



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

DANDARA MARIA REAL E SILVA

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E DA ELASTICIDADE DA
MADEIRA DE *Tectona grandis* L.f. PROVENIENTE DE POVOAMENTO COM TRÊS
DENSIDADES DE PLANTIO EM CÁCERES-MT.**

SEROPÉDICA, RJ
JUNHO, 2010



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

DANDARA MARIA REAL E SILVA

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E DA ELASTICIDADE DA
MADEIRA DE *Tectona grandis* L.f. PROVENIENTE DE POVOAMENTO COM TRÊS
DENSIDADES DE PLANTIO EM CÁCERES-MT.**

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.

Orientador: João Vicente de Figueiredo Latorraca

SEROPÉDICA, RJ
JUNHO, 2010



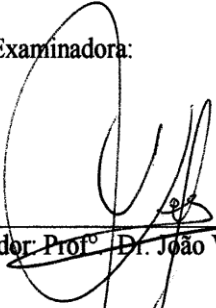
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE FLORESTAS
CURSO DE ENGENHARIA FLORESTAL


**Avaliação das propriedades físicas e da elasticidade da madeira de *Tectona grandis* L. f.
proveniente de povoamento com três densidades de plantio em Cáceres-MT.**

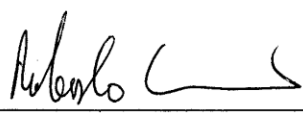
DANDARA MARIA REAL E SILVA

Seropédica, 30 de junho de 2010.

Banca Examinadora:


Orientador: Prof.º Dr. João Vicente de Figueiredo Latorraca – DPF/IF/UFRRJ


Titular: Prof.º Alexandre Monteiro de Carvalho – DPF/IF/UFRRJ


Titular: Prof.º Dr. Roberto Carlos Costa Lelis – DPF/IF/UFRRJ

Dedico

Aos meus pais, Maria Real e Zezinho,
que sempre me motivaram na
busca do conhecimento.

Às irmãs Carol e Sílvia,
pelo amor e companheirismo.

AGRADECIMENTOS

Ao Deus da vida.

Aos meus pais Maria Real (in memorian) e Zezinho, por acreditarem em mim e me apoiarem sempre na busca do conhecimento.

Às minhas irmãs, Carolina Real e Sílvia Real, pelo amor, amizade e companheirismo sempre.

A minha avó Neuza de Oliveira, pelas orações durante minha graduação.

Ao Luiz Gustavo de Almeida Campos, meu namorado, pelo amor e paciência durante a graduação.

Aos meus amigos da universidade da turma de 2005 II, pelo carinho e amizade, em especial, Adriano Marques, Elton Abel e Norton Araújo.

Às moradoras do quarto F3-404 por enriquecerem minha formação acadêmica e pessoal.

Ao meu orientador, Professor Dr. João Vicente de Figueiredo Latorraca, pela amizade e incentivo neste trabalho de monografia.

Aos funcionários do Instituto de Florestas e da UFRRJ.

A todos do Laboratório de Anatomia e Qualidade da Madeira, pela ajuda no desenvolvimento desta monografia e pelos momentos de descontração.

Aos Professores Roberto Carlos Costa Lelis e Alexandre Monteiro de Carvalho, por aceitarem o convite em participar da banca examinadora desta monografia.

Enfim, a todos que de alguma forma participaram desta importante etapa da minha vida.

RESUMO

A espécie *Tectona grandis* L.f. (teca) destaca-se pela produtividade e qualidade de sua madeira. A densidade de plantio ideal das árvores com a qual se obtém uma maior proporção de madeira e melhor qualidade é uma das questões a serem consideradas nas pesquisas de manejo florestal de teca. O objetivo deste estudo foi avaliar a influência da densidade de plantio nas propriedades físicas (densidade básica, densidade aparente, ponto de saturação das fibras e contração volumétrica total) e na elasticidade (módulo de elasticidade dinâmico-MOEd) da madeira de *Tectona grandis* L.f., aos 12 anos de idade, proveniente de um plantio no município de Cáceres-MT. Neste estudo foram amostradas 5 árvores de cada densidade de plantio (1250 árvores/ha, 1000 árvores/ha e 834 árvores/ha). De cada árvore foi retirada uma tora a 25% da altura total da árvore (abaixo do DAP), de cada tora uma prancha diametral que em seguida foi seccionada em corpos-de-prova de 2,0 x 2,0 x 30,0 cm. Para a determinação do MOEd foi utilizado o método não destrutivo pelo uso do ultra-som. Os resultados mostraram que a densidade de plantio influenciou significativamente na densidade aparente e o no MOEd, e que é possível avaliar pelo uso do ultra-som o comportamento da madeira de *Tectona grandis* L.f. durante a secagem.

Palavras-chave: *Tectona grandis*, densidade de plantio, ultra-som, módulo de elasticidade dinâmico.

ABSTRACT

The *Tectona grandis* L.f. specie (teak) stands out for the high productivity and quality of its wood. The density of ideal planting of the trees with which is obtained a larger wood proportion and better quality is one of the subjects to be considered in the researches of forest handling of teak. The objective of this study was to evaluate the influence of the planting density in the physical properties (basic density, specific gravity, point of saturation of the fibers and volumetric shrinkage) and elastic (module of elasticity dynamic - MOEd) of the wood of *Tectona grandis* L.f., with 12 years of age, originating from a planting in the municipal district of Cáceres-MT. In this study 5 trees of each planting density were used (1250 trees/ha, 1000 trees/ha and 834 trees/ha). Of each tree a log was removed to 25% of the total height of the tree (below DAP), of each log a diametrical board that soon afterwards was split up in samples of 2,0 x 2,0 x 30,0 cm. The determination of MOEd was used no destructive method, using the ultrasound. The results showed that the planting density influenced significantly in the apparent density and the MOEd, and that it is possible to evaluate the behavior of the wood of *Tectona grandis* L.f. during the drying using the ultrasound.

Key words: *Tectona grandis*, planting density, ultrasound, dynamic module of elasticity.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABELAS	x
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivo Geral	2
1.2. Objetivos Específicos	2
2. REVISÃO DE LITERATURA	2
2.1. <i>Tectona grandis</i> L.f.	2
2.2. Densidade da madeira	3
2.3. Retração volumétrica	4
2.4. Teor de Umidade da Madeira	5
2.5. Ponto de Saturação das Fibras	5
2.6. Módulo de Elasticidade Dinâmico	6
2.7. Densidade de Plantio – Espaçamento	7
2.8. Avaliação Não-Destrutiva	8
2.9. Ultra-Som	8
3. MATERIAL E MÉTODOS	10
3.1. Local de Estudo.....	10
3.2. Coleta do Material e Preparo das Amostras	10
3.3. Estudo das Propriedades Físicas	11
3.4. Estudo da Propriedade Mecânica.....	12
3.5. Determinação do Ponto de Saturação das Fibras	13
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	14
4.1. Propriedades Físicas	14
4.1.1. Densidade Básica e Contração Volumétrica.....	14
4.1.2 Densidade Aparente.....	14
4.2. Propriedade Mecânica.....	15
4.2.1. Velocidade de propagação da ultra-sônica.....	15
4.2.2. Módulo de Elasticidade Dinâmico (MOEd)	17
4.3. Ponto de Saturação das Fibras (PSF)	17
5. CONCLUSÕES	19
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	20
7. ANEXOS.....	24

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1:** Modelo de retirada dos corpos-de-prova diametrais.11
- Figura 2:** (A) Aparelho de ultra-som – Steinkamp Ultrasonic Tester BP-7 Series, Versão 4.21, com transdutores e calibrador de acrílico. (B) Determinação do tempo de propagação da onda, no sentido longitudinal, com transdutor exatamente ao centro do corpo-de-prova.13
- Figura 3:** Densidade Aparente em função da densidade de plantio para *Tectona grandis* L.f. aos 12 anos de idade.15
- Figura 4:** Tendência do comportamento da velocidade de propagação da onda ultra-sônica na direção longitudinal da madeira de *Tectona grandis* aos 12 anos de idade, em função da umidade.....16
- Figura 5:** Modelo representativo da variação da velocidade de propagação de onda de ultra-som na direção longitudinal em função da umidade; (A) trecho de 0% a 30%; (B) trecho de umidade acima de 30%.16
- Figura 6:** Módulo de Elasticidade dinâmico (MOEd) em função da densidade de plantio para *Tectona grandis* L.f. aos 12 anos de idade.....17
- Figura 7:** Determinação do PSF através da marcação do ponto de inflexão da curva no gráfico volume x umidade.18
- Figura 8:** Determinação do PSF através da marcação do ponto de inflexão da curva no gráfico MOEd x umidade.18

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Arranjo do espaçamento em cada densidade de plantio.	10
Tabela 2: Valores médios de densidade básica (D_b) e contração volumétrica total (CVT) no sentido longitudinal para <i>Tectona grandis</i> L.f.	14
Tabela 3: Valores médios do ponto de saturação das fibras (PSF) para <i>Tectona grandis</i> L.f.	18

1. INTRODUÇÃO

Com a crescente pressão sobre as áreas de florestas nativas, estas superfícies vêm diminuindo cada vez mais, provocando até mesmo a extinção de algumas espécies. Por outro lado, a crescente demanda por madeira evidencia a necessidade de estudos para aumentar a produção de madeira a partir de florestas plantadas, como forma alternativa de suprir a falta de matéria-prima florestal sem, no entanto, diminuir ainda mais os remanescentes de floresta nativa (OLIVEIRA, 2008).

No Brasil, os plantios de teca iniciaram-se no final da década de sessenta, implantados pela empresa Cáceres Florestal S.A., na região do Município de Cáceres, Mato Grosso (TSUKAMOTO FILHO et al., 2003, citado por RONDON, 2006), com o objetivo de diminuir a pressão sobre as espécies nativas, apresentando ótimos resultados de crescimento. TSUKAMOTO FILHO et al. (2003) afirmam que apesar desse potencial, os reflorestamentos de teca no Mato Grosso ainda não ultrapassam 20.000 ha e também são poucas as empresas que estão investindo nas plantações florestais desta espécie, nesse Estado e no Brasil.

