

**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

Aplicação de métodos não destrutivos na avaliação das propriedades físicas do lenho de árvores de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* Barr. et Golf. e *Tectona grandis* (L.f.)

Vinícius Resende de Castro

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre em Recursos Florestais. Área de concentração: Recursos Florestais, com opção em Tecnologia de Produtos Florestais

**Piracicaba
2011**

Vinicius Resende de Castro
Engenheiro Florestal

**Aplicação de métodos não destrutivos na avaliação das propriedades físicas do lenho de
árvores de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* Barr. et Golf. e
Tectona grandis (L.f.)**
versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 5890 de 2010

Orientador:
Prof. Dr. **MARIO TOMAZELLO FILHO**

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre em
Recursos Florestais. Área de concentração: Recursos
Florestais, com opção em Tecnologia de Produtos Florestais

Piracicaba
2011

**Dados Internacionais de Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – ESALQ/USP**

Castro, Vinícius Resende de

Aplicação de métodos não destrutivos na avaliação das propriedades físicas do lenho de árvores de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* Barr. et Golf. e *Tectona grandis* (L.f.) / Vinícius Resende de Castro. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 5890 de 2010. -- Piracicaba, 2011.

104 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2011.

1. Densitometria de raios X 2. Estrutura da madeira 3. Madeira - Anatomia
4. Pinheiro 5. Teca 6. Tomografia I. Título

CDD 634.9751
C355a

“Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor”

Aos meus pais, José de Castro e Virgínia, por terem me concedido a oportunidade de viver, pelo exemplo de vida e união e, principalmente, pela educação: maior herança que um filho pode herdar de seus pais.

Ao meu irmão Henrique, pela amizade e amor que nos une.

A toda minha família, os verdadeiros responsáveis por este trabalho.

Dedico

AGRADECIMENTOS

À Deus agradeço imensamente pela oportunidade e generosidade.

Ao Prof. Mário Tomazello Filho pela dedicação e apoio na orientação deste trabalho.

À Maria Aparecida R. C. Bermudez pela amizade, apoio, carinho e conversas no cafezinho.

Aos Profs. Mário Tomazello Filho, Fidel A. Roig, Ivaldo P. Jankowsky e Geraldo Bortoletto Junior que ministraram as disciplinas no Programa de Mestrado.

Aos Pesq. Sérgio Brazolin, Raquel Dias de A. M. do Amaral, Maria José de A. C M. Andrade e o Seu Antônio do Instituto de Pesquisas Tecnológicas, IPT, pelas aulas e pelo Curso de Tomografia.

Ao Eng. Lothar Göcke pelos ensinamentos no Curso de Tomografia do tronco das árvores.

Ao Prof. Demóstenes F. da Silva Filho e ao Dr. Jefferson Lordello Polizel, pelo empréstimo e orientação do uso do tomógrafo de impulso.

À Acad. Julianne Sbeghen do Curso de Engenharia Florestal, pelo auxílio na coleta e análise das amostras do lenho.

Ao Carlos R. Sette Junior, Ugo L. Belini, Daniel de S. P. Costa, Matheus P. Chagas, Moisés S. Lobão, Mauro Soave, Victor Hugo P. Moutinho, Cláudio R. Anholetto Junior, Marco A.

Arizapana, Alisson Rangel, Angel T. B. Ferreira, Saly Takeshita, Paula Surdi, Camila Sarto e Marta K. Leite pelo que aprendemos juntos, pelos momentos de trabalho e de descontração.

Aos amigos mineiros de barzinho Alécio Souza e Geraldo Silva.

A turma da “English Class”, em especial ao Prof. Bianchi, que de forma descontraída, me incentivou a melhorar este segundo idioma.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos.

Ao Departamento de Ciências Florestais da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” pela acolhida.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para o êxito desse trabalho.

SUMÁRIO

RESUMO	9
ABSTRACT	11
1 INTRODUÇÃO	13
2 OBJETIVOS	15
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3.1 Caracterização das espécies estudadas.....	17
3.1.1 A espécie <i>Pinus caribaea</i> var. <i>hondurensis</i>	17
3.1.2 A espécie <i>Tectona grandis</i>	18
3.2 Caracterização do lenho das árvores por métodos não destrutivos.....	20
3.2.1 Aplicação do tomógrafo de impulso.....	21
3.3 Caracterização das propriedades físicas do lenho das árvores.....	22
3.3.1 Densidade aparente do lenho por densitometria de raios X.....	22
3.3.2 Densidade básica do lenho pelo método do máximo teor de umidade.....	25
3.3.3 Distribuição do teor de umidade do lenho de árvores vivas.....	26
3.4 Relação das propriedades do lenho das árvores: velocidade de onda mecânica, densidade e teor de umidade.....	27
4 MATERIAL E MÉTODOS	31
4.1 Caracterização das plantações de <i>Pinus caribaea</i> var. <i>hondurensis</i> e de <i>Tectona grandis</i>	31
4.2 Caracterização das áreas experimentais.....	31
4.3 Seleção e amostragem das árvores de <i>Pinus caribaea</i> var. <i>hondurensis</i> e de <i>Tectona grandis</i>	32
4.4 Avaliação das propriedades do lenho das árvores de <i>Pinus caribaea</i> var. <i>hondurensis</i> e de <i>Tectona grandis</i>	33
4.4.1 Caracterização macroscópica do lenho e dos anéis de crescimento.....	33
4.4.2 Avaliação das propriedades do lenho do tronco das árvores em pé por tomografia de impulso.....	33
4.4.3 Avaliação das propriedades físicas do lenho extraído por métodos não destrutivos do tronco das árvores.....	34
4.4.3.1 Avaliação da densidade aparente do lenho por densitometria de raios X.....	34
4.4.3.2 Avaliação da densidade básica do lenho pelo máximo teor de umidade.....	36
4.4.3.3 Avaliação do teor de umidade do lenho das árvores.....	37

4.5 Análises estatística dos resultados.....	38
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	39
5.1 Propriedades do lenho do tronco das árvores em pé de <i>Pinus caribaea</i> var. <i>hondurensis</i> ..	39
5.1.1 Caracterização macroscópica do lenho e dos anéis de crescimento.....	39
5.1.2 Propriedades do lenho do tronco das árvores por tomografia de impulso.....	40
5.1.3 Propriedades físicas do lenho do tronco das árvores em pé.....	45
5.1.3.1 Densidade aparente do lenho por densitometria de raios X.....	45
5.1.3.2 Densidade básica do lenho do tronco das árvores.....	49
5.1.3.3 Teor de umidade do lenho do tronco das árvores.....	52
5.1.4 Velocidade de onda mecânica com as propriedades físicas do lenho do tronco das árvores.....	55
5.2 Propriedades do lenho do tronco das árvores em pé de <i>Tectona grandis</i>	57
5.2.1 Caracterização macroscópica do lenho e dos anéis de crescimento.....	57
5.2.2 Propriedades do lenho do tronco das árvores por tomografia de impulso.....	58
5.2.3 Propriedades físicas do lenho do tronco das árvores em pé.....	63
5.2.3.1 Densidade aparente do lenho por densitometria de raios X.....	63
5.2.3.2 Densidade básica do lenho do tronco das árvores.....	66
5.2.3.3 Teor de umidade do lenho do tronco das árvores.....	70
5.2.4 Velocidade de onda mecânica com as propriedades físicas do lenho de <i>Tectona grandis</i>	73
5.3 Propriedades do lenho do tronco das árvores em pé de <i>Pinus caribaea</i> var. <i>hondurensis</i> e de <i>Tectona grandis</i>	74
6 CONCLUSÕES.....	77
REFERÊNCIAS.....	79
ANEXOS.....	87

RESUMO

Aplicação de métodos não destrutivos na avaliação das propriedades físicas do lenho de árvores de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* Barr. et Golf. e *Tectona grandis* (L.f.)

A aplicação de métodos não destrutivos (MND) invasivos - extração de amostras do lenho do tronco das árvores com sondas metálicas - e não invasivos - análise do lenho diretamente no tronco - permite a avaliação da qualidade do lenho, dos defeitos internos e sua aplicação como madeira sólida. No presente trabalho são aplicados os MND invasivo (densitometria de raios X) e não invasivo (tomógrafo de impulso) na análise do lenho do tronco de 18 árvores de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* e 18 de *Tectona grandis*, com 18 e 52 anos, respectivamente. Os resultados permitem concluir que a (i) estrutura anatômica macroscópica do lenho e dos anéis de crescimento descrita é característica das coníferas (*Pinus*) e das folhosas (*Tectona*) e similar à apresentada na literatura; (ii) as imagens tomográficas da seção transversal do lenho indicam um bom estado de sanidade (*Pinus*) e regiões afetadas do lenho (*Tectona*); a velocidade de onda é maior na região interna em relação à externa (*Pinus*) e maior em um dos raios, decrescendo em direção à medula e do raio oposto (*Tectona*) do lenho, e permite agrupar as árvores em 4 (*Pinus*) e 6 (*Tectona*) classes; observa-se a correlação do diâmetro do tronco com o tempo médio da velocidade de onda; (iii) os perfis diametrais de densidade aparente e básica do lenho indicam aumento da medula para a casca e estabilização no lenho externo; os perfis radiais de densidade aparente permitem a precisa demarcação dos anéis de crescimento anuais; os valores médios de densidade agrupam as árvores em 3-2 (*Pinus*) e 6-5 (*Tectona*) classes não se observando correlação com o diâmetro do tronco; (iv) os perfis diametrais de teor de umidade do lenho indicam uma diminuição da medula para a casca e estabilização no lenho externo; permitem agrupar as árvores em 3 (*Pinus*) e 5 (*Tectona*) classes e não se correlacionam com o diâmetro do tronco; (v) o coeficiente de correlação de Pearson indicou valores negativos e não significativos entre a velocidade de onda e a densidade aparente e básica do lenho (*Pinus*) e entre a velocidade de onda e a densidade básica do lenho (*Tectona*); positiva e não significativa para o teor de umidade (*Pinus*) e positiva e não significativa para o teor de umidade e a densidade aparente (*Tectona*); negativa entre o teor de umidade e a densidade aparente e básica do lenho; (vi) a velocidade média de onda no lenho é menor e com maior variação das velocidades médias mínima e máxima em *Tectona*, em relação às árvores de *Pinus*; (vii) a densidade aparente e básica média do lenho foi significativamente mais elevada (*Tectona*) e os valores de densidade mínima e máxima média foram mais discrepantes no lenho das árvores de *Pinus* e (viii) o teor de umidade médio do lenho foi significativamente superior em *Tectona*, com a maior discrepância dos valores médios mínimo e máximo no lenho das árvores de *Pinus*. No presente trabalho são discutidas as vantagens da aplicação de MND na análise do tronco das árvores de plantações florestais.

Palavras-chave: Tomografia de impulso; Métodos não-destrutivos; Densitometria de raios X

ABSTRACT

Application of non-destructive methods to evaluate physical properties of the wood of trees of *Pinus caribaea* var. *hondurensis* Barr. et Golf. and *Tectona grandis* (L.f.)

