,84)**(1,29)***

É possível notar que, quando se leva em comparação os quatro grupos de ocorrência (CCN, CSN, MCN e MSN), os valores de MOR e MOE diferenciaram-se pelo teste de Tukey a 5% de significância. Os maiores valores estatísticos foram encontrados para as madeiras cerne e mista sem a presença de nó. Mostrando assim que para essa propriedade, a presença de nó impactou mais fortemente que a relação cerne e alburno. O que já era esperado por se tratar de madeira jovem de teca, sendo assim, a relação cerne/alburno não está bem definido. Nota-se nesse ensaio que os valores de MOR variaram de 87,21 a 99,20 [MPa] para as amostras de cerne com nó e alburno com nó, tendo aí uma variação de cerca de 14%.

Os valores determinados para módulo de elasticidade (MOE) variaram de 8.551 [MPa] a 10.601[MPa] para as madeiras de cerne com presença de nó e madeira mista sem a presença de nó. Destaca-se ainda que, quando acrescenta o nó no grupo da madeira há uma diminuição de 3,1% para cerne e 1,1% para alburno-cerne não estatisticamente.

Benedetti (2018) ao avaliar madeira teca dequatro fazendas em municípios distintos com idades entre 9,4 anos a 18,7 anos encontrou uma média para MOR de

81,97 [MPa] para árvores com 9,4 anos, 97 [MPa] para árvores com 9,5 anos, 89,86 [MPa] para 14,4 anos e 96,83 [MPa] para 18,7 anos. Já para MOE encontrou uma média de: 10.005,72 [MPa], 10.965,62 MPa, 10.035,15 [MPa] e 11.936,45 [MPa] respectivamente para as mesmas idades. Portanto é possível concluir que nem sempre há uma relação direta entre os parâmetros MOR e MOE e idade da árvore. Deixando assim claro que outros fatores como anisotropia da madeira podem afetar nessas propriedades.

Zahabu *et al.* (2015) estudaram um povoamento de 14 anos de idade de teca e diferentes espaçamentos, e concluíram que não há uma relação direta dos valores determinados de MOR e MOE com o aumento de espaçamento, e ainda que os valores de MOR foram de: 79,07 [MPa], 82,20 [MPa] e 81,86 [MPa] para os tratamentos 2x2, 3x3 e 4x4 metros, respectivamente. E de MOE: 8.275,84 [MPa], 8.277,87 [MPa] e 7.167,88 [MPa] para os tratamentos 2x2, 3x3 e 4x4 metros, respectivamente. Destacase ainda que os valores encontrados no presente trabalho são superiores aos valores citados pelos autores.

4.3. Propriedades não destrutivas da madeira

Para estas análises as amostras foram divididas em dois grandes grupos, as que continham madeira mista (cerne- alburno) e as com madeira apenas de cerne. A partir daí foram determinados os parâmetros dinâmicos. Na Tabela 4.6 são apresentados os valores do ensaio de propagação de ondas ultrassônicas e módulo de elasticidade dinâmico (Edin).

Vale destacar que os ensaios dinâmicos foram realizados em corpos de prova diferentes das amostras realizadas nos ensaios estáticos, sendo assim, não serárealizado o teste estatístico de regressão entre eles. Apenas comparado os valores médios.

TABELA 4.6: Valores médios da densidade, velocidade e da elasticidade dinâmico através do ensaio não destrutivo de ultrassom.

AMOSTRAS	Densidade aparente [kg.m ⁻³]	Velocidade [m.s ⁻¹]	Edin [MPa]
CEDNE	574,91 B	4601,89 B	12159 B
CERNE	(54,54)	(264,85)	(125,99)
MICTA	667,46 A	4916,34 A	16106 A
MISTA	(61,32)	(175,35)	(132,03)

Médias seguidas pela mesma letra na vertical, não diferem estatisticamente entre si (Tukey; p > 0.05). Edin= Módulo de elasticidade dinâmico, em MPa.

Fonte: A autora (2022).

Para o ensaio de velocidade de propagação da onda ultrassônica, os valores determinados para densidade aparente a 12% de umidade, velocidade de propagação das ondas e módulo de elasticidade dinâmico foram estatisticamente diferentes quando divididos em madeiras de cerne e mista (cerne-alburno). A madeira mista possui propriedades com valores superiores as amostras que possuem apenas madeira de cerne. Para efeito de comparação, a densidade aparente é maior cerca 14%, enquanto o valor calculado para velocidade de propagação da onda 6,4% e o módulo de elasticidade é 24,5%.