A importância da madeira de teca se deve às propriedades físico-mecânicas desejáveis da madeira, como: durabilidade, estabilidade, facilidade de pré-tratamento, resistência natural ao ataque de fungos, insetos, pragas e brocas. A teca parece atender aos principais critérios de seleção das espécies florestais para a produção de madeira de rápido crescimento, tais como a resistência às pragas e doenças e o alto valor econômico (VIEIRA et al., 2002; FIGUEIREDO, 2001; citados por OLIVEIRA, 2008).

A correta utilização de um material está associada às suas características e assim, torna-se de grande importância o conhecimento de suas características (propriedades), a fim de prognosticar seu comportamento em diferentes utilizações. Segundo KORKUT & GULLER (2008), há uma forte ligação entre as propriedades da madeira e a qualidade da madeira. Estas propriedades, principalmente físicas, são utilizadas para classificar e selecionar madeira para a indústria de produtos florestais.

É importante também o conhecimento silvicultural da produção da madeira, como densidade de plantio e espaçamento e as características da madeira influenciadas por isso.

É possível uma caracterização eficaz da madeira por meio de métodos não destrutivos, uma vez que a avaliação é feita na própria peça ou estrutura. O ultra-som é um método de avaliação não destrutiva, que se caracteriza por frequências acima de 20000 Hz. Entre as vantagens de sua utilização, vale destacar o baixo custo de aquisição do equipamento se comparado ao das máquinas de classificação automática, e o treinamento relativamente simples da mão de obra para utilização do equipamento, possibilitando que o método seja facilmente difundido em revendedores e indústrias de madeiras e derivados (OLIVEIRA et al., 2003).

GUTIÉRREZ et al. (2008), resume que só se pode caracterizar o uso de uma madeira para fins industriais se for levado em consideração suas propriedades, tanto físicas quanto mecânicas.

Apesar do expressivo avanço nos estudos de modelagem do crescimento e da produção de povoamentos florestais de *Tectona grandis* L.f., as estimativas de produção e beneficiamento de produtos e povoamentos de teca muitas vezes ainda têm sido obtidas de forma empírica. Assim, se justifica a investigação científica envolvendo o espaçamento do povoamento relacionado às propriedades da madeira.

O presente trabalho apresenta um estudo sobre as propriedades físicas e da elasticidade da madeira de *Tectona grandis* L.f. proveniente de povoamento com três densidades de plantios em Cáceres-MT.

1.1. Objetivo Geral

O objetivo geral deste estudo foi avaliar a influência da densidade de plantio nas propriedades físicas (densidade básica, densidade aparente e contração volumétrica total) e mecânica (módulo de elasticidade dinâmico) da madeira de *Tectona grandis* L.f., aos 12 anos de idade.

1.2. Objetivos Específicos

Determinar as propriedades físicas da madeira (densidade básica, densidade aparente e contração volumétrica total);

Determinar a propriedade mecânica da madeira (MOEd) através do uso de ultra-som;

Determinar a influência da densidade de plantio nas propriedades da madeira.

Determinar o Ponto de Saturação das Fibras da madeira de *Tectona grandis* L.f..

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. *Tectona grandis* L.f.

A teca (*Tectona grandis* L.f.), também conhecida por *teak* (Índia, Siam, Birmânia e Indonésia), *teck* (França), *ojati* (Java), *may sak* (Laos) e *tiek* (Alemanha), é uma espécie arbórea da família Verbenaceae que apresenta alto valor comercial, segundo TSUKAMOTO Fo. et al. (2003), que forneceram uma importante contribuição para os custos de produção e rentabilidade do cultivo da teca no Brasil.

Tectona grandis (Teca) é uma espécie arbórea decídua da floresta tropical, nativa das zonas úmidas do subcontinente Índico e do Sudeste Asiático, especialmente na Índia, Burma, Tailândia, Laos, Camboja e Vietnã. Atualmente é cultivada em quase todo o mundo tropical (SÁNCHEZ, 2002).

Possui folhas opostas, coriáceas e ásperas ao tato, dotadas de pecíolos curtos ou ausentes e ápice e base agudos. Os indivíduos adultos possuem folhas, em média, com comprimento de 30 a 40 cm por 25 cm de largura. Nos indivíduos mais jovens, com até 3 anos de idade, as folhas podem atingir o dobro dessas dimensões. Possui flores brancas e pequenas dotadas de pecíolos curtos, dispostas em grandes e eretas inflorescências do tipo panícula. Seus frutos consistem de drupas subglobosas de mais ou menos 1,2 cm de diâmetro. As sementes, de um a quatro, estão protegidas por um tecido duro (endocarpo) envolvido por uma compacta e densa cobertura feltrosa (mesocarpo). Este conjunto está incluso em um involúcro vesicular inflável de consistência membranosa (exocarpo) (VIEIRA et al., 2002).

A teca tem seu melhor desenvolvimento com precipitações anuais de 1250 a 3750 mm e temperaturas que oscilam entre os 13°C e 37°C, todavia a espécie é capaz de suportar precipitações anuais tão baixas como 500 mm por ano e tão altas como 5100 mm ao ano. Em relação à temperatura, seu desenvolvimento ótimo se dá aos 25°C (ANGELI & STAPE, 2003).

O bom crescimento e alta qualidade da madeira estão associados à profundidade do solo, boa capacidade de retenção de água, solos aluviais com boa drenagem, ricos em cálcio,

fertilidade mediana; relevo suave (SETH & KAUL, 1978). ROQUE (2002) não observou relação entre a precipitação e a densidade da madeira de teca na Costa Rica; no entanto, árvores com maiores idades e com taxas de crescimento mais lentas tiveram maior densidade de madeira.

É uma espécie de rápido crescimento (quando comparada à algumas nativas), com incremento médio anual (IMA) variável segundo as condições ambientais, sendo, em média, de 9 a 10 metros cúbicos por hectare/ano, e com rotação entre 50 e 150 anos nos plantios comerciais (SALAZAR & ALBERTIN, 1974). No Brasil seu crescimento é maior, devido às condições climáticas e solo, atingindo anualmente 24,0 metros cúbicos por hectare, na região de Cáceres – MT, com ciclo de corte de 30 anos (SHIMIZU et al. 2007). De todos esses trabalhos, emana o consenso de que se trata de uma espécie de potencial e de retorno financeiro aos investidores.

Os resultados de ANGELO et al.(2009) sugerem ser a teca um investimento lucrativo aos produtores, e que a maturidade financeira ocorre dos 14 aos 20 anos, dependendo da taxa de juros e do critério econômico empregado na análise. O valor da floresta variou de US\$ 4.973,09 a US\$14.059,45 por hectare na idade de 25 anos, dependendo da taxa de remuneração do capital desejada pelo investidor. Segundo TSUKAMOTO Fo. et al. (2003) a produção mundial de madeira de teca é estimada em 3 milhões de m³/ano, o que é extremamente baixa pela demanda atual dessa espécie no mercado exterior.

A madeira de *T. grandis* possui um alburno estreito e claro, bem distinto do cerne, cuja cor é marrom viva e brilhante. A espécie apresenta densidade aparente média de 0,650 g/cm³, que apesar de ser leve, apresenta boa resistência a compressão, tração e flexão. A madeira é estável, praticamente não empena e se contrai muito pouco durante a secagem. A estabilidade dimensional permite que a madeira de *T. grandis* resista à variação de umidade no ambiente (LAMPRECHT, 1990; WALKER et al., 1993; LORENZI et al., 2003, citados por LIMA et al., 2009).

MORENO & ROQUE (2006), determinaram para a madeira de teca, densidade básica de 0,50g/cm³. ILLIC (2003) determinou para teca de Myanmar a 12% de umidade, uma densidade de 0,675 g/cm³, velocidade de propagação da onda de 4730 m/s, MOEd de 15,1 GPa.

2.2. Densidade da madeira

A densidade da madeira é uma das propriedades mais importantes na caracterização tecnológica da madeira, visto que sua variação afeta a resistência mecânica e a estabilidade dimensional da madeira (ARGANBRIGHT, 1971; citado por SCANAVACA & GARCIA, 2004). Em termos químicos a densidade, pode ser reflexo da percentagem de diferentes constituintes, e é influenciada também pelos elementos anatômicos (PANSIN & DE ZEEUW, 1970; ARGANBRIGHT, 1971; USDA, 1974; citados por SCANAVACA & GARCIA, 2004).

Segundo SHIOYAMA (1990), a densidade é uma quantificação direta do material lenhoso por unidade de volume, estando relacionada a muitas propriedades e características tecnológicas fundamentais para a produção e utilização dos produtos florestais, sendo um dos parâmetros mais importantes entre as diversas propriedades físicas da madeira, pois afeta todas as demais propriedades desta. Seus efeitos, porém, são interativos e difíceis de serem avaliados isoladamente.

LATORRACA et al. (2000), observaram que a densidade tende a aumentar com a idade, com conseqüente aumento da espessura da parede celular e diminuição da largura das células.

Segundo PANSIN & DE ZEEUW (1980) (citados por LOBÃO, 2004), a densidade básica em função da idade da árvore em geral aumenta rapidamente durante o período juvenil, depois mais lentamente até atingir a maturidade, quando permanece mais ou menos constante, e a madeira de lenho tardio apresentava densidade básica maior que a de lenho juvenil. Esses mesmos autores afirmaram que a variabilidade da maior parte das propriedades mecânicas da madeira pode ser estimada com base na variação da densidade. Isso pode ser explicado porque as propriedades de resistência à flexão estática e o seu MOE (módulo de elasticidade) estão correlacionados com a densidade, a qual, por sua vez, também está correlacionada com as dimensões das células. Mencionaram também que a relação entre densidade e as propriedades mecânicas pode ser alterada pela presença de extrativos que se adicionam à massa lenhosa, aumentando, principalmente, a resistência à compressão axial da madeira, e a efetiva resistência desta a alguma forma particular de aplicação de esforços é uma função não só da quantidade total da parede celular, mas também da proporção dos componentes das células estabelecidas em dada espécie e da quantidade de extrativos presentes no lúmen das células.