The application of non-destructive methods (MND) invasive - extraction of samples from the trunk of trees with metal probes - and not invasive - analysis of the wood directly on the trunk - to evaluate the quality of the wood, the internal defects and their application as solid wood, etc. In the present study are applied MND invasive (X-ray densitometry) and noninvasive (tomography of impulse) in the analysis of the trunk of 18 trees of *Pinus caribaea* var. *hondurensis* and 18 of *Tectona grandis*, with 18 and 52 years, respectively. The results suggest that (i) gross anatomical structure of wood and the growth rings described is characteristic of conifers (*Pine*) and hardwood (*Teak*) and similar to that presented in the literature, (ii) tomographic images of the cross section of wood indicate a good state of health (*Pinus*) and affected regions of the wood (*Tectona*), the wave velocity is higher in the inner region compared to external (*Pine*) and higher in one of the rays, decreasing toward the pith and the opposite ray (*Tectona*) of wood, and allows the grouping of trees in 4 (*Pine*) and 6 (*Tectona*) classes, we observe the correlation of stem diameter with the time average of velocity of wave (iii) the density profiles diametrical and basic density of wood show an increase from pith to bark and the wood external stabilization, the radial density profiles allow a precise demarcation of the annual growth rings, the average density of trees in group 3-2 (*Pine*) and 6-5 (*Tectona*) classes no significant correlation with the trunk diameter, (iv) the diametric profiles of moisture content of wood indicate a decrease from pith to bark and the wood external stabilization, allow you to group trees in 3 (*Pine*) and 5 (*Tectona*) classes and do not correlate with the diameter of the trunk, (v) the Pearson correlation coefficient showed negative and not significant between the wave velocity and density basic of wood (*Pine*) and between wave velocity and density of wood (*Tectona*), positive and not significant for moisture content (*Pine*) and positive and not significant for moisture content and density (*Tectona*), negative correlation between moisture content and density wood basic density and (vi) the average speed of wave in the wood is less and greater variation of minimum and maximum velocities in *Tectona*, in relation to *Pine* trees, (vii) and average basic density of wood was significantly higher (*Tectona*) and the values of minimum density and maximum density were more discrepant in the wood of pine trees and (viii) the average moisture content of wood was significantly higher in *Tectona*, with the largest discrepancy between the minimum and average values maximum in the wood of *Pine* trees. In this paper we discussed the advantages of applying MND in the analysis of tree trunks in forest plantations.

Keywords: Tomography of impulse; Non-destructive methods; X-ray densitometry

1 INTRODUÇÃO

A aplicação de técnicas não destrutivas na análise do tronco das árvores em pé nas plantações florestais permite a avaliação da qualidade do lenho, dos defeitos internos e sua caracterização para a aplicação como madeira sólida e de seus produtos. Essas técnicas não destrutivas de análise do lenho das árvores podem, da mesma forma, ser aplicadas como ferramenta para o manejo florestal sustentado (efeito de desbaste, desrama, espaçamento, etc.), na seleção de árvores nos programas de melhoramento florestal, na tecnologia e usos da madeira etc.

Os métodos não destrutivos (MND) podem ser *invasivos*, caracterizados pela extração de amostras do lenho do tronco das árvores, com sondas metálicas, e *não invasivos*, quando a análise da qualidade do lenho é realizada diretamente no tronco das árvores. As amostras do lenho do tronco das árvores, obtidas pela aplicação dos MND invasivos, são analisadas em laboratório, aplicando diferentes metodologias e equipamentos, permitindo caracterizar a sua estrutura anatômica e propriedades físicas, químicas e mecânicas. Destas, mencionam-se a avaliação da estrutura anatômica macro e microscópica, a determinação da densidade aparente e básica, do teor de umidade do lenho, etc., que são obtidas pelas metodologias clássicas, como determinação da massa seca/volume saturado e modernas, como a densitometria de raios X, que constrói, com precisão e detalhe, o perfil radial da densidade aparente do lenho, delimitando os lenhos inicial e tardio dos anéis de crescimento anuais (TOMAZELLO FILHO et al., 2008; OLIVEIRA, 2011). Na aplicação dos MND não invasivos, são disponíveis diversos equipamentos, como o tomógrafo de impulso, que permite a reconstrução das seções transversais do tronco e dos galhos das árvores, possibilitando inferir sobre o estado de sanidade e de algumas propriedades do lenho (GILBERT e SMILEY, 2004; PEREIRA, 2009; ROLLO, 2009; ALMODEI et al., 2010; ULIANA, 2010).

No presente trabalho são aplicados os MND invasivos e não invasivos na análise do lenho do tronco das árvores de plantações de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* e de *Tectona grandis*, consideradas como das mais importantes nos programas de reflorestamento no Brasil, juntamente com as de *Eucalyptus* sp. e de outras espécies florestais.

O *Pinus caribaea* var. *hondurensis* é uma espécie tropical que ocorre naturalmente em Belize, El Salvador, Guatemala, Honduras, Nicarágua e no México. Apresenta importância na Austrália, Ilhas Fiji, Venezuela (com plantação de 600.000 ha), Brasil, etc. Até a década de 1980

mais de 50.000 ha foram plantados no Brasil e, dados de 2000, reportam 1.840.050 ha de pinus (várias espécies), sendo o Paraná o estado com maior área plantada (686.509 ha), seguido por Santa Catarina (545.592 ha), Rio Grande do Sul (168.955 ha) e São Paulo (216.005 ha) (GOLFARI et al., 1978; DVORAK e MOURA, 2001; ABRF, 2011).

As árvores de *Tectona grandis* ocorrem naturalmente em países da Ásia (Índia, Tailândia, Burma, Mianmar, etc.) e foram introduzidas na Nigéria em 1902; na América, a primeira plantação foi feita em 1913, em Trinidad e Tobago. Atualmente, na América Central encontram-se plantações da espécie em diferentes sítios de Porto Rico, Belize, Panamá, etc. Na América do Sul, a espécie está sendo cultivada com sucesso na Colômbia, Venezuela, Brasil e Guianas. Estima-se que a área plantada de *Tectona grandis* exceda a três milhões de hectares, com sua madeira possuindo uma vasta gama de usos e aplicações. O mercado brasileiro é considerado como consumidor em potencial da madeira, com as plantações de *Tectona grandis* estendendo-se nos Estados do Acre, Amapá, Mato Grosso (com 50.000 ha), Mato Grosso do Sul, Pará, Paraná, Rondônia, São Paulo e Tocantins (CARDOSO, 1991; OLIVEIRA, 2011).

2 OBJETIVOS

Aplicação de propriedades físicas do lenho de árvores de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* e de *Tectona grandis* através da aplicação de métodos não destrutivos.

Como objetivos específicos::

(i) aplicação do tomógrafo de impulso na caracterização do lenho de árvores de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* e de *Tectona grandis*,

(ii) aplicação da densitometria de raios X na caracterização do lenho e dos anéis de crescimento de árvores de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* e de *Tectona grandis*,

(iii) determinação da densidade básica e do teor de umidade do lenho de árvores de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* e de *Tectona grandis*,

(iv) correlação entre os parâmetros físicos do lenho das árvores de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* e de *Tectona grandis*.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Caracterização das espécies estudadas

3.1.1 A espécie *Pinus caribaea* var. *hondurensis*

As árvores de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* ocorrem naturalmente na América Central (Belize, El Salvador, Guatemala, Honduras, Nicarágua) até o leste do México, desde o nível do mar até 1000 m de altitude, com precipitação de 2.000-3.000 mm/ano. Constitui-se na variedade mais plantada em reflorestamentos em várias regiões do mundo, como na Austrália, Ilhas Fiji, Brasil e Venezuela. (GOLFARI et al., 1978; DVORAK e MOURA, 2001).

Na região tropical do Brasil é a espécie de pinus mais plantada, mencionando-se as regiões Amazônica, Centro-oeste e Sudeste, ocupando 2 milhões de ha, em diferentes tipos de solo e sendo tolerante à seca e inundações esporádicas. As árvores adultas podem atingir até 45 m de altura e 1 m de diâmetro, com copa caracterizada por ramos longos, retos e sem ramificações. Sua madeira é utilizada em serraria, construções, celulose, entre outros. Além da utilização do seu lenho como uso como madeira sólida e inúmeros produtos, extrai-se a goma-resina utilizada em aplicações industriais, com o breu e terebintina, considerados de boa qualidade (LORENZI et al., 2003; SBS, 2008).

As árvores de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* produzem lenho claro, amarelado, com anéis de crescimento formados por lenho inicial e tardio, com textura grosseira e grã direita. No processo de secagem natural, o lenho das árvores apresenta tendência a rachar nas extremidades das toras, podendo, quando verde, ser afetado por fungos manchadores. A madeira é de fácil trabalhabilidade sendo que, o teor de resina pode causar problemas no desdobro (BERNI et al., 1979; LORENZI et al., 2003; FERREIRA, 2009).

As árvores de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* formam a madeira juvenil, nos 5-8 anos iniciais do crescimento do tronco, com vigoroso crescimento inicial, caracterizada por anéis de crescimento largos e maior proporção lenho inicial/tardio; segue-se a fase de transição do desenvolvimento do lenho, com passagem gradual da madeira juvenil-adulta, de densidade intermediária, proporção similar lenho inicial/tardio e, em seguida a madeira adulta, de maior densidade e maior proporção lenho tardio/inicial (FERREIRA, 2009) (Figuras 1A e 1B).

A densidade do lenho das árvores de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* pode variar dentro e entre as árvores, locais e condições da população, se natural ou plantada. Na região de origem da variedade (Nicarágua, Belize, Guatemala e Honduras), a densidade do lenho das árvores variou de 0,53-0,65 g/cm³, nas plantações da África do Sul, Malásia, Ilhas Fiji, Austrália, Jamaica foi de 0,33-0,50 g/cm³, e nas plantações do Brasil, em árvores com 17 e 22 anos foi de 0,36-0,44 e de 0,43-0,46 g/cm³, respectivamente; em árvores com 39 anos, a densidade aparente variou de 0,59-0,70 g/cm³ (LONGWOOD, 1962; LEE e CHU, 1965; LAVERS, 1969, BOLZA e KLOOT, 1972; BANKS, 1979; ONG, 1978; RESCH e BASTENDORFF, 1978 apud PLUMPTRE, 1984; BONDUELLE e CENI, 2002; GONÇALEZ et al., 2009, FERREIRA, 2009).