Iwakiri *et al.*(2013) utilizaram lamelas de madeira de *Tectona grandis* com 18 anos proveniente do estado do Mato Grosso obtiveram resultado médio do módulo de elasticidade dinâmico (Ec₀) com média de 14.291 [MPa] e a velocidade de propagação da onda 4.665 [m.s⁻¹]. Enquanto Souza (2019) estudou três árvores de teca provenientes dos municípios de Alta Floresta (AF), Nossa Senhora do Livramento (NS) e Cáceres (CA) e encontrou valores de módulo de elasticidade dinâmico de 16.486,93 [MPa], 16.293,57 [MPa] e 18.181,54 [MPa], respectivamente.

Na Tabela 4.7 são apresentados os valores de frequência natural [Hz], o módulo de elasticidade dinâmico [MPa] e o módulo de deformação transversal dinâmico [MPa] determinados com a utilização do ensaio do Sonelastic e a partir daí comparados os valores encontrados para as amostras de cerne e mista (cerne-alburno).

TABELA 4. 7: Resultados médios obtidos por meio do ensaio de propagação de ondas de excitação (Sonelastic).

AMOSTRAS		CERNE	MISTA
	Frequência [Hz]	1942,56 B	2026,77 A
Elevienel		(135,58)*	(130,31)*
Flexional —	Edin	9716,54 B	13206 A
	[MPa]	(1179,46)*	(1347,0)*
	Frequência	2717,15 A	2515,72 B
Tousianal	[Hz]	(77,05)*	(119,27)*
Torcional —	Gdin	1116,15 A	1149,57 A
	[MPa]	(125,99)*	(132,03)*
Densidade aparente		574,91 B	667,46 A
[Kg.m ⁻³]		(54,54)	(61,32)

Edin: módulo de elasticidade dinâmico; Gdin: módulo de deformação transversal dinâmico. *: desvio padrão [Hz] ou [MPa]. Médias seguidas pela mesma letra na vertical, não diferem estatisticamente entre si (Tukey; p > 0,05).

Fonte: A autora (2022).

A partir dos dados expostos na Tabela 4.7 é possível notar que os maiores valores de frequência natural e módulo de elasticidade dinâmico ocorreram para as madeiras mistas, o mesmo comportamento encontrado para o ensaio com propagação de ondas ultrassônicas, exceto para o teste torcional. Apesar dos valores encontrados de frequência torcional serem maiores para as madeiras de cerne, seus valores de módulo de elasticidade transversal foram semelhantes estatisticamente pelo teste de Tukey.

Soares (2014) avaliou material de árvore de *Tectona grandis* com aproximadamente 18 anos de idade de um plantio de reflorestamento no estado de Mato Grosso para a confecção de um violão. Segundo a autora a frequência natural média foi entre 2.500 a 2.800 [Hz] e o módulo de elasticidade longitudinal dinâmico foi 16.000 [MPa].

Carrasco *et al.* (2017) estudaram madeira de teca e para o módulo de elasticidade dinâmico flexional de 10.970 [MPa] e para o módulo de deformação 1.920 [MPa]. Observa-se que, apesar dos valores de módulo de elasticidade dinâmico flexional ser superior ao encontrado pelos autores citados, o módulo de elasticidade

transversal obteve valores superiores. Mostrando assim que a idade do plantio ou até a própria anisotropia da madeira podem ter sido fatores influenciados do resultado.

Para efeito de comparação é possível mostrar na tabela 4.8, que apesar de serem métodos dinâmicos com princípios diferentes, ambos os testes obtiveram resultados positivos para a estimativa dos módulos de elasticidade, conforme é possível observar na Tab. 4.7.

TABELA 4.8: Comparação dos métodos dinâmicos

Módulo de elasticidade [MPa]	CERNE	MISTA
MOE	8834,04 B	10488 A
1102	(2092,41)*	(1604,1)
E _{c0} (Estimado)	9815,6	11653,3
	(2324,9)	(1782,4)
Ultrassom	12159 B	16106 A
0.101 4000111	(125,99)	(132,03)
Excitação (flexional)	9716,54 B	13206 A
L'actuquo (Heatonui)	(1179,46)	(1347,0)

Médias seguidas pela mesma letra na horizontal, não diferem estatisticamente entre si (Tukey; p > 0,05).