Na caracterização da madeira, a determinação de sua densidade e principalmente de sua variação dentro da árvore, tanto na direção radial, da medula para a casca, quanto no sentido base-topo, é fundamental como subsídio ao entendimento de sua qualidade. Madeira mais homogênea, no que diz respeito à sua densidade no interior do tronco, sem dúvida nenhuma poderá se comportar melhor nas operações de processamento e refletir maior uniformidade nas demais propriedades tecnológicas. As peças de madeira com menor variação de densidade são adequadas para utilizações que exigem material homogêneo e com menor variabilidade nas propriedades físico-mecânicas (OLIVEIRA et al., 2005).

2.3. Retração volumétrica

Segundo REZENDE et al. (1988), com a diminuição da umidade da madeira, além da perda de massa (peso), tem-se também uma perda em volume, denominada de retratibilidade volumétrica parcial ou simplesmente retração volumétrica.

As principais características físicas da madeira podem ser obtidas a partir de ensaios de estabilidade dimensional. As dimensões da madeira alteram-se substancialmente com a variação da umidade, no intervalo de 0% até o limite de saturação das fibras. Neste intervalo, conhecido como intervalo higroscópico, ao se aumentar o teor de umidade, as dimensões da madeira aumentam (inchamento) e ao se diminuir o teor de umidade, as dimensões diminuem (retração) (LOGSDON et al., 2008).

O termo contração volumétrica total refere à perda total de água desde a amostra totalmente saturada até secagem completa em estufa a $103 \pm 5^\circ\text{C}$. Sabe-se também que a variação em volume na madeira se processa praticamente para umidades inferiores a 28% aproximadamente, sendo a madeira praticamente estável, com pequenas variações volumétricas, para umidades acima deste valor. Este valor crítico para a umidade é denominado ponto de saturação das fibras (PSF) (REZENDE et al., 1988).

DURLO & MARCHIORI (1992), citados por SILVA et al. (2006), asseguraram que as variações dimensionais e a anisotropia são características indesejáveis da madeira, limitando o seu uso para diversas finalidades e exigindo, por isso, técnicas específicas de processamento e utilização. A idade e, principalmente, o efeito da variação radial, no sentido medula-casca, influenciaram as retrações volumétrica e linear das madeiras em questão.

SILVA et al. (2006), observaram aumento da retração em função da idade e da posição radial, no sentido medula-casca, à exceção da retração longitudinal e do fator anisotrópico, que não apresentaram tendência definida.

2.4. Teor de Umidade da Madeira

A determinação do teor de umidade e de sua variação no tronco das árvores ou das peças de madeira é de extrema importância no seu desempenho e utilização. Os elevados gradientes de umidade da madeira constituem-se em uma das causas de defeitos de secagem, notadamente os caracterizados por empenamentos e fendilamentos. As informações relativas à distribuição da umidade no interior da madeira são de grande importância na segregação das peças em teores de umidade mais uniformes, de modo a facilitar a secagem tanto no que diz respeito à minimização de defeitos quanto à obtenção de menor variabilidade em torno do teor de umidade médio pretendido (OLIVEIRA et al., 2005).

Segundo JANKOWSKY et al. (1985) a água existente no interior das madeiras pode ser encontrada em três diferentes formas:

- Água livre ou capilar, ocupando parcial ou completamente o lúmen das células, os espaços intercelulares e aberturas de pontuações;
- Água de impregnação ou higroscópica, quimicamente ligada por pontes de hidrogênio, às cadeias de celulose das paredes celulares;
- Vapor d'água, que pode estar, assim como a água livre, contido nos espaços vazios das cavidades celulares.

As condições ambientais afetam a umidade da madeira que, por sua vez, afeta as propriedades mecânicas da madeira (resistência e elasticidade) sendo, portanto, seu estudo, de extrema importância. Importante também é lembrar-se dos aspectos referentes à secagem de peças de madeira, procedimento este que envolve o conhecimento da relação água-madeira. Seguindo tendência mundial, o novo texto da Norma Brasileira para o Projeto de Estruturas de Madeira (ABNT NBR 7190:97) definiu uma umidade de referência para reportar resultados de resistência e rigidez da madeira. Assim, na caracterização usual de propriedades, os valores devem ser corrigidos para a umidade padrão de 12% por meio de uma expressão teórica de correção (GONÇÁLVES & COSTA, 2004).

Durante o processo de secagem da madeira, a água movimenta-se do interior da peça para a superfície evaporante, originando um gradiente de umidade. O fluxo contínuo de água é função da permeabilidade e do gradiente de umidade, quando a umidade da madeira estiver, respectivamente, acima e abaixo do ponto de saturação das fibras. (JANKOWSKY et al., 1985)

2.5. Ponto de Saturação das Fibras

Em uma árvore viva, dependendo da estação do ano, da espécie e da localização da árvore, o teor de umidade da madeira verde varia de 60 a 200% (ZIMMERMANN, 1983, citado por GONÇÁLVES & COSTA, 2004). As madeiras verdes normalmente contêm água em três diferentes formas: água líquida, preenchendo parcialmente ou completamente as cavidades celulares, vapor de água nos espaços vazios das cavidades celulares e água na parede celular.

O ponto de saturação das fibras corresponde a um teor de umidade da madeira, obtido quando a umidade relativa do ar é próxima de 100%, ou mais exatamente 98% como indicado por SIAU (1984). Neste caso, as cavidades celulares não contêm mais água enquanto as

paredes estão saturadas. Para espécies de zonas temperadas inúmeras pesquisas já foram realizadas para se determinar com exatidão o ponto de saturação de várias espécies estando este ponto entre 28% e 30% (KOLLMANN, 1951).

GERHARDS (1982), citado por GONÇÁLVEZ & COSTA (2004), resumiu diversos trabalhos que mostravam a influência da umidade e da temperatura em várias propriedades mecânicas da madeira. Todos os trabalhos confirmam a redução da resistência e do módulo de elasticidade da madeira com o acréscimo da umidade, até valores de teor de umidade próximos de 30%. Segundo o autor, acréscimos de teores de umidade acima deste ponto não mais influenciavam os parâmetros mecânicos.

O uso do ultra-som para o monitoramento do teor de umidade da madeira é relativamente novo (BUCUR, 1995). BUCUR & SAREM (1992) analisaram o comportamento da velocidade e da atenuação das ondas de ultra-som em corpos-de-prova da espécie spruce, medida nas condições saturada e seca ao ar.

A variação da velocidade longitudinal (VLL) com a umidade mostra que a máxima velocidade foi obtida na condição seca ao ar. SAKAI (1990) indica que a velocidade decresce de maneira muito acentuada com o acréscimo da umidade até o ponto de saturação das fibras e, após, a variação passa a ser muito pequena. BUCUR (1995) indica que, a teores de umidade baixos ($U < 18\%$), quando a água está presente nas paredes celulares na forma de água de impregnação, o pulso de ultra-som se dispersa nas células e nos limites intercelulares da madeira.

Acima do ponto de saturação das fibras, quando a água livre está presente nas cavidades celulares, a porosidade do material intervém como fator predominante na dispersão das ondas. Desta maneira, é de extrema importância pesquisas que visem obter uma indicação da sensibilidade da técnica do ultra-som à umidade da madeira, bem como determinem se há uma ligação entre este comportamento e a estrutura anatômica da madeira (GONÇÁLVEZ & COSTA, 2004).

2.6. Módulo de Elasticidade Dinâmico

As propriedades elásticas da madeira, juntamente com a densidade, são consideradas fundamentais para a avaliação da qualidade da madeira. Essas propriedades podem ser determinadas por análises não destrutivas. Testes para a determinação do MOE são costumeiramente destrutivos, o que reduz a oportunidade de rapidez da análise. Com o conhecimento do Módulo de Elasticidade, este se torna importante indicador de força, o que indicará o valor econômico da madeira (ILLIC, 2003).

Os primeiros ensaios na madeira, com o objetivo elementar de analisar a relação entre o carregamento e seus efeitos (tensões e deformação), foram feitos por GALILEU, em 1638 e HOOKE, em 1678 (citados por BALLARIN & NOGUEIRA, 2003).

GERHARDS (1982), citado por GONÇÁLVEZ & COSTA (2004), constatou que há redução da resistência e do módulo de elasticidade da madeira com o acréscimo da umidade, até valores de teor de umidade próximos de 30%. Segundo o autor, acréscimos de teores de umidade acima deste ponto não mais influenciavam os parâmetros mecânicos.

Segundo BALLARIN & NOGUEIRA (2003), as metodologias empregadas nesses estudos vão desde os ensaios estáticos convencionais (compressão, tração, flexão e torção) até os ensaios não-destrutivos (vibração longitudinal, vibração transversal e ondas de tensão).

O conhecimento dos principais parâmetros elásticos da madeira, que expressam relações tensão-deformação ou relações entre deformações nas direções de simetria elástica, é

de fundamental importância para que seja possível a modelagem matemática de seu comportamento estrutural (BALLARIN & NOGUEIRA, 2003).

ILLIC (2003), em trabalho com 55 espécies, entre elas a teca, originária de Myanmar, encontrou densidade aparente de 675 kg/m^3 , 4730 m/s de velocidade no sentido longitudinal e MOEd (Módulo de Elasticidade Dinâmico) de $15,1 \text{ GPa}$, com a madeira a 12% de umidade.

2.7. Densidade de Plantio - Espaçamento

O sucesso de qualquer empreendimento florestal passa, necessariamente, por um adequado planejamento da implantação das florestas. No que diz respeito à concepção de um sólido programa de melhoramento genético e à adoção de técnicas silviculturais e manejo que propiciem alcançar níveis significativos de ganho de produtividade e qualidade da matéria prima desejada (SILVEIRA, 1999).

A decisão sobre o espaçamento inicial de uma floresta é uma das mais importantes e difíceis decisões a serem tomadas pelo silvicultor, em razão do efeito no custo e manutenção do povoamento (COELHO et al., 1970).