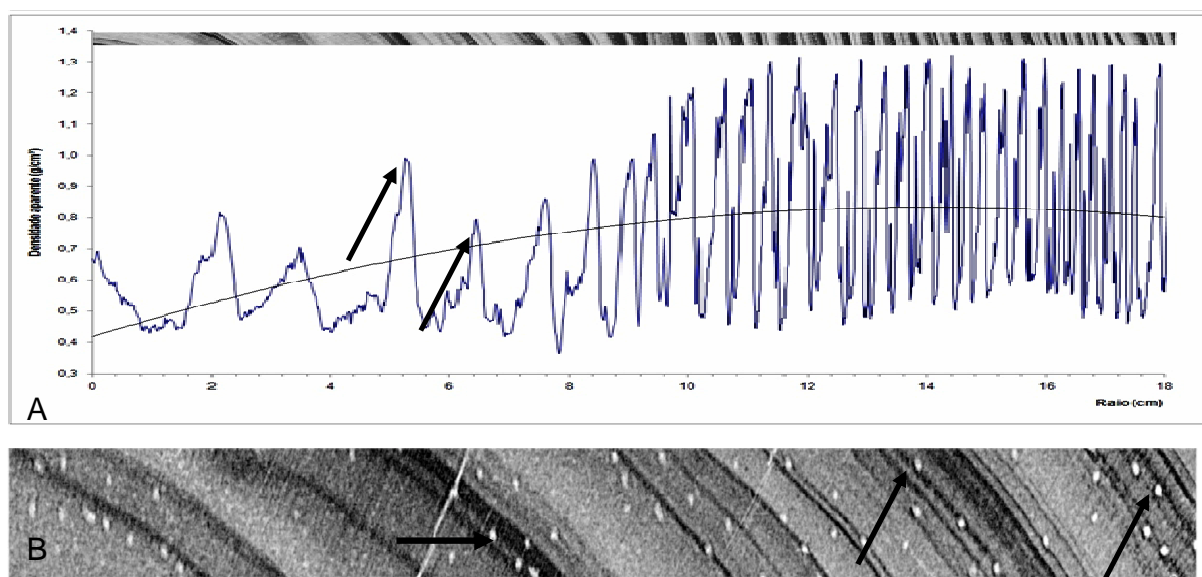


Figura 1 - Variação radial da densidade aparente e da estrutura anatômica do lenho. (A) Perfil de densidade intra e inter anéis de crescimento do lenho de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* por densitometria de raios X. (B) Lenho com anéis de crescimento e canais de resina (FERREIRA, 2009)

3.1.2 A espécie *Tectona grandis*

As árvores de *Tectona grandis* são nativas das florestas tropicais da Índia, Mianmar e Tailândia, ocorrendo desde o nível do mar até 1000 m de altitude, com precipitações anuais de 1200-2500 mm e temperatura média de 24°C. As árvores são decíduas, de grande porte, podendo alcançar, quando adultas, 1 m de diâmetro e 20-35 m de altura, com tronco retilíneo, seção circular; a casca é gretada, cinza-marrom, com 15 mm de espessura e conferindo resistência ao fogo. No Brasil, as plantações se concentram nas regiões Centro-oeste e Norte, nos municípios de

Cáceres e Alta Floresta (Estado do Mato Grosso) e de Dom Eliseu (Estado do Pará). Kaosa-Ard (1983) indicou que as árvores necessitam de um período de seca de 3-5 meses/ano para a formação de lenho de boa qualidade. As árvores adaptam-se a solos profundos, bem drenados, arejados e medianamente férteis.

A madeira das árvores de *Tectona grandis* apresenta vasta aplicação (móveis, esquadrias, pisos, decoração, construção naval, etc.), tendo valor no mercado internacional pela beleza e durabilidade. Nos países de ocorrência natural, o uso da madeira é abrangente (energia, caixotaria, escoramento, construção civil etc.) com peças de menor dimensão proveniente do desbaste das árvores (LORENZI et al., 2003; PIMENTEL et al., 2008).

As árvores de *Tectona grandis* produzem lenho de coloração marrom a amarelo pardacento, alburno claro; os anéis de crescimento são distintos, formados por lenho inicial/tardio; a madeira é estável e praticamente não empena, com baixa retratibilidade na secagem (CARDOSO, 1991). A densidade básica média do lenho de árvores de *Tectona grandis* na Índia é de 0,49-0,55 g/cm³ (SUDO, 1963; CHUDNOFF, 1984; LIMA et al., 2009). O tratamento preservativo é necessário para a madeira exposta ao tempo, com cerne possuindo polifenol (tectoquinona) que confere durabilidade natural. O alburno-cerne contém substância (caucho) que reduz a absorção de água e confere proteção aos ácidos, evitando a corrosão de peças metálicas (LAMPRECHT, 1990).

Jane (1956) e Cardoso (1991) ao descreveram as características anatômicas do lenho das árvores de *Tectona grandis*, indicou a formação de anéis de crescimento demarcados por parênquima marginal e anéis semi-porosos, com a formação de tiloses e de substância branca (fosfato de cálcio) no lume dos vasos. Outros autores, como Kribbs (1959), Freitas (1963) e Donaldson (1984) indicaram características anatômicas similares para a madeira da espécie.

No lenho das árvores de *Tectona grandis*, na estação favorável ao crescimento (disponibilidade de luz, precipitação, temperatura, etc) são formados os anéis de crescimento largos, podendo reduzir a sua durabilidade aos organismos xilófagos. O lenho inicial do anel de crescimento é formado no período vegetativo, com atividade cambial intensa e condições ambientais favoráveis, com vasos de maior diâmetro e fibras de parede fina e lume largo; o lenho tardio é formado no final do período vegetativo, quando as árvores diminuem suas atividades vitais, com condições ambientais desfavoráveis, com vasos de menor diâmetro e frequência, além de fibras de parede espessa e lume reduzido (WEAVER, 1993).

A alternância dos lenhos inicial e tardio pode ser analisada pela variação da frequência e do diâmetro tangencial dos vasos, sendo maior no lenho inicial e menor no tardio; a frequência de vasos é menor no lenho inicial e maior próxima ao tardio (SILVA, 2002). Oliveira (2011), caracterizando os anéis de crescimento de *Tectona grandis*, concluiu que o lenho inicial é formado por vasos de maior diâmetro e frequência e, no lenho tardio, de menor diâmetro e frequência, além da presença de faixas terminais de parênquima axial com uma coloração mais clara em relação às fibras (Figura 2A e 2B).

Os primeiros relatos de anéis de crescimento falsos no lenho das árvores de *Tectona grandis* foram reportados na literatura por Chowdhury (1939) e por Prys e Bhat (1998) ao relacionarem a formação dos anéis de crescimento e os fatores ambientais em Kerala, Índia.

Nas árvores de *Tectona grandis*, no período de dezembro-fevereiro (maior pluviosidade), observou-se maior atividade cambial, com as células cambiais com dimensões tangenciais aumentadas e paredes delgadas, no período de setembro-novembro (menor pluviosidade) ocorre menor atividade cambial, com encurtamento da parede tangencial e expansão da parede radial, com um pronunciado espessamento da parede, principalmente a radial (CARDOSO, 1991).

O lenho das árvores de *Tectona grandis* não é uniforme na direção medula-casca; os anéis de crescimento no lenho inicial têm menor massa específica, menor comprimento de fibra e maior ângulo microfibrilar; nos anéis de crescimento sucessivos ocorre aumento da massa específica e alterações da estrutura anatômica; nos primeiros anéis de crescimento a taxa de variação das propriedades do lenho é rápida, assumindo, gradualmente, as características da madeira adulta (BENDTSEN et al., 1986).

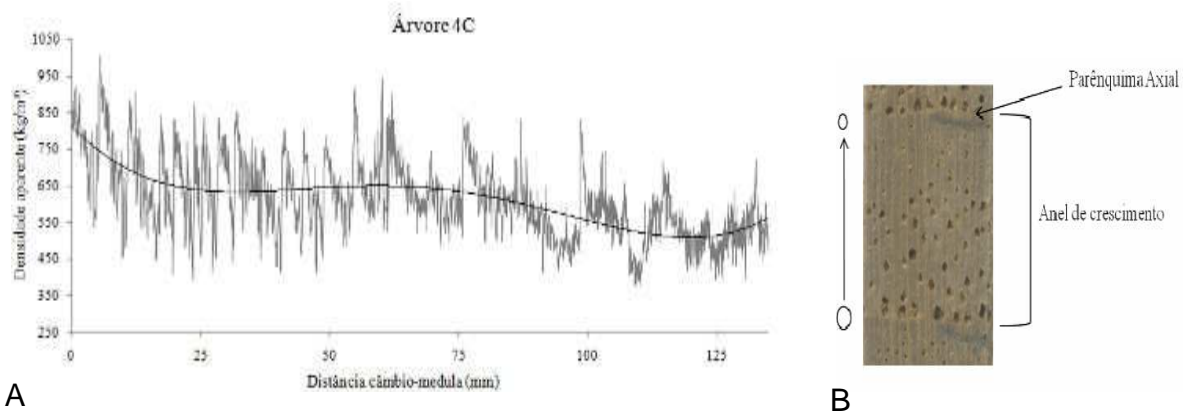


Figura 2 - Variação radial da densidade do lenho de árvores de *Tectona grandis*. (A) Perfil de densidade intra e inter anéis de crescimento do lenho de *Tectona grandis* por densitometria de raios X. (B) Detalhe do lenho com a delimitação de anel de crescimento (OLIVEIRA, 2011)

3.2 Caracterização do lenho das árvores por métodos não destrutivos

Ross et al. (1998) consideraram que a aplicação de métodos não destrutivos na avaliação do lenho mantém a integridade do tronco das árvores, não alterando as suas características anatômicas, físicas, químicas e mecânicas, bem como não interferem no seu uso. Os métodos não destrutivos são técnicas que permitem a identificação das propriedades da madeira, permitindo a verificação de descontinuidades ou de defeitos (ULIANA, 2010).

Diversos autores, como Calil Jr. e Miná (2003), Ross et al. (2004), Shimoyama (2005) e Pantoja (2006) destacaram as vantagens da utilização dos métodos não destrutivos na avaliação das propriedades da madeira, comparados aos convencionais, como o uso da peça de madeira testada, rapidez da aplicação, confiabilidade dos resultados, redução de perdas, classificação em classes de qualidade, detecção de defeitos internos e custos reduzidos.

Os métodos de análise do lenho não destrutivos podem ser invasivos (perfura-se o tronco das árvores para a retirada de amostras do seu lenho para análises) e não invasivos (não se retiram amostras do lenho, com as análises realizadas através do impacto de ferramentas ou pela fixação de pregos ou grampos no lenho das árvores ou das peças de madeira).

3.2.1 Aplicação do tomógrafo de impulso

A tomografia de impulso baseia-se na medição do tempo para a transmissão das ondas mecânicas através do lenho, entre os diferentes sensores fixados no tronco das árvores. Alguns equipamentos (ex.: Arbotom® e Picus® Sonic Tomography) determinam a velocidade das ondas mecânicas e geram uma imagem de diferentes tonalidades da seção transversal do lenho do tronco, através de software. Esta imagem da seção da estrutura interna transversal do lenho do tronco das árvores pode ser correlacionada com as suas propriedades físico-mecânicas, como densidade, teor de umidade e módulo de elasticidade. Possibilita, ainda, a determinação do cerne/alburno, madeira de reação, nós, lenho biodeteriorado e excentricidade da medula. A velocidade da onda depende do estado de sanidade do lenho; o sadio com maior velocidade e o lesionado (fratura, cavidade, podridão, etc.) com menor velocidade de propagação da onda mecânica (RINNTECH, 2005; BUCUR, 2006; PEREIRA *et al.*, 2007; PICUS, 2009).

Gilbert e Smiley (2004) utilizaram o tomógrafo de impulso na avaliação do lenho do tronco de árvores de *Quercus alba* e de *Carya* spp., apresentando alta correlação com os resultados de sua avaliação visual (3-8% de erro).

Deflorio et al. (2007) caracterizaram as fases (2º, 16º e 27º meses) após a inoculação de fungos de podridão no alburno no lenho de árvores de *Acer pseudoplatanus*, *Fagus sylvatica*, *Quercus robur*, verificando que as imagens tomográficas obtidas com o tomógrafo *Picus Sonic Tomography* detectaram deterioração avançada do alburno, pela diminuição da velocidade de onda mecânica.

Segundo Pereira (2009) a tomografia de impulso demonstrou ser uma ferramenta eficiente para estimar a densidade do lenho de árvores de *Caesalpinia echinata*, *Schizolobium parayba* e *Eucalyptus saligna*, quando relacionada com a densidade aparente obtida por densitometria de raios X.

Por outro lado, Rollo (2009) concluiu que os resultados da análise do lenho de árvores sadias por tomografia de impulso foram melhores, em relação ao uso do resistógrafo e Almodei et al. (2010) verificaram que a tomografia de impulso permitiu diagnosticar regiões deterioradas do lenho de *Tectona grandis*.