Fonte: A autora (2022).

Os valores determinados para MOE foram de 8.834 MPa e 10.488 MPa para as madeiras de cerne e mista respectivamente. De acordo com a norma NBR 7190 (1997) MOE = 0,90 E_{c0} , sendo assim, para efeito de comparação foram estimados os valores de Ec_0 de 9.816 [MPa] e 11.653 [MPa] para as madeiras de cerne e mista. As relaçõesentre os módulos de elasticidade determinados pelos testes dinâmicos ultrassônicos e estáticos foram de 1,24 e 1,38 para as amostras de cerne e mista. Resultados compatíveis ao determinado por PUCCINI (2002), que encontrou a relação $CLL \approx 1,28 \ E_{c0}$ na direção longitudinal.

5. CONCLUSÃO

A partir dos resultados encontrados para o lote de madeira, é possível concluir que:

- Os valores de densidade básica para as amostras de cerne e mista (cerne e alburno) foram semelhantes estatisticamente pelo teste de Tukey, no entanto, quando se calcula o valor de densidade aparente a 12% de umidade, os maiores valores foram encontrados para a madeira de cerne em relação à mista. A madeira deteca estudada é classificada como de média densidade.
- Os valores das propriedades mecânicas das madeiras não variaram entre si quando levados em consideração a influência do fator cerne/alburno. No entanto, quando relacionados à presença de nós, os resultados de f_{c0} e diminuíram consideravelmente. Tal evidência não se confirma para o ensaio de dureza Janka.
- O módulo de elasticidade determinado pelo teste estático de flexão estática variou quando levados em considerações os fatores cerne/alburno.
 Apresentando valores superiores quando a ocorrência de madeira mista em comparação as amostras de cerne, cerca de 20%. Já quando levado em consideração a ocorrência de nós, estes não sofreram grandes influências.
- Para os ensaios dinâmicos, os valores determinados com o método de propagação de ondas ultrassônicas foram de 12.159 [MPa] e 16.106 [MPa] para o módulo de elasticidade dinâmico ou constante de rigidez para as madeiras de cerne e mista. Mostrando valores superiores para as madeiras mistas de cerca de 30%. Enquanto com o método de propagação de ondas de excitação, os valores determinados foram de 9.717 [MPa] e 13.206 [MPa] para as madeiras de cerne e mista. Também com valores superiores para as madeiras mistas de cerca de 36%.
- Apesar dos dois métodos não destrutivos se mostrarem eficientes e confiáveis para determinar as constantes de rigidez ou módulo de elasticidade dinâmico, o método de propagação de ondas de excitação flexional foi o que obteve

resultados mais próximos aos valores determinados para módulo de elasticidade estático.

6. REFERÊNCIAS

Amorim, E. P.; Paes, J. B.; Nicácio, M. A. Anisotropia da contração e inchamento da madeira: uma abordagem tecnológica. Científica digital, v.2, p.81-100, 2021.

Araujo, H. J. B. Agrupamento das espécies madeireiras ocorrentes em pequenas áreas sob manejo florestal do projeto de colonização Pedro Peixoto (AC) por similaridade das propriedades físicas e mecânicas. Dissertação (Mestado em Recursos Florestais) — Universidade de São Paulo. 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. Ensaios físicos e mecânicos da madeira MB-26/40. Rio de Janeiro, 16p. 1940.

Associação Brasileira de Normas Técnicas — ABNT. **Ensaios não destrutivos** — **Ultrassom:** classificação mecânica de madeira serrada de dicotiledôneas (Projeto NBR 58 000 10001). Rio de Janeiro: ABNT, 2007, 8p.

_____.Projeto de estruturas de madeira – NBR7190. Projeto de Revisão NBR7190. Rio de Janeiro, p.60. 2010.

ASTM E -1876. Standard Test Method for DynamicYoung'sModulus, SherModulus, andPoisson'sRatioby Impulse ExcitationofVibration. 2005

ATPC, Engenharia Física. Manual de instalação e operação, Ribeirão Preto, 2014.