CAMPOS et al. (1977) e SCHENEIDER (1993), citados por OLIVEIRA (2008) dentre outros, confirmam a influência do espaçamento entre árvores sobre as características de crescimento (volume, diâmetro e/ou altura) e sobrevivência das árvores nos povoamentos.

Segundo LIMA et al. (2009), deve-se conhecer o aspecto silvicultural da produção de madeira de *T. grandis*, e também as características físicas desta madeira como um dos parâmetros de avaliação tecnológica.

Segundo ZOBEL & VAN BUIJTENEN (1989), a distância entre plantas e os desbastes aplicados afetam diretamente a qualidade da madeira. Sabe-se que com espaçamentos mais amplos a dimensão das toras é favorecida. Todavia, os efeitos dos espaçamentos sobre a qualidade da madeira; em muitas ocasiões, não são conhecidos. As diferenças ocorridas na qualidade da madeira é produto do manejo florestal, que geralmente estão associadas a um incremento no tamanho da copa, que pode ser consequência da competição dos nutrientes e das variações nos processos fotossintéticos ao aumentar ou diminuir o número de árvores em uma plantação (ROCHA & DELLA, 1987).

Os efeitos do espaçamento na qualidade da madeira podem, em alguns casos, ser atribuídos às propriedades da espécie em questão e sua interação com a qualidade do sítio, no qual está sendo cultivada (OLIVEIRA, 2008)

PÉREZ & KANNINEN (2002) não encontraram diferença significativa na densidade da madeira para diferentes densidades da plantação de árvores de teca crescendo na Costa Rica (ROQUE et al., 2003).

Segundo SIMÕES (1989), citado por OLIVEIRA (2008), a densidade de plantio influencia as taxas de crescimento das plantas, a qualidade da madeira, a idade de corte, bem como as práticas de exploração e manejo florestal, e, conseqüentemente, os custos de produção.

De acordo com ZOBEL & BUIJTENEN (1989), o espaçamento influencia pouco as propriedades da madeira de folhosas. Isto foi verificado por BRASIL & FERREIRA (1971), em um estudo sobre a densidade básica da madeira de *Eucalyptus alba*, *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus grandis* com idade de 5 anos, sendo que os autores observaram que os espaçamentos $3 \times 1,5 \text{ m}$ e $3 \times 2 \text{ m}$, em duas localidades não influenciaram esta propriedade.

ROQUE & LEDEZMA (2003), estudando o efeito do espaçamento ($3 \times 3 \text{ m}$ e $6 \times 2 \text{ m}$) sobre a densidade básica e retração da madeira, em populações de *T. grandis*, de 10 anos de

idade, verificaram que a densidade básica aumentou no espaçamento 6 x 2m, enquanto que a retração volumétrica diminui neste espaçamento.

2.8. Avaliação Não-Destrutiva

Diversos métodos podem ser empregados na avaliação dos parâmetros de qualidade da madeira, e a avaliação não-destrutiva tornou-se, nos últimos anos, uma importante ferramenta na inferência de propriedades físicas e mecânicas da madeira, devido, principalmente, ao baixo custo dos equipamentos, rapidez e praticidade dos testes (BALLARIN & NOGUEIRA, 2005).

A avaliação não destrutiva é definida como sendo a ciência de identificar as propriedades físicas e mecânicas de uma peça de determinado material sem alterar suas capacidades de uso final (ROSS et al., 1998, citado por OLIVEIRA et al. 2003). De acordo com SALES (2002), OLIVEIRA et al. (2003), os métodos não destrutivos apresentam vantagens em relação aos métodos convencionais para caracterização da madeira: maior rapidez para analisar uma grande população e versatilidade para se adequar a uma rotina padronizada numa linha de produção.

É possível uma caracterização eficaz da madeira por meio de métodos não destrutivos, uma vez que a avaliação é feita na própria peça ou estrutura ROSS et al. (1998).

Segundo ERIKSON et al. (2000), citado por OLIVEIRA et al. (2003) a avaliação não destrutiva é uma importante ferramenta para a caracterização da madeira, podendo ser utilizada pelas indústrias para melhorar o controle de qualidade dos processos através de uma maior uniformidade na matéria-prima e em seus derivados.

De acordo com ROSS (1999), várias tecnologias, como raio-x, propriedades vibracionais e transmissão de ondas sonoras, são usadas para avaliar a madeira de modo não destrutivo.

A técnica do ultra-som, mais avançada e de maior potencial que as demais, permite maior controle das fontes emissoras de pulsos, sobretudo no que diz respeito às frequências das emissões. Além disso, parece ser mais promissora, na medida em que sua extensão a indústria - objetivo maior de um trabalho científico-investigativo - se daria de forma mais imediata e direta, conforme mostram exemplos internacionais. (BALLARIN & NOGUEIRA, 2005)

2.9. Ultra-Som

O ultra-som é caracterizado por frequências acima de 20000 Hz. O método ultrasonoro se apóia na análise da propagação de uma onda e sua relação entre a resposta ao ultra-som e às constantes elásticas da madeira. Em geral, o método consiste em gerar, no interior de um corpo-de-prova, uma ou várias ondas elásticas com a ajuda de uma sonda "piezo-elétrica". As ondas se propagam com velocidades que dependem da direção de propagação e das constantes elásticas do material. A medição do tempo de propagação da onda, isto é, de sua velocidade, permite determinar estas constantes (NOGUEIRA & BALLARIN, 2003),(GONÇALVEZ et al., 2001)

Entre as vantagens de sua utilização, vale destacar o baixo custo de aquisição do equipamento se comparado ao das máquinas de classificação automática, e o treinamento relativamente simples da mão-de-obra para utilização do equipamento, possibilitando que o método seja facilmente difundido em revendedores e indústrias de madeiras e derivados (OLIVEIRA, 2001).

A aplicação e medição de ondas acústicas consistem no posicionamento de dois transdutores acelerômetros sobre o material a ser avaliado. A onda acústica é introduzida no material por um dos transdutores e captada pelo outro transdutor, sendo a contagem de tempo, em microssegundos, realizada pelo próprio instrumento de ultra-som. (GONÇALEZ et al., 2001)

Segundo HALABE et al. (1996), a velocidade de uma onda ultra-sônica depende do modo de vibração (nas direções longitudinal e transversal) e das propriedades do material. Diversos trabalhos têm demonstrado as relações existentes entre os parâmetros elásticos e mecânicos da madeira (notadamente seu módulo de elasticidade) e a constante dinâmica (MOEd), obtida a partir da velocidade de propagação da onda de ultra-som, conforme segue:

$$V = \sqrt{(\text{MOEd}/d)} \quad (1)$$

em que:

MOEd - constante dinâmica na direção longitudinal (paralela às fibras) do material, Pa;

V- velocidade de propagação da onda no material na direção longitudinal, m/s;

d- densidade do material, kg /m³.

Na madeira, os fatores que influenciam a propagação de ondas ultra-sônicas são: propriedades físicas do substrato, características geométricas da espécie (macro e microestruturas), condições do meio (temperatura, umidade) e o procedimento utilizado para tomada das medidas (frequência e sensibilidade dos transdutores, seu tamanho, posição e características dinâmicas do equipamento) (BUCUR & BÖNHKE (1994)).

Segundo OLIVEIRA et al. (2003), os valores do módulo de elasticidade obtidos no método de ultra-som são usualmente maiores que os encontrados na flexão estática. Que pode ser explicado segundo SIMPSON & WANG (2001), considerando-se a madeira um material visco elástico e altamente amortecedor. Na vibração de uma espécie de madeira, a força elástica restaurada é proporcional ao deslocamento e a força dissipativa é proporcional à velocidade. Portanto, quando a força é aplicada com curta duração, o material se comporta como um sólido elástico, enquanto que para uma longa duração o comportamento é igual ao de um líquido viscoso. Este comportamento é mais proeminente no ensaio de flexão estática (longa duração) se comparado ao ensaio de ultra-som.

Há forte relação entre velocidade de propagação de ondas e a umidade. A umidade afeta a velocidade de propagação de dois modos: no efeito intrínseco da rigidez e na densidade da madeira. A água livre aumenta a atenuação, resultando numa diminuição da velocidade nas direções longitudinal, radial e tangencial.

De acordo com BUCUR (1995), em um baixo valor de umidade (menor que 18%), quando a água existente na madeira está ligada às moléculas de celulose da parede celular, o pulso ultra-sônico é espalhado pelos elementos anatômicos e pelos contornos destes elementos.

A velocidade de propagação diminui drasticamente com o aumento da umidade até o ponto de saturação das fibras, sendo que, a partir deste ponto, a variação da velocidade torna-se pequena. A atenuação é praticamente constante em baixos valores de umidade, mas aumenta a partir de um ponto crítico no qual as paredes das células começam a reter água livre. A velocidade ultra-sônica na madeira nas direções longitudinal e radial tende a aumentar com a diminuição do teor de umidade. A influência da umidade abaixo do ponto de saturação das fibras é mais significativa do que acima deste ponto, mas as relações numéricas entre essas grandezas variam muito entre as diferentes espécies (BUCUR & SAREM, 1992),

OLIVEIRA & SALES (2005) observaram uma inflexão em torno do ponto de saturação das fibras para todas as espécies estudadas, demonstrando que o efeito do teor de umidade abaixo do PSF é mais significativo do que acima deste ponto.

CALEGARI et al.(2007) afirmam que a grande influência do teor de umidade sobre o MOE (módulo de elasticidade), na faixa que corresponde à madeira completamente seca até o PSF, seria responsável pela variação da velocidade ultra-sônica. Assim, teores de umidade acima do PSF proporcionam menores variações da velocidade ultra-sônica e piores ajustes matemáticos.