A análise do lenho de árvores vivas de *Manilkara huberi* por Uliana (2010) indicou ausência de correlação entre a imagem da seção transversal do lenho do tronco pelos valores de velocidade de onda mecânica do tomógrafo de impulso com a densidade aparente do lenho fornecida pela densitometria de raios X e pelo método gravimétrico.

3.3 Caracterização das propriedades físicas do lenho das árvores

3.3.1 Densidade aparente do lenho pela densitometria de raios X

Desde a década de 1960 têm sido desenvolvidos métodos de determinação da densidade do lenho por técnicas que utilizam a radiação, como a microdensitometria de raios X, por Polge, na França: amostras do lenho + cunha de calibração são dispostas sob filmes radiográficos e, em seguida, sob fonte de raios X; após a revelação, o filme radiográfico é analisado em microdensitômetro, com os valores de densidade ótica transformados em densidade aparente do lenho (POLGE 1965, 1966; HUGHES e SARDINHA, 1975).

No Brasil, a aplicação da técnica de atenuação dos raios X na análise de madeiras foi implantada por Amaral (1994) e Amaral e Tomazello Filho (1998), sendo considerada importante ferramenta na avaliação detalhada do efeito dos tratamentos silviculturais na qualidade do lenho, bem como na caracterização tecnológica da madeira. A técnica de densitometria de raios X possibilita determinar a produção anual da biomassa de lenho e a relação com a sua estrutura anatômica (MOTHE et al., 1998).

A metodologia de densitometria de raios X aplicada no estudo do lenho das árvores apresenta como, uma das principais vantagens, o registro radiográfico permanente das amostras do lenho e a alta sensibilidade e resolução, aliadas à velocidade de processamento dos dados de densidade e a interpretação através dos perfis radiais de densidade (SILVA e LOUSADA, 2001).

Através da técnica de densitometria de raios X, podem ser analisados os anéis de crescimento e obtidos os valores de densidade aparente do lenho em intervalos micrométricos – variações intra e inter-anéis de crescimento – em comparação com os métodos gravimétricos. A análise dos parâmetros densitométricos do lenho das árvores pode ser aplicada nos estudos da relação da genética, fertilização, irrigação, desrama, ataque de fungos e insetos, fatores climáticos e do solo, com a estrutura e qualidade da madeira (TOMAZELLO FILHO et al., 2005).

A técnica de microdensitometria por raios X, aplicada para o lenho de árvores de *Quercus faginea* indicou uma alta variação da densidade no sentido radial do tronco (19,2-30,4%), baixa variação no sentido axial (5,8-6,8%) e valores médios de densidade de $0,86 \text{ g.cm}^{-3}$, considerada alta (LOUZADA et al., 2010).

Os perfis de densidade aparente do lenho de árvores de *Eucalyptus grandis*, de 5 anos, por microdensitometria de raios X, evidenciaram um modelo de variação radial caracterizado por valores de $0,50\text{-}0,65 \text{ g/cm}^3$, na região da medula, de $0,40\text{-}0,50 \text{ g}$ a 50% do raio e de $0,65\text{-}0,80 \text{ g/cm}^3$ próximo à região da casca (SETTE JÚNIOR et al., 2009; SETTE JÚNIOR, 2010).

Alzate (2004) caracterizou a variação radial da densidade aparente do lenho de árvores de *Eucalyptus grandis* com 8 anos, pela densitometria de raios X, obtendo uma densidade aparente média de $0,46 \text{ g/cm}^3$ e um perfil densitométrico caracterizado pelo incremento da densidade no sentido radial.

Silva et al. (2004) obtiveram valores crescentes de densidade aparente do lenho de árvores de *Eucalyptus grandis*, em relação à idade e variação radial, com valores de 0,46 e de 0,63 g/cm³, nas idades de 10 e 20 anos, respectivamente.

A variação radial da densidade aparente do lenho de árvores do híbrido de *Eucalyptus grandis x urophylla*, com 7 anos de idade, foi analisada por Tomazello Filho (2006) pela técnica de densitometria de raios X, obtendo um perfil radial de densidade aparente do lenho característico para o gênero e média de 0,65 g/cm³.

Benjamin (2006) aplicou a mesma técnica na análise da variação da densidade aparente do lenho de árvores de *Eucalyptus grandis*, com 28 anos de idade, confirmando o modelo radial e variação e 0,70 g/cm³ de densidade aparente média.

A metodologia de densitometria de raios X permite, da mesma forma, avaliar o efeito da deterioração provocada no lenho das árvores de eucalipto por fungos de podridão branca, além de detectar o limite do cerne-alburno e determinar o efeito do manejo florestal nas propriedades do lenho (TOMAZELLO FILHO et al., 2008).

Com árvores de *Pinus sylvestris*, Schweingruber (1996) e Vaganov et al. (2006) desenvolveram detalhados estudos aplicando a metodologia de densitometria de raios X, construindo os perfis de variação de densidade aparente do lenho de árvores de diferentes procedências na Europa, bem como comparando as variações de densidade dentro e entre anéis de crescimento para a aplicação em dendrocronologia e dendroecologia.

Ferreira et al. (2009) analisaram o lenho de árvores de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, por densitometria de raios X, obtendo os perfis radiais de variação da densidade aparente do lenho e dos anéis de crescimento, bem como a demarcação dos seus limites, além dos valores médios de densidade do lenho.

A aplicação da densitometria de raios X no lenho de árvores de *Araucaria columnaris*, de 35 anos, permitiu delimitar os anéis de crescimento, sendo complementar à análise macroscópica; observou-se tendência decrescente da densidade aparente média dos anéis de crescimento próximos à região da medula, com aumento seguido de estabilização no lenho adulto (MEDEIROS, 2005).

Alvarado et al. (2010) analisaram as amostras do lenho de árvores de *Swietenia macrophylla* pela técnica de densitometria de raios X, identificando e demarcando a largura dos

anéis de crescimento, diferenciando o cerne-alburno e variações da densidade intra e inter anéis de crescimento.

Nos últimos anos, têm sido utilizados equipamentos, como o QTRS-01X “Tree Ring Scanner”, que permite a determinação da densidade aparente do lenho e dos anéis de crescimento, através da passagem de feixe colimado de raios X, dispensando o uso de filmes radiográficos. Os equipamentos propiciam a otimização do tempo, aumento da velocidade de processamento das análises e da coleta dos dados de densidade aparente com excelente resolução, permitindo arquivar os dados de densidade das amostras do lenho analisadas.

As características e a densidade do lenho dos anéis de crescimento de árvores de 7 espécies de coníferas, utilizando o equipamento QTRS-01X, foram correlacionadas com a resistência à compressão e módulo de elasticidade dinâmico por Lin et al. (2007), permitindo a demarcação, a determinação da porcentagem e da densidade máxima e mínima do lenho tardio e inicial.

Costa et al. (2010) compararam os perfis radiais de densidade aparente do lenho de árvores de *Cedrela odorata* pelas metodologias de densitometria de raios X e pelo equipamento QTRS-01X, não detectando diferenças nos perfis radiais e na densidade aparente do lenho, indicando as vantagens da leitura direta nos processos de calibração, leitura e no processamento dos dados.

Pereira (2009) utilizando as amostras diametraais do lenho de árvores de *Schizolobium parahyba*, *Eucalyptus saligna* e *Caesalpinia echinata* determinou os perfis de densidade aparente do lenho por densitometria de raios X, obtendo boa correlação quando em comparação com os valores de propagação da velocidade de onda mecânica obtidos pelo tomógrafo de impulso.

O lenho de árvores de *Tectona grandis*, analisado por densitometria de raios X, possibilitou a construção do perfil radial de densidade aparente, com valores crescentes no sentido medula-casca, característico da espécie, bem como a delimitação, contagem e mensuração da largura dos anéis de crescimento (MIQUELONI et al., 2007).

Moya et. al (2009) avaliando a densidade aparente por densitometria de raios X, em árvores de plantações de *Tectona grandis*, na Costa Rica, com 13 anos de idade, em diferentes climas (tropical úmido e seco) e solos (muito e pouco fértil), detectaram a variação de densidade intra-anéis de crescimento nos sítios analisados.

Na análise da variação da densidade do lenho de árvores de *Tectona grandis*, Oliveira (2011) utilizou equipamento QDP-01X e verificou, através da densitometria de raios X, a variação radial dos anéis de crescimento e a qualidade do lenho com e sem extrativos.

3.3.2 Densidade básica do lenho pelo método do máximo teor de umidade

A densidade básica do lenho corresponde à relação de sua massa absolutamente seca e o volume completamente saturado, sendo expressa em g/cm^3 ou kg/cm^3 , constituindo-se em um dos principais parâmetros de avaliação da qualidade da madeira, correlacionando-se com as suas demais propriedades. A densidade básica é considerada como característica complexa resultante da combinação dos caracteres anatômicos, físicos e químicos da madeira (CHIMELO, 1980; VITAL, 1984; BUSNARDO et al., 1987).

A variação da densidade básica do lenho das árvores está relacionada com parâmetros anatômicos (espessura da parede celular, frequência de vasos, parênquima e dimensões das fibras), químicos, condições edafo-climáticas e manejo silvicultural. Outras variáveis indicadas na literatura referem-se à taxa de crescimento das árvores, espaçamento, idade, procedência e variação longitudinal-radial do tronco. (TOMAZELLO FILHO, 1985; SOUZA et al. 1986; VALE et al. 1995; VIGNERON et al. 1995; BOUVET et al. 1999 apud VIANA, 2008).

A densidade básica da madeira pode ser determinada através de métodos denominados de (i) balança hidrostática e (ii) máximo teor de umidade. Nas pesquisas iniciais e pioneiras, Smith (1954, 1955) e Scaramuzzi (1966) aplicaram o método do máximo teor de umidade para a determinação da densidade básica da madeira, com 2 pesagens, a da amostra do lenho completamente saturada de água, e da amostra seca em estufa ($103 \pm 2^\circ\text{C}$). Stamm (1964) indica que as possíveis incorreções referem-se à densidade da substância madeira (utilizando o valor 1,53, embora varie de 1,50-1,55 g/cm^3) e a obrigatoriedade da completa saturação do lenho em água, principalmente, em madeira pouco permeável. Vintila (1939) afirmou que a saturação máxima com água pode ser atingida com amostras de madeira de 200-1.000 mm^3 de volume, sendo, de acordo com Smith (1955) satisfatório para amostras de madeira com 100-1.600 mm^3 .

A densidade básica de cavacos de madeira de pinus tropicais determinada pelo método do máximo teor de umidade e da balança hidrostática não mostrou diferença significativa (FOELKEL et al., 1971).

Amaral et al. (1977) estudaram a variação da densidade básica do lenho de árvores de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* e de outras espécies, pelo método de máximo teor de umidade, estimando o valor da densidade básica média através de equações lineares simples em relação ao DAP do tronco.

A eficiência e aplicabilidade da determinação da densidade básica do lenho de árvores de *Pinus elliottii*, *P. taeda*, *Eucalyptus grandis* e *E. dunnii*, pelo método de máximo teor de umidade, exige a completa saturação das amostras do lenho, sendo viável para a madeira permeável do alburno; não são aplicáveis para a madeira impermeável de cerne (PEREIRA, 1997).

