

**UFRRJ  
INSTITUTO DE FLORESTAS  
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS E  
FLORESTAIS**

**DISSERTAÇÃO**

**Avaliação da Qualidade da Madeira de *Tectona grandis* L. f. por meio de  
Análises Tomográfica, Microdensitométrica e Anatômica**

**Juliana Bernardo Amodei**

**2011**



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO  
INSTITUTO DE FLORESTAS  
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS E  
FLORESTAIS**

**AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA MADEIRA DE *Tectona grandis* L.f.  
POR MEIO DE ANÁLISES TOMOGRÁFICA,  
MICRODENSITOMÉTRICA E ANATÔMICA**

**JULIANA BERNARDO AMODEI**

*Sob a Orientação do Professor*  
**João Vicente de Figueiredo Latorraca**

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Ciências**, no Curso de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Florestais, Área de Concentração em Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais.

Seropédica, RJ  
Junho de 2011

582.16

A523a

T

Amodei, Juliana Bernardo, 1983-  
Avaliação da qualidade da madeira  
de *Tectona grandis* L.f. por meio de  
análises tomográfica,  
microdensitométrica e anatômica /  
Juliana Bernardo Amodei - 2011.  
50 f.: il.

Orientador: João Vicente de  
Figueiredo Latorraca.

Dissertação (mestrado) -  
Universidade Federal Rural do Rio  
de Janeiro, Curso de Pós-Graduação  
em Ciências Ambientais e  
Florestais.

Bibliografia: f. 41-48.

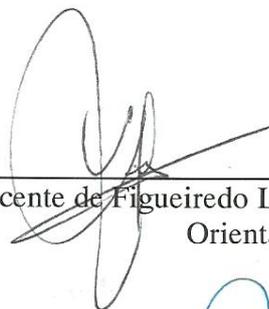
1. Madeira - Anatomia - Teses. 2.  
Madeira - Densidade - Teses. 3. Teca  
(árvore) - Análise - Teses. 4.  
Tomografia - Teses. I. Latorraca,  
João Vicente de Figueiredo, 1962-.  
II. Universidade Federal Rural do  
Rio de Janeiro. Curso de Pós-  
Graduação em Ciências Ambientais e  
Florestais. III. Título.

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO  
INSTITUTO DE FLORESTAS  
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS E  
FLORESTAIS**

**JULIANA BERNARDO AMODEI**

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Ciências**, no Curso de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Florestais, área de concentração em Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais.

DISSERTAÇÃO APROVADA EM: 21/06/2011.



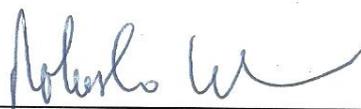
---

João Vicente de Figueiredo Latorraca. Prof. Dr. UFRRJ  
Orientador



---

Cláudio Henrique Soares Del Menezzi. Prof. Dr. UnB



---

Roberto Carlos Costa Lelis. Prof. Dr. UFRRJ

*Aos meus pais Aurelio (in memoriam) e  
Angela, à minha família e aos meus  
amigos.*

*Dedico.*

## AGRADECIMENTOS

À Deus, pela força e luz que me impulsionam a lutar pelas coisas importantes da vida;

Ao meu eterno paizinho Aurelio Amodei (*in memorian*), pelo exemplo de amor, carinho e atenção, e a minha querida mãezinha Angela Maria Bernardo Amodei, pela força, dedicação, amor e apoio em todos os momentos da minha vida;

À minha família, em especial a minha Vovó Iná (*in memorian*) pelo carinho e ao meu irmão pelo apoio e pelo presente, meu querido e amado sobrinho Dudu;

Ao lindinho Renato Ventura Scoralick Braga, pelo amor, carinho e apoio;

Ao prof. e orientador João Vicente de Figueiredo Latorraca, pela oportunidade e apoio nessa importante fase da minha vida, acreditando em meu trabalho;

Ao curso de Pós-Graduação, em especial ao prof. Roberto Carlos Lelis pela oportunidade e apoio durante essa jornada;

Ao querido prof. Carlos Passos (*in memorian*) pela colaboração e apoio na coleta do material para a pesquisa desenvolvida;

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Mato Grosso (Campus Cáceres), em especial, ao prof. Reginaldo e aos alunos que ajudaram na coleta de dados e por todo apoio fornecido;

Ao prof. Mario Tomazello e a todos do Laboratório de Anatomia da Madeira da ESALQ-USP, que de alguma forma ajudaram a tornar possível a realização dessa dissertação;

À minha grande amiga, Monique de Moura Gurgel, companheira de todas as horas, tanto para incentivar, apoiar, compreender, divertir, como para brigar e dar puxões de orelha;

Às amigas Gilmara Palermo, Bruna Ugulino, Juliana Grilo e Milene Teixeira, que foram muito mais que parceiras de laboratório, amigas de toda hora, incentivando e apoiando durante toda essa trajetória.

Aos amigos Thiago Ventura, Vanessa Kunz e Michele Reis, pela amizade desde o tempo da faculdade e por serem eternamente queridos;

À Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, ao Instituto de Florestas, ao Departamento Produtos Florestais e ao Laboratório de Anatomia e Qualidade da Madeira, pela oportunidade e apoio para meu desenvolvimento acadêmico;

À CAPES pela bolsa-auxílio concedida durante esse trabalho para que eu pudesse me dedicar exclusivamente ao desenvolvimento dessa pesquisa;

À todos que de alguma forma participaram direta ou indiretamente desse momento importante da minha vida.

*“O homem nunca sabe do que é capaz até que seja obrigado a tentar”.*

*(Charles Dickens)*

## RESUMO

AMODEI, Juliana Bernardo. **Avaliação da qualidade da madeira de *Tectona grandis* L. f. por meio de análise tomográfica, microdensitométrica e anatômica.** 2011. 50p. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais e Florestais). Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2011.

O objetivo geral deste estudo foi avaliar a qualidade da madeira de teca (*Tectona grandis*) proveniente de três diferentes densidades de plantio, em um povoamento localizado no Instituto Federal do Mato Grosso (IFMT) - Cáceres-MT, através de análise tomográfica, microdensitométrica e anatômica. Mais especificamente, teve como objetivo avaliar o potencial da tomografia de impulso para pré-estabelecer parâmetros de qualidade e usos da madeira. Além de determinar a variação radial da densidade da madeira e da espessura e comprimento das fibras e avaliar o efeito da densidade de plantio e da posição radial do lenho sobre as variáveis anatômicas (espessura e comprimento de fibras) e físicas (densidade da madeira e velocidade da propagação de ondas mecânicas). Para a pesquisa, foram selecionadas três árvores por densidade de plantio, sendo três árvores de cada espaçamento (6x2 m<sup>2</sup>; 5x2 m<sup>2</sup> e 4x2 m<sup>2</sup>), totalizando nove árvores provenientes de um povoamento de 11 anos de *T. grandis*, localizados no município de Cáceres. Foi realizado um exame de tomografia em cada árvore selecionada, para obtenção da velocidade de propagação da onda, a partir de uma imagem tomográfica gerada. Em seguida, as árvores foram abatidas e foi retirado um disco de cada árvore, na altura de 1,30 m do solo (altura do DAP), para a realização de análises densitométricas de raios X (densidade aparente) e anatômicas (comprimento e espessura da parede das fibras). Os resultados foram analisados pela estatística multivariada, através dos métodos de análise de agrupamento hierárquico e análise de componentes principais (ACP). Concluiu-se que a posição radial influenciou as características físicas e anatômicas analisadas; a densidade de plantio não apresentou influência nas características analisadas; o comprimento de fibras e a espessura da parede das fibras foram as características de maior importância na variação radial.

**Palavras-chave:** Tomografia de Impulso, Densidade da Madeira, Variação Radial, Densidade de Plantio.

## ABSTRACT

AMODEI, Juliana Bernardo. **Quality evaluation of wood *Tectona grandis* L. f. through tomographic, microdensitometer and anatomical analysis.** 2011. 50p. Dissertation (Master Environmental and Forest Science). Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2011.

The aim of this study was to evaluate the quality of teak (*Tectona grandis*) from three different planting densities in a stand located at the Instituto Federal do Mato Grosso (IFMT) - Cáceres-MT, through tomographic, microdensitometric and anatomical analysis. More specifically, it aimed to evaluate the potential of the impulse tomography to preset parameters of quality and uses of wood, also determining the radial variation of the wood density, thickness and length of the fibers and evaluating the effect of planting density and radial position on the wood anatomical (thickness and length of fiber) and physical (wood density and speed propagation of mechanical waves) variables. For the research, three trees were selected for each planting density, with three trees of each spacing (6x2 m<sup>2</sup>, 5x2 m<sup>2</sup> and 4x2 m<sup>2</sup>), totalizing nine trees from an 11 years stand of *T. grandis*, located in the city of Cáceres. It was made a tomography exam in each selected tree to obtain the wave propagation speed from the tomographic image generated. Then the trees were cut down and a disk was removed from each tree at the height of 1.30 m above the ground (height of DAP), to make X-ray densitometric (apparent density) and anatomical (length and thickness of the wall of the fibers) analysis. The results were analyzed by multivariate statistics, through the methods of hierarchical cluster analysis and principal component analysis (PCA). The conclusion was that the radial position influenced the physical and anatomical characteristics analyzed; the planting density had no effect on the characteristics analyzed; and length and thickness of the wall of the fibers were the most important features on the radial variation.

**Key words:** Impulse Tomograph, Wood Density, Radial Variation, Spacing.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	1
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	2
2.1 Espécie <i>Tectona grandis</i> L. f. ....	2
2.2 Qualidade da Madeira.....	4
2.3 Densidade da Madeira .....	4
2.4 Densidade de Plantio .....	6
2.5 Avaliação da Madeira através de Métodos Não-Destrutivos .....	7
2.5.1 Tomografia de impulso.....	8
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	12
3.1 Caracterização da Área de Estudo .....	12
3.2 Coleta do Material de Estudo .....	13
3.3 Análises Físicas .....	14
3.3.1 Velocidade de propagação de ondas através do Exame de Tomografia de Impulso.....	14
3.3.2 Densidade aparente através da densitometria de raios X .....	16
3.4 Análises Anatômicas .....	18
3.4.1 Comprimento e espessura da parede das fibras .....	18
3.5 Delineamento Experimental e Análises Estatísticas.....	19
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	21
4.1 Caracterização das Árvores de <i>Tectona grandis</i> L. f.....	21
4.2 Análises Físicas .....	21
4.2.1 Análise Tomográfica .....	21
4.2.2 Análise de Microdensitometria de raios X .....	27
4.3 Análises Anatômicas .....	31
4.3.1 Comprimento e Espessura da Parede das Fibras .....	31
4.4 Influência da Densidade de Plantio e da Posição Radial (sentido Medula-Câmbio) nos Caracteres Físicos e Anatômicos.....	34
4.4.1 Análise de Agrupamento .....	34
4.4.2 Análise de Componentes Principais .....	35
4.4.3 Análise Fatorial .....	38
<b>5 CONCLUSÃO</b> .....	40
<b>6 REFERÊNCIAS</b> .....	41
<b>ANEXOS</b> .....	49

## 1 INTRODUÇÃO

A teca (*Tectona grandis* L.f.) é uma espécie arbórea que apresenta alto valor comercial, tendo a madeira como principal produto. É muito utilizada na carpintaria, na marcenaria, na fabricação de móveis finos e de usos nobres e, principalmente, na construção naval, pois possui durabilidade natural, resistindo ao sol, ao calor e frio e à água das chuvas e do mar (RONDON NETO et al., 1998). Sua madeira possui excelentes qualidades tendo grande procura no mercado mundial, podendo alcançar preços de até três vezes superiores aos do mogno. A importância e a valorização da teca se devem às propriedades desejáveis da madeira, como durabilidade, estabilidade dimensional, facilidade de pré-tratamento, resistência natural ao ataque de fungos, insetos, pragas e brocas. Além dessas, o desenho e a cor são aspectos qualitativos importantes que tornam a teca a madeira de folhosa mais valorizada no mundo (VIEIRA et al., 2002).

A qualidade da madeira é o resultado de uma combinação de práticas de manejo florestal e de características genéticas, físicas, anatômicas e químicas da madeira. Dentre os parâmetros empregados na avaliação da qualidade da madeira, a densidade tem merecido atenção especial, devido a sua alta relação com algumas importantes características tecnológicas da madeira. (PEREIRA, 1982).

O avanço tecnológico nos últimos tempos tem permitido a utilização de metodologias não destrutivas na caracterização de madeiras. Os ensaios não destrutivos são aqueles realizados em materiais para verificar a existência, ou não, de descontinuidades ou defeitos, por meio de princípios físicos definidos, sem alterar suas características físicas, químicas, mecânicas e dimensionais, e sem interferir em seu uso posterior (ABENDE, 2006). Além disso, é possível a obtenção dos resultados com maior rapidez.

Nesse contexto, a tomografia de impulso vem se destacando por ser uma técnica não destrutiva que permite a avaliação do interior do lenho de árvores pela passagem de ondas mecânicas, sendo possível analisar a presença de defeitos (fungos, ataques de insetos, rachaduras, nós) que alteram principalmente as propriedades mecânicas da madeira.

O presente estudo objetivou avaliar a qualidade da madeira de *Tectona grandis* L.f. proveniente de três diferentes densidades de plantio através de análise tomográfica, microdensitométrica e anatômica. Mais especificamente, teve como objetivo avaliar o potencial da tomografia de impulso para pré-estabelecer parâmetros de qualidade e usos da madeira. Além disso, determinar a variação radial da densidade da madeira, da velocidade de propagação de ondas, do comprimento e espessura da parede das fibras, e avaliar o efeito da densidade de plantio e da posição radial do lenho sobre as variáveis anatômicas (espessura e comprimento de fibras) e físicas (densidade da madeira e velocidade da propagação de ondas mecânicas).

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

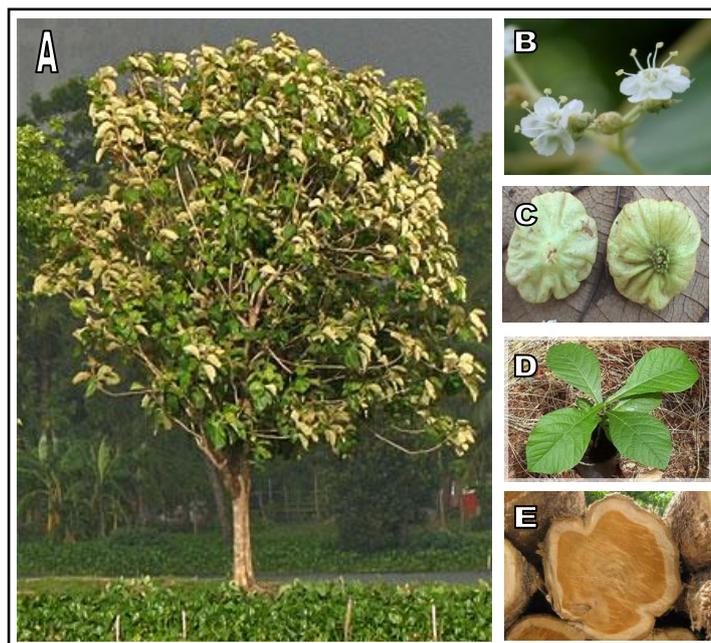
### 2.1 Espécie *Tectona grandis* L. f.

A *Tectona grandis*, conhecida popularmente como teca, é uma espécie arbórea pertencente à família Verbenaceae, nativa das florestas tropicais situadas entre 10° e 25°N no subcontinente índico e no sudeste asiático, principalmente na Índia, Tailândia, Laos e Indonésia (LAMPRECHT, 1990). Devido à sua dispersão geográfica e à variedade de ambientes de ocorrência natural, possui alta adaptabilidade em locais com dispersão vertical entre 0 e 1300 m acima do nível do mar, ocorrendo em áreas com precipitação anual de 1257 a 2540 mm e zonas de temperatura mínima que varia de 1,9°C (Tailândia) a 47,8°C (Índia), porém tem melhor desenvolvimento na temperatura média anual de 26°. A espécie demanda solos profundos, bem drenados e com razoável fertilidade, tolerando aqueles com textura variando de barro-arenosa a franco-argilosa (KIEHL, 1979).

A teca foi introduzida em muitos países da África e das Américas. No Brasil, os plantios tiveram início no final da década de sessenta, implantados pela empresa Cáceres Florestal S.A., na região do município de Cáceres – Mato Grosso, onde se desenvolveu bem devido às condições climáticas que são semelhantes às dos países de origem da espécie. Além das condições climáticas favoráveis, o solo de melhor fertilidade e os tratamentos silviculturais mais adequados e intensos contribuíram para reduzir o ciclo de produção de 80 anos, na região de origem da teca, para apenas 25 anos, na região de Cáceres-MT. Atualmente a área plantada neste Estado é estimada em mais de 50 mil hectares (CALDEIRA & OLIVEIRA, 2008). Mundialmente, a área plantada com teca excede os 3 milhões de hectares, incluindo, além dos países asiáticos, outros países tropicais como Honduras, Camarões e Brasil (LORENZI et al., 2003).

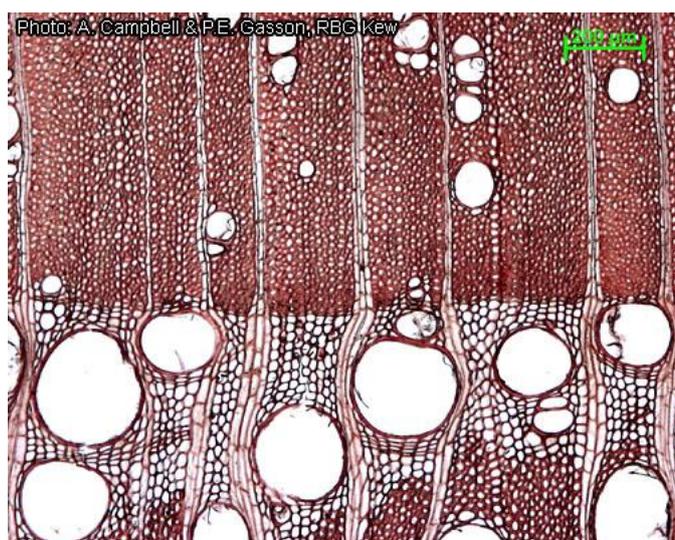
Trata-se de uma espécie tipicamente pioneira, com copa arredondada de folhagem densa. Possui folhas opostas, elípticas, coriáceas e ásperas, dotadas de pecíolos curtos ou ausentes. Os indivíduos adultos possuem folhas, em média, com comprimento de 30 a 40 cm por 25 cm de largura. Nos indivíduos mais jovens, com até 3 anos de idade, as folhas podem atingir o dobro dessas dimensões. Por ser uma espécie caducifólia, a teca perde as folhas durante a estação seca. Possui flores brancas e pequenas com pecíolos curtos, dispostas em grandes e eretas inflorescências do tipo panícula. Seus frutos são do tipo drupas subglobosas de mais ou menos 1,2 cm de diâmetro envolvido por uma densa cobertura marrom (MATRICARDI, 1989; WAGENFUHR, 1996; KHEDKAR, 1999). Conforme Higuchi (1979), a madeira de teca apresenta alburno amarelado, geralmente delgado, contrastando com o cerne que é castanho-amarelado (Figura 1). O lenho é moderadamente duro e oleoso ao tato (MATRICARDI, 1989).

A teca ocupa rapidamente clareiras abertas na floresta e sendo uma planta heliófita (exige plena exposição à luz solar) não tolera qualquer tipo de sombreamento. Quando adulta, a árvore atinge entre 25 a 35m (raramente acima de 45m) de altura e diâmetro (DAP) de 100 cm ou mais. Seu tronco é reto e revestido por uma casca mole e espessa (LAMPRECHT, 1990; WAGENFUHR, 1996; KHEDKAR, 1999).



**Figura 1.** Árvore de *Tectona grandis* L. f. (A), flores (B), frutos (C), folhas (D) seção transversal do tronco (E). (Fonte: adaptado J.M.Garg)

Anatomicamente, apresenta anéis de crescimento visíveis a olho nu e demarcado pelas faixas do parênquima inicial que se associam aos anéis porosos (CARDOSO, 1991). Apresenta poros grandes e numerosos no lenho inicial das camadas de crescimento e pequenos e escassos no lenho final (FREITAS, 1958) (Figura 2). Os poros são, geralmente, isolados, mas às vezes aparecem agrupados, apresentando tilos e inclusões. O parênquima é razoavelmente abundante e distinto, sendo marginal com aspecto inicial.



**Figura 2.** Seção Transversal do lenho da árvore de *Tectona grandis* L. f. (Fonte: CAMPBELL & GASSON, 2010).

A importância econômica da teca é bastante destacada por diversos autores, bem como suas qualidades físico-mecânicas e das suas possibilidades de uso da madeira. A densidade da madeira da teca, a 12% de umidade, é de  $0,6259 \text{ g/cm}^3$ , possui textura grosseira e grã reta (IBDF, 1984). A madeira apresenta estabilidade dimensional permitindo assim resistir à variação de umidade no ambiente. No processo de secagem, a madeira de teca, praticamente, não empena e se contrai muito pouco.

A durabilidade natural da madeira de teca se deve à presença de um extrativo chamado tectoquinona, encontrado nas células do cerne de sua madeira. Entretanto, quando a madeira for utilizada exposta ao tempo, é necessário o seu tratamento. Tanto o alburno quanto o cerne contêm uma substância semelhante ao látex, denominado caucho, que reduz a absorção de água e lubrifica as superfícies. Essa substância também confere resistência a ácidos e protege pregos e parafusos da corrosão (LAMPRECHT, 1990; LORENZI et al., 2003).