Esse fenômeno que foi explicado por GONÇÁLVES & COSTA (2004), até o ponto de saturação das fibras tem-se a presença de água livre nos vazios celulares e água de impregnação nas paredes. Isso faz com que a propagação da onda ocorra, tanto na parede celular quanto na água, reduzindo assim a velocidade. Abaixo do ponto de saturação, a água só existe na forma de água de impregnação e se localiza na parede celular. Nesse estado, a propagação da onda se daria somente na parede celular, o que faz com que a velocidade seja maior e com que a dispersão se dê em função de fatores ligados à estrutura da madeira.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Local de Estudo

O material utilizado para este estudo foi coletado de um plantio de *Tectona grandis* L.f., de 12 anos, com três densidades de plantio diferentes, do município de Cáceres – Mato Grosso, Brasil, nas seguintes coordenadas geográficas de 16°11'42"S e 57°40'51"W a uma altitude de 117 m.

3.2. Coleta do Material e Preparo das Amostras

Foram selecionadas cinco árvores ao acaso de cada densidade de plantio (Tab. 1), de todas as árvores foram retirados discos e toras. Neste trabalho utilizou-se a tora a 25% da altura total da árvore – tora 2 (Fig. 1), logo abaixo do DAP (Diâmetro à altura do peito).

Tabela 1: Arranjo do espaçamento em cada densidade de plantio.

Densidade de plantio	Espaçamento
1250 árvores/ha	4 x 2m
1000 árvores/ha	5 x 2m
834 árvores/ha	6 x 2m

O material foi levado ao Laboratório de Processamento e Usinagem da Madeira do Departamento de Produtos Florestais, do Instituto de Florestas, na Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ). De cada tora, a partir de uma prancha diametral, foram retirados corpos-de-prova com as dimensões de 2,0 x 2,0 x 30,0 cm (espessura x largura x comprimento). Para este estudo foram confeccionados 70 corpos-de-prova.

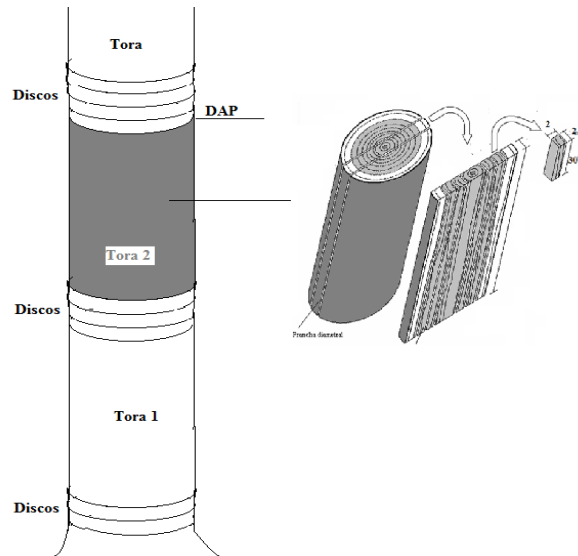


Figura 1: Modelo de retirada dos corpos-de-prova (Adaptado de LOGSDON et al., 2007).

Em seguida, as amostras foram levadas ao Laboratório de Física e Secagem da Madeira – LAFIS do Departamento de Produtos Florestais, do Instituto de Florestas na UFRRJ, onde foi realizado todo o procedimento experimental.

3.3. Estudo das Propriedades Físicas

As propriedades físicas da madeira estudadas foram densidade básica, densidade aparente, contração volumétrica total, teor de umidade. Para tanto, os 70 corpos-de-prova foram levados à condição saturada; destes foram retirados 10 corpos-de-prova para serem amostras controle. As amostras controle serviram para a estimativa do teor de umidade da madeira e o peso final de cada amostra.

À estufa de ventilação forçada foram levados 30 corpos-de-prova para serem submetidos à secagem.

A secagem da madeira procedeu-se em três fases. Da condição de umidade verde (saturada) até 40% (Fase 1) adotou-se a temperatura de 60°C. Para a faixa de umidade de 40 - 20% adotou-se a temperatura de 70°C (Fase 2) e para a faixa de umidade de 20 a 10% utilizou-se a temperatura de 80°C. Esse procedimento foi adotado para simular um processo de secagem e procurar manter uma taxa de vazão de água linear.

Dentro de cada fase de secagem foram tomados as dimensões lineares e massa de cada corpo de prova em intervalos de 20 minutos na Fase 1 de secagem e 10 minutos nas outras fases (2 e 3).

Após o término da Fase 3, a temperatura da estufa de ventilação forçada foi elevada a $103 \pm 2^\circ\text{C}$ para a secagem completa por 24 horas.

Os 30 corpos-de-prova restantes foram dispostos em câmara climatizada, $20^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ e $65\% \pm 5\%$ de umidade, para o equilíbrio do conteúdo de umidade (12%), e para o acompanhamento do comportamento de secagem e velocidade ultra-sônica. Durante este processo cada corpo de prova foram tomados de dimensões lineares, massa a cada medição. As medições foram feitas duas vezes ao dia. Após os corpos-de-prova atingirem a umidade equilíbrio, foram levados para estufa de ventilação forçada a $103 \pm 2^\circ\text{C}$ por 24 horas, para aquisição da massa seca e dimensões lineares.

Tanto para os corpos-de-prova na estufa e na câmara climatizada foram utilizados dois corpos-de-prova por árvore, totalizando 10 corpos-de-prova por tratamento (densidade de plantio).

Com posse das massas secas reais de todos os corpos-de-prova, determinou-se o teor de umidade real em cada etapa, assim como o cálculo da densidade básica e aparente.

Para a determinação do teor de umidade da madeira foi utilizada a seguinte expressão:

$$TU = [(M_u - M_s) / M_s] \times 100 \quad (1)$$

Onde:

TU: teor de umidade, em %;

M_u : massa úmida, g;

M_s : massa seca, g.

Para a determinação da densidade básica foi utilizada a expressão seguinte:

$$D_b = M_0 / V_{100} \quad (2)$$

Em que:

D_b : densidade básica, g/cm³;

M_0 : massa seca da madeira, g;

V_{100} : volume da madeira saturada, cm³.

Para a determinação da densidade aparente foi utilizada a seguinte expressão:

$$D_a = M_{12} / V_{12} \quad (3)$$

Sendo:

D_a : densidade aparente, g/cm³;

M_{12} : massa da madeira a 12% de umidade, g;

V_{12} : volume da madeira a 12% de umidade, cm³.

Para a contração volumétrica total utilizou-se a expressão:

$$CVT = [(v_v - v_s) / v_v] \times 100 \quad (4)$$

Em que:

CVT: contração volumétrica total, em %;

v_v : volume saturado, g/cm³;

v_s : volume seco, g/cm³.

3.4. Estudo da Propriedade Mecânica

Na condição saturada, os corpos-de-prova foram submetidos à primeira leitura do tempo de propagação de onda na direção longitudinal, utilizando o equipamento de emissão de ondas ultra-sonoras da marca Steinkamp, modelo BP-7. O tempo de propagação das ondas de ultra-som foi determinado exatamente no centro dos corpos-de-prova, considerando o plano longitudinal (Fig.2).

O tempo de propagação da onda ultra-sônica de cada corpo de prova foi medido durante o processo de secagem na câmara climatizada e na estufa de ventilação forçada no mesmo momento em que eram realizados os outros procedimentos de medição (massa e dimensões).

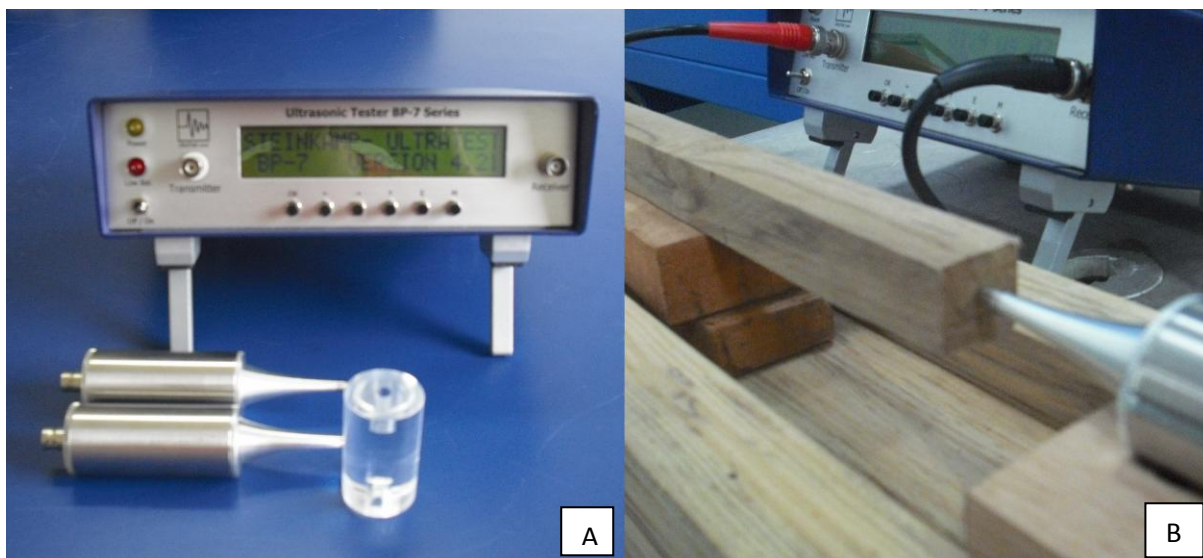


Figura 2: (A) Aparelho de ultra-som – Steinkamp Ultrasonic Tester BP-7 Series, Versão 4.21, com transdutores e calibrador de acrílico. (B) Determinação do tempo de propagação da onda, no sentido longitudinal, com transdutor exatamente ao centro do corpo-de-prova.

Com os tempos de propagação da onda ultra-sônica, foram obtidas as velocidades de propagação da onda no sentido longitudinal, e também o Módulo de Elasticidade dinâmico (MOEd).

A velocidade ultra-sônica, em m/s, foi calculada pela razão entre o comprimento do corpo-de-prova e do tempo de propagação. O MOEd (Módulo de Elasticidade Dinâmico) foi calculado pela seguinte expressão:

$$\text{MOEd} = V^2 \times D_b / 1000 \quad (5)$$

Sendo:

MOEd: módulo de elasticidade dinâmico, MPa;

D_b : densidade básica, g/cm³;

V: velocidade ultra-sônica, m/s.