Avelino, E. F. Avaliação da madeira de teca jovem (Tectona grandis L. F.) visando uso em movelaria. Dissertação (Mestrado em ciências) — Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. 2012.

Bonduelle, G. M. et al. Análise da massa específica e da retratibilidade da madeira de Tectona grandis nos sentidos axial e radial do tronco. **Floresta**, v. 45, n.4, p.671-680. 2015.

Braz, R. L. et al. Propriedades físicas e mecânicas da madeira de Toonaciliata em diferentes idades. **Revista Floresta**, v.43, n.4, p.663-670. 2013.

Cáceres Florestal. Manual do Cultivo teca. 2016.

- Calegari, L. Uso da onda ultra-sônica como meio de controle do processo de secagem da madeira. Dissertação (Mestrado em tecnologia da madeira) Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 2006.
- Câmara, A. P.; Vidaurre, G. B.; Moulin, J. C.; Bobadilha, G. S. A relação cerne e alburno na madeira de eucalipto. Biblioteca Central da Universidade Federal do Espírito Santo. 2020.
- Cardoso, N. S. Caracterização da estrutura anatômica da madeira, fenologia e relações com a atividade cambial de árvores de teca (Tectona grandis L.f) Verbenaceae. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) Universidade de São Paulo. 1991.
- Carmo, A. G. O. Avaliação do potencial preservativo dos extratos do cerne no alburno da madeira de Corymbia citriodora (Hook.) K.D. Hill & L.A.S. Johnson. Monografia (Engenheiro Florestal) Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro). 2008.
- Carpinelli, S. M. Rendimento no desdobro e produtividade em madeira serrada de uma floresta de Eucalyptus grandis. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) Escola Superior de Agricultura/ Universidade de São Paulo, Piracicaba SP. 2002.
- Carrasco, E. et al. Avaliação das características mecânicas da madeira por meio de excitação por impulso. **Revista Matéria.** 2017.
- Carrillo, J.; Ramírez, J.; Lizarazo-Marriaga, J. ModulusofelasticityandPoisson'sratiooffiber-reinforced concrete in Colombiafromultrasonic pulse velocities. **Journalof Building Engineering**, v.23, p.18-26. 2019.
- Cezaro, J. A.; Trevisan, R.; Balbinot, R. Propriedades físico-mecânicas da madeira de Chrysophyllummarginatum.Pesquisa**Floresta Brasileira.** 2016.
- Colenci, R. A. Qualificação mecânica de madeiras para uso como dormente ferroviário. Dissertação (Mestrado em agronomia) Faculdade de Ciências Agronômicas, Bocucatu-SP. 2002.
- Costa, A. C. S. et al. Propriedades da madeira de cerne e alburno de Eucalyptus camaldulensis. **BrasilianJournalof Wood Science**, v.8, p.10-20. 2017.
- Delgado, L. G. M.; Gomes, J. E.; Araujo, H. B. Análise do sistema de produção da teca (Tectona grandis L.f.) no Brasil. **Revista Científica eletrônica de Engenharia Florestal,** n.11. 2008.

- Dias, A. A. Estudo da solicitação de compressão normas às fibras da madeira. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos. 1994.
- Dias, A., C. C.; Marchesan, R.; Almeida, V. C.; Monteiro, T. C.; Moraes, C. B. Relação entre a densidade básica e as retrações em madeira teca. Ciência da Madeira (Brazilianof Wood Science), p. 37-44, 2018.
- Dias, F. M.; Lahr, F. A. R. Estimativa de propriedades de resistência e rigidez da madeira através da densidade aparente. **ScientiaForestalis**,n.65, p.102-113, 2004.
- Dias, L. G. Caracterização das propriedades físicas e mecânicas dos painéis de teca com adição de pupunha. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) Faculdade de Engenharia de Bauru. 2020.
- Fernandes, A. M.; Vito, M. Análise das propriedades mecânicas de madeira tratada em autoclave e madeira natural de Eucalyotus citriodora. UNESC (Artigo submetido ao curso de Engenharia Civil), 2018.
- Figueiredo, F. M. Aplicação dos anéis de crescimento dendrocronologia- na reconstrução do crescimento do tronco de árvores de Tectona grandis L.f., teca, de plantações dos estados do Mato Grosso e São Paulo. Dissertação (Mestrado em Ciências) Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura. 2021.
- Figueroa, M. J. M. Coeficientes de modificação das propriedades mecânicas da madeira devidos à temperatura. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.
- Filho, A. A. T.; Silva, M. L.; Couto, L.; Müller, M. D. Análise econômica de um plantio de teca submetido a desbastes. **Revista Árvore**, v.27, n.4, p.487-494. 2003.
- Finger, F. A.; Finger, Z.; Logsdon, N. B. Qualificação da madeira de Tectona grandis L.f., oriunda do primeiro desbaste comercial, com vista ao seu aproveitamento. **Madeira: arquitetura e engenharia**, n.10, 2003.
- Firmino, A. V.; Vidaurre, G. B.; Guedes, M. C.; Oliveira, J. T. S.; Silva, J. G. M.; Coelho, J. C. F.; Carneiro, M. F. Demarcação dos lenhos juvenil e adulto em andiroba de florestas de terra firme e várzea. III Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia da Madeira III CBTEM. 2017.
- Foelkel, C. E.B.; Brasil, M. A.; Barrichelo, L. E. G. Métodos para determinação da densidade básica de cavacos para coníferas e folhosas. **Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais IPEF**, n.2/3, p.65-74. 1971.