3.3.3 Distribuição do teor de umidade do lenho de árvores vivas

O lenho de árvores recém-cortadas apresenta alto teor de umidade que diminui quando as toras são expostas para a secagem. No desdobro do lenho, o teor de umidade das peças de madeira continua a diminuir com maior ou menor velocidade, dependendo da espécie, condições ambientais, dimensões e empilhamento. A secagem da madeira resulta em vantagem, como a redução da massa, aumento da resistência aos fungos manchadores e apodrecedores, melhoria das propriedades mecânicas, aumento da resistência das uniões e juntas de pregos e parafusos, melhoria da colagem, usinagem, acabamento, tratamento preservativo, resistência elétrica, redução de empenamentos, deformações e rachaduras. O beneficiamento final das peças de madeira deve ser efetuado, no entanto, quando o teor de umidade for menor que 30%, ou seja, teor de umidade que indica o ponto de saturação das fibras (PONCE e WATAI, 1985; GALVÃO e JANKOWSKI, 1985).

A determinação da variação do teor de umidade no tronco das árvores e peças de madeira é importante para a sua correta utilização, na seleção de peças com teor uniforme de umidade, facilitando a secagem e minimizando os defeitos. A remoção da umidade da madeira gera custo no produto final, com a secagem natural e artificial exigindo um tempo mínimo para atingir os valores adequados de umidade (OLIVEIRA et al., 2005a). Em árvores vivas e recém-cortadas o teor de umidade do lenho varia de 30 a 200% entre espécies e no tronco da própria árvore (SEVERO, 1998).

Em árvores de *Acacia mangium*, *A. auriculiformis* e seus híbridos o maior teor de umidade foi de 250%, obtido no interior do seu lenho, no entorno da região da medula. O lenho de árvores de *E. deglupta* de florestas naturais e plantadas, apresenta diferença do teor umidade, com variações de 82 e 113%, respectivamente (YAMAMOTO et al., 2003).

De acordo com Forest Products Laboratory (1987), *apud* Oliveira et al. (2005b), o teor de umidade do lenho das árvores pode variar de 31-249% no cerne e de 40-213% no alborno. No lenho de árvores de *Xylopia sericea*, Oliveira et al. (1990) verificaram 74% de teor de umidade, com variação no sentido medula-casca, sendo a região do lenho de maior umidade. No lenho de árvores de *Eucalyptus maculata*, *E. citriodora* e *E. grandis*, o teor de umidade variou de 50-70, 46-80 e de 50-133%, respectivamente (CARMO, 1996). No tronco de árvores de sete espécies de eucalipto, Oliveira et al. (2005b) observaram que um maior teor de umidade no lenho da base do tronco, diminuindo até 50% de sua altura, aumentando a partir do 1/3 superior e no topo com valores próximos aos da base.

No lenho de espécies de árvores de pinus com óleo-resina, Klock (2000) inferiu sobre o efeito de substâncias voláteis (ex.: terpenos) na determinação do teor de umidade, sendo que os diterpenos hidrofóbicos diminuem o teor de umidade no lenho.

3.4 Relação entre as propriedades do lenho das árvores: velocidade de onda mecânica, densidade e teor de umidade

As ondas mecânicas que se propagam através do lenho das árvores caracterizam-se pela velocidade, comprimento e frequência. O aumento da frequência é proporcional à diminuição do comprimento da onda (PEREIRA, 2009). A velocidade de propagação da onda é uma grandeza física que expressa o comportamento das variáveis (Equação 1):

$$V = \lambda \times f \dots\dots\dots(1)$$

Onde, V= velocidade de propagação da onda (m/s); λ = comprimento de onda; f= frequência da onda (número de oscilações/segundo).

A equação (1) expressa a velocidade de ondas mecânicas, através da relação das características do material a partir da 2ª Lei de Newton (força é igual à massa x aceleração) e de Hooke (definiu o módulo de elasticidade). A velocidade de propagação de uma onda em um meio é constante, dependendo das suas propriedades. Como o lenho apresenta frequência e

comprimento de onda constantes propôs-se então a fórmula (Equação 2) para o cálculo da velocidade de onda mecânica de acordo com as propriedades da madeira de cada espécie:

$$V = \sqrt{\frac{E_i}{D}} \dots\dots\dots(2)$$

Onde, V= velocidade de propagação da onda mecânica (m/s); E_i = módulo de elasticidade da madeira (N/m^2); D= densidade (kg/m^3); i=direção de propagação da onda (long., radial ou tang.)

A velocidade de propagação da onda mecânica é inversamente proporcional à raiz quadrada da densidade do lenho das árvores e, segundo Rinntech (2005) e Pereira (2009), quanto maior a densidade do lenho, maior será a velocidade de propagação das ondas mecânicas.

Calegari et al. (2008) afirmaram que a velocidade de propagação das ondas mecânicas para a avaliação da qualidade da madeira não deve considerar apenas a função da raiz quadrada da razão entre o módulo de elasticidade dinâmico e a massa específica do material. Esclarecem que muitos fatores influenciam a propagação das ondas, como as características anatômicas, teor de umidade, massa específica, dimensão das amostras, inclinação e distorção da grã e nós da madeira, além do tipo de transdutores/sensores. Detectaram um aumento proporcional da velocidade ultrassônica com o aumento da massa específica da madeira de pinus, sendo o inverso para a madeira de eucalipto. Shimoyama (2005) indica que madeira de maior massa específica apresenta maior teor de substância madeira e, portanto, menor espaço vazio propiciando um aumento da velocidade de propagação das ondas.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Caracterização das plantações de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* e de *Tectona grandis*

As árvores de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* foram selecionadas de uma parcela experimental implantada no ano de 1992, no Campus Luiz de Queiroz, da ESALQ/USP. De acordo com os registros, mudas da espécie, com 4 meses de idade e 25-35 cm de altura, foram plantadas em espaçamento de 3 x 3 m, em uma área de 1 hectare. Nessa plantação não foi aplicado o manejo florestal, sendo que algumas árvores de pinus foram submetidas à resinagem e, desta forma, não selecionadas no processo de amostragem.

As árvores de *Tectona grandis* foram selecionadas de uma parcela experimental de 2,8 hectares instalada em fevereiro de 1959, no Campus Luiz de Queiroz, da ESALQ/USP. As plantas foram produzidas em viveiro florestal, a partir de sementes coletadas de árvores adultas na Usina Tamoio, no município de Araraquara (SP) e plantadas 552 mudas, com 30 cm de altura média, no espaçamento de 3 x 1,5 m (CARDOSO, 1991). A parcela experimental foi submetida à prática de desbaste em diferentes períodos sendo, atualmente, constituída por 180 árvores.

4.2 Caracterização das áreas experimentais

As áreas experimentais localizam-se nas coordenadas geográficas de 22° 42' de latitude S, 47° 37' de longitude O e 560 m de altitude (Figura 3). A declividade é suave (< 10%) e o solo é classificado como terra roxa eutrófica, estruturada e de textura argilosa (RANZANI *et al.*, 1966). A região é caracterizada pela estação de verão chuvoso (média de dezembro a março de 182 mm) e de inverno seco (média de junho a outubro de 40 mm) e anual de 1200 a 1300 mm. A temperatura média máxima é superior à 23°C e a mínima inferior à 18 °C. O balanço hídrico indica um período seco de abril a outubro/novembro com déficit hídrico anual de 70,3 mm (GALVANI, 2008) (Figura 4).

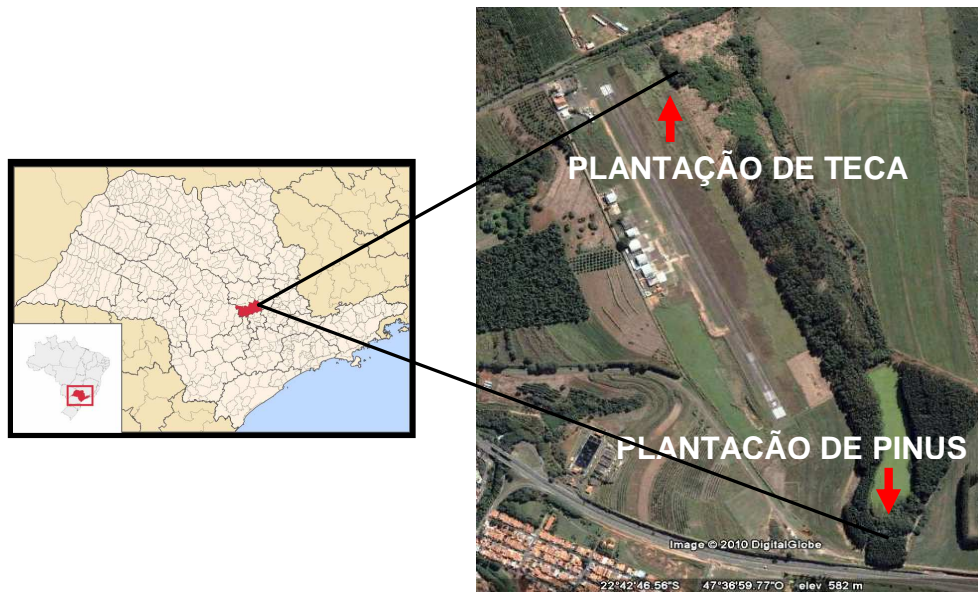


Figura 3 - Localização do município de Piracicaba no estado de São Paulo e indicação das plantações de *Tectona grandis* e de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* no Campus Luiz de Queiroz, da ESALQ/USP

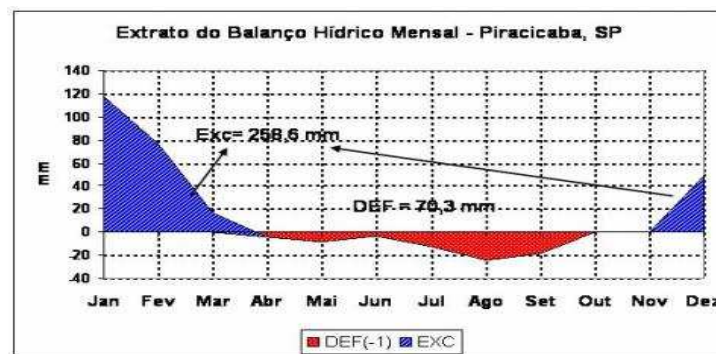


Figura 4 - Balanço hídrico mensal do município de Piracicaba, SP. (Galvani, 2008)

4.3 Seleção e amostragem das árvores de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* e de *Tectona grandis*

O DAP do tronco das árvores das parcelas experimentais foi mensurado, com variação de 14-30 cm para *Pinus caribaea* var. *hondurensis* e de 14-43 cm para *Tectona grandis*. Através dos resultados do inventário florestal, foram selecionadas 18 árvores para cada espécie. Na seleção das árvores foram considerados o DAP do tronco com 14-26 cm nas duas espécies, além da ausência de sintomas de pragas e de doenças, evitando-se as árvores localizadas na bordadura das parcelas.

4.4 Avaliação das propriedades do lenho das árvores de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* e de *Tectona grandis*

4.4.1 Caracterização macroscópica do lenho e dos anéis de crescimento

Para a caracterização da estrutura anatômica macroscópica do lenho e dos anéis de crescimento foram extraídas amostras diametrais do lenho no DAP do tronco das 18 árvores de cada espécie com sonda de Pressler. As amostras do lenho foram acondicionadas em tubos plásticos e, em condições de laboratório, foram coladas em suportes de madeira de acordo com a posição original no tronco das árvores. A seção transversal foi polida com lixas de diferentes granulometrias contrastando a estrutura anatômica macroscópica e os anéis de crescimento do lenho (ALVARADO *et al.*, 2010).