Para o cálculo do MOEd a 12% de umidade foi utilizado na expressão (5), a densidade aparente em substituição à densidade básica.

3.5. Determinação do Ponto de Saturação das Fibras

Após a determinação de todas as propriedades físicas e mecânica propostas neste estudo foi determinado o Ponto de Saturação das Fibras (PSF) para a madeira de *Tectona grandis* L.f..

Para tanto, foram confeccionados gráficos de Volume x Teor de Umidade e, MOEd x Teor de Umidade, para todos os corpos-de-prova.

Em cada gráfico foi marcado, visualmente, o ponto de inflexão da curva, o que indica o ponto de saturação das fibras. Para a confirmação deste ponto, os gráficos foram partimentalizados da condição de umidade a 0% até o ponto marcado como de inflexão da curva, foi gerada uma equação linear e calculado o coeficiente de determinação (R^2). Dependendo do ponto marcado o gráfico foi refeito da condição a 0% de umidade para um teor de umidade acima e um abaixo do ponto de inflexão para a confirmação do PSF, sendo

que quanto mais alto o coeficiente de determinação, melhor o ajuste da equação, e confirmação de que aquele ponto é o PSF.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Propriedades Físicas

4.1.1 Densidade básica e Contração volumétrica

A densidade básica média encontrada para *Tectona grandis* L.f. foi 0,496 g/cm³.

Os valores médios apresentados (Tab.2) para a densidade básica são semelhantes aos obtidos por MORENO & ROQUE (2006), e CRESPO et al.(2008), e inferiores ao apresentado por ILLIC (2003) em estudos com *T. grandis*. Os efeitos das densidades de plantio não foram significativos a 5% de probabilidade.

Este resultado está de acordo com o encontrado por PÉREZ & KANNINEN (2002), que não encontraram diferença significativa na densidade da madeira para diferentes densidades da plantação de árvores de teca crescendo na Costa Rica; BRASIL & FERREIRA (1971), também não verificaram diferenças significativas entre aumento do espaçamento para a densidade básica da madeira de algumas espécies do gênero *Eucalyptus*. Entretanto, ROQUE & LEDEZMA (2003), estudaram o efeito do espaçamento sobre a densidade básica em populações de *T. grandis*, de 10 anos de idade, e verificaram que a densidade básica aumentou na menor densidade de plantio.

A contração volumétrica total (CVT) média no sentido longitudinal para *Tectona grandis* foi 8,53%.

Com a diminuição da umidade da madeira tem-se também uma perda em volume (REZENDE et al.,1988). Os efeitos das densidades de plantio não foram significativos a 5% de probabilidade.

Os valores médios encontrados (Tab.2) estão de acordo com SILVA et al. (2006). CRESPO et al. (2008) também encontraram valores de contração volumétrica total entre 7,77% (teca de Quevedo) e 8,11% (teca de Balzar). ROQUE & LEDEZMA (2003) verificaram que o aumento do espaçamento diminuiu a retração volumétrica da madeira de *T. grandis* de 10 anos de idade. Entretanto, os efeitos das densidades de plantio não apresentaram diferenças significativas, a 5% de probabilidade.

Tabela 2: Valores médios de densidade básica (D_b) e contração volumétrica total (CVT) no sentido longitudinal para *Tectona grandis* L.f.

D. de plantio	D^b (g/cm ³)	desvpad	CVT (%)	desvpad
834 árv./ha	0,516	0,047	9,02	1,029
1000 árv./ha	0,502	0,055	8,16	0,502
1250 árv./ha	0,471	0,024	8,41	1,165

4.1.2 Densidade aparente

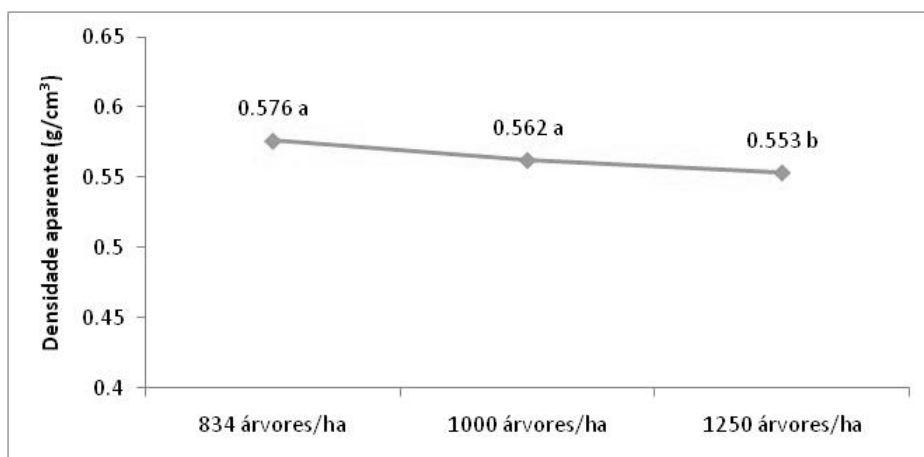
A densidade aparente média encontrada para *Tectona grandis* L.f. foi 0,562 g/cm³.

Os efeitos das densidades de plantio foram significativos a 5% de probabilidade. Verificou-se uma tendência de acréscimo para a densidade aparente de acordo com a

diminuição da densidade de plantio, sendo a maior densidade (1250 árvores/ha) significativamente menor.

Os valores médios de densidade aparente encontrados são inferiores aos encontrados por LIMA et al. (2009), que encontrou a mesma tendência de aumento da densidade aparente com a diminuição da densidade de plantio. A influência das densidades de plantio na densidade aparente foi significativa a 5% de probabilidade (Fig. 3).

Considerando-se que densidades de plantio menores podem produzir um maior volume de madeira por unidade de área, pode-se, então, pensar que houve um ganho na densidade de acordo com a diminuição da densidade de plantio. Lembrando que isto só foi significativo para a densidade aparente.



Obs: Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade

Figura 3: Densidade Aparente em função da densidade de plantio para *Tectona grandis* L.f. aos 12 anos de idade.

4.2. Propriedade Mecânica

4.2.1. Velocidade de propagação da onda ultra-sônica

Os resultados médios de velocidade de propagação da ultra-sônica e umidade foram inseridos em um gráfico (Umidade x Velocidade ultra-sônica na direção longitudinal), para a avaliação da tendência geral dos mesmos. O valor da velocidade de propagação da onda na direção longitudinal para teca, com a madeira na umidade equilíbrio, foi de 3915 m/s, valor inferior ao encontrado por ILLIC (2003) para teca de Myanmar.

O comportamento clássico da redução da velocidade ultra-sônica em função do aumento do teor de umidade da madeira também foi encontrado por CALEGARI et al. (2007) para as madeiras de pinus e eucalipto. Na Fig. 4, observa-se comportamento da velocidade na direção longitudinal.

Observa-se na Fig. 4, que a velocidade de propagação na direção longitudinal decresce com o acréscimo de umidade, em dois trechos distintos, no trecho compreendido entre as umidades de 0% e 30% nota-se uma variação maior na velocidade do que naquela existente para umidades superiores.

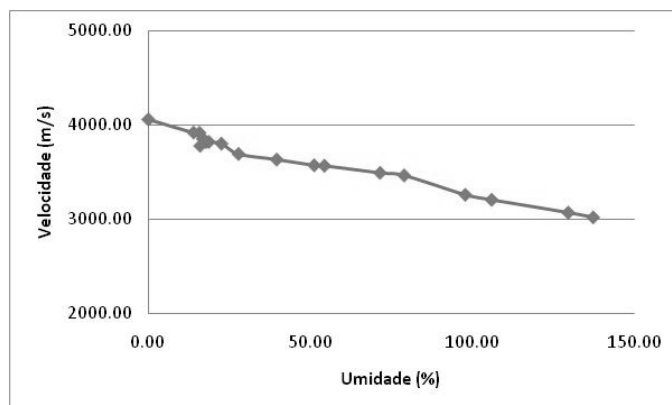


Figura 4: Comportamento da velocidade de propagação da onda ultra-sônica na direção longitudinal da madeira de *Tectona grandis* aos 12 anos de idade, em função da umidade.

Até o PSF tem-se presença de água livre nos vazios celulares e a água de impregnação nas paredes, fazendo com que a propagação da onda ocorra tanto na parede celular, quanto na água, o que reduz a velocidade. Após o PSF, a onda se propaga somente pela parede, tornando a velocidade maior. GONÇALVES & COSTA (2006), encontraram resultado semelhante, trabalhando com *Pinus elliottii*.