## **2.2 Qualidade da Madeira**

A madeira é um elemento orgânico heterogêneo, composto basicamente de celulose, polioses, lignina e extrativos, possui uma diversidade de usos para obtenção de uma série de produtos. Apresenta características, tais como anisotropia (propriedades distintas nos seus três eixos ortotrópicos) e higroscopicidade (capacidade de perder ou adquirir umidade dependendo das condições ambientais).

Se por um lado, a variabilidade entre e dentro da árvore favorece a madeira ser um material que pode ser utilizado para diversos tipos de produtos, por outro, possui um grande inconveniente na sua utilização como matéria-prima para produtos específicos, necessitando de um conhecimento prévio de suas propriedades e variações. Seu uso depende da qualidade que pode ser determinada em função dos requisitos exigidos pelo produto final.

Vários autores referem-se às propriedades anatômicas, químicas, físicas e morfológicas, como sendo as principais variáveis de qualidade da madeira (LARSON, 1969; BARRICHELO, 1979; ZOBEL; VAN BUIJTENEN, 1989; MOURA, 2000) e às propriedades mecânicas, quando se considera a madeira para fins estruturais (MATOS, 1997).

Contudo, a qualidade da madeira é o resultado de uma combinação de práticas de manejo florestal e de características genéticas, físicas, anatômicas e químicas da madeira. Dentre os parâmetros empregados na avaliação da qualidade da madeira, a densidade tem merecido atenção especial, devido a sua alta relação com algumas importantes características tecnológicas da madeira. (PEREIRA, 1982).

## **2.3 Densidade da Madeira**

A densidade da madeira reflete a quantidade de matéria lenhosa por unidade de volume, ou do volume de espaços vazios existentes em uma madeira.

A densidade real ou densidade da parede celular é obtida sem a inclusão do volume dos poros e é igual a  $1,53 \text{ g/cm}^3$ , praticamente constante para todas as espécies. Porém, a madeira é porosa e quando o volume de poros é incluído na determinação da densidade, esta é expressa principalmente de duas formas: densidade básica, sendo a relação entre massa seca (seca em estufa a  $103^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ ) e o seu volume saturado, e densidade aparente, que relaciona a massa e o volume da madeira a uma determinada umidade (sendo esta padronizada internacionalmente em 12%, pois é o valor médio de equilíbrio da umidade da madeira com o ar) (VITAL, 2004; REZENDE; ESCOBEDO; FERRAZ, 1988).

A escolha do tipo de densidade a ser utilizada é realizada de acordo com a finalidade da informação. Geralmente, a densidade básica é utilizada em inventários florestais para determinação da massa seca da floresta. Já a densidade aparente a 12% de umidade é utilizada

em ensaios de caracterização físico-mecânica da madeira, sendo possível o conhecimento do seu comportamento em condições ambientais (VITAL, 1984; REZENDE; ESCOBEDO; FERRAZ, 1988; ABNT, 1997).

A variação da densidade é dada essencialmente em função das características anatômicas, como espessura da parede celular, dimensões e tipos de células e, em menor proporção, da quantidade de componentes extraíveis presentes por unidade de volume (PANSHIN e DE ZEEUW, 1980; HAYGREEN e BOWYER, 1982).

A densidade é uma das propriedades da madeira que mais fornece informações sobre as características da madeira, por estar diretamente relacionada com sua resistência mecânica (DINWOODIE & DESCH, 1996; apud CALDEIRA, 2004), variação dimensional, pela perda ou absorção de água.

A densidade é um importante fator na determinação das propriedades físicas e mecânicas, às quais caracterizam diferentes espécies lenhosas, diferentes árvores de uma dada espécie e até mesmo, diferentes regiões de uma mesma árvore, em função de sua variabilidade (FOELKEL et al., 1971).

Além disso, é um importante indicador de qualidade da madeira, pois proporciona uma quantificação muito precisa do teor de material lenhoso existente numa peça de madeira (PANSHIN E DEZEEUW, 1980).

Segundo Klock (2000), a utilização intensiva da madeira como matéria prima para fins industriais ou construtivos só pode ocorrer a partir do conhecimento adequado de suas propriedades. Por ser um elemento orgânico heterogêneo, composto basicamente de celulose, polioses (hemiceluloses), lignina e extrativos, apresenta uma versatilidade enorme de usos para obtenção de uma série de produtos. O aprimoramento no emprego de novas tecnologias para transformação e uso racional da madeira na geração de novos produtos, requer o conhecimento adequado de suas características e comportamento como matéria-prima.

Busnardo et al. (1987) afirmam que a densidade é uma característica bastante complexa, resultante da combinação de caracteres, anatômicos, físicos e químicos. Dadswell (1957) afirma que, em madeira obtida de plantações ou de povoamentos naturais de angiospermas ou de gimnospermas, a densidade aumenta no sentido medula-casca, atingindo um valor constante após certo número de anos.

Segundo vários autores, a densidade é uma das principais características para se qualificar a madeira. De acordo com Stewart & Polak (1975, apud Oliveira, 1991), uma maior a densidade corresponde quase sempre a maior retratibilidade e maior resistência mecânica. Assim, há um alto grau de correlação entre a densidade e as propriedades mecânicas da madeira, bem como em relação ao seu poder calorífico.

Melo et al. (2006), estudando a variação radial da densidade básica da *Tectona grandis* L.f. e mais seis madeiras do semi-árido, concluíram que todas as madeiras apresentaram variação da densidade básica no sentido radial e os menores valores de densidade foram apresentados pela espécie teca com variação radial de 0,59 – 0,66 g/cm<sup>3</sup>.

Vários estudos relacionados com a qualidade da madeira de teca em árvores de diferentes idades indicaram que o lenho juvenil, ao contrário de outras espécies de zonas temperadas, não é inferior ao lenho adulto em termos de densidade e resistência mecânica (KOKUTSE et al., 2004).

De acordo com Carrasco & Azevedo Júnior (2003), não é propriamente o aumento da densidade que acarreta o aumento na velocidade de propagação das ondas ultrassônicas em madeiras. Ao contrário, o aumento da densidade deveria provocar a diminuição da velocidade de propagação, visto que a velocidade é inversamente proporcional à raiz quadrada da densidade. Entretanto, considerando-se um valor de umidade constante ao longo da amostra, o aumento da densidade decorre da maior deposição de celulose na face interna da parede celular. Esta deposição acarreta aumento mais significativo nos valores de rigidez do que nos

valores da densidade da madeira. Dessa forma, mesmo que haja aumento da densidade, a velocidade não diminui, pois é compensada pelo aumento da rigidez. Portanto, as maiores velocidades ultrassônicas são geralmente alcançadas em espécies de madeira com maior densidade.

Pereira et al. (2007), demonstraram que houve correlação ao compararem os dados de velocidades de ondas produzidos pelo tomógrafo de impulso com dados de densidade aparente obtidos pela densitometria de raios X.

Dentre os possíveis métodos para determinação de densidade da madeira, destaca-se o da densitometria de raios X, o qual possibilita determinar a distribuição da densidade ao longo das micro-variações da estrutura anatômica da madeira (ROQUE, 2005). Segundo Tomazello Filho (2006), o uso da análise por densitometria de raios X proporciona um perfil detalhado da densidade na direção radial da madeira, a partir da retirada de pequenas amostras de madeira, nas quais os limites dos anéis de crescimento podem ser visualizados.

## 2.4 Densidade de Plantio

Segundo Passos (2006), a quantidade de árvores por área e a distribuição delas na área podem modificar as condições ambientais dos povoamentos florestais e a participação dos fatores de produção, tais como luz, água, nutrientes e mão-de-obra, afetando a produtividade, as características da madeira e os custos de produção. Segundo Zobel & Van Buijtenen (1989), a distância entre plantas e os desbastes aplicados afetam diretamente a qualidade da madeira.

Segundo Scolforo (1997 *apud* Chies, 2005), quando o povoamento é muito denso, o espaço para o crescimento de cada árvore é reduzido, o crescimento e o desenvolvimento da planta são retardados, comprometendo o desenvolvimento das raízes e da copa, conseqüentemente, afetando a quantidade e qualidade da madeira. No entanto, espaçamentos muito amplos também podem afetar a qualidade da madeira, pois há maior emissão de galhos, aumentando assim a presença de nós, o que diminui a qualidade da madeira.

Segundo Gomes (2002), a escolha do espaçamento adequado proporciona a cada indivíduo o espaço suficiente para se obter o crescimento máximo com a melhor qualidade e menor custo.

Roque & Ledezma (2003), estudando o efeito do espaçamento (3 x 3 m<sup>2</sup> e 6 x 2 m<sup>2</sup>) sobre a densidade básica em populações de *T. grandis*, de 10 anos de idade, verificaram que esta aumentou no espaçamento 6 x 2 m<sup>2</sup>.

Segundo Simões (1989), 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. O espaçamento deve considerar a qualidade do sítio florestal, a destinação da madeira e o nível tecnológico do empreendedor.

Vários autores (BELL, 1973; BAUER, 1982; CATIE, 1986; FAO, 1977 e HERNANDEZ, 1989, citados por CHAVES & FONSECA, 1991) consideram que o espaçamento utilizado para a teca depende, principalmente, do tipo de produto que se espera obter (madeira serrada, lenha ou carvão).

A teca é uma espécie heliófila que apresenta um aumento na mortalidade de plantas jovens quando a densidade de plantio é muito alta. Apesar de ser plantada há trinta anos em Mato Grosso, ainda não foram publicados estudos que contribuam para a definição de espaçamentos para as condições ambientais do Estado.

Em Mato Grosso, na região de Cáceres, esta espécie é cultivada com muito sucesso em espaçamento inicial de 3,0 x 3,0 m<sup>2</sup> ou 3,0 x 2,0 m<sup>2</sup>, obtendo-se árvores de grandes dimensões num ciclo de 25 a 30 anos, com obtenção de madeira para serraria de ótima qualidade (MACEDO et al., 2005).

Macedo et al. (2005) estudando árvores de teca da cidade de Paracatu-MG observaram que as árvores plantadas no espaçamento 3 x 2 m<sup>2</sup>, com 36 meses, produziram maior volume do tronco por área em relação aos demais espaçamentos utilizados. Entretanto, não é aconselhável o uso de tais resultados para outras áreas com diferentes variáveis ambientais, como solo e clima (BALLONI, 1983).

São poucos os estudos com objetivo de avaliar os efeitos do espaçamento sobre a qualidade da madeira de teca. Dentre eles, podemos citar o de Rosso & Ninin (1998), na Venezuela, onde encontraram que o espaçamento influencia no tamanho dos galhos e a perda da verticalidade do fuste, o qual pode determinar a presença e magnitude dos efeitos como excentricidade da medula, achatamento e as tortuosidades das toras. E o de Pérez & Kanninen (2002), na Costa Rica, que não encontraram diferença significativa na densidade da madeira para diferentes densidades da plantação de árvores de teca crescendo na Costa Rica.

## 2.5 Avaliação da Madeira através de Métodos Não Destrutivos

Com os avanços tecnológicos, métodos alternativos de avaliação da qualidade da madeira tem sido estudado, sem que se tenha a real necessidade de destruir uma peça ou mesmo derrubar uma árvore. Os ensaios não destrutivos têm tomado espaços significativos nos meios de divulgação científica de maneira que o uso dessas técnicas tem crescido rapidamente. Porém, ainda é uma técnica recente e em desenvolvimento e, portanto, são encontrados poucos estudos, embora a técnica já tem comprovada eficiência prática e científica.

A avaliação não destrutiva tem sido usada na área florestal para uma série de finalidades, desde a matéria prima bruta até a classificação de produtos finais dentro das indústrias, além de outras aplicações como avaliação “in loco” de partes de madeira ou estruturas montadas, postes e, até mesmo, árvores ornamentais.

Os métodos não destrutivos são técnicas de identificação das propriedades de um determinado material sem alterar sua capacidade de uso final (ROSS, et al., 1998). Qualquer técnica não destrutiva utiliza alguma fonte de energia que se propaga ao longo de um material e infere características importantes sobre a amostra analisada. A fonte de energia pode ser estática ou dinâmica ou ainda pode ser gerada por ondas eletromagnéticas ou elásticas (SCHAD et al., 1996). Ele se baseia na identificação física e mecânica das propriedades de dado material sem alterá-lo (ROSS et al., 1998).

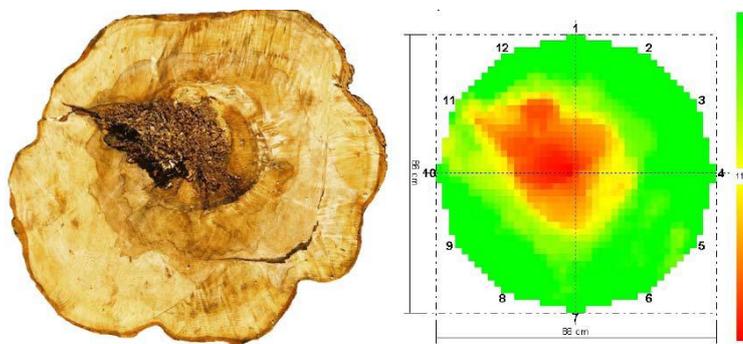
Há um grande interesse por parte dos pesquisadores no desenvolvimento de método adequado de avaliação das propriedades de árvores em pé. Considerável economia, tanto em matéria prima, quanto em processo, pode ser obtida se as propriedades da madeira fossem determinadas em árvores em pé, através de métodos não destrutivos, podendo-se prever e antecipar a qualidade do produto final. Entretanto, sabe-se que uma árvore apresenta uma estrutura bastante complexa e com grandes variações no formato, tamanho e propriedades. Além disso, a presença da casca, galhos e raízes criam muitas dificuldades geométricas e heterogeneidades para a utilização dos métodos não destrutivos. Segundo Wang et al. (2001), as árvores em pé tendem a apresentar variáveis externas e condições adversas que podem interferir com maior intensidade na avaliação das propriedades da madeira através da aplicação de ondas de tensão, quando comparadas com produtos acabados. Entretanto, os autores salientam que é possível adaptar o método para uma avaliação mais eficiente e eficaz.

Segundo Wang et al. (2001), em sua pesquisa com árvores de “Western hemlock” (*Tsuga heterophylla*) e “Sitka spruce” (*Picea sitchensis*), foi observada alta correlação entre a velocidade de propagação das ondas de tensão e módulo de elasticidade, determinados na árvore em pé, com aqueles obtidos em amostras retiradas das mesmas árvores após o abate, indicando que a avaliação das propriedades na árvore em pé é eficiente e confiável.

As vantagens dos métodos não destrutivos sobre os métodos tradicionais são significativas, destacando-se a possibilidade de utilização posterior da peça testada; a rapidez de aplicação do método; a confiabilidade dos valores obtidos; redução das perdas de material; classificação de peças em classes de qualidade e resistência; detecção de defeitos internos antes do beneficiamento, além das vantagens financeiras proporcionadas pelo conjunto de vantagens citadas.

### 2.5.1 Tomografia de impulso

A tomografia possibilita a reconstrução de seções transversais inteiras da árvore, por meio de informações fornecidas pela passagem de energia através da madeira (Figura 3). Até a invenção da tomografia, não havia aparelhos que permitissem conhecer seções transversais inteiras de árvores com rapidez e praticidade, demonstrando a evolução tecnológica para a avaliação da qualidade do interior das árvores. Além disso, sua utilização deixa pouquíssimos sinais.



**Figura 3.** Imagem da tomografia de impulso distinguindo porções de qualidades diferenciadas da madeira (Fonte: RINNTECH, 2005).

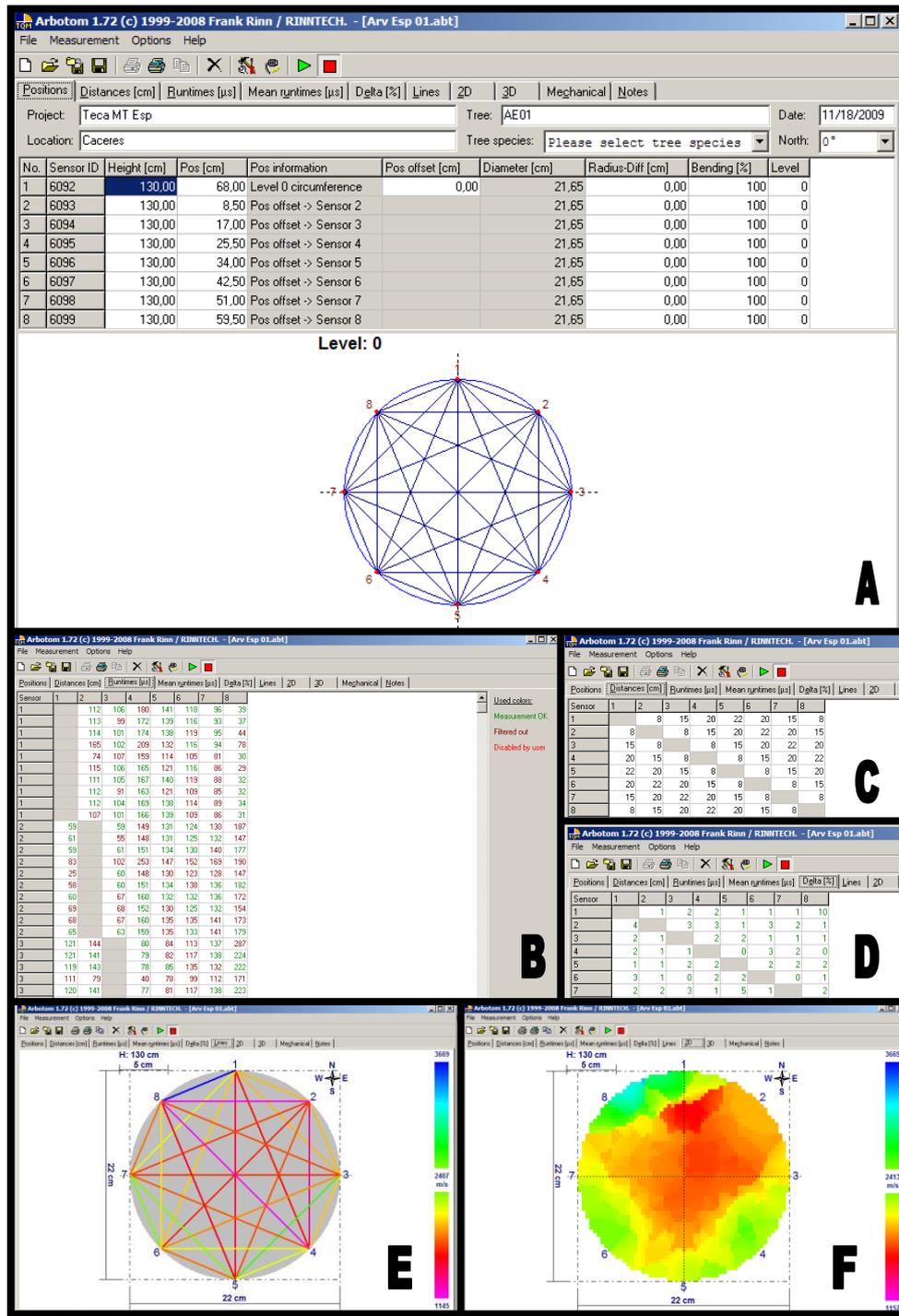
Assim, a tomografia é um tipo de ensaio não destrutivo, possibilitando visualizar o interior de um corpo sem a necessidade de abri-lo. Diferentes tipos de energia podem ser utilizados em tomografia para fornecer informações sobre a madeira, como por impulsos, ondas de ultrassom, campo elétrico e ondas eletromagnéticas, raios  $\gamma$  e  $x$  (NICOLOTTI et al., 2003).

A tomografia de impulso, por sua vez, baseia-se no princípio da cronometragem de ondas mecânicas para reconstrução de seções das árvores (RINNTECH, 2005) e assim avaliar o estado do interior de árvores vivas.

O tomógrafo de impulso é composto por sensores de impulsos que são fixados em seções transversais da árvore. Os sensores são conectados em linha, podendo ser usados em qualquer quantidade, sendo que árvores de menor diâmetro exigem menos sensores, assim como, para árvores de maior dimensão necessita-se de um maior número de sensores. Entretanto, vale lembrar que a quantidade de sensores afetará a precisão da análise, uma vez que, um maior número de sensores aumentará a resolução e precisão dos resultados. Tais sensores recebem determinado número de pancadas, utilizando martelo especial, que produzem ondas mecânicas que percorrem a madeira, cujos tempos de percurso entre os sensores são medidos, e suas velocidades calculadas pelo software do equipamento.

Posteriormente às marteladas, os dados são gerados automaticamente e exibidos sob forma de matrizes, gráficos de linha e de superfície. Todos os dados básicos são gravados no

software tais como: posição dos sensores, distância entre sensores, tempo de percurso das ondas (runtimes), velocidades e porcentagens de erros (Figura 4).



**Figura 4.** Software ARBOTOM. - (A) Informações fornecidas pelo usuário do Aparelho, como distância entre sensores, medida da circunferência da árvore, informações da espécie, indivíduo e sua localização; (B) Matriz de Runtimes; (C) Distância entre sensores; (D) Matriz de Velocidades; (E) Gráfico de linhas; (F) Gráfico de Superfície.