4.4.2 Avaliação das propriedades do lenho do tronco das árvores em pé por tomografia de impulso

Na avaliação do lenho do tronco das árvores foi utilizado o equipamento de tomografia de impulso marca ARBOTOM®, modelo 1.73, da RINNTECH®. O equipamento determina a velocidade das ondas mecânicas que percorrem o lenho das árvores, através de uma fonte de emissão e de recepção de sensores instalados no tronco das árvores. Os valores de velocidade de onda mecânica são expressos através de uma imagem da seção transversal do tronco com diferentes colorações. Para a avaliação do lenho do tronco das árvores foram fixados 11 pregos metálicos para todas as árvores selecionadas independente do diâmetro, a 2 cm de profundidade, na altura do seu DAP, em pontos equidistantes considerando o seu perímetro. Nos pregos metálicos foram acoplados os sensores (numerados e dispostos no sentido horário) conectados entre si por um cabo e uma bateria interligada ao computador portátil (Figura 5A). Com um martelo, em cada sensor, foram realizadas 5 batidas, induzindo a formação de onda mecânica através do lenho do tronco das árvores, captadas pelos demais sensores. Quando a porcentagem de erro da matriz delta do software atingiu valor acima de 10% aumentou-se o número de batidas (leituras) com o martelo. O cálculo da velocidade da onda que atinge os sensores é feito pelo software ARBOTOM®, gerando uma imagem tomográfica codificada por cores da seção transversal do tronco.

Análise dos resultados e confecção dos gráficos de velocidade de onda no perfil radial: utilizou-se o modelo de cor “rainbow” para as imagens, pela maior variedade de cores disponíveis no software com resolução de superfície em duas dimensões (comprimento e largura) a cada milímetro. Os tons violeta, vermelho, laranja e amarelo indicam, em escala ascendente, menor velocidade de propagação da onda mecânica; por outro lado, as tonalidades azul e verde representam maior velocidade de propagação da onda mecânica. Para cada imagem tomográfica da seção transversal do lenho das árvores foi selecionada uma região diametral (casca-casca) contendo a maior variedade de cores, evidenciando a faixa de pixels selecionada para a construção do perfil radial (Figura 5B). A faixa da região do lenho selecionada compreendeu a leitura dos sensores 11-5 e 7-2, pois era a faixa que compreendia a maior variedade de tonalidades, sendo analisada por uma linha de pixels com o software Adobe Photoshop, reconhecendo-se os valores RGB (*red, green, blue*) de cada pixel. Em seguida, a velocidade de onda mecânica foi associada a cada valor de RGB, com o comportamento da velocidade de onda, em relação às cores da imagem, analisado segundo Rollo (2009).

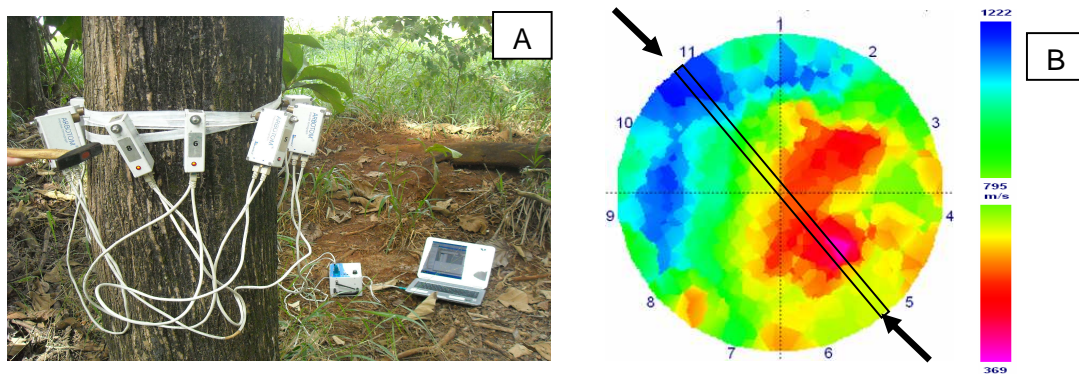


Figura 5 - Utilização do tomógrafo de impulso em árvore de *Tectona grandis*. (A) sensores instalados no tronco da árvore, conectados entre si por um cabo e a uma bateria interligada ao computador; (B) Imagem da seção transversal do lenho, no modelo “rainbow”, com a indicação da faixa do lenho selecionada e a escala de cores

4.4.3 Avaliação das propriedades físicas do lenho extraído por método não destrutivo do tronco das árvores

4.4.3.1 Avaliação da densidade aparente do lenho por densitometria de raios X

Extração e preparação das amostras do lenho do tronco das árvores: com a sonda de Pressler foram extraídas amostras diametraes do lenho, com 5 mm de diâmetro, do DAP do tronco das árvores de cada espécie, compreendendo a faixa selecionada pela imagem tomográfica (Figura

5B). As amostras do lenho foram coladas em suporte de madeira e sua seção transversal foi cortada em equipamento de dupla-serra circular paralela, com 2 mm de espessura (Figuras 6A, 6B, 6C e 6D). As amostras do lenho foram acondicionadas em sala de climatização (20°C, 60% UR, 24 h) (AMARAL e TOMAZELLO FILHO, 1998).

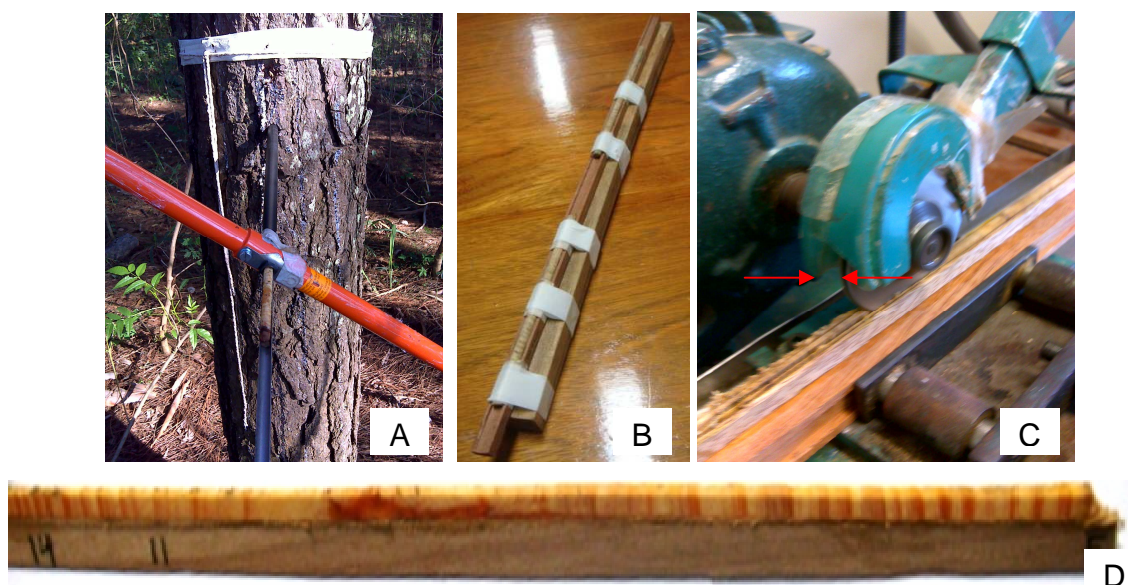


Figura 6 - Extração das amostras do lenho em árvore de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. (A) extração de amostra do lenho com sonda de Pressler; (B) colagem da amostra do lenho em suporte de madeira; (C) corte das amostras do lenho em equipamento de dupla serra; (D) amostra do lenho com de 2 mm de espessura

Descrição do equipamento e princípio de funcionamento: o perfil de densidade do lenho foi obtido no equipamento marca QTRS-01X, da Quintek Measurement Systems, EUA (Figura 7A). As amostras do lenho das duas espécies (12% umidade) foram encaixadas no suporte metálico e transferidas para um compartimento interno blindado do equipamento, seguindo-se a sua calibração e o escaneamento (varredura) radial contínuo por um feixe de raios X colimado (Figuras 7B e 7C). Os valores de raios X que atravessam a amostra do lenho são transformados em densidade aparente através do software QMS. Os valores pontuais de densidade que compõem o perfil radial de densidade aparente do lenho são observados na tela do monitor, simultaneamente à imagem da seção transversal da amostra do lenho (QMS, 1999) (Figuras 7D).

Montagem do perfil radial de densidade aparente do lenho: os valores radiais de densidade aparente do lenho obtidos pelo software QMS originam um arquivo DAT (relatório da análise com os valores pontuais de densidade aparente do lenho a cada 40 μm). O arquivo DAN é lido pelo software Excel, construindo-se os perfis radiais de densidade aparente do lenho das árvores (QMS, 1999) (Figura 7 E).

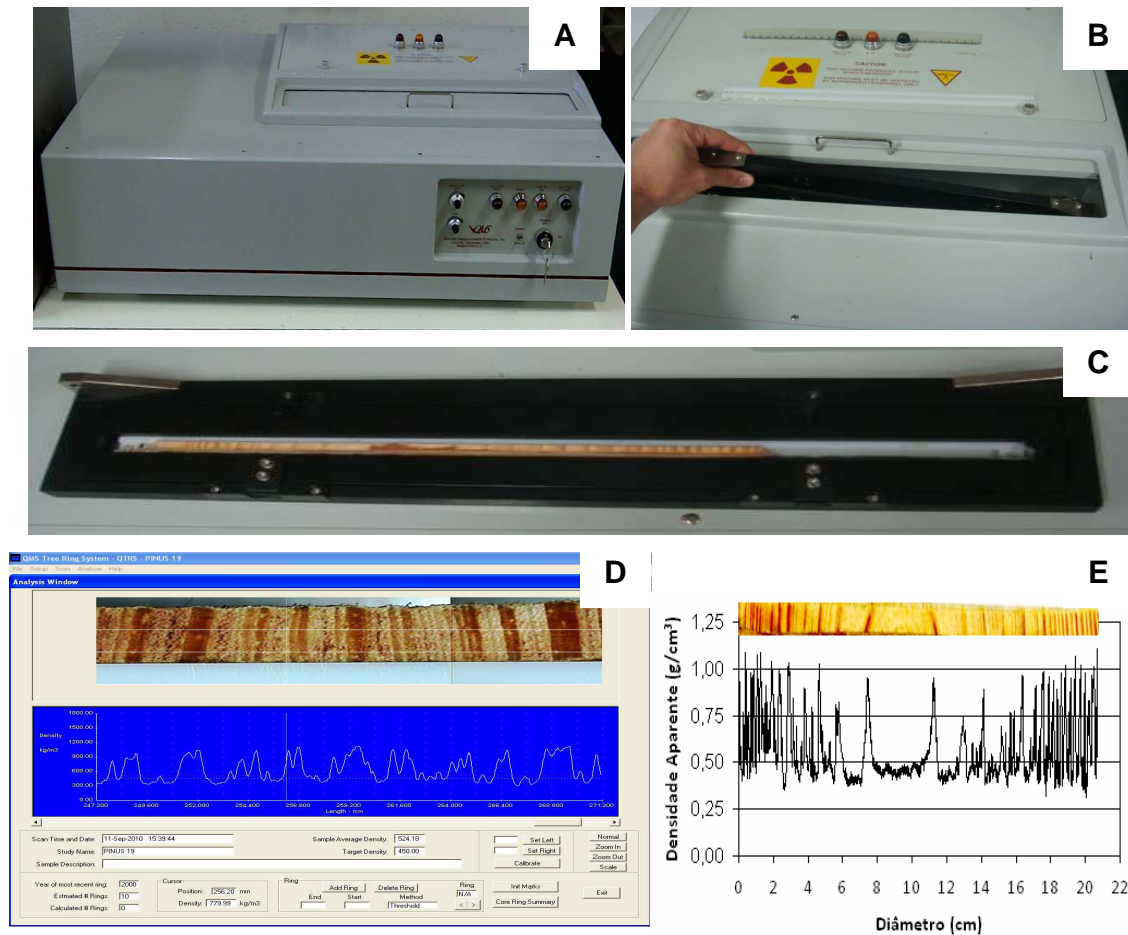


Figura 7 - Obtenção dos perfis de densidade do lenho de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. (A) equipamento de raios X QTRS-01X; (B, C) suporte metálico e encaixe com a amostra do lenho no compartimento; (D) seção transversal do lenho e perfil de densidade aparente no monitor; (E) amostra do lenho e perfil de densidade aparente