Na Fig.5 são apresentados os modelos que representam a velocidade de propagação da onda em função da umidade na direção longitudinal, no trecho de 0% a 30%, e no trecho acima de 30%

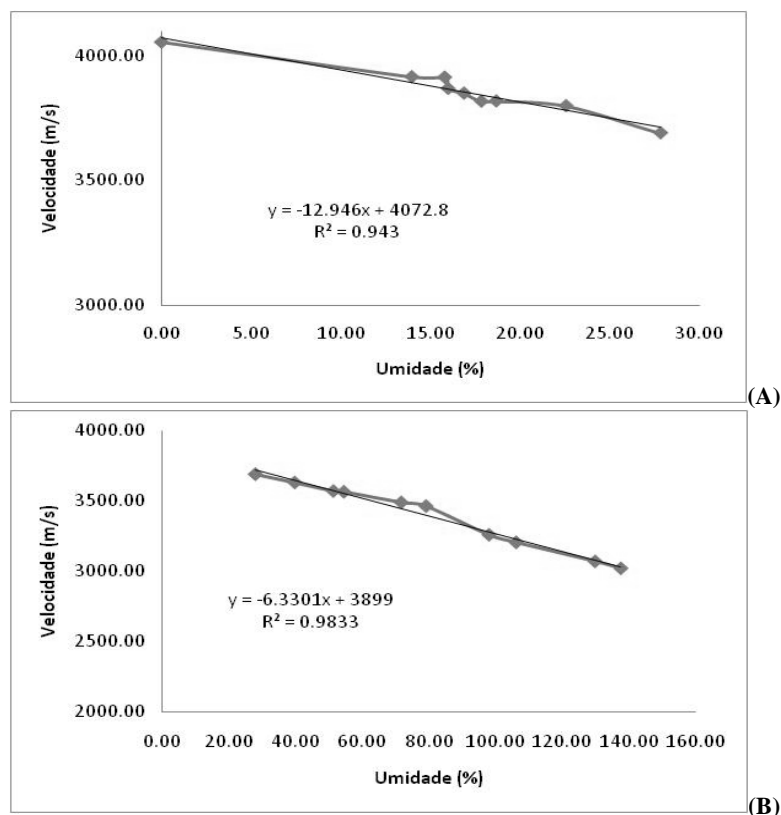


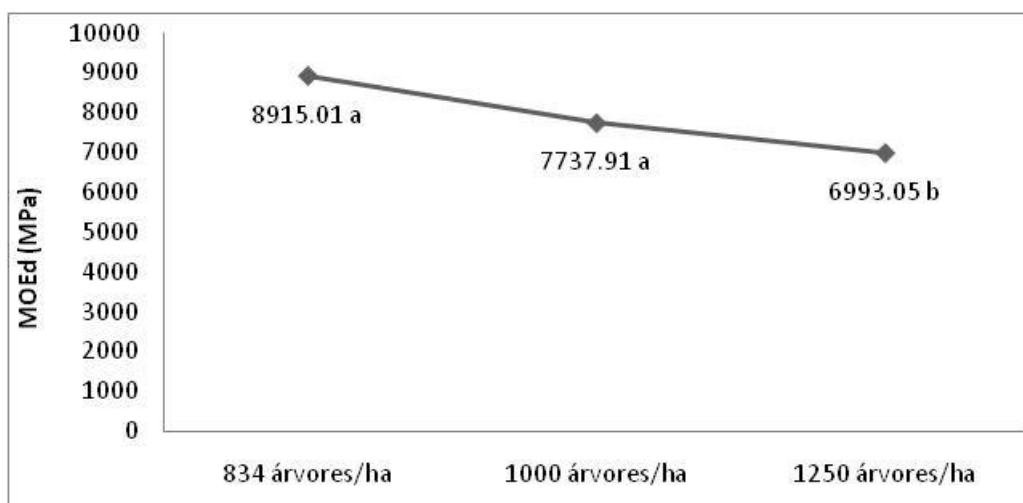
Figura 5: Modelo representativo da variação da velocidade de propagação de onda de ultra-som na direção longitudinal em função da umidade; **(A)** trecho de 0% a 30%; **(B)** trecho de umidade acima de 30%.

4.2.2. MOEd

O módulo de elasticidade dinâmico (MOEd) médio encontrado para *Tectona grandis* foi 7.881,98 MPa, a 12% de umidade.

Valores médios encontrados para MOEd foram inferiores ao encontrado por ILLIC (2003), em estudo com teca de Myanmar usando o ultra-som, e ao encontrado por CRESPO et al. (2008) em ensaio de flexão estática para teca de Quevedo e Balzar. Verificou-se tendência significativa de acréscimo do MOEd com a diminuição da densidade de plantio, sendo a maior densidade (1250 árvores/ha) significativamente menor (Fig. 6).

Observou-se que a densidade influencia intensamente a resistência mecânica da madeira. Houve um aumento proporcional do MOEd com o aumento da densidade aparente, já que o MOEd está relacionado a esta densidade e a velocidade ultra-sônica, Sendo essas propriedades sensivelmente afetadas pela umidade, que como visto influencia a propagação das ondas.



Obs: Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade

Figura 6: Módulo de Elasticidade dinâmico (MOEd) em função da densidade de plantio para *Tectona grandis* L.f. aos 12 anos de idade.

CALEGARI et al.(2008), estudando *Pinus* e *Eucalyptus*, afirmou que a grande influência do teor de umidade sobre o MOE, na faixa de umidade que corresponde à madeira completamente seca até seu PSF, seria responsável pela variação da velocidade ultra-sônica.

Segundo OLIVEIRA et al. (2003), BALLARIN & NOGUEIRA (2005), os valores do módulo de elasticidade obtidos no método de ultra-som são usualmente maiores que os encontrados na flexão estática.

4.3. Ponto de Saturação das Fibras (PSF)

O ponto de saturação das fibras (PSF) médio encontrado para *Tectona grandis* foi 29,76% de umidade. O valor encontrado está dentro do intervalo estabelecido por KOLLMANN (1951), estando este ponto entre 28% e 30%. Não houve diferença significativa da influência das densidades de plantio nos valores de PSF (Tab.3).

Tabela 3: Valores médios do ponto de saturação das fibras (PSF) para *Tectona grandis* L.f.

D. de plantio	PSF (%)	desvpad
834 árv./ha	29,47	1,238
1000 árv./ha	29,88	0,983
1250 árv./ha	29,94	0,625

O PSF foi determinado a partir da análise dos gráficos confeccionados para cada corpo-de-prova (Fig. 7 e 8), marcando o ponto de inflexão da curva, e em seguida o cálculo do coeficiente de determinação (R^2).

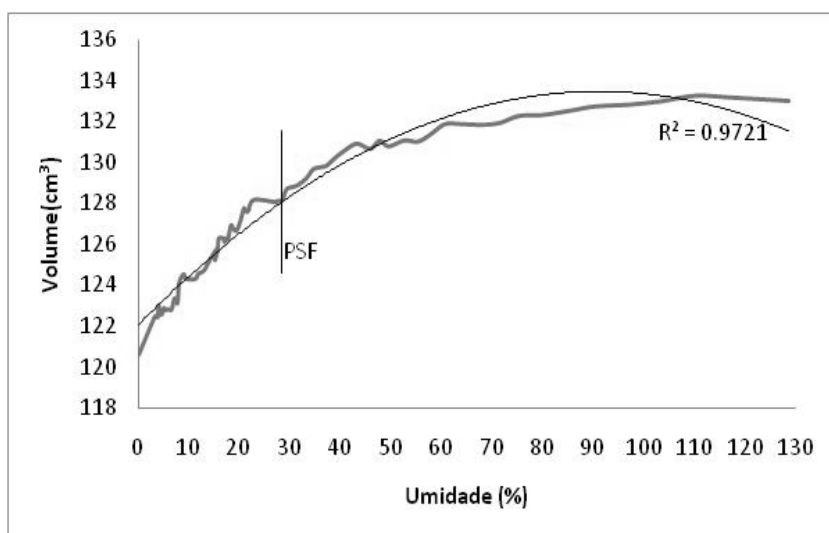


Figura 7: Determinação do PSF através da marcação do ponto de inflexão da curva no gráfico volume x umidade.

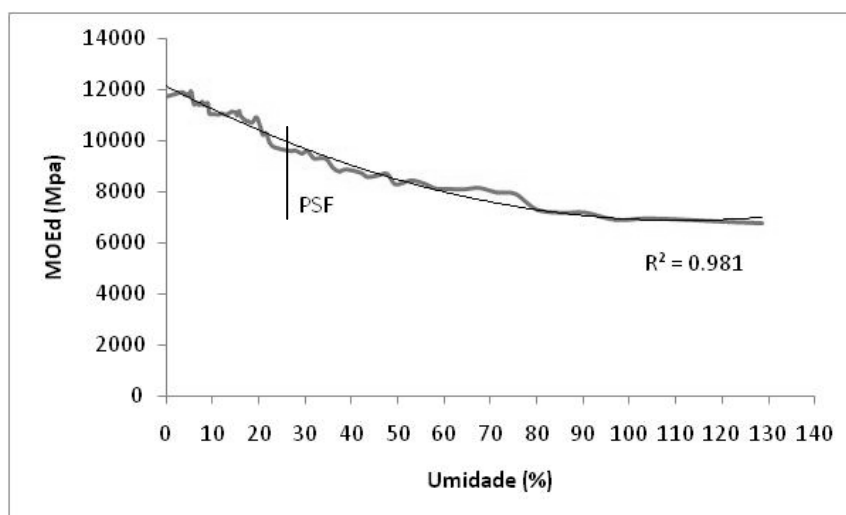


Figura 8: Determinação do PSF através da marcação do ponto de inflexão da curva no gráfico MOEd x umidade.

Como observado na Fig. 7 e Fig. 8, é possível determinar através das propriedades físicas e do MOEd o PSF.

5. CONCLUSÕES

- A densidade de plantio influenciou significativamente a densidade aparente da madeira de *Tectona grandis* L.f., assim como o MOEd, que aumentaram com a diminuição da densidade de plantio.
- A velocidade de propagação da onda ultra-sônica diminuiu com o aumento do teor de umidade da madeira.
- Os resultados deste estudo demonstram que as variáveis MOEd e Velocidade de propagação da onda ultra-sônica, obtidos através do ultra-som, podem ser utilizados como um dos parâmetros para a determinação do comportamento de secagem da madeira de *Tectona grandis* L.f..