O software ARBOTOM, fornece uma Matriz de Runtimes, a qual fornece valores do tempo, em microssegundo, do percurso que o impulso viaja entre os sensores. E quando um impulso não chega até um outro sensor, que pode ser ocasionado por espaços vazios dentro do tronco, o valor de runtime tende a valores muito altos. E então, são excluídos por estarem fora dos padrões pré-definidos no programa. Além disso, é também gerada uma Matriz de velocidade, com as velocidades calculadas entre os sensores, em metros por segundo, através da equação (1). Sendo essas informações chaves geradas pelo tomógrafo de impulso para avaliação do estado da madeira.

$$V = D/T, \quad \text{equação (1).}$$

Onde:

V = Velocidade da onda mecânica (m/s);

D = Distância entre os sensores (cm);

T = Tempo utilizado para a onda percorrer determinada distância ( $\mu$ s).

A Matriz de delta (%) é outra informação gerada pelo ARBOTOM e esta exibe a porcentagem de erro da medida realizada, ou seja, ela informa o quanto um dado é confiável. Logo, quando o valor do delta está entre 0 e 10% significa dizer que o dado é confiável e quando o delta está acima de 10%, o dado não é confiável. Então, quando houver valores acima de 10%, é interessante que se repita o procedimento para este sensor. Geralmente, são necessárias de 3 a 5 batidas para gerar resultados confiáveis, para isso é importante utilizar forças firmes e constantes durante a batida nos sensores, para que não possam ocorrer elevadas variações nos dados.

Além dessas informações, o software gera dois gráficos, um de linha e um de superfície. O Gráfico de Linha exibe a velocidade entre os pares de sensores através de linhas coloridas, porém não é possível espacializar o defeito na madeira. O Gráfico de Superfície é gerado a partir do gráfico de linha, usando algoritmo matemático. Permite localizar o defeito da madeira e todas as cores do gráfico são encontradas na palheta de cores, que exibem as velocidades inicial, média e final a que se referem.

Segundo Rinntech (2005), as imagens tomográficas permitem fazer levantamentos de informações sobre porcentagem de cerne e alburno, madeira de reação, presença de nós, defeitos internos, de podridão do lenho.

Várias pesquisas têm sido realizadas para avaliar a eficiência dos tomógrafos de impulso na localização e estimativa do tamanho de defeitos e lesões na madeira de árvores em pé (GILBERT; SMILEY, 2004; DEFLORIO; FINK, SCHMARZE, 2008; WANG & ALLISON, 2008), bem como a confiabilidade das informações fornecidas pela cronometragem das ondas (PEREIRA, 2007).

Os primeiros trabalhos a respeito de passagem de ondas mecânicas pelo interior do lenho para a avaliação de árvores datam da primeira metade dos anos oitenta (BUCUR 1983, 1985), quando ondas de ultrassom foram aplicadas a indivíduos arbóreos para estudos a respeito da constante elástica no incremento do lenho e comparações com densitometria de raios X.

Segundo Pereira (2009), a velocidade de propagação das ondas mecânicas é determinada pelas propriedades físico-mecânicas da madeira, principalmente pelo módulo de elasticidade, pela densidade e umidade. A velocidade do impulso está altamente correlacionada com os valores de densidade e conseqüentemente, se relacionam com a anatomia e grau de biodeterioração do lenho. Além disso, o lenho possui diferentes tipos de madeira que estão relacionadas com os estágios de formação do lenho, como a madeira juvenil e adulta. No entanto, as diferenças particulares entre as espécies precisam ser levadas

em consideração quando são avaliados os resultados obtidos pelo tomógrafo de impulso (RINNTECH, 2005).

Gilbert & Smiley (2004) testaram a capacidade e precisão na detecção de apodrecimento de tronco de duas espécies por meio da utilização de um tomógrafo de impulso e foi possível identificar espacialmente e quantitativamente as lesões observadas visualmente.

Wang & Allison (2008) avaliaram a precisão da tomografia de impulso ao compará-la com a avaliação e leituras lineares de medição de estresse (stress-wave timer) em dois indivíduos centenários de *Quercus rubra* e detectaram que o método identificou a localização e magnitude aproximada dos tecidos lesionados nos indivíduos avaliados.

Segundo Rollo (2009), as informações obtidas por meio da avaliação visual aliadas às informações tomográficas, permitem a identificação precisa de problemas fitossanitários e biomecânicos, possibilitando uma avaliação a respeito da qualidade e risco de queda dos indivíduos constituintes da floresta urbana.

Uliana (2010), avaliando os padrões de resposta e eficácia do método da tomografia de impulso na identificação de lesões e ocos no lenho de árvores de espécies madeireiras da região amazônica, encontrou correlação da imagem tomográfica com a qualidade do fuste após o corte, porém em árvores com diâmetro maior que 90 cm o método se mostrou ineficiente.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Caracterização da Área de Estudo

Foram selecionadas árvores de um povoamento de *Tectona grandis* L.f. com 11 anos de idade, plantado em diferentes densidades de plantio. O povoamento localiza-se no campus do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso (IFMT), no município de Cáceres, MT (Figura 5). As coordenadas geográficas são 16°11'42" W e 57°40'51" S e a altitude de 117 metros.

A vegetação original da área é de Savana Florestada (cerradão) em clima de Savanas tropicais com verão úmido e inverno seco (Aw, Köppen), ou seja, clima tropical chuvoso, em que a temperatura média anual varia entre 23° C e 25° C, com índice pluviométrico anual relativamente elevado, porém com uma nítida estação seca (W), apresentando oscilação anual de temperatura, inferior a 5°C. O relevo é plano e o solo classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico.



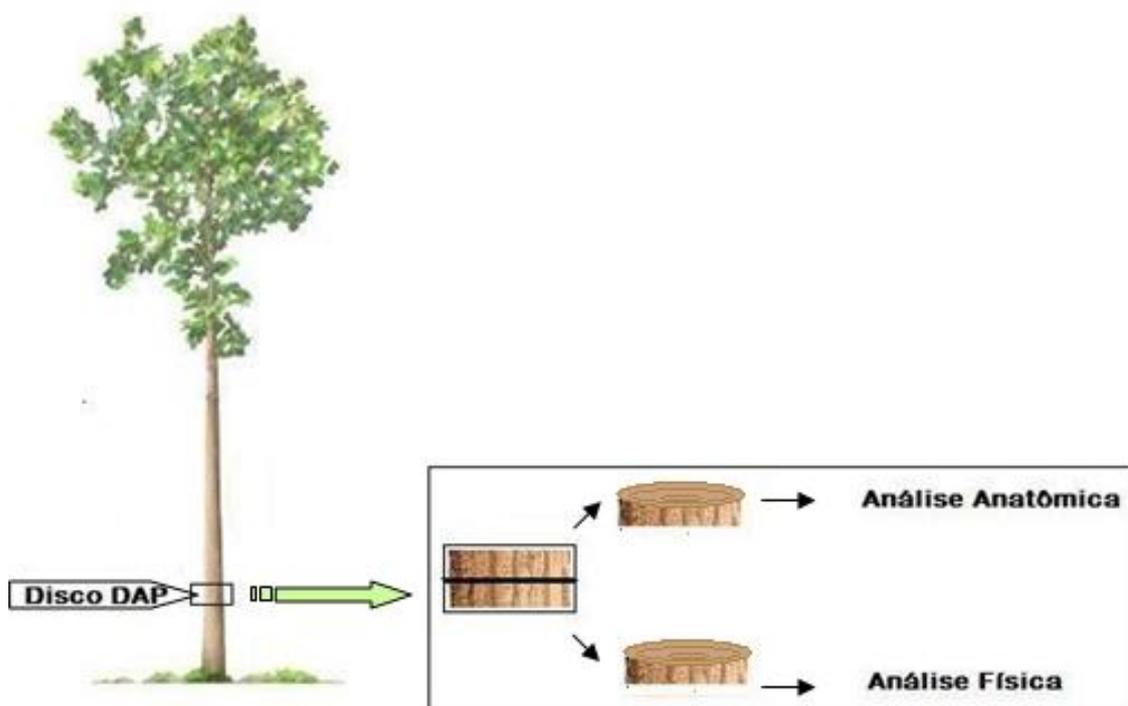
**Figura 5.** Vista geral da área do estudo

As mudas de *Tectona grandis* L.f foram do tipo toco (“stump”), com 20 cm de altura, provenientes de viveiro comercial localizado em Cuiabá, MT. O plantio foi realizado no mês de dezembro de 1998, manualmente em covas de 20 x 20 x 20 cm, fertilizadas com 190 g de superfosfato simples e 10 g de micronutrientes FTE BR-15 (Frieded Trace Elements). Aplicaram-se em cobertura no segundo e nono mês, 95 g por planta da fórmula 20-05-20 (N-P-K), acrescidos de 5 g por planta de FTE BR-15.

### 3.2 Coleta do Material de Estudo

Foram selecionadas aleatoriamente 3 árvores por densidade de plantio para serem abatidas em três diferentes espaçamentos (totalizando 9 árvores). Os espaçamentos escolhidos foram 6,0 x 2,0 m (menor densidade); 5,0 x 2,0 m (média densidade) e 4,0 x 2,0 m (maior densidade).

Antes do abate das árvores uma avaliação tomográfica da seção transversal do tronco foi realizada. Em seguida, foi retirado de cada árvore selecionada um disco na altura de 1,30 m do solo (altura do DAP). Após retirada dos discos, estes foram devidamente identificados e transportados para a Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ) No laboratório de processamento e usinagem da madeira, do Departamento de Produtos Florestais, os discos foram divididos em duas metades (Figura 6), para análise anatômica (comprimento e espessura da parede das fibras) e física da madeira (densidade).



**Figura 6.** Esquema da retirada do disco do lenho das árvores de teca para análises.

### 3.3 Análises Físicas

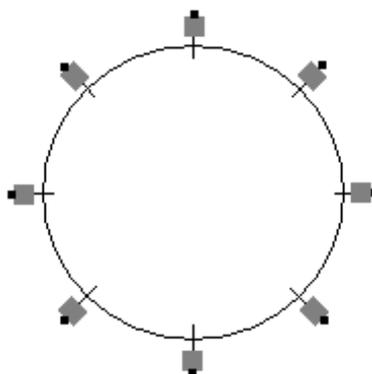
#### 3.3.1 Velocidade de propagação de ondas através do exame de tomografia de impulso

Para a realização do exame de tomografia da seção transversal do tronco das árvores, foi utilizado o tomógrafo de impulso ARBOTOM (Figura 7).



**Figura 7.** Utilização do Tomógrafo de impulso ARBOTOM para obtenção das imagens tomográficas.

Inicialmente, foi mensurada a circunferência na altura do DAP (a 1,30 m do solo) e dividiu-se pelo número de sensores ( $n=8$ ) para que estes fossem fixados equidistantemente na seção transversal da árvore analisada (Figura 8).



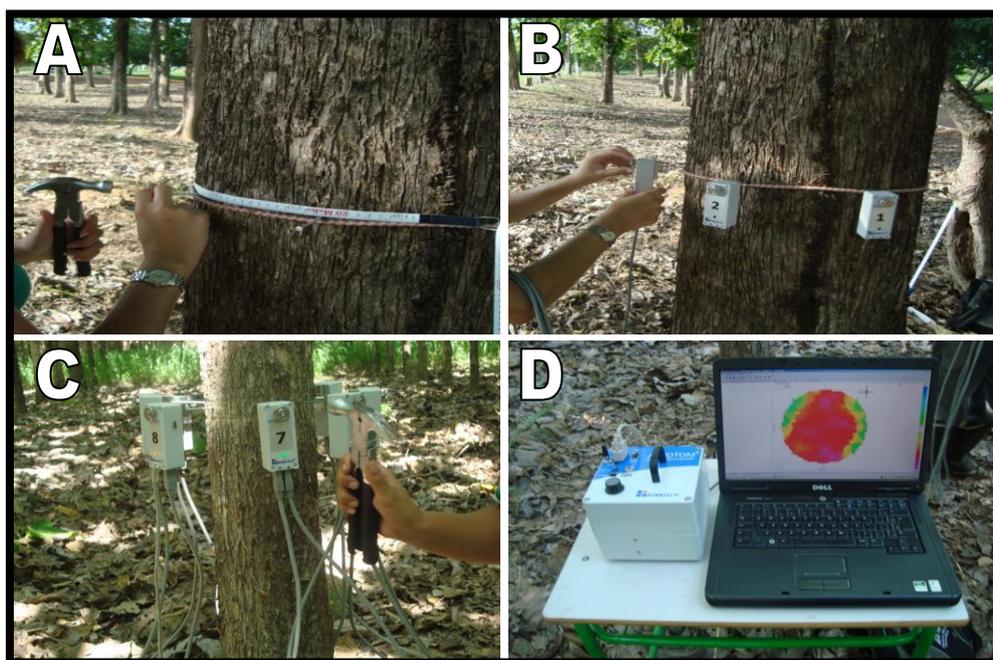
**Figura 8.** Esquema do posicionamento equidistante e em linha dos sensores na seção transversal do lenho das árvores de teca.

Depois de determinadas as distâncias, foram fixados os condutores metálicos na árvore para sustentação dos oito sensores de impulsos frontais (Figura 9). Em cada sensor foi

produzido ondas de impacto através de pancadas de martelo. Essas ondas mecânicas percorreram o lenho até alcançar os demais sensores e assim, gerar os tempos de propagação da onda utilizados no cálculo da velocidade de onda.

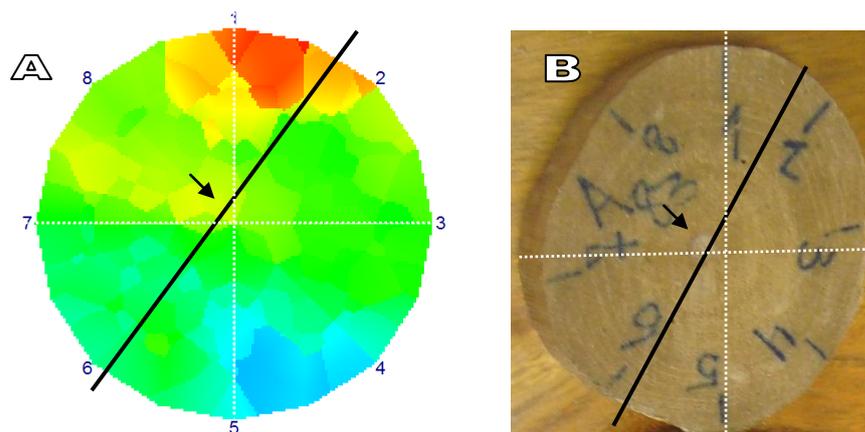
As velocidades das ondas entre os sensores foram calculadas automaticamente pelo software ARBOTOM. Em seguida, foi produzido um gráfico de velocidade de onda da seção transversal (imagem tomográfica) de cada árvore.

Para a identificação das zonas da madeira com características distintas, analisaram-se as variações da coloração nas imagens, geradas pelas diferentes velocidades de propagação de onda dentro do lenho.



**Figura 9.** Instalação do tomógrafo de impulso e obtenção das imagens tomográficas. A – Fixação dos condutores metálicos equidistantes; B – Distribuição dos sensores de impulsos; C- Aplicação das pancadas de martelo para produção de ondas mecânicas; D – Imagem tomográfica.

Para construção do gráfico do perfil radial da velocidade de propagação das ondas, selecionou-se uma faixa diametral, passando pela medula e que apresentou uma maior representatividade de cores da imagem tomográfica (Figura 10). As imagens utilizadas foram configuradas com o modelo de cor “rainbow” e com resolução 2D igual a 1mm. Dessa faixa, percorreu-se uma linha de pixels. As cores dos pixels na linha percorrida foram reconhecidas com o auxílio do software Adobe Photoshop na escala RGB, sendo associado um valor de velocidade de onda a cada cor (PEREIRA, 2007).



**Figura 10.** Demarcação da amostra diametral para análise densitométrica com destaque para região da medula. A – Imagem tomográfica; B – Disco do lenho da árvore de *T. grandis*.

A imagem tomográfica é composta pelas variações de níveis de cinza em cada uma das bandas RGB (vermelho, verde, azul, respectivamente), formando assim as cores da imagem. Essas cores são correspondentes aos valores velocidade de propagação da onda mecânica, onde por meio da identificação de tais valores foi construída uma planilha de cores e velocidades para cada uma das imagens, possibilitando a identificação da velocidade de propagação em cada elemento da matriz e a construção de um gráfico de velocidade para cada faixa avaliada.

Adotou-se 155 classes de velocidade de propagação de onda mecânica por meio da equação 2, que possibilitou definir o intervalo de velocidade de cada uma das classes e valores de níveis de cinza de cada uma das bandas enquadradas em cada classe (ROLLO, F., 2009; ROLLO, L., 2009).

$$\frac{V - v}{155}, \quad \text{equação (2).}$$

Onde:

V = Velocidade máxima de propagação da onda;

v = Velocidade mínima de propagação da onda.

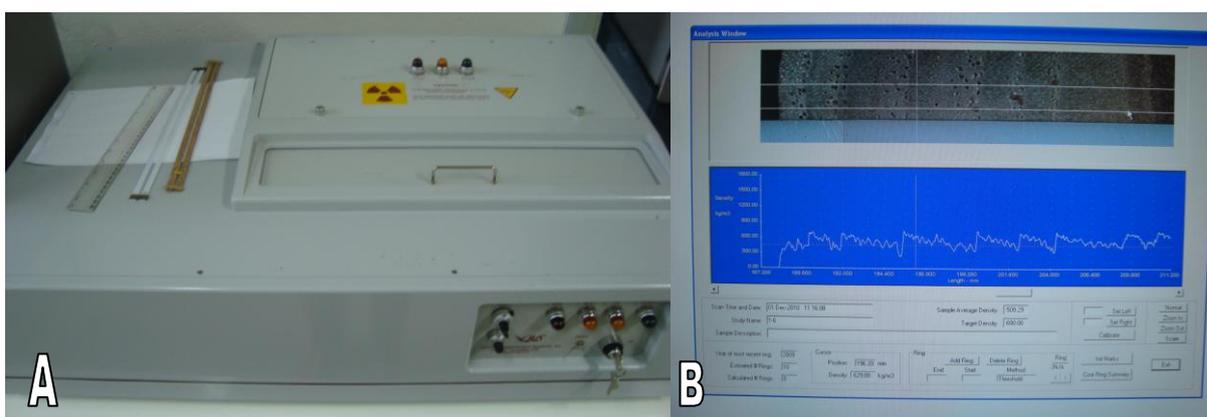
### 3.3.2 Densidade aparente através da densitometria de raios X

Para a obtenção do perfil radial da densidade foi utilizada a técnica de densitometria de raios X. Para tanto, foi seccionada a amostra diametral, previamente selecionada de cada disco. Estas foram fixadas em suportes de madeira e seccionadas sentido transversal (2,0 mm de espessura) com auxílio de um equipamento de dupla serra circular paralela (Figura 11). As seções transversais do lenho foram acondicionadas em câmara de climatização (12 h, 20° C, 50% UR) até atingirem 12% de umidade.



**Figura 11.** Preparo do material para densitometria de raios X. A – Colagem da amostra no suporte de madeira; B – Equipamento dupla serra circular paralela; C – Detalhe do corte para retirada da amostra com 2 mm de espessura; D – material para climatização.

A densitometria de raios X foi realizada utilizando o equipamento QTRS-01X Tree-Ring Analyzer (Figura 12), onde as amostras foram dispostas em suportes e inseridas no compartimento de leitura e analisadas diretamente no sentido radial, através de fonte colimada de feixes de raios X. A leitura da densidade foi feita a cada 0,4 mm e a obtenção dos perfis radiais de densidade dos lenhos foi possível através da aplicação do software QMS.

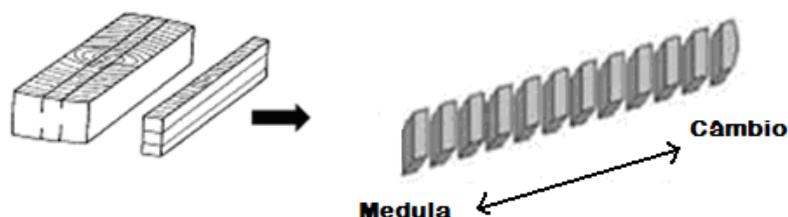


**Figura 12.** Equipamento utilizado na densitometria de raios X. A - equipamento QTRS-01X Tree-Ring Analyzer; B – Software QMS para obtenção dos perfis radiais de densidade.

### 3.4 Análises Anatômicas

#### 3.4.1 Comprimento e espessura da parede das fibras

Para análise anatômica, foi determinada a variação radial do comprimento das fibras e espessura da parede das mesmas. Cada disco coletado passou por uma serra de fita para obtenção de três baguetas com 3 cm de largura, partindo da medula até atingir o câmbio. Em cada uma das baguetas foram feitos cortes tangenciais sistemáticos a cada 1 cm desde a medula até o câmbio, obtendo-se sub-amostras com dimensões 1,0 x 1,0 x 3,0 cm (Figura 13).



**Figura 13.** Esquema do seccionamento das amostras para análises anatômicas.

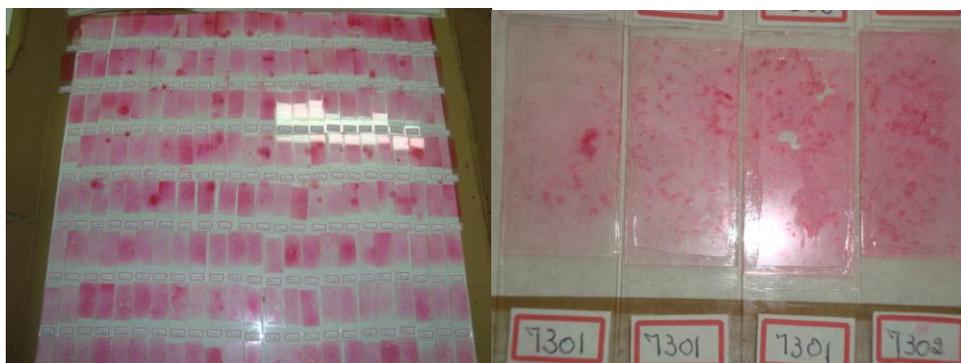
Para mensuração do comprimento e espessura da parede das fibras, as amostras passaram por um processo de dissociação, obtendo amostras com dimensões semelhantes a um palito de fósforo. Tais amostras foram colocadas dentro de frascos devidamente identificados (posição dentro da amostra diametral) contendo uma mistura de ácido acético glacial e peróxido de hidrogênio (130 Vol.), numa proporção (1:1) (Figura 14).