4.4.3.2 Avaliação da densidade básica do lenho pelo máximo teor de umidade

Com uma sonda de Pressler foram extraídas amostras diametraais do lenho (5 mm, diâmetro) do DAP do tronco das árvores, na faixa selecionada pela imagem tomográfica (Figura 5B). As amostras do lenho foram seccionadas em segmentos (1 cm de comprimento), imersos em água até a saturação (com bomba de vácuo), avaliada a sua massa saturada, após a remoção da água superficial; em estufa ($103 \pm 2^\circ\text{C}$) as amostras foram secas até peso constante e obtida a massa seca (Figura 8). A densidade básica do lenho foi determinada através do método do máximo teor de umidade, através da equação (3):

$$DB = \frac{m_s}{m_{SAT} - (0,346xm_s)} \dots\dots\dots(3)$$

Onde: DB = densidade básica (g/cm^3), m_s = massa seca (g), m_{SAT} = massa saturada em água (g)

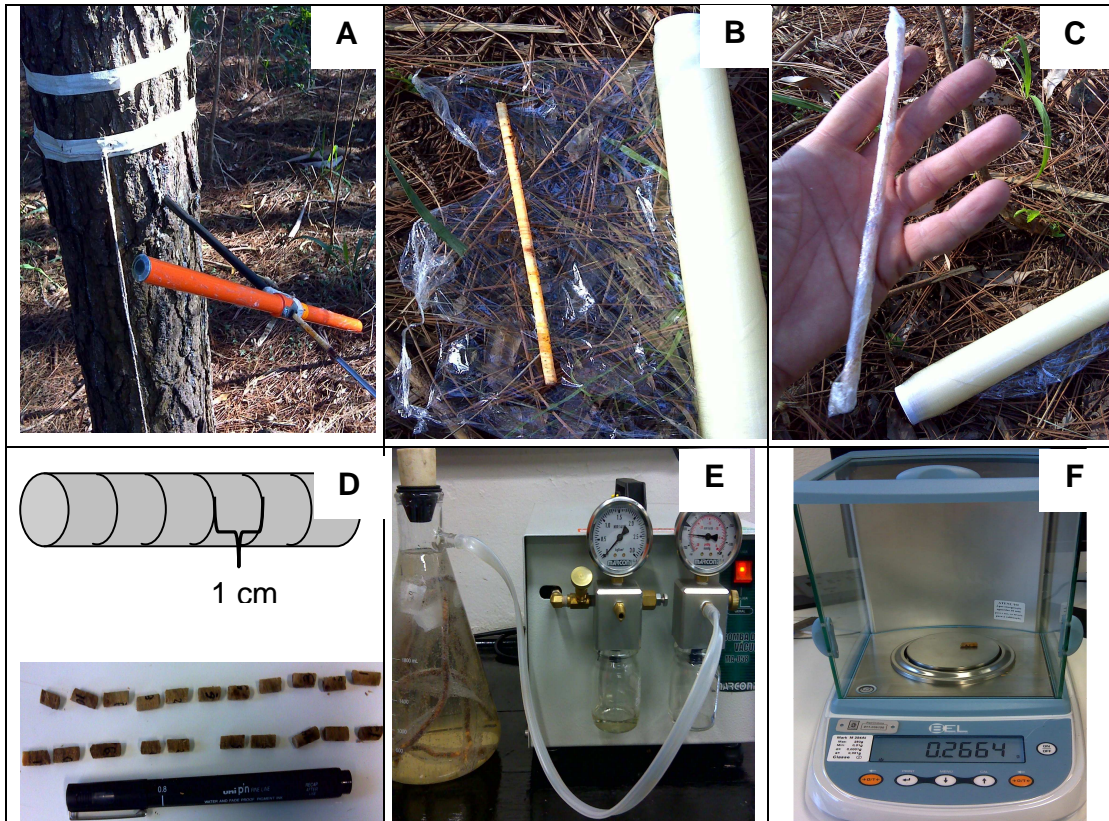


Figura 8 - Determinação da densidade básica e teor de umidade no lenho. (A) extração do lenho com a sonda de Pressler; (B, C) envolvimento das amostras em filme e tubo plástico; (D, E) amostras do lenho seccionadas e saturadas em bomba de vácuo; (F) determinação da massa seca e saturada do lenho

4.4.3.3 Avaliação do teor de umidade do lenho das árvores

As amostras do lenho extraídas do tronco das árvores com a sonda de Pressler, para a determinação da densidade básica, foram envolvidas em filme plástico e transferidas para tubos plásticos para a manutenção da umidade. As amostras do lenho foram seccionadas em segmentos (1 cm de comprimento) e determinada a massa úmida em balança digital. Os segmentos do lenho foram secos em estufa ($103 \pm 2^\circ\text{C}$) até massa constante e determinada a massa seca, através da equação (4):

$$U = \left(\frac{m_u}{m_s} - 1 \right) \times 100 \dots \dots \dots (4)$$

Onde: U= teor de umidade (%), m_u = massa úmida(g); m_s = massa seca (g) do lenho.

4.5 Análise estatística dos resultados

Para a análise estatística das variáveis do lenho das árvores de *Pinus caribaea var. hondurensis* e *Tectona grandis*: velocidade de onda mecânica, densidade aparente, densidade básica, teor de umidade, foi utilizado o programa SAS (SAS INSTITUTE, 1997) e SPSS (“software package social science”). O teste de Scott-Knott (95% de probabilidade) foi utilizado face ao grande número de tratamentos, com o objetivo de separar os grupos de médias sem ambiguidade. Na correlação dos valores de velocidade de onda e das propriedades físicas do lenho das árvores foi aplicada a metodologia sugerida por Pereira et al. (2007): os valores da velocidade de onda e densidade aparente de cada 1 cm das amostras do lenho foram correlacionados entre si; para as demais variáveis utilizaram-se os dados de cada amostra do lenho. Como parâmetro estatístico foi utilizado o coeficiente de correlação de Pearson, seguido da probabilidade do teste t.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Propriedades do lenho do tronco das árvores em pé de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*

5.1.1 Caracterização macroscópica do lenho e dos anéis de crescimento

A partir do exame da seção transversal das amostras do lenho das árvores de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* foi feita a caracterização macroscópica do lenho e dos anéis de crescimento. O lenho possui cerne e albarno indistintos, coloração branco-amarelado; os anéis de crescimento são distintos, formado por faixas de cor marrom escura, com transição abrupta entre os lenhos tardio e inicial da estação de crescimento seguinte. Os canais de resina longitudinais são visíveis, sendo mais frequentes no lenho tardio dos anéis de crescimento. A estrutura anatômica descrita para o lenho das árvores de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* é coincidente com a apresentada na literatura por Ferreira (2009) e Ferreira et al. (2009). Os anéis de crescimento próximos à medula são mais largos e com lenho inicial de maior espessura em relação ao lenho tardio (Posição 1); a largura dos anéis de crescimento diminui, com lenho inicial e tardio de espessura similar a 50% do raio (Posição 2); os anéis de crescimento mantêm aproximadamente a mesma largura, com lenho inicial de menor espessura em relação ao lenho tardio, próximo à casca (Posição 3) (Figura 9).

A delimitação do lenho tardio, pela coloração mais escura, possibilitou a contagem dos anéis de crescimento anuais, confirmando a idade de 18 anos das árvores de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. Da mesma forma, foi possível detectar os anéis de crescimento falsos, sendo mais frequentes na região externa do lenho das árvores, associados com a alta variabilidade climática, especialmente, a precipitação pluviométrica, com períodos de seca denominados de veranico, na primavera-verão (FERREIRA et al., 2009).

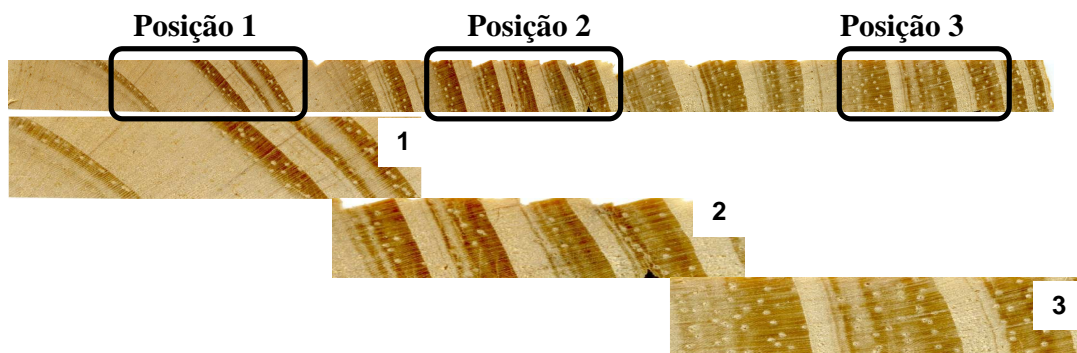


Figura 9 - Seção transversal do lenho do tronco da árvore de *P. caribaea* var. *hondurensis* evidenciando os anéis de crescimento nas regiões próxima à medula (1), intermediária (2) e à casca (3), (10X, Figuras 1, 2 e 3)

5.1.2 Propriedades do lenho do tronco das árvores por tomografia de impulso

A aplicação do tomógrafo de impulso como método não destrutivo, a partir de imagens tomográficas, possibilitou a reconstrução de toda a seção transversal do lenho do tronco na altura do DAP. As imagens geradas no campo permitiram a análise imediata do lenho, sendo o equipamento de fácil manuseio e interpretação dos resultados por meio da diferença de tonalidade indicando regiões sadias (coloração azul) e afetadas (coloração vermelho/violeta).

As imagens tomográficas da seção transversal do lenho do tronco das 18 árvores de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, obtidas através do tomógrafo de impulso (Figura 10) foram caracterizadas, de modo geral, pelas colorações azulada (região interna) e esverdeada (região externa), indicativas da maior e menor velocidade das ondas mecânicas. As imagens tomográficas da seção transversal das árvores relacionam-se com o bom estado de sanidade do lenho, não demonstrando evidências de lesões causadas por agentes xilófagos.

Algumas árvores de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* apresentaram pequenas manchas localizadas na região externa do lenho do tronco, próxima à casca. As manchas do lenho possuem coloração amarelada entre os sensores 3-4 (árvores 1, 2, 7, 9, 12, 15), 4-5 (árvores 4, 5, 8, 9, 15), 5-6 (árvores 1, 4, 5, 9, 13, 14, 15, 16), 6-7 (árvores 1, 2, 5, 8, 12, 13, 16, 17); ou vermelha, entre os sensores 5-6 (árvores 7, 12) e 7-6 (árvores 9, 15). As manchas amareladas e avermelhadas indicam redução localizada de velocidade de onda, possivelmente devido à ineficiência (perda parcial) do contato da ponta dos pregos metálicos e dos sensores com a região do lenho (alburno), problemas de sensibilidade na emissão/recepção das ondas entre esses sensores ou devido a curta distância entre os sensores. O Anexo B apresenta o diâmetro das árvores analisadas que variou de 13-26 cm, com o diâmetro máximo e mínimo mensurado nas árvores 18 e 13, respectivamente. A distância entre os sensores variou de 3,7-7,4 cm nas árvores 18 e 13, respectivamente. A curta distância de fixação entre os sensores (recomendação de acima de 12-15 cm) não induziu a formação das áreas amareladas e avermelhadas, considerando que na árvore 18 (13 cm de diâmetro) não foram verificadas manchas que indicassem a queda abrupta de velocidade de onda.