- Freitas, D. L. et al. Estabilidade dimensional da madeira de clones de Eucalyptus spp. **Scientia Agraria Paranaensis**, v.15, n.4, p.435-439. 2016
- Gil, J. L. R. A. et al. Características físicas e anatômicas da madeira de Tectona grandis L.f. aos 7 anos de idade. **Revista de Ciências Agrárias**, v41, n.2, p.529-538. 2018.
- Guirardi, B. D. Efeito da termorretificação nas propriedades da madeira de desbastes de Tectona grandis L.f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2020.
- Hoppe, J. M.; Freddo, A. R. Efeito da intensidade de desrama na produção de Pinus elliottiiEngelm., no município de Pirantini, RS. Ciência Floresta, Santa Maria, v.13, n.2, p.47-56. 2003.

INDÚST	TRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES – IBÁ. Relatório anual 2019 .
	. Relatório anual 2020.
	. Relatório anual 2021.
	Relatório anual 2022.

ISO 3130. Wood determination of moisture content for physical and mechanical tests. International Organization for Standardization, Switzerland. 1975.

Iwakiri, Setsuo et al. Estimativa do módulo de elasticidade dinâmico nas diferentes posições do tronco das árvores de Tectona grandis utilizando método de ondas acústicas. **ScientiaFlorestalis**, v.41, n.100, p.523-532. 2013.

Júnior, A. F. D. et al. Caracterização da madeira de quatro espécies florestais para uso em movelaria. **Ciência da Madeira**, Pelotas, V.4, p. 93-107. 2013.

Klock, Umberto. **Qualidade da madeira juvenil de** *Pinus maximinoi***H. E. Moore.** Tese (Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2000.

Kokutse, A.D.; Stokes, A.; Baillères, H.; Kokou, K.; Baudasse, C. DecayresistanceofTogoleseteak (Tectona grandis) heartwoodandrelationshipwithcolour. TreesStrucFunt. v.20, p.219–223, 2006.

Latreille, A. J et al. Propriedades físico-mecânicas em madeira de Dipteryxalata, Astroniumgraveolens, Bowdichiavirgilioides e Eucalyptus grandis. **Revista Instituto Florestal,** v.30, n.2, p.143-150. 2018.