**Figura 14.** Frascos contendo amostras para análises anatômicas.

Os frascos foram lacrados para evitar evaporação da solução, devido à pressão formada no interior dos mesmos. Depois foram levados à estufa a 60° C, por 24 horas, para completa dissociação dos elementos celulares. Em seguida, o material deslignificado foi lavado em água corrente até a completa retirada da solução. Para facilitar a visualização das fibras ao microscópio, foi adicionada uma solução de safranina 1% (1g de safranina/100 ml de água destilada), para promover a coloração dos elementos celulares.

Foram confeccionadas cinco lâminas provisórias por posição e por árvore (Figura 15). Em cada lâmina foram selecionadas, aleatoriamente, cinco fibras inteiras, totalizando vinte e cinco fibras por posição.



**Figura 15.** Lâminas temporárias para mensuração as fibras.

Para mensuração do comprimento total, diâmetro total e diâmetro do lume das fibras, capturou-se imagens digitais através do software "Analysis Get It" e com o auxílio do software "Cell" foi realizada a medição. As espessuras da parede (EP) das fibras foram obtidas de acordo com a equação (3).

$$EP = \frac{\text{diâmetro total} - \text{diâmetro do lume}}{2} \quad \text{Equação (3).}$$

### 3.5 Delineamento Experimental e Análises Estatísticas

Nesse estudo, para avaliar a influência da densidade de plantio e da posição na seção radial (região próxima a Medula, região Intermediária compreendida entre a medula e o câmbio e região próxima ao Câmbio, doravante citado por M, I e C, respectivamente) nas variáveis em estudo, foi utilizado o delineamento experimental conforme Tabela 1.

**Tabela 1.** Delineamento experimental do estudo.

Tratamento	Densidade de Plantio	Posição Radial	Repetição
1	4,0 m x 2,0 m	M	
2	4,0 m x 2,0 m	I	3
3	4,0 m x 2,0 m	C	
4	5,0 m x 2,0 m	M	
5	5,0 m x 2,0 m	I	3
6	5,0 m x 2,0 m	C	
7	6,0 m x 2,0 m	M	
8	6,0 m x 2,0 m	I	3
9	6,0 m x 2,0 m	C	

M = Região próxima a Medula; I = Região Intermediária compreendida entre a medula e o câmbio; C = Região próxima ao câmbio.

A análise dos dados foi realizada através do *software* STATISTICA 7.0, utilizando análises multivariadas e univariadas. Como as variáveis analisadas apresentaram escalas

diferentes de mensurações, estas não poderiam ser diretamente comparadas, sendo necessária a padronização dos dados, de modo que as variáveis transformadas passaram a ter média zero e variância unitária, possibilitando a execução da análise estatística multivariada.

A análise estatística multivariada foi feita através a Análise de Agrupamento Hierárquico e Análise de Componentes Principais. A Análise de Agrupamento Hierárquico e a Análise de Componentes Principais (ACP) foram utilizados com a finalidade de se verificar como as amostras estão relacionadas segundo as variáveis (velocidade de propagação de ondas, densidade aparente, comprimento de fibras e espessura da parede de fibras) utilizadas no trabalho. A Análise de Agrupamento ou *Cluster* constitui uma metodologia numérica multivariada, com o objetivo de propor uma estrutura classificatória, ou de reconhecimento da existência de grupos, objetivando, mais especificamente, dividir o conjunto de observações em um número de grupos homogêneos, segundo algum critério de homogeneidade (REGAZZI, 2001). Foi então utilizada para o estudo a aglomeração hierárquica que se caracteriza pelo estabelecimento de uma hierarquia, ou estrutura em forma de árvore (MALHOTRA, 2001). A formação dos agrupamentos começa pela fusão sucessiva dos dados que produzirem a menor variância do sistema e que se combinam por suas semelhanças, repetindo o procedimento até esgotar as possibilidades de combinação ou até agrupar todos os dados, terminando em um grande grupo (PALERMO, 2010). Para interpretação dos resultados, foi utilizado o Dendrograma, também chamado de gráfico de árvore, que representa uma síntese gráfica de formação dos agrupamentos. No dendrograma vertical, a leitura é feita da direita para esquerda, no qual as linhas verticais (eixo y) indicam as distâncias entre os grupos formados, e a posição da reta na escala (eixo x), representa os grupos unidos por ordem decrescente de semelhança (VICINI, 2005). Como o objetivo da análise de agrupamento é reunir objetos semelhantes, foi utilizada a distância euclidiana como medida de similaridade entre os objetos.

A Análise de Componentes Principais (ACP) é o cálculo de autovalores e correspondentes autovetores de uma matriz de variâncias-covariâncias ou de uma matriz de coeficientes de correlação entre variáveis. A ACP consiste numa transformação linear de "m" variáveis originais em "m" novas variáveis, de tal modo que a primeira nova variável computada seja responsável pela maior variação possível existente no conjunto de dados, a segunda pela maior variação possível restante e assim por diante até que toda a variação do conjunto tenha sido explicada. O resultado é um sistema reduzido de coordenadas, proporcionando informações sobre as semelhanças das amostras (VALENTIN, 2000).

Como se sabe, a análise multivariada é uma técnica exploratória e, devido a isso, foi realizada também a análise estatística univariada para verificar a confirmação, através da Análise de Variância Fatorial. Sendo caracterizada a influência da densidade de plantio ou posição radial, aplicou-se o teste de Tukey, a 95% de confiabilidade.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Caracterização Dendrométrica das Árvores de *Tectona grandis* L. f.

Na Tabela 2, encontram-se as características dendrométricas das árvores de *Tectona grandis* selecionadas para o estudo.

**Tabela 2.** Características dendrométricas das árvores de *Tectona grandis*

Espaçamento (m)	Árvore	Diâmetro (cm)	Altura (m)
4x2	14	13,81	13
	24	13,85	14
	34	15,15	15
5x2	15	17,19	15
	25	16,39	15
	35	14,8	13
6x2	16	21,65	13
	26	21,33	12
	36	21,96	15

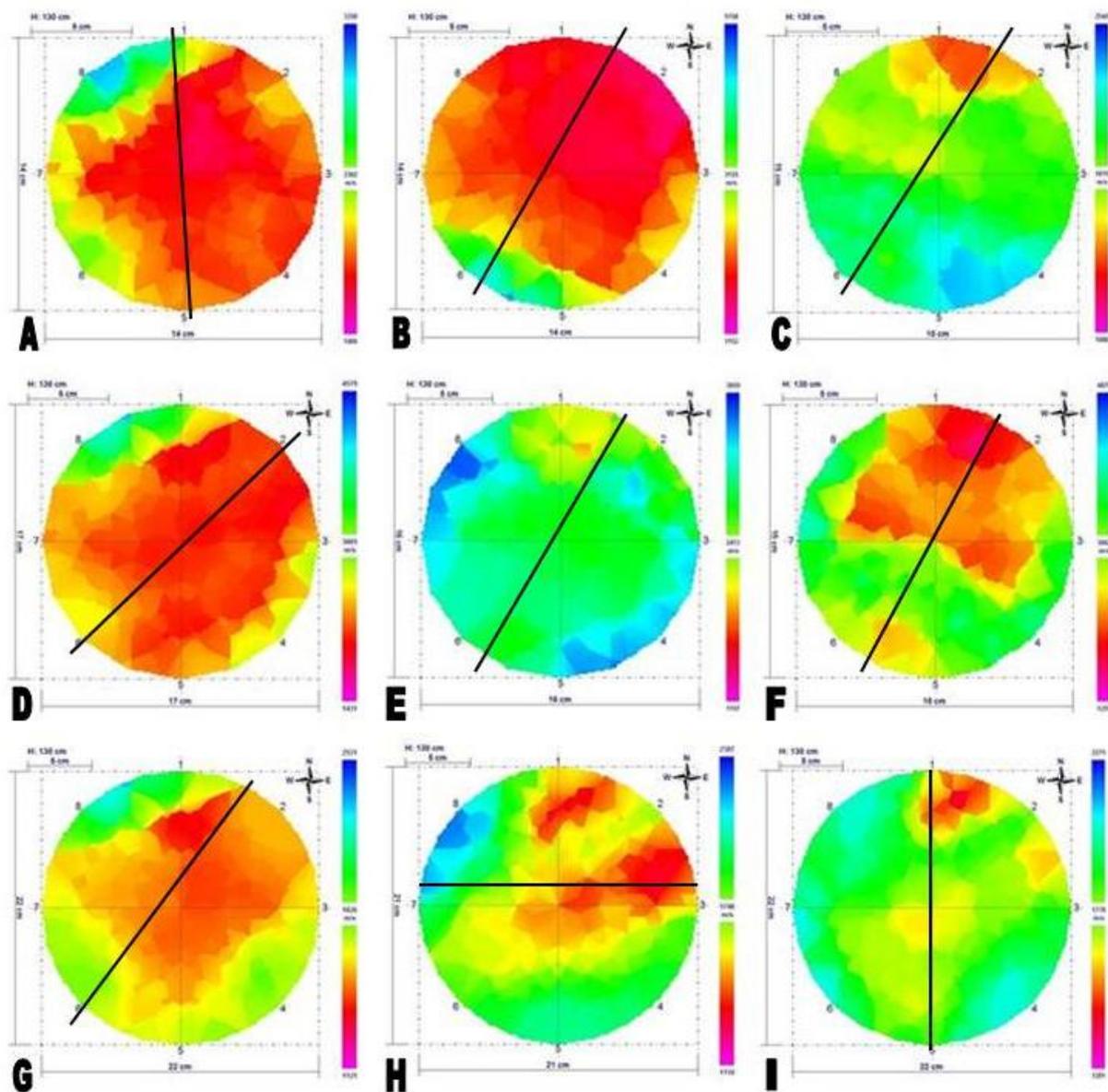
As árvores de *T. grandis* provenientes do povoamento com espaçamento menos adensado, apresentaram um diâmetro médio de 21,65 cm e 13,3 m de altura média; já no espaçamento mais adensado, observou-se um diâmetro médio de 14,27 cm e altura média de 14 m e na densidade média de plantio obteve-se um diâmetro médio de 16,13 cm e altura média de 14,3 m.

Foi observado que todas as amostras apresentaram medula com aspecto bastante poroso, o que infere uma área de baixa densidade. Além disso, as medulas se apresentaram de forma excêntrica nos discos do lenho das árvores de teca.

### 4.2 Análises Físicas

#### 4.2.1 Análise tomográfica

A técnica de tomografia de impulso utilizada no lenho das árvores de *Tectona grandis* L.f. gerou as imagens tomográficas apresentadas na Figura 16, onde também se encontram demarcados os perfis radiais utilizados na densitometria de raios X.



**Figura 16.** Imagens tomográficas das seções transversais do lenho das árvores de *Tectona grandis* L. f. com a demarcação dos perfis radiais utilizados para o estudo. A, B, C – espaçamento 4x2; D, E, F – espaçamento 5x2; G, H, I – espaçamento 6x2. Entende-se por A, B, C, D, E, F, G, H e I, árvores 14, 24, 34, 15, 25, 35, 16, 26 e 36, respectivamente.

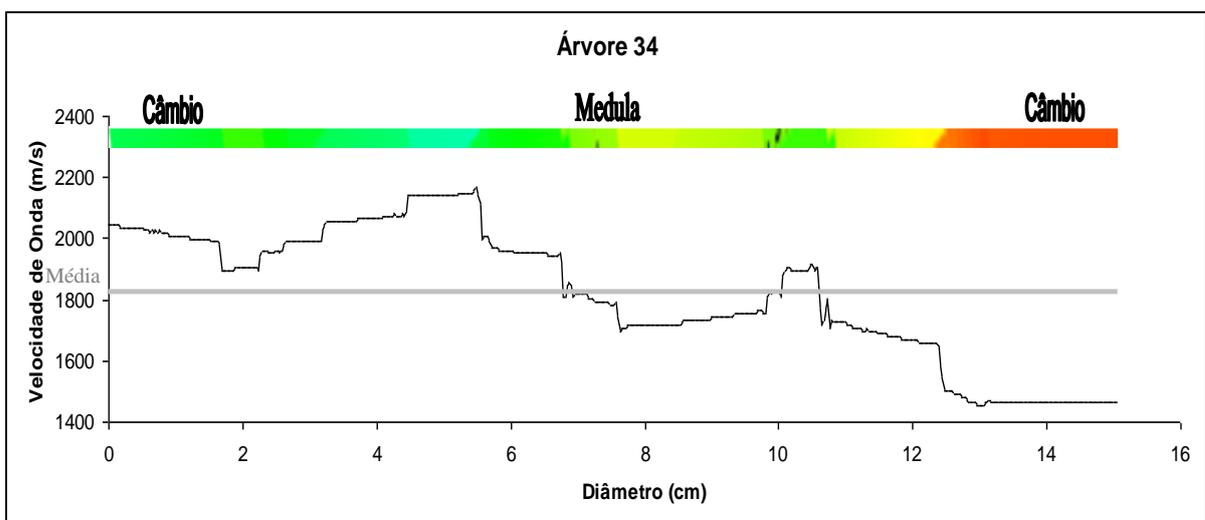
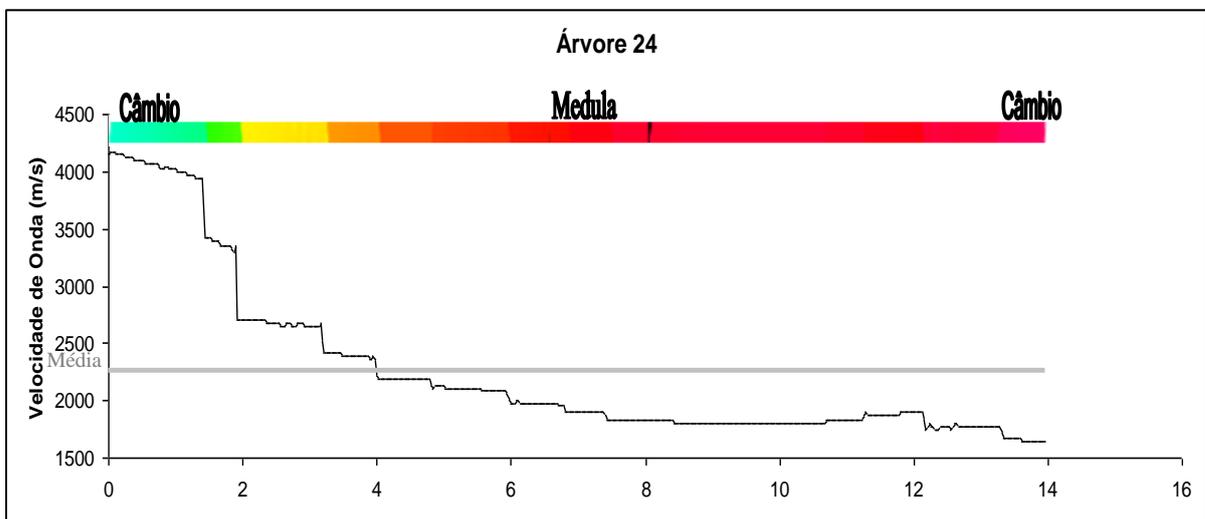
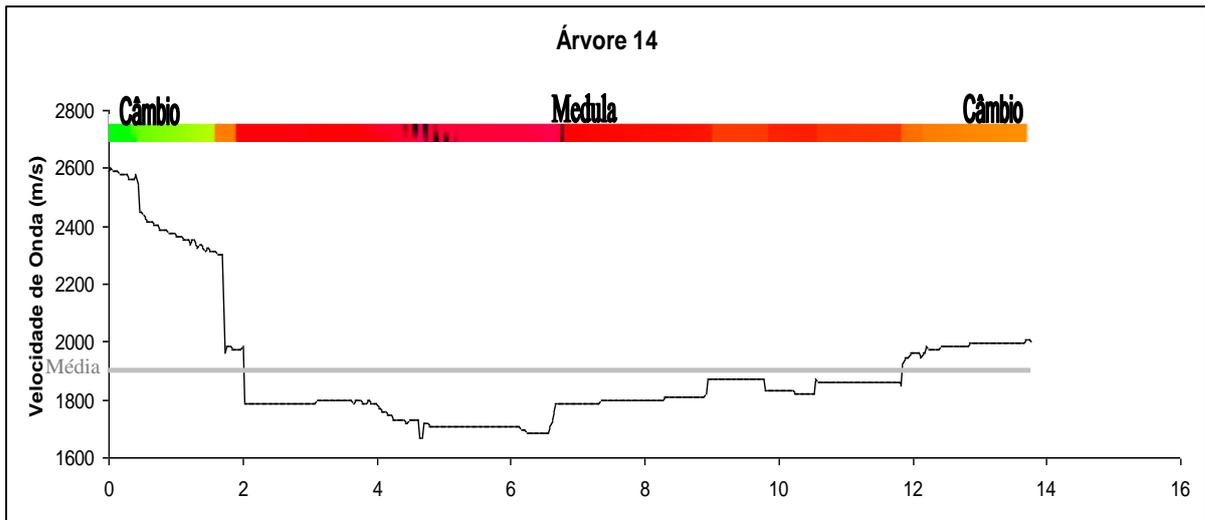
Observando as imagens tomográficas, foi possível perceber a variação da coloração promovida pela variação da velocidade de propagação da onda mecânica gerada no lenho das árvores de *T. grandis*. De acordo com Matos (1997), a propagação das ondas no sentido transversal às fibras encontra o diâmetro do lume como barreira e as mesmas desviam, acarretando em um aumento acentuado no tempo do percurso, reduzindo significativamente a velocidade das ondas.

De acordo com a escala, observa-se que as porções com coloração azul, apresentaram maiores valores de velocidade de onda e as porções com coloração rosa menores valores de velocidade de onda. Além disso, também foi possível identificar que cada imagem possui um padrão específico na variação das cores da escala relacionadas às velocidades, o que dificulta a comparação entre as imagens.