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ÂNGELO, H.; SILVA, V. S. M.; SOUZA, A. N.; GATTO, A. C. Aspectos financeiros da produção de teca no Estado do Mato Grosso. **Revista Floresta**, Curitiba- PR, v. 39, n. 1, p. 23-32. 2009.
- BALLARIN, A.W.; NOGUEIRA, M. Caracterização elástica da madeira de *Eucalyptus citriodora*. **Revista Cerne**, v.9, N.1, p.066-080, 2003.
- BALLARIN, A.W.; NOGUEIRA, M. Determinação do módulo de elasticidade da madeira juvenil e adulta de *Pinus taeda* por ultra-som. **Eng. Agríc.**, Jaboticabal, v.25, n.1, p.19-28, 2005.
- BRASIL, M. A. M.; FERREIRA, M. **Variação da densidade básica da madeira de *Eucalyptus alba*, *E. saligna* e *E. grandis* aos 5 anos de idade, em função do espaçamento.** IPEF, Piracicaba, n. 2/3, p. 129-149, 1971.
- BUCUR, V.; BÖHNKE, I. Factors affecting ultrasonic measurements in solid wood, *Ultrasonics*. V. 32, n. 5, p.385-390, 1994.
- BUCUR, V. **Acoustics of wood**. New York 1995.
- BUCUR, V.; SAREM, M. An experimental study of ultrasonic waves propagation in dry and water saturated solid wood. **In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA**, 4. São Carlos. **Anais...** São Carlos, v. 2, p.127-138,1992.
- CALEGARI, L. STANGERLIN, D.M. SANTINI, E.J. HASELEIN, C.R. LONGHI,S.J. CARMO, O.I.O. SILVA Fo., L.C.P. GATTO,D.A. Monitoramento do teor de umidade de madeiras de *Pinus elliottii* Engelm. E *Eucalyptus grandis* W. HILL ex Maiden, sob diferentes temperaturas de secagem, através do ultra-som. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.17,n.4,p 399-408, 2007.
- COELHO, A.S.R.; MELLO, H.A.; SIMÕES, J.W. **Comportamento de espécies de eucalipto face ao espaçamento.** IPEF, Piracicaba, 1970.
- CRESPO, R.G. ROMERO, E.J. CUNUHAY, P.S. BLANCO, G.L. FONSECA, C.S. Análisis comparativo de las propiedades físico-mecánicas de la madera de teca (*Tectona grandis* L.F.) de Quevedo y Balzar. **Ciencia y Tecnologia**, v.1,n.2 p.55-63, 2008.
- GONÇALVES, R.; COSTA, O.L. Aplicação de ultra-som no acompanhamento da secagem de peças de madeira. **6ª Conferência sobre tecnologia de equipamentos, 2004.**
- GONÇALVEZ, J.C.;VALLE, A.T.; COSTA, A.F. Estimativas das constantes elásticas da madeira por meio de ondas ultra-sonoras (ultra-som).**Cerne**, v.7, n.2, p.081-092, 2001
- HALABE, U. B. Assessment of defects and mechanical properties of wood members using ultrasonic frequency analysis. **Materials Evaluation**, p.314-32., 1996.

- ILLIC, J. **Dynamic MOE of 55 species using small wood beams**. Springer-Verlag, 2003.
- JANKOWSKY, I.P.; SILVA, L.E. **Gradiente de umidade durante a secagem da madeira de *Araucária angustifolia* (BERT.) O.KTZE**. IPEF, n.31, p.57-59, 1985.
- LATORRACA, J.V.; ALBUQUERQUE, C.E.C. . Efeito de rápido crescimento sobre as propriedades da madeira. **Revista Floresta e Ambiente**, v.7, n.1, p.279-291, 2000.
- LIMA, I.L.; FLORSHEIM, S.M.B.; LONGUI, E.L. Influência do espaçamento em algumas propriedades físicas da madeira de *Tectona grandis* Linn .**Cerne**, Lavras, v. 15, n. 2, p. 244-250, 2009.
- LOBÃO, M. S.; LÚCIA, R. M. D.; SARMET, M. S.; GOMES, A. Caracterização das propriedades físico-mecânicas da madeira de eucalipto com diferentes densidades. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.28, n.6, p.889-894, 2004.
- LOGSDON, N.B.; FINGER, Z.; PENNA, E.S. Caracterização físico-mecânica da madeira de Cedro-marinho, *Guarea trichilioides* L. (Meliaceae). **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 36, n. 77, p. 43-51, 2008.
- NOGUEIRA, M.; BALLARIN, A.W. Sensibilidade dos ensaios de ultra-som à ortotropia elástica da madeira. In: CONFERÊNCIA PAN-AMERICANA DE ENSAIOS NÃO-DESTRUTIVOS, 3., 2003, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ABENDE, 2003.
- OLIVEIRA, F. G. R. **Estudo de propriedades mecânicas de dicotiledôneas por meio de ensaios não destrutivos utilizando equipamento de ultra-som**. Dissertação (Mestrado) – EESC, USP, São Carlos, 2001.
- OLIVEIRA, F.G.R.; SALES, A. Efeito da densidade e do teor de umidade na velocidade ultra-sônica da madeira. **Revista Minerva**, v2, n1, p. 25-31. 2005.
- OLIVEIRA, F. G. R.; FRANCIELI, M. C.; LUCCHETE, F.; CALIL JR., C.; SALES, A. Avaliação de propriedades mecânicas de madeira por meio de ultra-som. In: III PAN-AMERICAN CONFERENCE FOR NONDESTRUCTIVE TESTING, **Anais...** Rio de Janeiro, Brasil. 2003.
- OLIVEIRA, J. T. S.; HELLMEISTER, J. C.; TOMAZELLO FILHO, M. Variação do teor de umidade e da densidade básica na madeira de sete espécies de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.29, n.1, p.115-127, 2005.
- OLIVEIRA, R.P.R.P.E. **Desempenho silvicultural de *Tectona grandis* L.f., em diferentes espaçamentos, no município de Cáceres, MT** . Monografia (Graduação em Engenharia Florestal). Seropédica, RJ 2008.
- PÉREZ, D.; KANNINEN, M. Heartwood, sapwood y bark content and wood Specific gravity of young and mature *Tectona grandis* L.f trees in Costa Rica. **Silva Fennica**, v.37, n.1, p.45-54, 2002

REZENDE, M.A.; ESCOBEDO, J.F. **Retratibilidade volumétrica e densidade aparente da madeira em função da umidade.** IPEF, n.39, p.33-40,1988.

ROCHA,B. DELLA,R.M. Efeito do espaçamento na produção em peso e qualidade da madeira de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla* aos 52 meses de idade. **Revista Árvore**, v11, n2, p 132-145, 1987.

ROQUE, R.M. Influencia de La edad Del cambium, tasa de crecimiento y nivel de precipitación sobre La densidad básica de La teca em Costa Rica. **Madera y Bosques**, v.8, n.1, p.39-49, 2002.

ROQUE, R. M.; LEDZEMA, R. M. Efecto del espaciamiento en plantación sobre dos propiedades físicas de madera de teca a lo largo del fuste. **Madera y Bosques**, Heredia, v. 9, n. 2, p. 15- 27, 2003.

ROSS, R. J. Nondestructive evaluation of wood. **Forest Products Journal**. v. 48, n.1, p. 14-19, 1998.

ROSS, R. J. Using sound to evaluate standing timber. **Forest Products Journal**, p. 43-44, 1999.

SALAZAR, R.F.; ALBERTIN, W. **Requerimentos edáficos e climáticos para *T. grandis* L. CATIE**, Turrialba, 1974.

SANCHÉZ, D.S. Estúdio físico de suelos de dos sítios para determinar la factibilidad Del establecimiento de caboa (*Swietenia humilis* Zucc.) y teca (*Tectona grandis* L.f). **Honduras**. 2002.

SETH, S.K.; KAUL, O.N. **Tropical Forest ecosystems of india: the teak forests**. Paris: Unesco, p.628–640, 1978.

SIAU, J. F. **Transport Processes in Wood**. Springer-Verlag, Berlin. 1984

SILVA, J.C.; OLIVEIRA, J.T.S.; XAVIER, B.A.; CASTRO, V.R. Variação da retratibilidade da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill Ex. Maiden, em função da idade e da posição radial no tronco. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.30, n.5, p.803-810, 2006.

SILVEIRA, V. **Comportamento de clones de *Eucalyptus* em diversos ambientes definidos pela Qualidade de sítios e espaçamento**. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal), Univ. de Federal de Lavras, 1999.

SIMPSON, T. S.; WANG, X. Relationship between longitudinal stress wave transitime and moisture content of lumber during kiln-drying. **Forest Products Journal**, v. 51, n.10, p.51-54, 2001.

SCANAVACA JR., L. GARCIA, J.N. Determinação das propriedades físicas e mecânicas de *Eucalyptus urophylla*. **Scientia Florestalis**, n 65. P120 a 129.2004.

SHIMIZU, J.Y.; KLEIN, H; OLIVEIRA, J.R.V. de Diagnóstico das plantações florestais em Mato Grosso. Cuiabá, MT: **Central de Texto**, 2007.

SHIMOYAMA, V.R. **Variações da densidade básica e características anatômicas e químicas da madeira em *Eucalyptus* sp.** Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 1990.

TSUKAMOTO FILHO, A. A.; SILVA, M. L.; COUTO, L.; MÜLLER, M. D. Análise Econômica de um plantio de teça submetido a desbastes. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 27, n. 4, p. 487- 494.2003.

VIEIRA, A. H; MARTINS, E.P; PEQUENO, P.L.L; LOCATELLI, M. **Aspectos silviculturais da teca em Rondônia.** Embrapa CPAF – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (Documentos 68), p.8, 2002.

ZOBEL, B. J.; BUIJTENEN, J. P. **Wood variation: its causes and control.** Springer-Verlag, Berlin, 361 p.1989.

7. ANEXOS

Quadro 1: Quadro da análise da variância para a densidade básica.

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamento	2	0,00293	0,00146	1,353 ^{n.s.}
Resíduo	12	0,013	0,00108	
Total	14	0,0159		

^{n.s.} não significativo a 5% de probabilidade.

Quadro 2: Quadro da análise da variância para a contração volumétrica total.

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamento	2	1,962	0,981	1,102 ^{n.s.}
Resíduo	12	10,678	0,889	
Total	14	12,640		

^{n.s.} não significativo a 5% de probabilidade.

Quadro 3: Quadro da análise da variância para a densidade aparente.

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamento	2	1,0734	0,5367	3,575*
Resíduo	12	7,504	0,30018	
Total	14	8,578		

*significativo ao nível de 5% de probabilidade.

Quadro 4: Quadro da análise da variância para o Módulo de Elasticidade dinâmico (MOEd).

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamento	2	9390488	4695244	4,3212*
Resíduo	12	13038714	1086559	
Total	14	22429202		

*significativo ao nível de 5% de probabilidade.