- Lemos, J. A. S. et al. Influência do método de propagação na produção de madeira de *Tectona grandis*. Advances in Forestry Science, v.6, n.3, p. 761-765, Cuiabá, 2019.
- Leonello, E. C. et al. **Variação radial de propriedade físico-mecânicas da madeira de seringueira** (*Hevea brasiliensis*). 1º Congresso Ibero-Latino Americano da Madeira na Construção, Coimbra Portugal, 2011.
- Lima, I. L. et al. Dimensões anatômicas da madeira de Tectona grandis Linn. Em função do espaçamento e da posição radial do tronco. **ScientiaForestalis**, v.39, n.89, p. 061-068, Piracicaba, 2011.
- Loiola, P. L. et al. Physical properties of the wood Pinus caribaea var. caribaea, Pinus caribaea var. houdurensis and Pinus oo carpa for pencil production. **Revista Floresta.** V.51, n.2, p. 354-362. 2019.
- Lopes, J. O. Caracterização físico-química e molhabilidade da superfície da madeira juvenil de teca modificada termicamente. Tese (Doutorada em Ciências Ambientais e Florestais) Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. 2018.
- Lopes, J. O. et al. Propriedades físicas da Madeira de Teca Termorretificada. **Floresta e Ambiente**, v.21, n.4, p.569-577. 2014
- _____. Uniformatização da cor da madeira jovem de teca pela termorretificação. **Revista Árvore.** 2014.
- Lourenci, R. F. Cálculo estrutural de uma edificação aporticada em madeira e algumas considerações sobre painéis estruturais em wood frame. Monografia (Bacharel em Engenharia Civil) Centro Universitário Antônio Eufrásio de Toledo de Presidente Prudente, Presidente Prudente, 2018.
- Magalhães, L. G. S.; Lima, A. P. L.; Lima, S. F.; Soratto, D. N.; Martins, S. M.; Santos, I. F. F. Densidade básica da madeira de clones de eucalipto em diferentes espaçamentos.**BrazilianJournalofDevelopment**, v.6, p. 19435-19445, Curitiba, 2020.
- Mendoza, Z. M.S.H.; Oliveira, J. K.; Borges, P. H. M.; Morais, P. H. Índices de qualidade das fibras de Tectona grandis Linn. F. em função da sua massa específica básica. **BrazilianJournalofDevelopment**, v.7, n.6, 2021.
- Moreira, M. F. et al. Teca: implantação e produção no Brasil. Arrudea: A revista do Jardim Botânico do Recife, p. 72-83, 2021.
- Moreschi, J. C. Propriedades da Madeira. Propriedades da Madeira. **Apostila didática.** Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal, Universidade Federal do Paraná, Curitibá, 2014.

- Motta, J. P. Propriedades tecnológicas da madeira de Tectona grandis L.f. proveniente do Vale do Rio Doce, Minas Gerais. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) Universidade Federal do Espírito Santo. 2011.
- Motta, J. P.; Alves, R. C.; Paes, J. B. Efeito do tratamento térmico na resistência à flexão estática da madeira de *Tectona grandis* L.f. **Construindo**, v.5, n.2, Belo Horizonte, 2013.
- Moya, R.; Bond, B.; Quesada, H. A review ofheastwoodproperties os Tectona grandis treesfrom fast-growth plantations. **Wood SciTechnol,** v.48, p.411-433. 2014.
- Nascimento, P. A. Teca desrama é fundamental no plantio. **Campo&Negócios Online.** Urbelândia, 2021. Disponível em:https://revistacampoenegocios.com.br/teca-desrama-e-fundamental-no-plantio/>. Acesso em 15 de março 2022.
- Nasser, S. M. Painéis com partículas de madeira da espécie teca e casca de amendoim com adesivo à base de mamona. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica Faculdade de Engenharia da UNESP). 2019.
- Oliveira, J. K. et al. Massa específica básica da madeira Tectona grandis proveniente de sistema agrossilvipastoril. **BrazilianJournaldevelopment**, v.6, n.10, p. 79608-79617, Curitiba. 2020.
- Otani, L. B.; Alves, H.; Segundinho, P. G. A.; Morales, E. Caracterização dos módulos elásticos de madeiras e derivados utilizando a técnica de excitação por impulso. **Informativo técnico-científico ITC-05** /**ATCP**. 2015.
- Otani, L. B.; Pereira, A. H.A.Guia de caracterização dos módulos elásticos e do amortecimento de madeiras e derivados utilizando as soluções SONELASTIC.**ATCP Engenharia Física**,Ribeirão Preto, 2013.
- Pace, José Henrique Camargo; Carvalho, Alexandre Monteiro de; Nascimento, Alexandre Miguel do; Latorraca, João Vicente Figueiredo; Júnior, Ananias Francisco Dias. A ação do intemperismo interfere no acabamento superficial e na coloração da madeira de espécies florestais. Revista de Ciências Agrárias. V. 61, 2018.
- Paes, J. B.; Santos, L. L.; Silva, L. F.; Motta, J. P.; Braz, R. L.; Lombardi, L. R. Caracterização tecnológica da madeira juvenil de teca (Tectona grandis) visando à produção de móveis. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.10, n.3, p. 437-442. 2015.
- Palermo, G. P. M.; Latorraca, J. V. F.; Sever, E. T. D.; Rezende, M. A. Delimitação entre os lenhos juvenil e adulto de Pinus elliottiiengelm. **Revista Árvore.** 2013.