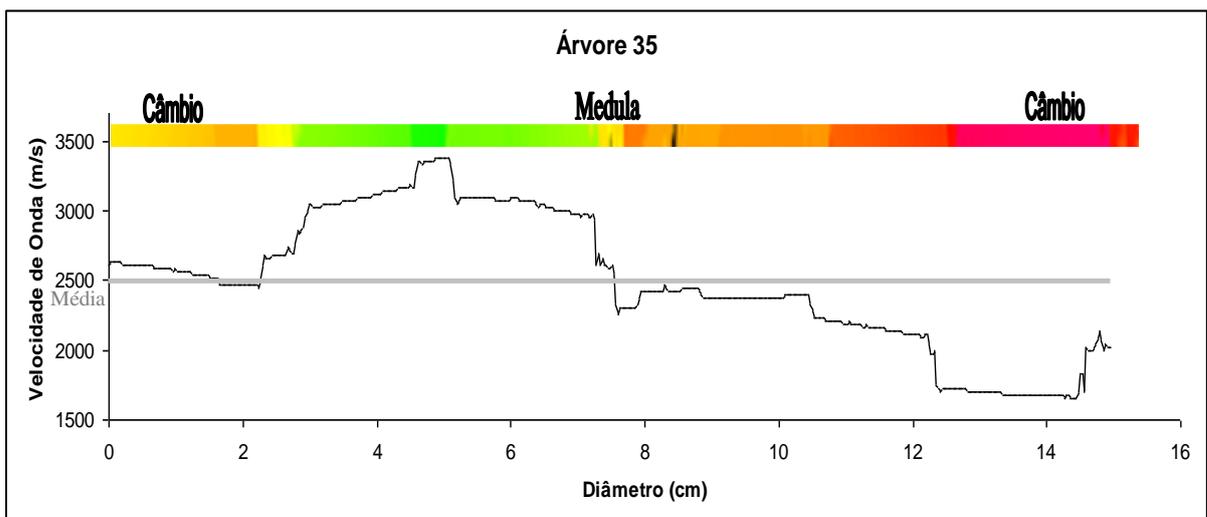
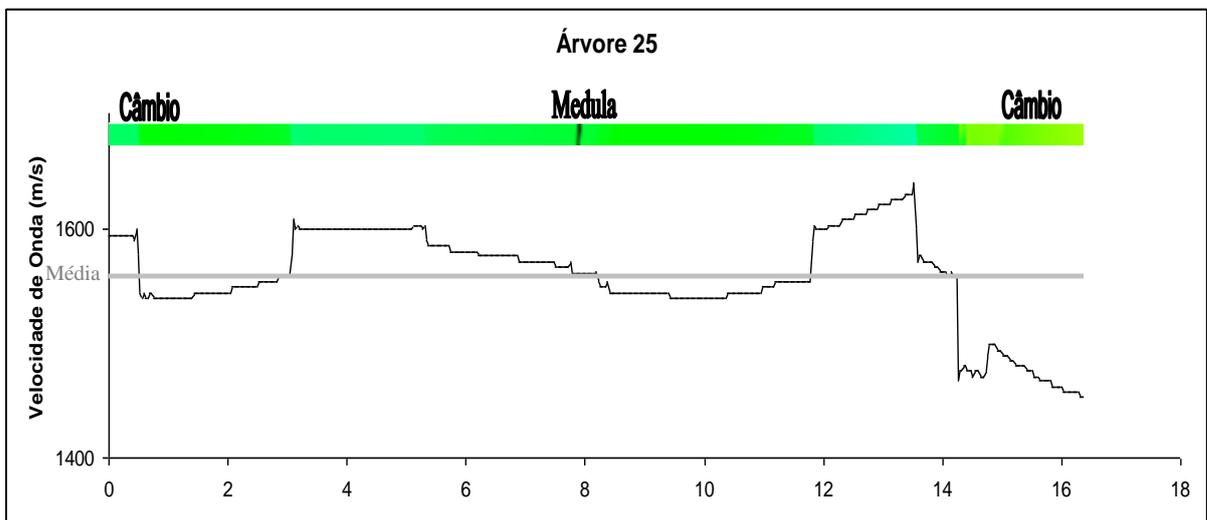
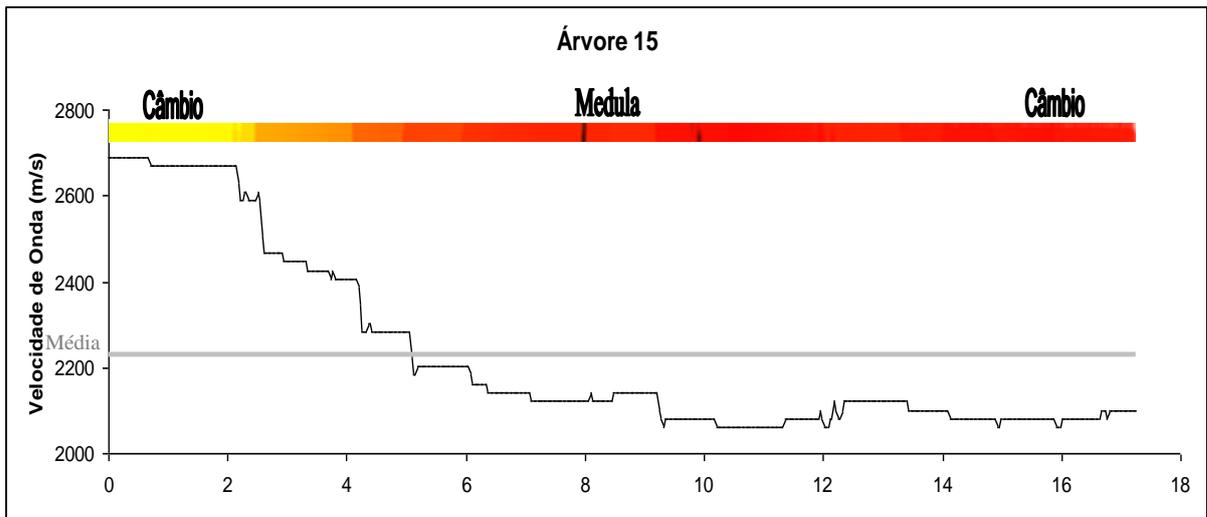
A grande variação das velocidades de ondas encontradas para as árvores em estudo de mesma idade e provenientes de mesmo povoamento pode ser atribuída às variações anatômicas e físicas encontradas entre as árvores e até mesmo dentro da mesma árvore. Existem diferentes tipos de madeira no tronco das árvores, relacionadas com os estágios de formação do lenho, denominadas madeira juvenil (menos denso), transição e adulto (mais denso). As diferenças particulares entre as espécies precisam ser levadas em conta (RINNTECH, 2005). Além disso, pode também ser atribuído a influências externas (vento, chuva, ruídos elevados) e influências inerentes ao equipamento, como qualidade da pancada (diferentes intensidades de batidas nos sensores) e fixação dos conectores metálicos.

Na Figura 16, a maioria das imagens (A, B, D, E, G) apresentou porções próximas ao centro com baixos valores de velocidade de onda (coloração vermelha-rosa), o que se pode inferir que a região próxima à medula é constituída de lenho juvenil, caracterizado por apresentar propriedades físico-mecânicas diferenciadas, como baixa densidade e consequentemente baixa velocidade de propagação de ondas mecânicas. É possível perceber esse decréscimo de velocidade no perfil radial tomográfico do lenho das árvores de teca apresentado nas Figuras 17,18 e 19.

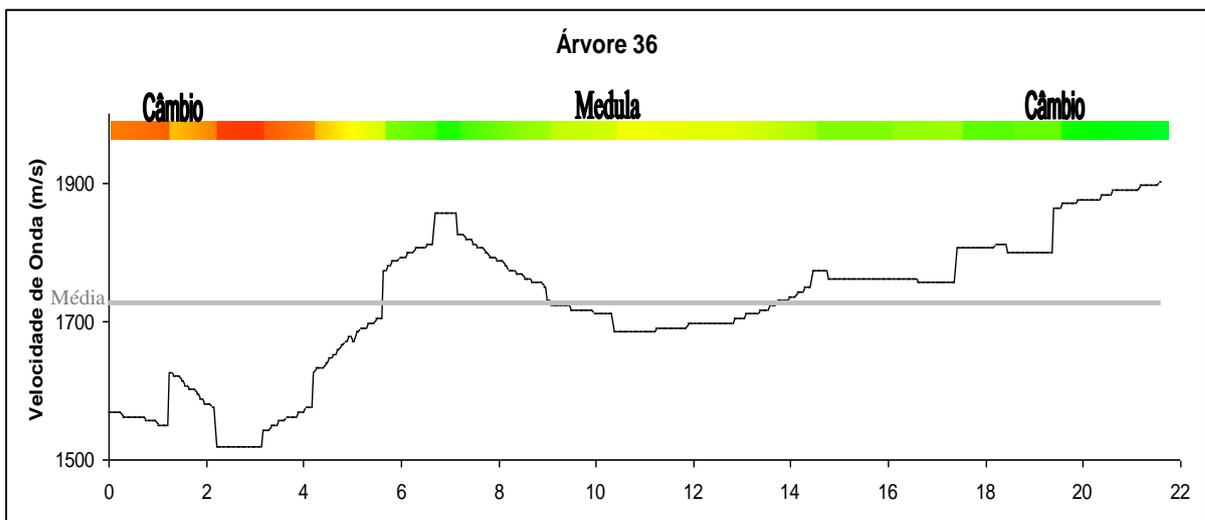
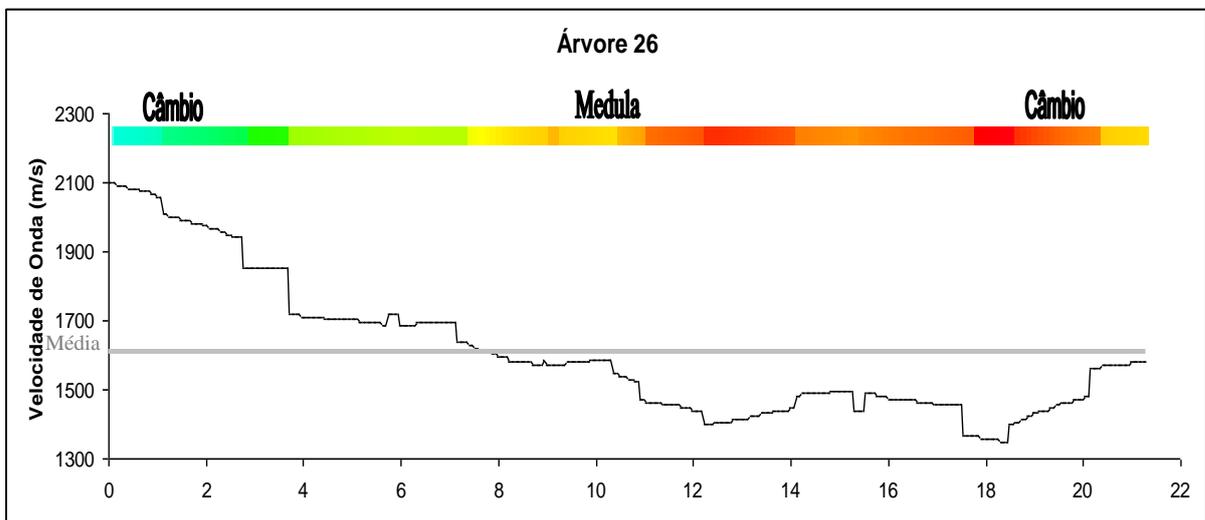
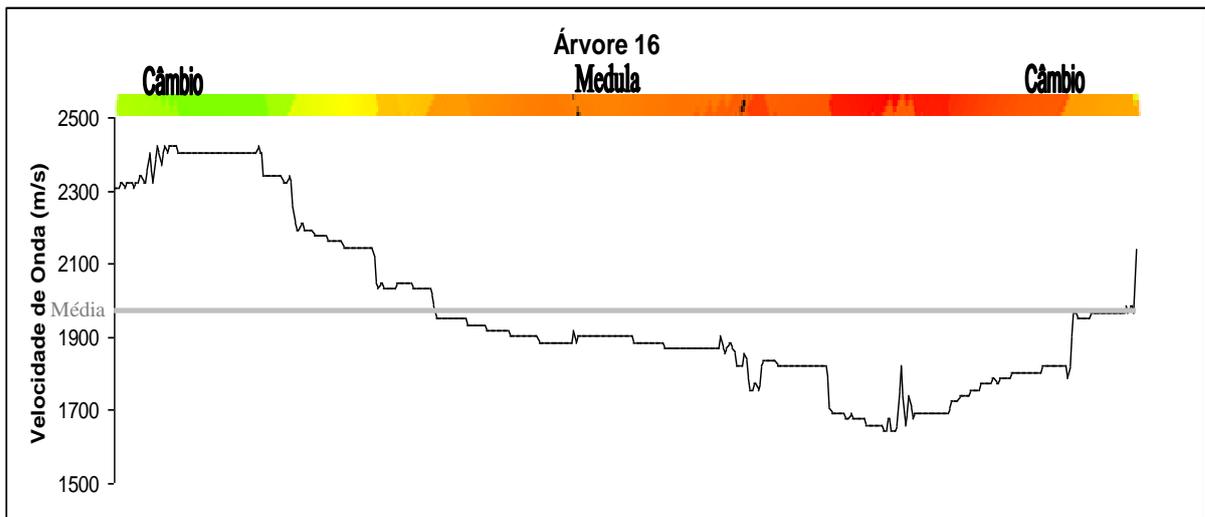
Avaliando-se as imagens tomográficas, não foi observado nenhum padrão que as diferenciasse de acordo com o espaçamento de plantio entre as árvores. No entanto, foi possível diferenciar pela posição radial a região próxima à medula, geralmente com valores mais baixos de velocidade de propagação de ondas.



**Figura 17.** Perfis (câmbio-câmbio) da velocidade de propagação de ondas no tronco das árvores de teca no espaçamento 4x2.



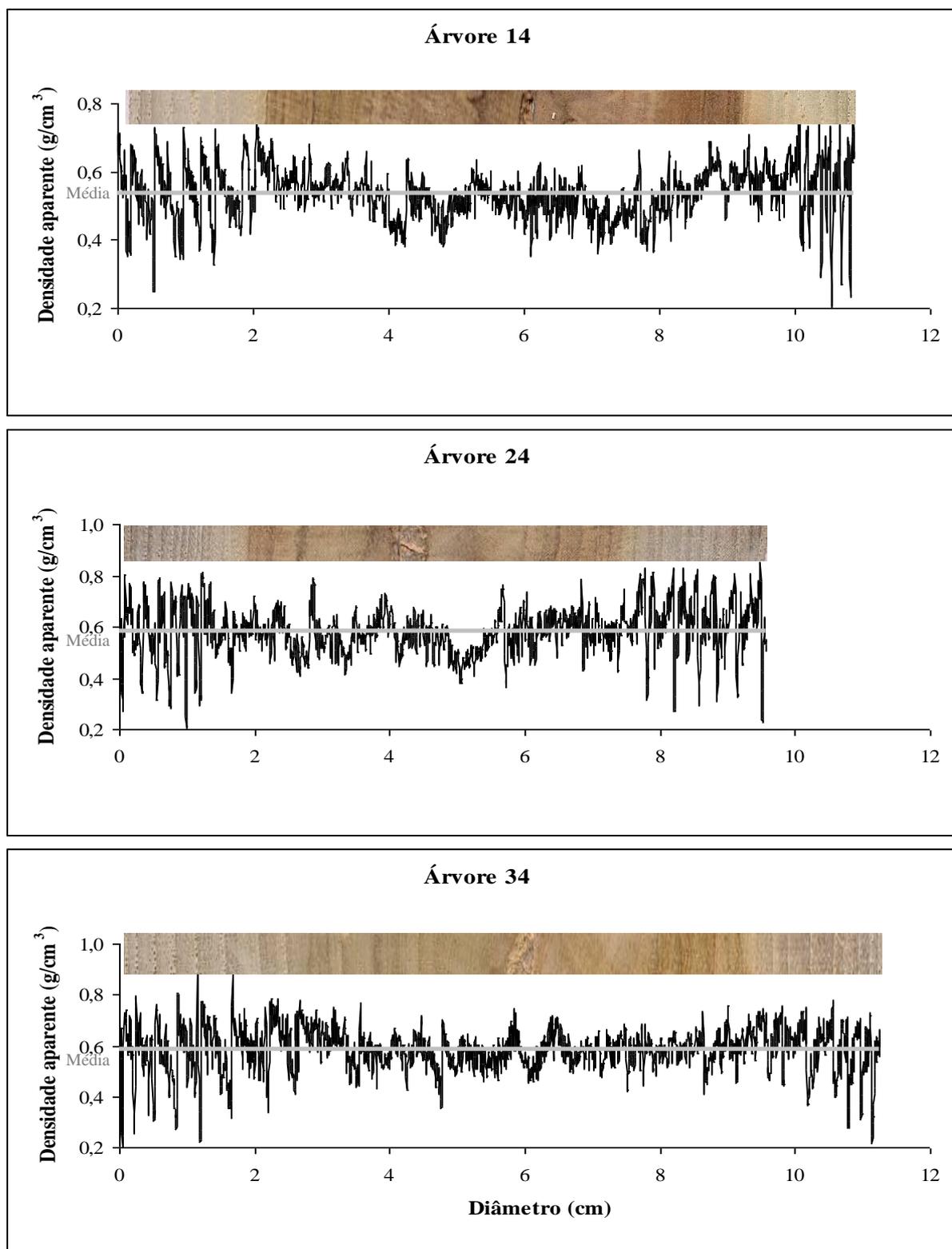
**Figura 18.** Perfis (câmbio-câmbio) da velocidade de propagação de ondas no tronco das árvores de teca no espaçamento 5x2.



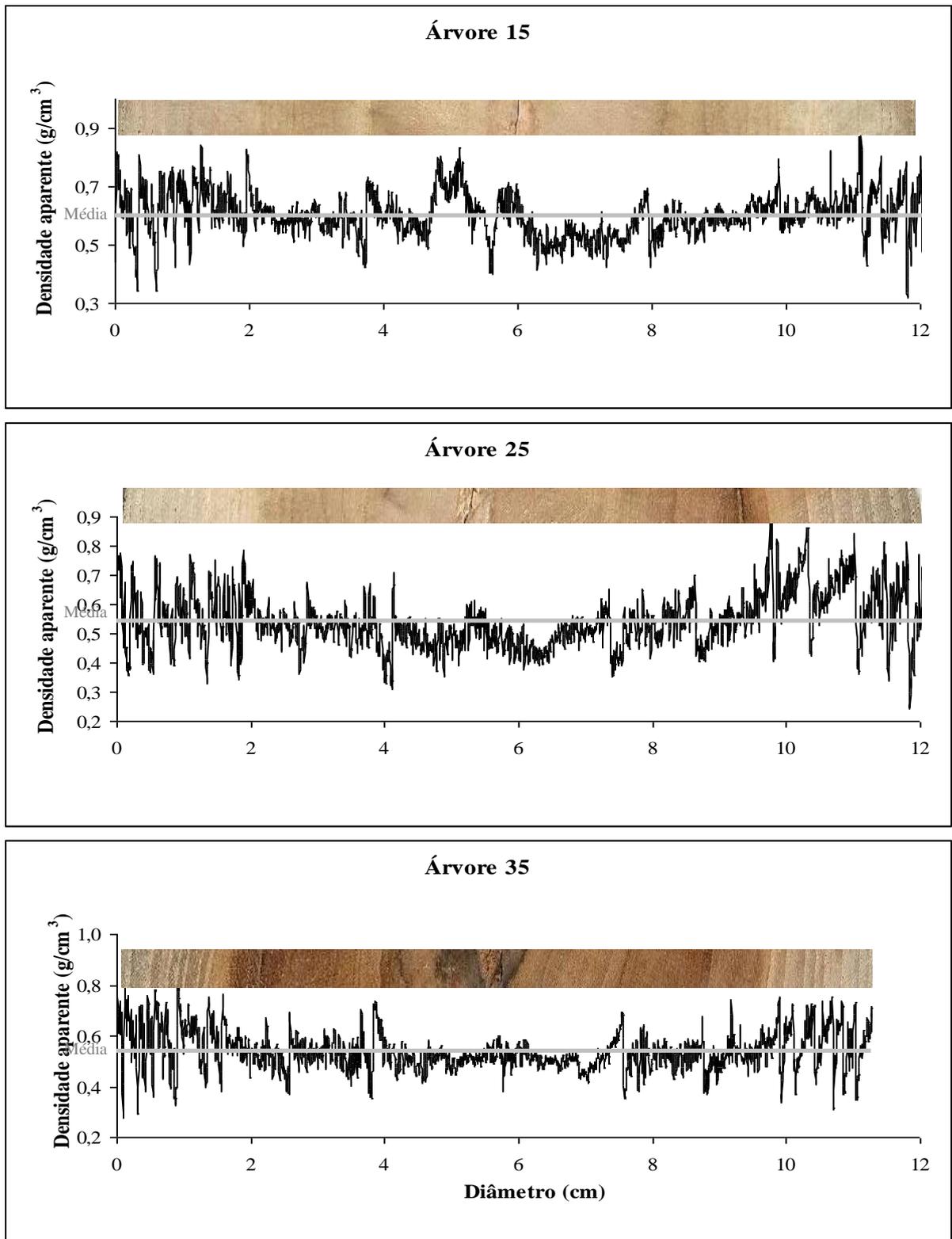
**Figura 19.** Perfis (câmbio-câmbio) da velocidade de propagação de ondas no tronco das árvores de teca no espaçamento 6x2.

#### 4.2.2 Análise de microdensitometria de raios X

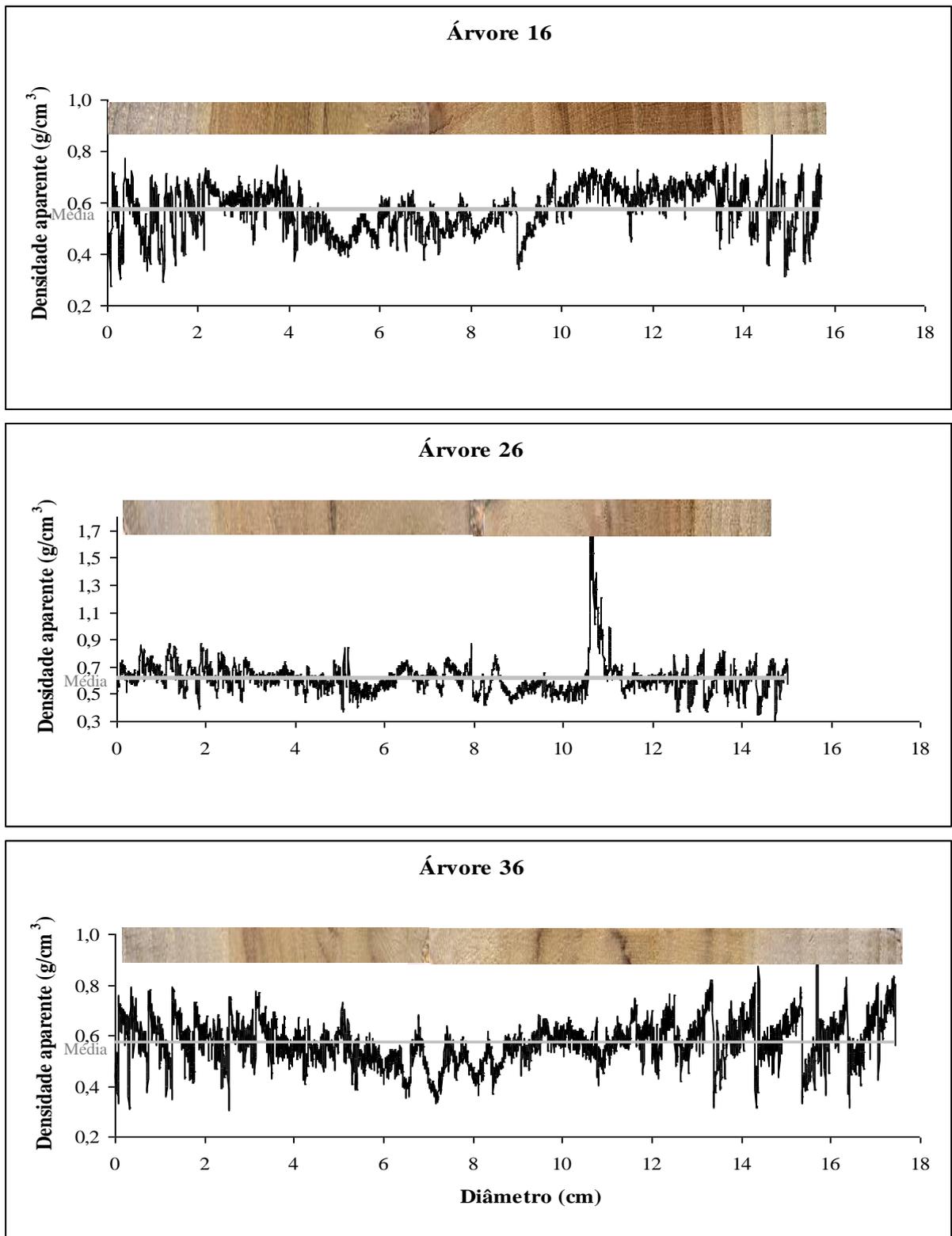
Os perfis radiais de densidade aparente das amostras de lenho das árvores de *T. grandis* em diferentes espaçamentos são apresentados nas Figuras 20, 21 e 22.



**Figura 20.** Perfis (câmbio-câmbio) de densidade das amostras de madeira de *Tectona grandis*, espaçamento 4x2.

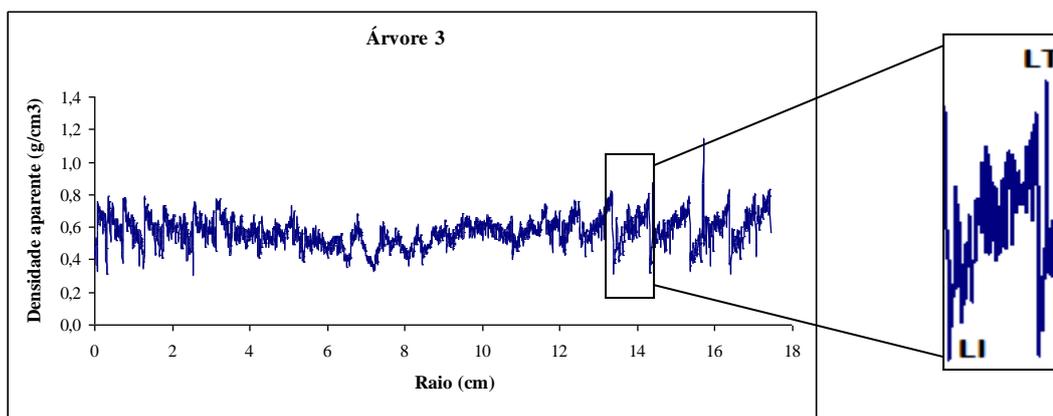


**Figura 21.** Perfis (câmbio-câmbio) de densidade das amostras de madeira de *Tectona grandis*, espaçamento 5x2.



**Figura 22.** Perfis (câmbio-câmbio) de densidade das amostras de madeira de *Tectona grandis*, espaçamento 6x2.

Através dos perfis radiais de variação de densidade aparente do lenho das árvores de *T. grandis* foi possível observar as variações da estrutura anatômica do lenho, podendo ser evidenciado os anéis de crescimento, formados pelo lenho inicial (LI), apresentando poros grandes e numerosos, e pelo lenho tardio (LT), com poros pequenos e escassos (FREITAS, 1958) (Figura 23). As características anatômicas do lenho e sua relação com o perfil de densidade, para árvores de folhosas foram apresentadas por vários autores (TOMAZELLO et al., 2001, *apud* CHAGAS, 2009).



**Figura 23.** Detalhamento da variação microdensitométrica entre lenho inicial e lenho tardio.

Na região próxima ao câmbio foi possível observar com maior clareza a variação da densidade, onde os anéis de crescimento são mais nítidos. Esse comportamento foi similar entre os câmbios.

O surgimento de picos de alta densidade que se sobressai entre os demais, em alguns perfis de densidade, indica a presença de defeitos na madeira e o possível acúmulo de extrativos.

Para as árvores de teca do Mato Grosso, a densidade aparente variou de 537-618 kg/m<sup>3</sup>. Valores próximos a estes foram encontrados por Moya et al. (2009), estudando árvores de teca da Costa Rica com 13 anos de idade.

A variação radial da densidade aparente encontrada por Oliveira (2011) foi de 650-550 kg/m<sup>3</sup> na região próxima da medula e 850-650 para a região próxima ao câmbio com extrativo e 750-550 kg/m<sup>3</sup> sem extrativos.

Izekor et al. (2011a), ao estudar a densidade básica das árvores de teca, encontraram valores médios de 480, 556 e 650 kg/m<sup>3</sup> para árvores com 15, 20 e 25 anos de idade, respectivamente. Também estudando árvores de Teca, González & Bonilla (1979) encontraram para árvores com 28 anos valores próximo de densidade básica (610 Kg/m<sup>3</sup>).

Os gráficos do perfil microdensitométrico do lenho das árvores de *T. grandis* demonstraram tendência crescente nos valores de densidade aparente, no sentido medula-câmbio. Esse modelo de variação tem sido comumente observado para o lenho de *Tectona grandis* (CALDEIRA, 2004; MOYA et al., 2009).

A variação no sentido radial é a mais importante fonte de variação na madeira, sendo, principalmente, determinada pela presença da madeira juvenil, sua proporção no tronco, suas características físico-químicas e anatômicas (GONÇALVES et al., 2007). Segundo os mesmos autores a elevação do gradiente de variação dentro da zona juvenil diminui com o passar do tempo.

Segundo Ballarin & Palma (2003) e Serpa et al. (2003), o aumento do valor da densidade da madeira, no sentido da medula para a casca, é decorrente da formação de madeira juvenil nos primeiros anos e uma tendência de homogeneização da madeira, com o

passar do tempo, ou seja, a madeira estaria atingindo a maturidade. Kokutse et al. (2004) verificaram um aumento proporcional com a idade e uma estabilização, na variação medula-casca, na densidade da madeira de *T. grandis*, na idade acima de 23 anos.

Um estudo realizado na Costa Rica em árvores juvenis e adultas de teca comprovou que a densidade anidra aumenta ligeiramente com a idade e ao longo da seção transversal (Medula-Câmbio) na altura do DAP (CORDERO & KANNINEM, 2003).

### 4.3 Análises Anatômicas

#### 4.3.1 Comprimento e espessura da parede das fibras

A variação do comprimento e espessura de parede das fibras do lenho das árvores de *Tectona grandis* nas três diferentes densidades de plantio é apresentada nas Figuras 24 e 25.

A variação radial do comprimento das fibras do lenho das árvores de *T. grandis* passa de 793  $\mu\text{m}$ , próximo à medula, a 1285  $\mu\text{m}$  próximo ao câmbio. Segundo a IAWA, com tais valores, podemos dizer que as fibras variam de muito curtas a curtas no sentido radial (medula-câmbio). Os valores encontrados estão em conformidade com os encontrados na literatura. Assim como o encontrado por Silva et al. (2007) e Moya et al. (2009). Garcia et al. (2009) também encontraram valores semelhantes, variando de 871  $\mu\text{m}$ , na medula, a 1166  $\mu\text{m}$ , na casca.

Segundo Silva et al.(2007), as fibras localizadas nas camadas de crescimento, mais próximas da medula e a dado nível do tronco, apresentam menores dimensões do que aquelas localizadas nas camadas finais de crescimento, mais próximas da casca.

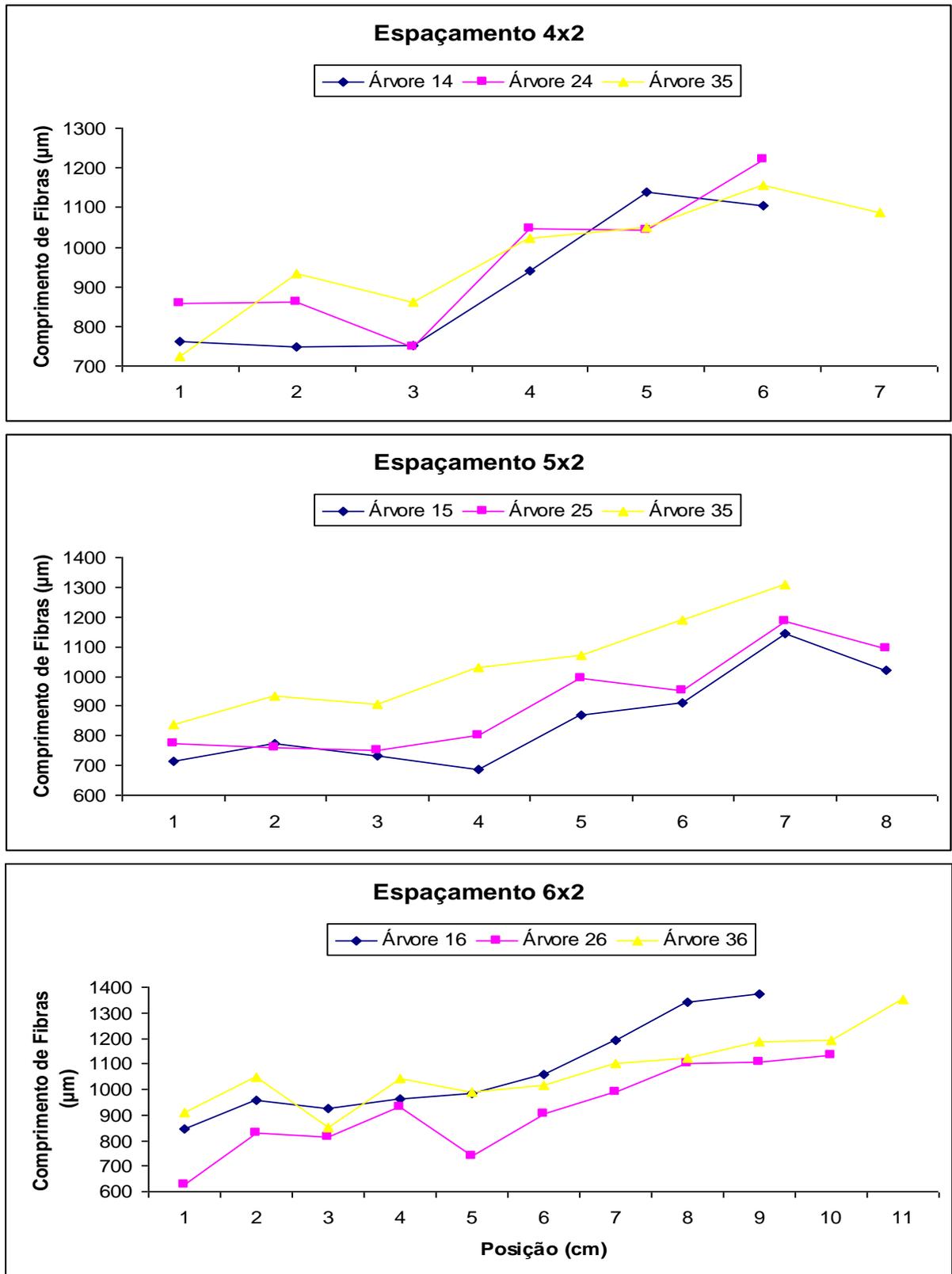
A variação radial da espessura da parede das fibras do lenho das árvores de teca variou de 3,6 a 5,5  $\mu\text{m}$  no sentido medula-câmbio semelhantes ao encontrado por outros autores. Entre eles, Silva et al. (2007) tendo encontrado o valor médio para espessura da parede das fibras de 3,76  $\mu\text{m}$  e Moya et al. (2009), que foi de 3,2 a 5,7  $\mu\text{m}$  para árvores de teca com 13 anos, provenientes da Costa Rica.

Izekor et al. (2011b), estudando árvores de teca de diferentes idades, encontraram valores de comprimento (1450  $\mu\text{m}$ ) e espessura da parede (5,9  $\mu\text{m}$ ) das fibras das árvores, com 15 anos, um pouco mais elevados, porém próximos ao encontrado nesse estudo.

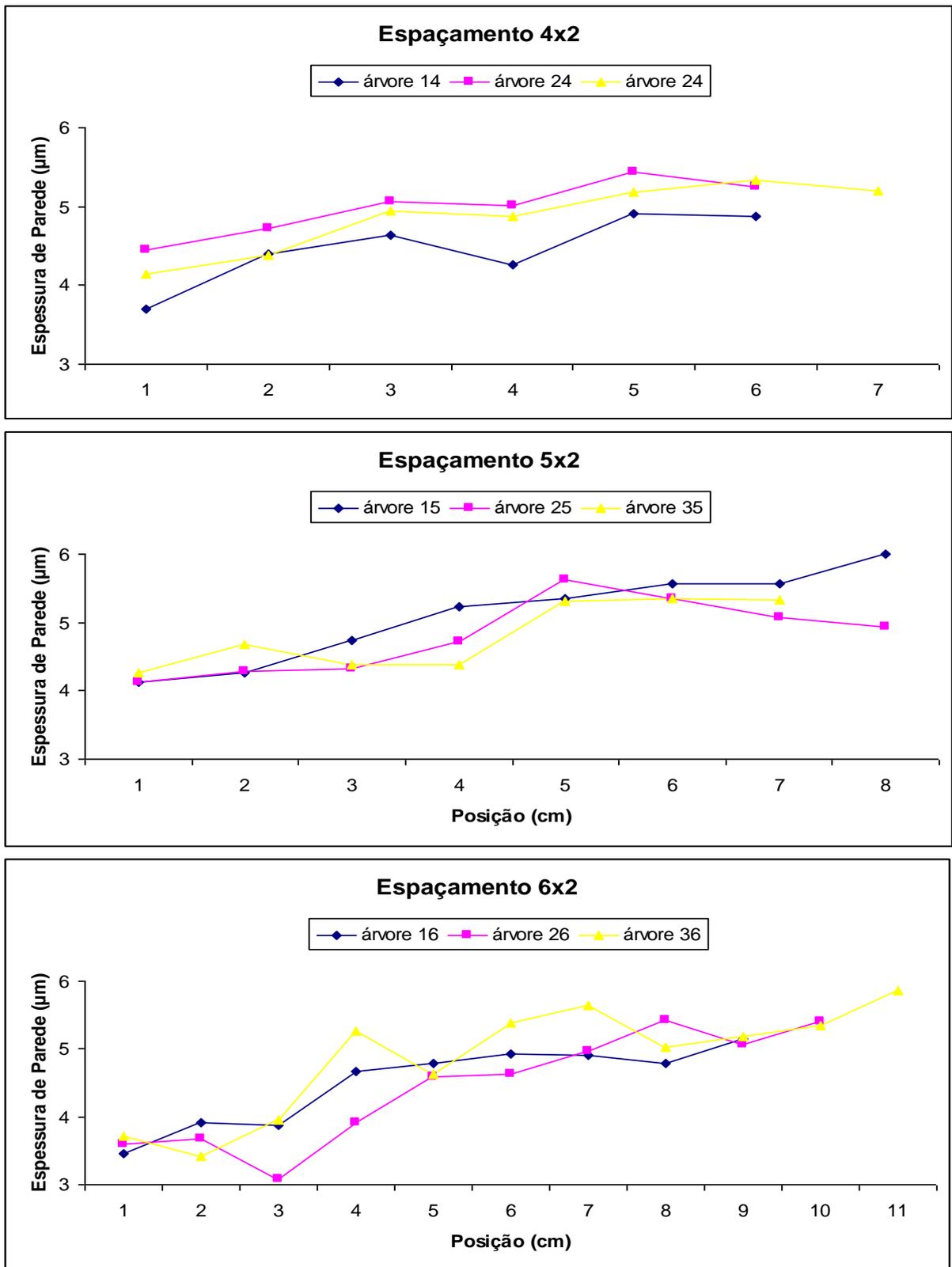
A variação tanto do comprimento de fibras quanto da espessura de parede das fibras mostrou tendência crescente no sentido medula-câmbio, para as árvores de teca aos 11 anos.

Entretanto, Gonçalves et al. (2007) observaram, em árvores *Tectona grandis* com 17 anos, que o comprimento das fibras se manteve crescente no sentido medula-câmbio até a região intermediária e a partir deste ponto mostrou um pequeno decréscimo e posterior estabilidade até a região do câmbio. Esse fato pode ser explicado pelas divisões longitudinais-tangenciais ocorridas no câmbio que influenciam diretamente nos elementos anatômicos (MOREIRA, 1999). Com isso, as células cambiais passam a produzir, durante certo tempo, elementos com maiores dimensões até atingir a sua estabilização, em idades mais avançadas, ao longo do raio (TOMAZELO FILHO, 1985a; ANDRADE, 1987 e ESTEBAN et al., 2003).

A caracterização do lenho juvenil e adulto foi demonstrada por inúmeros pesquisadores, sendo que em árvores de *T. grandis* a transição da madeira juvenil para adulta ocorre por volta de 20 anos (BHAT et al., 2001 *apud* BHAT et al., 2004). Entretanto, para as árvores de teca estudadas ainda não foi possível perceber a transição entre lenho juvenil e lenho adulto, a partir das características observadas.



**Figura 24.** Variação do comprimento das fibras do lenho das árvores de *Tectona grandis* nos três diferentes espaçamentos.



**Figura 25.** Variação da espessura da parede das fibras do lenho das árvores de *Tectona grandis* nos três diferentes espaçamentos.

Hans & Burley (1972 *apud* SILVA et al., 2007), ao estudar a madeira de diferentes espécies de eucalipto, verificaram uma variação crescente no sentido medula-câmbio para o comprimento das fibras, até atingir um valor constante. Tomazello Filho (1985b) constatou que o modelo de variação radial das árvores de eucalipto é caracterizado pelo aumento das dimensões das fibras, nos primeiros anos, e, após esse período, atinge a estabilização, em torno do oitavo ao décimo anel de crescimento. De acordo com Malan (1995), ocorre uma grande variação nas propriedades das madeiras sentido medula-casca, cuja extensão é determinada, principalmente, pela presença de madeira juvenil e a sua proporção no tronco das árvores.

As características anatômicas do lenho das árvores e sua relação com o perfil densitométrico, para árvores de folhosas, foram apresentadas por vários autores demonstrando semelhanças ao observado para *T. grandis* proveniente do município de Cáceres – MT.

#### **4.4 Influência da Densidade de Plantio e da Posição Radial (sentido Medula-Câmbio) nos Caracteres Físicos e Anatômicos**

##### **4.4.1 Análise de Agrupamento**

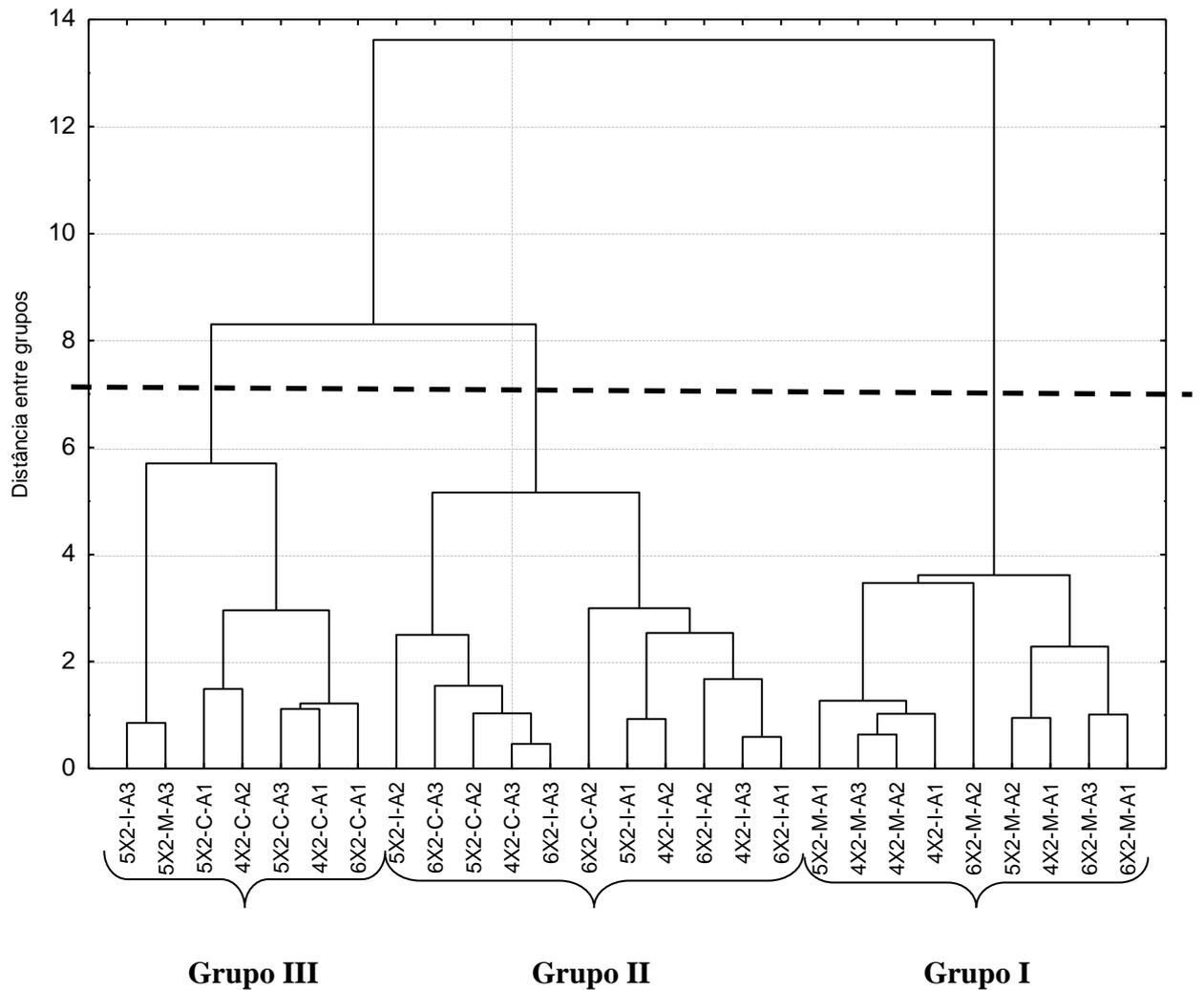
A análise de agrupamento hierárquico das amostras segundo as variáveis utilizadas nesse estudo gerou o Dendrograma, através do Método *Ward* de ligação e distância Euclidiana, apresentado na Figura 26.