- Pereira, B. L. C. et al. Correções entre a relação Cerne/Alburno da madeira de eucalipto, rendimento e propriedades de carvão vegetal. **ScientiaForestalis**, v.41, n. 98, p.217-225. 2013.
- Pereira, H.; Gominho, J.; Knapic, S. Cerne e borne-factores de variação da qualidade tecnológica das árvores. Centro de Estudos Florestais Universidade Técnica de Lisboa. 2005.
- Pinto, M. L. **Propriedades e características da madeira de teca (***Tectona grandis***) em função da idade.** Tese (Doutorado em construção civil) Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2007.
- Pizzol, V. D.; Mantilla, J. N. R.; Carrasco, E. V. M. Caracterização elástica de compensados de madeira utilizados e reutilizados em fôrmas através de excitação por impulso. **Revista Matéria.** 2017.
- Puccini, C.T. Avaliação de aspectos de qualidade da madeira utilizando o ultrasom. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Universidade Estadual de Campinas UNICAMP, Campinas, 2002. 139p.
- Queiroz, F. L. C. Qualidade da madeira de *Tectona grandis* L.f de diferentes procedências para utilização na indústria de produtos florestais. Doutorado (Ciências Florestais) Universidade de Brasília UnB, Brasília, 2018.
- Ross, J. L. S.; Prette, M. E. D. Recursos hídricos e as bacias hidrográficas: âncoras do planejamento e gestão ambiental. **Revista do departamento de geografia**, v. 12, p. 89-121, 1998.
- Santos, C. V. F. **Método de ensaio para a determinação da resistência ao cisalhamento em elementos estruturais de madeira de** *Pinus spp.* **Dissertação (Mestrado em Ciências) Universidade de São Paulo, São Carlos. 2016.**
- Silva, C. C. R. et al. Madeiras nativas e plantadas do Brasil qualidade, pesquisas e atualidades. **Editora Científica digital.** 2021.
- Silva, D. M. R. Avaliação das propriedades físicas e da elasticidade da madeia de Tectona grandis L.f. proveniente de povoamento com três densidades de plantio em Cáceres-MT. Monografia (Engenheiro Florestal) Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica. 2010.
- Silva, J. C. Caracterização da madeira de Eucalyptus grandis Hill ex. Maiden, de diferentes idades, visando a sua utilização na indústria moveleira. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) Universidade Federal do Paraná. 2002.

- Silva, V. A. N. Caracterização não destrutiva de madeira usando a técnica de excitação por impulso. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá. 2021.
- Soares, M. A. **Produção de um violão clássico em madeira de teca** *(Tectona grandis)*. Monografia (Engenharia Industrial Madeireira) Universidade Estadual Paulista, Itapeva. 2014.
- Souza, R. S. Propriedades tecnológicas de Tectona grandis provenientes de sítios distintos. Tese (Doutorado em ciências florestais) Universidade de Brasília. 2019.
- Stangerlin, D. M. et al. Propriedades de flexão estática da madeira de Caryaillinoinensis em duas condições de umidade. **Ciência da Madeira**, v.1, n.2, p.70-79. 2010.
- Szücs, C. A.; Terezo, R. F.; Valle, A.; Moraes, P. D. Estruturas de Madeira. Universidade Federal de Santa Catarina UFSC, Florianópolis. 2015.
- Targa, L. A.; Ballarin, A. W.; Biaggioni, M. A. M. Avaliação do módulo de elasticidade da madeira com uso de método não-destrutivo de vibração transversal. Engenharia Agrícula, Jaboticabal, v.25, n.2, p.291-299. 2005.
- Vieira, A. H. et al. Aspectos silviculturais da Teca (*Tectona grandis L.*)em Rondônia. **Embrapa** Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, documento 68, Porto Velho, 2002.
- Zahabu, E. K. et al. EffectofSpacing Regimes onGrowth, Yield, and Wood Properties of Tectona grandis atLonguza Forest Plantation, Tanzania. **InternationalJournalofForestryResearch**, p.6, 2015.