O eixo vertical do dendrograma representa a distância euclidiana reescalada de 0 a 14 e o eixo horizontal representa as amostras que geraram os grupos.

Os grupos foram definidos a partir do traçado de uma linha paralela ao eixo horizontal, denominada linha *Fenon* (linha média), partindo da distância Euclidiana média (7), conforme recomendado por BOUROCHE & SAPORTA (1972). A linha *Fenon* interceptou três ramos das ligações, no agrupamento formado, classificando o conjunto dos 27 casos em 3 grupos distintos, em razão da posição na seção transversal do lenho das árvores.

O grupo I (6x2-M-1, 6x2-M-3, 4x2-M-1, 5x2-M-2, 6x2-M-2, 4x2-I-1, 4x2-M-2, 4x2-M-3, 5x2-M-1) foi formado em sua maioria pelas amostras situadas próxima a medula; No grupo II (6x2-I-1, 4x2-I-3, 6x2-I-2, 4x2-I-2, 5x2-I-1, 6x2-C-2, 6x2-I-3, 4x2-C-3, 5x2-C-2, 6x2-C-3, 5x2-I-2) ocorreu uma pequena heterogeneidade de amostras da posição intermediária e próximas ao câmbio; Já o grupo III (6x2-C-1, 4x2-C-1, 5x2-C-3, 4x2-C-2, 5x2-C-1, 5x2-M-3, 5x2-I-3) apresentou em sua maioria amostras localizadas no câmbio.

De modo geral, a posição das amostras foi um fator importante na divisão dos grupos. Já o espaçamento não influenciou muito as variáveis a ponto de gerar o agrupamento das amostras.

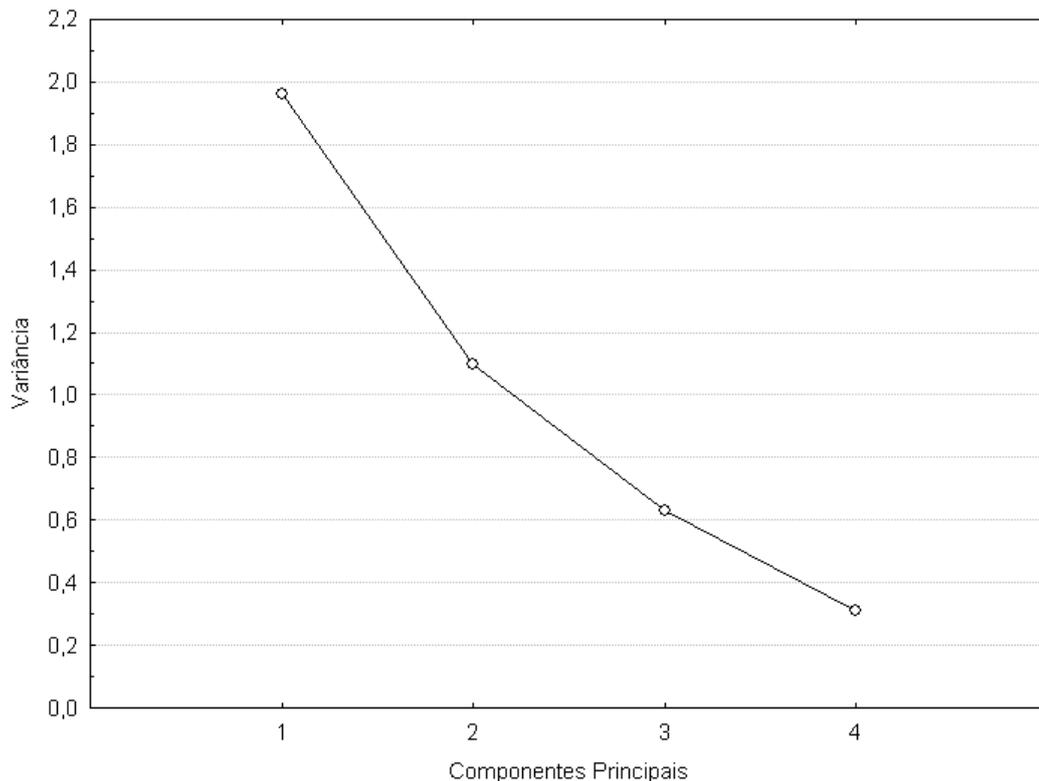


**Figura 26.** Dendrograma obtido pela análise de Agrupamento Hierárquico.

#### 4.4.2 Análise de Componentes Principais

Para identificar quais variáveis foram responsáveis pela divisão dos grupos formados pela análise de agrupamento hierárquico, utilizou-se a Análise de Componentes Principais (ACP).

Na ACP foi gerado o *scree-plot* (Figura 27), onde é possível visualizar os grupos de variáveis que explicam 100% da variação total.



**Figura 27.** Scree-plot das quatro Componentes Principais.

Verifica-se que apenas as duas primeiras componentes são suficientes para explicar 76,5% da variação total dos dados (Tabela 3), sendo 49% da primeira e 27,5% da segunda CPs. Sendo assim, as quatro variáveis analisadas (Características Físicas e Anatômicas) para as árvores de teca podem ser substituídas por estas duas componentes, com perda de apenas 23,5% de informação sobre a variância total.

**Tabela 3.** Análise de Componentes Principais com dados padronizados.

Componente Principal	CP 1	CP 2
Variável*		
V	0,337	<b>0,841<sup>+</sup></b>
D	0,573	-0,623
CF	<b>0,840<sup>+</sup></b>	0,053
EP	<b>0,903<sup>+</sup></b>	0,032
Varição total (%)	49	27,5
Varição acumulada (%)	49	76,5

+ = Auto-vetor > 0,70

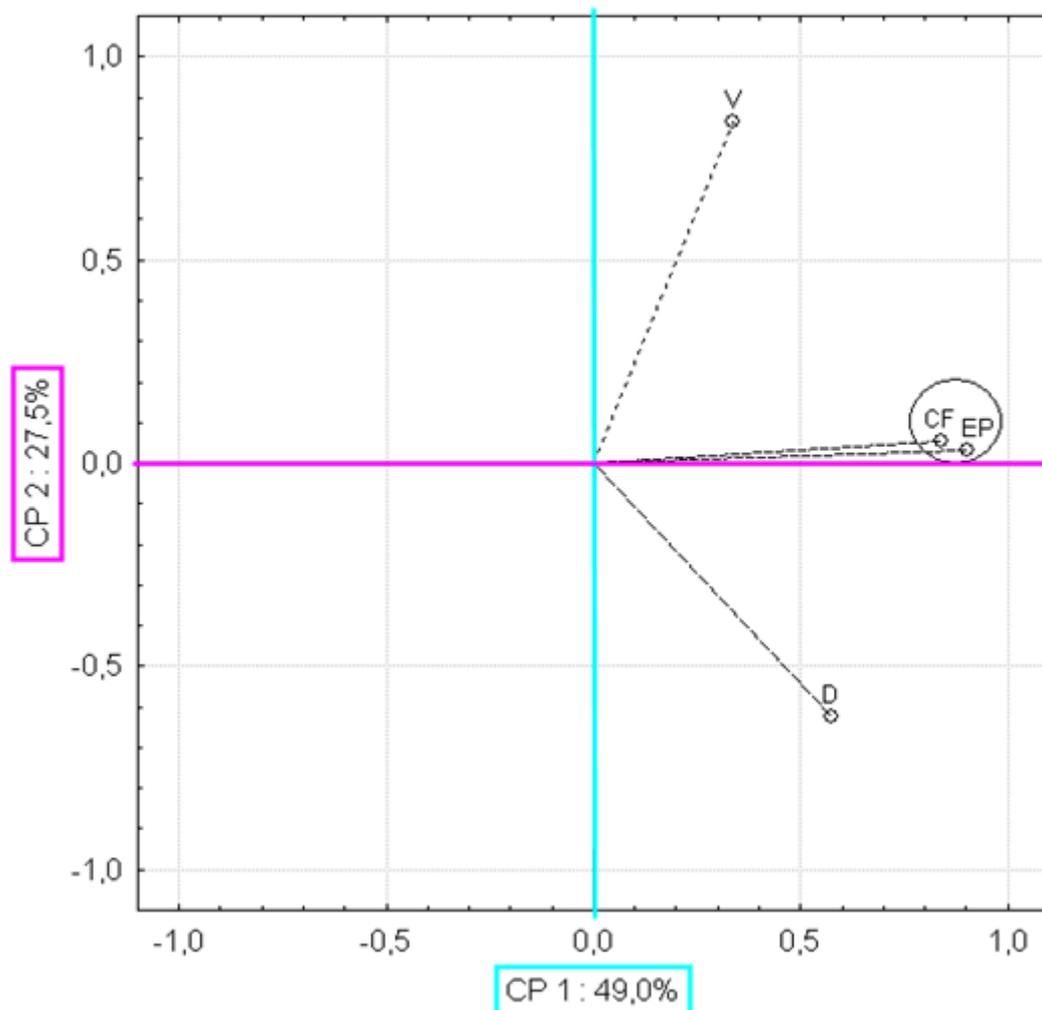
\*V = velocidade de propagação de ondas, D = Densidade aparente, CF = Comprimento das Fibras, EP = Espessura da parede das fibras.

Para determinar a importância de cada variável nos componentes principais foi utilizado no contraste um valor maior que 0,70 nos auto-vetores. Assim, as variáveis que mais contribuíram para a diferenciação dos grupos no primeiro componente foram espessura da parede das fibras, sendo o maior responsável pela variabilidade das amostras (0,903), seguida

pelo comprimento de fibra (0,840). Já no segundo componente, a velocidade de propagação de ondas foi a maior responsável (0,841).

Os resultados sugerem que a diferenciação entre os três grupos está principalmente relacionada aos caracteres anatômicos, mais especificamente pela espessura da parede das fibras e em menor grau pela velocidade de propagação de ondas mecânicas no interior do lenho das árvores de *Tectona grandis*.

O gráfico biplot (Figura 28) permite realçar e visualizar as relações de dominância de cada fator, onde as variáveis analisadas mais distantes do eixo zero são as que mais contribuem para a variação total. Aquelas próximas do eixo zero contribuem pouco ou praticamente não contribuem para a variação total (SHIMOYAMA, 2005).



**Figura 28.** Projeção das características anatômicas e físicas analisadas no lenho das árvores de *Tectona grandis* nas duas componentes principais.

Assim, as variáveis CF e EP são as que mais contribuíram para variação da CP1 e foram as que menos contribuíram para a variação da CP2.

As características próximas uma das outras, dentro do mesmo quadrante, possuem relação entre si, como ocorre com a variável comprimento de fibras e espessura de parede, em destaque na Figura 28.

Já a velocidade de propagação de ondas encontra-se mais afastada destas anteriormente citadas, porém estão no mesmo quadrante o que infere que estas variáveis apresentaram correlação entre si, porém uma baixa correlação.

A densidade aparente apresentou quase nenhuma correlação com as demais características avaliadas, o que já era esperado uma vez que esta característica não apresentou muita variação no sentido medula-câmbio e nem sob diferentes espaçamentos.

#### 4.4.3 Análise Fatorial

A Análise de Variância, de modo geral confirmou os resultados obtidos pela ACP. Verificou-se que os efeitos da densidade de plantio e posição radial no sentido medula-câmbio não foram significativos nas variáveis das características físicas (densidade aparente e velocidade de onda), ao nível de 5%, pelo teste F. Somente nas variáveis das características anatômicas (comprimento e espessura da parede das fibras) que o efeito da posição radial foi significativo, sendo que o efeito da densidade de plantio nessas variáveis também não foi significativo ao nível de 5%, pelo teste F (ANEXO). Entretanto, a interação dos fatores não apresentou efeito significativo para nenhuma das variáveis analisadas.

Os valores médios das variáveis analisadas e seus respectivos desvios padrões encontram-se apresentados na Tabela 4.

Brasil & Ferreira (1971), em um estudo sobre a densidade básica da madeira de três diferentes espécies de *Eucalyptus* com idade de 5 anos, que observaram que os espaçamentos (3 x 1,5 m e 3 x 2 m) não influenciaram esta característica.

Sturion et al. (1988), verificaram que não houve influência do espaçamento na densidade básica da madeira de *Eucalyptus viminalis* Labill, aos quatro e sete anos de idade, implantado sob espaçamentos variando de 1 m<sup>2</sup> a 6 m<sup>2</sup>.

Cruz (2000), estudando clones de *Eucalyptus*, não encontrou valores de dimensões de fibras e vasos entre clones que pudessem demonstrar claramente a influência do espaçamento nas características anatômicas da madeira. Possivelmente, em consequência disso, nos resultados de densidade básica, contrações e propriedades mecânicas, esse efeito também não foi perceptível, o que está em conformidade também com alguns resultados apresentados por SILVEIRA (1999).

Segundo Zobel & Jett (1995), existem controvérsias com relação à influência da densidade de plantio sobre as características anatômicas, físicas e mecânicas da madeira.

Nos estudos de Berger et al. (2000), o espaçamento mais amplo (3 x 4 m) proporcionou um aumento significativo na densidade básica da madeira em uma população clone de *E. saligna*, aos 10 anos de idade.

Roque & Ledezma (2003), estudando o efeito do espaçamento (3 x 3m e 6 x 2m) sobre a densidade básica em populações de *T. grandis* de 10 anos de idade, verificaram que a densidade básica aumentou no espaçamento 6 x 2m.

Lima et al. (2009), ao estudarem árvores de teca aos 31 anos, verificaram que os efeitos de espaçamento e posição radial foram significativos a 1% de probabilidade. Entretanto, os efeitos das interações foram não significativos para a densidade aparente e densidade básica, não existindo, portanto, dependência entre os fatores. Nesse mesmo estudo, os autores verificaram uma tendência de acréscimo para a densidade aparente e densidade básica de acordo com o aumento do espaçamento, porém, somente a densidade aparente foi significativa.

Este mesmo autor encontrou diferenças significativas para as posições radiais em relação à densidade aparente, verificando-se também um aumento do valor desta propriedade, no sentido da medula para a casca; porém, somente a posição da medula foi significativamente menor.

Para Brasil & Ferreira (1971), o local do plantio e a idade do povoamento podem influenciar a densidade básica da madeira, à medida que a espessura da parede e o comprimento das fibras aumentam.

**Tabela 4.** Valores médios das propriedades físicas e anatômicas para densidade de plantio e posição radial e suas interações.

FONTE DE VARIAÇÃO		PROPRIEDADES FÍSICAS E ANATÔMICAS			
FATORES/NÍVEIS - INTERAÇÃO		Velocidade de onda (m/s)	Densidade Aparente (g/cm <sup>3</sup> )	Espessura de Parede (µm)	Comprimento de Fibras (µm)
<b>A - Densidade de Plantio</b>		NS	NS	NS	NS
1 - 4x2		1775,7 (115,36)	0,589 (0,012)	0,0046 (0,0001)	1,019 (0,026)
2 - 5x2		1958,48 (115,36)	0,566 (0,012)	0,0047 (0,0001)	0,942 (0,026)
3 - 6x2		2078,86 (115,36)	0,554 (0,012)	0,0049 (0,0001)	0,945 (0,026)
<b>B - Posição Radial</b>		NS	NS	S	S
1 - Medula		1890,34 (115,36)	0,544 (0,012)	0,0041 <b>a</b> (0,0001)	0,829 <b>a</b> (0,026)
2 - Intermediária		1919,5 (115,36)	0,557 (0,012)	0,0049 <b>b</b> (0,0001)	0,923 <b>b</b> (0,026)
3 - Câmbio		2003,21 (115,36)	0,587 (0,012)	0,0052 <b>c</b> (0,0001)	1,155 <b>c</b> (0,026)
<b>C - Interação</b>		A X B	NS	NS	NS
	A1 x B1	1714,39 (199,81)	0,560 (0,021)	0,0038 (0,0002)	0,876 (0,045)
	A1 X B2	1755,08 (199,81)	0,600 (0,021)	0,0048 (0,0002)	0,973 (0,045)
	A1 X B3	1857,62 (199,81)	0,606 (0,021)	0,0052 (0,0002)	1,210 (0,045)
	A2 X B1	1847,68 (199,81)	0,554 (0,021)	0,0043 (0,0002)	0,815 (0,045)
	A2 X B2	1891,42 (199,81)	0,579 (0,021)	0,0048 (0,0002)	0,895 (0,045)
	A2 X B3	2136,36 (199,81)	0,566 (0,021)	0,0052 (0,0002)	1,118 (0,045)
	A3 X B1	2108,94 (199,81)	0,519 (0,021)	0,0044 (0,0002)	0,796 (0,045)
	A3 X B2	2112,0 (199,81)	0,553 (0,021)	0,0050 (0,0002)	0,902 (0,045)
	A3 X B3	2015,64 (199,81)	0,591 (0,021)	0,0054 (0,0002)	1,138 (0,045)

S = Valor calculado de F significativo a 95% de probabilidade; NS = Valor calculado de F não significativo a 95% de probabilidade. (Desvio Padrão).

## 5 CONCLUSÕES

- Não foi possível pré-estabelecer parâmetros de qualidade e uso da madeira somente com a tomografia de impulso;
- A variação radial da velocidade de propagação de ondas, obtida pelas imagens tomográficas, está associada a vários fatores, não sendo somente influenciada pela densidade da madeira;
- A técnica de densitometria de raios X possibilitou a análise precisa das variações radiais da densidade do lenho de árvores de teça, inclusive demarcando os lenho inicial e tardio dos anéis de crescimento;
- O comprimento e espessura da parede das fibras variaram em função da posição no sentido radial;
- Houve tendência crescente nos valores da densidade aparente, comprimento e espessura da parede das fibras no sentido medula-câmbio;
- As árvores de teça, com 11 anos de idade, não formou lenho adulto comprovada pela inexistência da estabilização dos valores das características anatômicas e densidade aparente;
- As características físicas e anatômicas não foram significativamente afetadas pela densidade de plantio.

## 6 RECOMENDAÇÕES

- ✓ Avaliar o efeito da umidade da madeira na formação da imagem tomográfica;
- ✓ Avaliar a influência do diâmetro tangencial dos vasos de lenho inicial na densidade aparente da madeira no sentido medula-câmbio;
- ✓ Estudar árvores com idades mais avançadas para avaliar se a presença de diferentes lenhos (jovem e adulto) é detectada pela tomografia de impulso;
- ✓ Estudos de tomografia de impulso utilizando um maior número de pares de sensores.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, M. C. D. **Variação das características das fibras em função da densidade básica de cavacos de madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex.Maiden.** Botucatu (SP). 1987. 43f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Estadual de São Paulo, Botucatu, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. Projeto de estruturas de madeira: projeto NBR 7190/1997. Rio de Janeiro, 1997. 107p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS E INSPEÇÃO. **Ensaios Não Destrutivos.** Disponível em: [http://www.abende.org.br/ensaios\\_nao\\_destrutivos.html](http://www.abende.org.br/ensaios_nao_destrutivos.html). Acesso em: 12 jul. 2006.

BALLARINI, A. W.; PALMA, H. A. L. Propriedades de resistência de madeira juvenil e adulta de *Pinus taeda* L. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 27, n. 3, maio/jun. 2003.

BALLONI, E.A. Influência do espaçamento de plantio na produtividade florestal. In: Simpósio IUFRO EM MELHORAMENTO GENÉTICO E PRODUTIVIDADE DE ESPÉCIES FLORESTAIS DE RÁPIDO CRESCIMENTO, 1983, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Silvicultura, V.8, n.31, p.588-93, 1983.

BARRICHELO, L. E. G. **Estudo das características físicas, anatômicas e químicas da madeira de *Pinus caribaea* Mor. Var hondurensis Barr. e Gof. para a produção de celulose kraft.** Piracicaba, 1979. 167 f. Tese (Livre-Docência em Ciências Florestais) - Departamento de Ciências Florestais, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.

BERGER, R.; SCHNEIDER, P. R.; FINGER, C. A. G. Efeito do espaçamento e da fertilização sobre o crescimento e qualidade da madeira de um clone de *Eucalyptus saligna* SMITH. In: SIMPÓSIO LATINO-AMERICANO SOBRE MANEJO FLORESTAL, 1., 2000, Santa Maria, RS. **Anais...** Santa Maria: UFSM, 2000. p. 209-236.

BHAT K.M., PRIYA P., RUGMINI P. Characterisation of juvenile wood in teak. **Wood Sci Tech** v.34, p.517–532, 2001.

BHAT K.M., PRIYA, P.B. Influence of provenance variation on wood properties of teak from the Western Ghat Region in India. **IAWA J.** v.25, n.3, p.273-282, 2004.

BUCUR, V. An ultrasonic method for measuring the elastic constants of wood increment cores bored from living trees. **Ultrasonics**, New York, v. 21, n. 1, p. 116-126, 1983.

\_\_\_\_\_. Ultrasonic hardness and x-ray densitometric analysis of wood. **Ultrasonics**, New York, v. 23, n. 6, p. 269-275, Nov. 1985.

\_\_\_\_\_. Environment modifiers of Wood structural parameters detected with ultrasonic waves. In:\_\_\_\_\_. **Acoustics of Wood.** 2nd Ed. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2006. chap 9, p. 242-270.

CALDEIRA, B. R. P. P. **Caracterização das propriedades físico-mecânicas e determinação de percentagem de cerne da madeira de *Tectona grandis***. Lisboa: Instituto Superior de Agronomia. Lisboa, 2004. 84 f. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Florestal e dos Recursos Naturais) - Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior de Agronomia. Lisboa, Portugal. 2004.

CALDEIRA, S.F. & OLIVEIRA, L.C. Desbaste seletivo em povoamentos de *Tectona grandis* com diferentes idades. **Acta Amazônica**, v. 38, n.2, p. 223 – 228, 2008.

CAMPBELL, A.; GASSON, P. E. Disponível em: [http://database.prota.org/PROTAhtml/Tectona%20grandis\\_En.htm](http://database.prota.org/PROTAhtml/Tectona%20grandis_En.htm). Acesso em 23/07/2010.

CARDOSO, N. S. **Caracterização da estrutura anatômica da madeira, fenologia e relações com a atividade cambial de árvores de teca (*Tectona grandis*) –Verbenaceae**. Piracicaba, 1991. 117p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1991.

CARRASCO, E.V.M.; AZEVEDO JÚNIOR, A.P. Avaliação não destrutiva de propriedades mecânicas de madeiras através de ultrassom - fundamentos físicos e resultados experimentais. **Cerne**, Lavras, v. 9, n. 2, p. 178-191, 2003.

CHAGAS, M. P. **Caracterização dos anéis de crescimento e dendrocronologia de árvores de *Grevillea robusta* A. Cunn, *Hovenia dulcis* Thunb., *Persea americana* Mill., *Tabebuia pentaphylla* Hemsl. e *Terminalia catappa* L. nos municípios de Piracicaba e Paulínia, SP**. Piracicaba: ESALQ/USP, 2009. 114 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais, com opção em Tecnologia de Produtos Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, 2009.

CHAVES, E.; FONSECA, W. ***Tectona grandis* L.f. espécie arbol de uso multiple em América Central**. Turrialba, Centro Agronômico Tropical de Investigación y Enseñanza, 1991. (Série Técnica, n. 179).

CORDERO, L. & KANNINEN, M. Heartwood, sapwood and bark content, and wood dry density of young and mature teak (*Tectona grandis*) trees grown in Costa Rica. **Silva Fennica**, n. 37, p. 45-54. 2003.

CRUZ, C. R. **Caracterização da madeira de clones de *Eucalyptus* para utilização na indústria madeireira**. 2000. 79p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, 2000.

DADSWELL, H. E. **The growth characteristic and their influence in wood structure and properties**. Div. of Build. Res, 19p. 1957.

DEFLORIO, G.; FINK, S.; SCHWARZE, F. W. M. R. Detection of incipiente decay in tree stems with sonic tomography after wounding and fungal inoculation. **Wood Science and Technology**, New York, v. 42, p. 117-132, 2008.

DINWOODIE, J. M. DESCH, H. E. **Timber - Structure, Properties, Conversion and use, 1996**.

- ESTEBAN, L. G. et al. **Madera y su anatomia**. Madri: AMVE Ediciones, 2003. 327p.
- FOELKEL, C. E. B.; BRASIL, M. A. M.; BARRICHELO, L. E. G. **Métodos para a determinação da Densidade Básica de cavacos para coníferas e folhosas**. IPEF, no 2/3, p. 65-73, 1971.
- FREITAS, M. C. P. G. **Estudo das madeiras de Timor**. II Contribuição, Junta de Investigação Ultramar, Lisboa, 1958.
- GILBERT, E. A.; SMILEY, T. Picus Sonic tomography for the quantification of decay in white oak (*Quercus alba*) and hickory (*Carya* spp.). **Journal of Arboriculture**. Champaign, v. 30, n. 5, p. 277-281, Sept. 2004.
- GARCIA, R.; LIMA, I. L.; LONGUI, E. L.; FLORSHEIM, S. M. B. Influencia do espaçamento e da posição radial na variação de elementos anatômicos da madeira de *Tectona grandis* Linn. **IF Ser. Reg.**, São Paulo, n. 40, p. 51-56, jul. 2009.
- GOMES, J. E. **Desenvolvimento inicial de *Tectona grandis* L. f (Teca) em área de cerrado sob diferentes espaçamentos**. 2002. 76 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2002.
- GONÇALVES, M. P. M.; COFFLER, R.; CARVALHO, A. M. & GARCIA, R. A. Variação radial da densidade básica e comprimento das fibras da madeira de *Tectona grandis* L. **Revista Floresta e Ambiente**, Seropédica, v.14, n.1, p. 70 -75. 2007.
- GONZÁLEZ, G.; BONILLA, L. **Propriedades y usos de la madera de Teca (*Tectona grandis*) creciendo en Quepos**. San José, Universidad de Costa Rica, Laboratorio de Productos Forestales. 1979.
- GONZALEZ, J.C.; VALLE, A.T. DO; COSTA, A.F. da. Estimativas das constantes elásticas da madeira por meio de ondas ultra-sonoras (ultra-som). **Cerne**, v.7, n.2, p.81-92, 2001.
- HAYGREEN, J. G.; BOWYER, J. L. **forest products and wood science: an introduction**. Ames: Iowa Sate University, 1982. 459p.
- HIGUCHI, N. **Informações básicas para o manejo florestal da *Tectona grandis* (Teca) introduzida no Alto Jauru**. Universidade Federal de Mato Grosso/ Departamento de Engenharia Florestal. Cuiabá, 1979. 92p.
- IAWA Committe. IAWA Listo f microscopic feature for hardwood identification. **IAWA Bulletin**, Leiden, v. 10, n. 3, p. 219-332, 1989.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE DESENVOLVIMENTO FLORESTAL – IBDF. **Diagnóstico do Setor Florestal do Estado de Mato Grosso**. Brasília. Departamento de Economia Florestal/IBDF. 1984. 354p.
- IZEKOR, D. N.; FUWAPE, J. A. Effects of density on variations in the mechanical properties of plantation grown *Tectona grandis* wood. **Archives of Applied Science Research**, v.2, n.6, p.113-120, 2011a.

IZEKOR, D. N.; FUWAPE, J. A. Variations in the anatomical characteristics of plantation grown *Tectona grandis* wood in Edo State, Nigeria. **Archives of Applied Science Research**, v.3, n.1, p.83-90, 2011b.

KHEDKAR, M. K. Advanages of raising teack (*Tectona grandis*) plantations by using root trainer plants. **The Indian Forester**, February, p. 133-135, 1999.

KIEHL, E. J. **Manual de edafologia: relações solo-planta**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1979. 264 p.

KLOCK, U. **Qualidade da madeira juvenil de *Pinus maximinoi* H. E. Moore**. Curitiba, 2000. 291 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, 2000.

KOKUTSE, A. D.; BAILLÉRES, H.; STOKES, A.; KOKOU, K. Proportion and quality of heartwood in Togolese teak (*Tectona grandis* L.f.). **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 189, p. 37-48, 2004.

LAMPRECHT, H. **Silvicultura nos trópicos**. Deustshe Gesellschaftfür Technische Zusammenarbeit (GT Z) GmbH. Cooperação técnica – República Federal da Alemanha. Eschborn, 1990, 343p.

LARSON, P. R. *Wood formation and the concept of wood quality*. Yale Univ. Sch. For. Bull n. 74,1969. 45 p.

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, abr./jun. 2009.

LORENZI, H. **Árvores exóticas no Brasil: madeireiras, ornamentais e aromáticas**. Nova Odessa: Instituto Plantarum, 2003. 368p.

MACEDO, R.L.G. et. al. Desenvolvimento inicial de *Tectona grandis* L.f. (teca) em diferentes espaçamentos no município de Paracatu, MG. **Cerne**, Lavras, v. 11, n. 1, p. 61-69, 2005.

MALLAN, F.A. Eucalyptus improvement for lumber production. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE UTILIZAÇÃO DA MADEIRA DE EUCALIPTO PARA SERRARIA, São Paulo, IPEF/IPT, Anais... São Paulo, IPEF/IPT, 05-06, abr, p. 1-19, 1995.

MALHOTRA, N. K. **Pesquisa de marketing: uma orientação aplicada**. Porto Alegre: Bookman, 2001.

MATOS, J. L. M. **Estudos sobre a produção de painéis estruturais de lâminas paralelas de *Pinus taeda* L.** Curitiba, 1997. 117 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, 1997.

MATRICARDI, W. A. T. **Efeitos dos fatores do solo sobre o desenvolvimento da teca (*Tectona grandis* L.F.) cultivada na Grande Cáceres – Mato Grosso**. 1989, 151p. (Dissertação de Mestrado em Ciências Florestais), ESALQ, Piracicaba 1989.

MELO, R. R.; PAES, J. B.; LIMA, C. R.; FERREIRA, A. G. Estudo da variação radial da densidade básica de sete madeiras do semi-árido. **Revista Científica eletrônica de Engenharia Florestal**, Garça, n. 07, 2006.

MOREIRA, W. S. **Relações entre propriedades físico-mecânicas e características anatômicas e químicas da madeira**. 1999. 107f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1999.

MOURA, M. C. **Variações em características de crescimento e da madeira em clones de Eucalyptus**. Lavras, 2000. 63 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Lavras, 2000.

MOYA, R.; BERROCAL, A.; SERRANO, J. R. & TOMAZELLO FILHO, M. Variación radial de la anatomía, densidad y durabilidad de la madera de teca (*Tectona grandis*) procedente de dos calidades de sitio y dos regiones climáticas de Costa Rica. **Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales**, n.18, v. 2, p. 119-131. 2009.

NICOLOTTI, G.; SOCCO, L. V.; MARTINIS, R.; GODIO, A.; SAMBUELLI, L. Application and comparison of three tomographic techniques for detection of decay in trees. **Journal of Arboriculture**, v.2, n.29, p. 66-78, 2003.

OLIVEIRA, J. T. S., FIEDLER, N. C. & NOGUEIRA, M. (Editores). **Tecnologias aplicadas ao setor madeireiro II**. Jerônimo Monteiro – ES. Editora: Suprema gráfica e Editora Ltda. 2007. 302 p.

OLIVEIRA, J. R. V. **Sistema para cálculo de balanço nutricional e recomendação de calagem e adubação de povoamentos de teca - Nutriteca**. 2003. 93f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2003.

OLIVEIRA, J. T. de; TOMAZELLO FILHO, M. & SILVA, J. C. Resistência natural da madeira de sete espécies de eucalipto ao apodrecimento. **Árvore**, v. 29, n. 6, p. 993-998, 2005.

OLIVEIRA, B. R. U. **Dendrocronologia de árvores de Teca na região de Cáceres, Mato Grosso**. 2011. 97p. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais e Florestais) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2011.

PALERMO, G. P. M. **Propriedades e comportamento tecnológico da madeira de Eucalyptus grandis W. Hill Ex. Maiden visando a sua utilização em produtos de maior valor agregado**. 2010. 237p. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais e Florestais) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2010.

PANSHIN, A. J.; DE ZEEUW, C. **Textbook of wood technology**. 3 ed. New York: McGraw-Hill, 1980. 722 p.

PASSOS, C.A.M.; BUFULIN, L.; GONÇALVES, M.R. Avaliação silvicultural de *Tectona grandis* L.f em Cáceres – MT. **Ciência Florestal**, V.16, n.2, p.225-232, 2006.

PEREIRA, J.C.D. **A influência do ritmo de crescimento na densidade da madeira de *Pinus Elliottii engelm var. elliotii***. 1982, 98p. (Dissertação de Mestrado), Piracicaba: USP-ESALQ, 1982.

PEREIRA, L. C.; SILVA FILHO, D. F.; TOMAZELLO FILHO, M.; COUTO, H. T. Z.; MOREIRA, J. M. M. A. P.; POLIZEL, J. L. Tomografia de impulso para avaliação do interior do lenho de árvores. **Revista da Sociedade Brasileira de Arborização Urbana**, Piracicaba, v. 2, n. 2, p. 65-75, 2007.

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.

RINNTTECH. **User Manual – Arbotom 3-D Tree Impulse Tomograph**, version 1.59 for Microsoft Windows 98, 2000, XP. 42 p., 2005.

REGAZZI, A. J. INF 766 - **Análise multivariada**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas. Departamento de Informática, 2001. 166p.

REZENDE, M. A.; ESCOBEDO, J. F.; FERRAZ, E. S. B. Retratibilidade volumétrica e densidade aparente da madeira em função da umidade. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 39, p. 33-40, ago, 1988.

ROLLO, F. M. A. **Identificação de padrões de resposta à tomografia de impulso em tipuanas (*Tipuana tipu* (Benth). O. Kuntze)**. 2009. 123p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Superior “Luiz de Queiroz”, Universidade São Paulo, Piracicaba, 2009.

ROLLO, L. C. P. **Tomografia de impulso para estimativa da densidade da madeira**. 2009. 48p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Superior “Luiz de Queiroz”, Universidade São Paulo, Piracicaba, 2009.

RONDON NETO, R. M.; MACEDO, R. L. G.; TSUKAMOTO FILHO, A. A. **Formação de povoamentos florestais com *Tectona grandis* L.f. (Teca)**. Boletim Técnico – Universidade Federal de Lavras. Série Extensão, Ano 7, n. 33. Lavras, MG, 1998. p. 1-29.

ROQUE, R. M. **Variação da anatomia e da densidade básica da madeira de *Gmelina arborea* (Roxb.), em diferentes condições de clima e manejo na Costa Rica**. Tese (Doutorado em Recursos Florestais), ESALQ/USP, Piracicaba, 202p. 2005.

ROQUE, M. R.; LEDEZMA A.V. Efecto del espaciamiento em plantacion sobre dos propiedades físicas de madera de teca a lo largo del fuste. **Revista Madera y Bosques**, Costa Rica, V.9, n.2, p.15-27, 2003.

ROSS, R. J.; BRASHAW, B. K.; PELLERIN, R. F. Nondestructive evaluation of wood. **Forest Products Journal**, Madison, v. 48, n. 1, p. 14-19, jan. 1998.

ROSSO, F.; NININ, P. Variabilidad de los defectos de trozas de la especie teca (*Tectona grandis* L.f.) em diferentes densidades arbóreas, em la unidad experimental de la reserva forestal de Ticoporo, Barinas-Venezuela. **Revista Forestal Venezolana**, v.42, n.2, p.103-112, 1998.

SCHAD, K.C.; SCHMOLDT, D. L.; ROSS, R. J. **Nondestructive methods for detecting defects in softwood logs**. US Forest Laboratory. Research Paper FPL n. 546, Madison, fev. 1996.

SERPA, P. N.; VITAL, B. R.; DELLA LUCIA, R. M.; PIMENTA, A. S. Avaliação de algumas propriedades da madeira de *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus saligna* e *Pinus elliottii*. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 27, n. 5, p. 723-733, 2003.

SHIMOYAMA, V.R. de S. **Estimativas de propriedades da madeira de Pinus taeda através do método não destrutivo emissão de ondas de tensão, visando à geração de produtos de alto valor agregado**. 2005. 151f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

SILVA, J. C.; TOMAZELLO FILHO, M.; OLIVEIRA, J. T. S.; CASTRO, V. R. Influência da idade e da posição radial nas dimensões das fibras e dos vasos da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.31, n.6, p.1081-1090, 2007.

SILVEIRA, V. **Comportamento de clones de Eucalyptus em diversos ambientes definidos pela qualidade de sítio e espaçamento**. 124p. Dissertação (Mestrado em Engenharia florestal). Universidade Federal de Lavras: UFLA, 1999.

SIMÕES, J.W. Reflorestamento e manejo de florestas implantadas. Piracicaba: USP/ESALQ, (Documentos Florestais, 4), 1989, 29p.

STURION, J. A.; PEREIRA, J. C. D.; CHEMIN, M. S. Q. **Qualidade da madeira de Eucalyptus viminalis para fins energéticos em função do espaçamento e idade de corte**. Boletim de Pesquisa Florestal, Colombo, n. 16, p.55-59, dez. 1988.

TOMAZELLO FILHO, M. Estrutura anatômica da madeira de oito espécies de eucalipto cultivadas no Brasil. **IPEF**, v.29, p.25-36, 1985a.

TOMAZELLO FILHO, M. Variação radial da densidade básica e da estrutura anatômica da madeira de *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus grandis*. **IPEF**, v.29, p.37-45, 1985b.

TOMAZELLO FILHO, M. **Efeito da irrigação e fertilização nas propriedades do lenho de árvores de Eucalyptus grandis x urophylla**. 2006. 135p. Tese (Livre-Docência) - Escola Superior "Luiz de Queiroz", Universidade São Paulo, Piracicaba, 2006.

TOMAZELLO FILHO, M.; BRAZOLIN, S.; CHAGAS, M. P.; OLIVEIRA, J. T. S.; BALLARIM, A. W.; BENJAMIM, C. A. Application of X-ray technique in nondestructive evaluation of Eucalypt wood. **Maderas: Ciência y Tecnología**. Concepción, v. 10, n. 2, p. 139-149, 2008.

ULIANA, L. R. **Aplicação da tomografia de impulso na avaliação da qualidade do lenho de árvores de maçaranduba, Manilkara huberi (Ducke) Chevalier**. 2010. 156p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Superior "Luiz de Queiroz", Universidade São Paulo, Piracicaba, 2009.

VALENTIN, J. L. **Ecologia numérica: uma introdução à análise multivariada de dados ecológicos**. Rio de Janeiro: Interciência, 2000.

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

VITAL, B. R. **Métodos de determinação de densidade da madeira.** Boletim técnico, Viçosa-MG, SIF, 1984. 21p

WAGENFUHR, R. **Verbenaceae, *Tectona grandis* L. f. – Teak.** HOLZATLAS 4, neubearbeitete Auflage mit Zahlreichen Abbildungen. Fachbuchverlag Leipzig. Germany, 1996. 668p.

WANG, X.; ROSS, R. J.; McCLELLAN, M.; BARBOUR, R. J.; ERICSON, J. R.; FORSMAN, J. W.; McGINNIS, G. D. Nondestructive evaluation of standing trees with a stress wave method. **Wood and Fiber Science**, Madison, v. 33, n. 4, p. 522-533, out. 2001

WANG, X.; ALLISON, R. B. Decay detections in red oak trees using a combination of visual inspection, acoustic testing and resistance microdrilling. **Arboriculture and Urban Forestry**, Champaign, v. 34, n. 1, p. 1-4, Jan. 2008.

ZOBEL B.; B.VAN BUIJTENEN **Wood variation: its causes and control.** Nova York: Spring-Verlag, 1989. 363p.

ZOBEL, B.J.; JETT, J.B. **Genetics of wood production.** Berlin: Springer-Verlag, p.337, 1995.

## ANEXOS

ANEXO A – Análise de variância da espessura da parede das fibras da madeira de *Tectona grandis* em diferentes densidades de plantio e posições, no sentido radial medula-casca.

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	G.L.	Quadrado Médio	F	Probabilidade
<b>Efeito</b>					
A - Posição Radial	5,65632E-06	2	2,82816E-06	25,19*	0,0000
B - Densidade de Plantio	4,85753E-07	2	2,43E-07	2,16	0,1439
Interação AxB	3,3568E-07	4	8,39E-08	0,75	0,5724
<b>Erro</b>	2,02116E-06	18	1,12E-07		
<b>Total</b>	8,49892E-06	26			

\*Significativo ao nível de 95% de probabilidade.

ANEXO B – Análise de variância do comprimento das fibras da madeira de *Tectona grandis* em diferentes densidades de plantio e posições, no sentido radial medula-casca.

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	G.L.	Quadrado Médio	F	Probabilidade
<b>Efeito</b>					
A - Posição Radial	0,506891	2	0,253445	41,30*	0,0000
B - Densidade de Plantio	3,42825E-02	2	0,0171412	2,79	0,0878
Interação AxB	1,3074E-03	4	0,000326855	0,05	0,9942
<b>Erro</b>	0,110466	18	0,00613699		
<b>Total</b>	0,652947	26			

\*Significativo ao nível de 95% de probabilidade

ANEXO C – Análise de variância da velocidade de propagação de ondas em árvores de *Tectona grandis* em diferentes densidades de plantio e posições, no sentido radial medula-casca.

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	G.L.	Quadrado Médio	F	Probabilidade
<b>Efeito</b>					
A - Posição Radial	61789,4	2	30894,7	0,26	0,7755
B - Densidade de Plantio	4,19430E+05	2	209715	1,75	0,2019
Interação AxB	1,3414E+05	4	33536,1	0,28	0,8871
<b>Erro</b>	2,16E+06	18	119776		
<b>Total</b>	2,77E+06	26			

\*Significativo ao nível de 95% de probabilidade

ANEXO D – Análise de variância da densidade aparente na madeira de *Tectona grandis* em diferentes densidades de plantio e posições, no sentido radial medula-casca.

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	G.L.	Quadrado Médio	F	Probabilidade
<b>Efeito</b>					
A - Posição Radial	0,00928526	2	0,00464263	3,45	0,0539
B - Densidade de Plantio	5,45713E-03	2	0,00272857	2,03	0,1607
Interação AxB	3,3596E-03	4	0,000839887	0,62	0,6514
<b>Erro</b>	0,0242293	18	0,00134607		
<b>Total</b>	0,0423312	26			

\*Significativo ao nível de 95% de probabilidade