A imagem tomográfica da área diametral do lenho do tronco das árvores das 18 árvores de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, com as respectivas velocidades de onda é apresentada no Anexo C e, para 3 árvores (2, 14 e 17) representativas da espécie, na Figura 11. Os números indicados ao longo da circunferência indicam a posição de fixação dos pregos e dos sensores no lenho do tronco das árvores. A área diametral demarcada em cada imagem tomográfica refere-se

à faixa do lenho selecionada para a confecção do perfil de velocidade de onda mecânica. Verifica-se que, de modo geral, a delimitação de duas regiões distintas do lenho do tronco das árvores: interna com maior velocidade de onda com valor médio de 1230 m/s; e externa, com menor velocidade de onda com valor médio de 1050 m/s.

A velocidade média da onda mecânica do lenho das 18 árvores de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* (Tabela 1) indica diferenças estatísticas significativas, possibilitando agrupá-las em 4 classes, sendo (i) as de menor velocidade (árvores 3, 10, 5 e 6, com velocidade média de 1029 m/s; variação de 1017-1045 m/s), (ii) intermediária inferior (árvores 9, 16, 13, 15, 14, com velocidade média de 1081 m/s; variação de 1065-1100 m/s), (iii) intermediária superior (árvores 11, 18, 2, 7, 12, 1, 17 e 4, com velocidade média de 1152 m/s; variação de 1118-1180 m/s) e (iv) de maior velocidade de onda (árvore 8, com velocidade média de 1261 m/s). O teste estatístico Scott-Knott, (com significância 5%; $p < 0,05$) permitiu agrupar as árvores, cuja faixa tomográfica selecionada apresentou velocidade de onda média semelhante: as árvores da classe (iv), de maior velocidade de onda são estatisticamente mais saudáveis do que as da classe (i), menor velocidade de onda.

A velocidade mínima e máxima da onda mecânica no lenho variou de 815-997 e 1084-1454 m/s, respectivamente, sendo que as árvores 6-12 e 23-18 de *Pinus* foram as de menor e maior velocidade de onda do lenho. Para as 18 árvores, os valores de velocidade de onda média, mínima e máxima foram de 1096, 815 e 1454 m/s, respectivamente. Os coeficientes de variação da velocidade de onda média, mínima e máxima foram baixos, de 3,73-11,23 % nas árvores 10 e 5, respectivamente, para a velocidade média; de 5,9-6,9% na velocidade de onda mínima e máxima, respectivamente, confirmando a uniformidade da velocidade de onda na seção do lenho analisada.

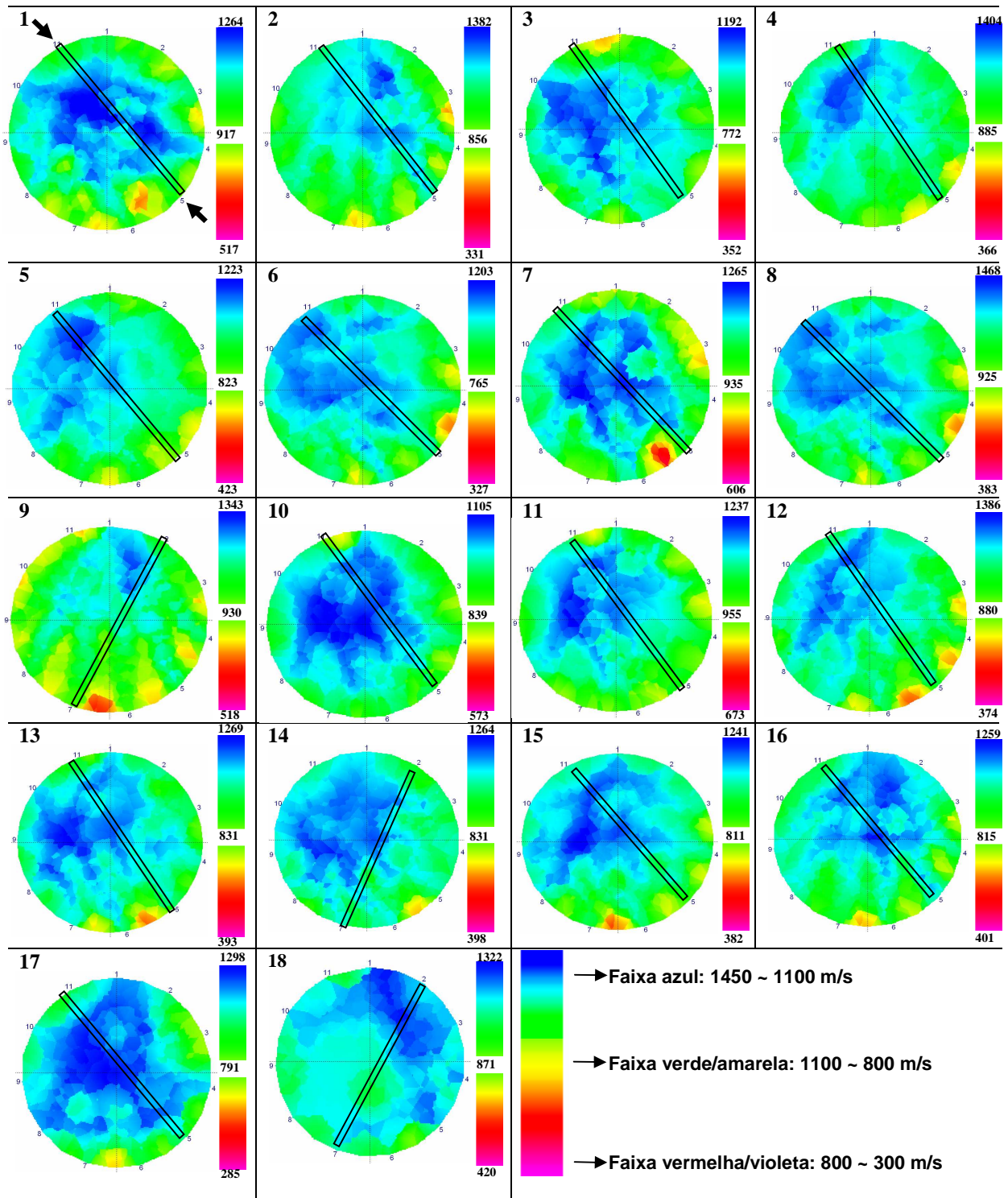


Figura 10 - Imagem tomográfica da seção transversal do lenho do tronco das 18 árvores de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, obtida através de tomógrafo de impulso, no modelo de cor "rainbow" e a escala de cores com as faixas de velocidade. As setas indicam a amostra do lenho extraída com a sonda de Pressler (Árvore 1)

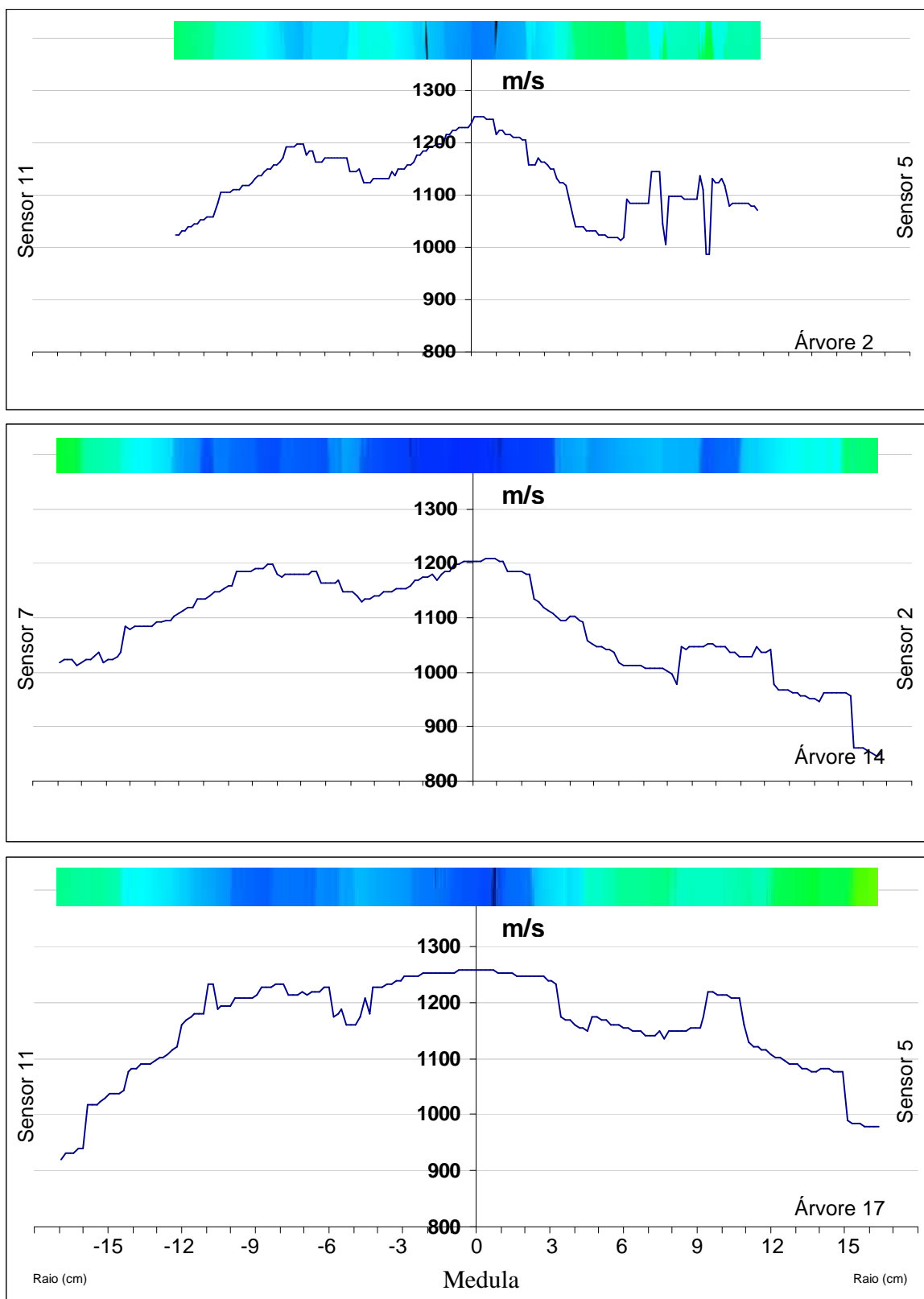


Figura 11 - Imagem tomográfica da área diametral do lenho do tronco das árvores 2, 14 e 17 de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, com a respectiva cor “rainbow” e velocidade da onda (m/s)

Tabela 1 - Valores médios de velocidade de onda mecânica (m/s) do lenho do tronco das árvores de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*

Árvore (n ^o)	Diâmetro do tronco (cm)	Velocidade de onda mecânica (m/s)		
		Média	Mínima	Máxima
3	16	1017A ¹ (± 79; 7,79) ²	986	1250
10	18	1021 A (± 38; 3,73)	933	1226
5	18	1036 A (± 116; 11,23)	984	1347
6	23	1045 A (± 45; 4,35)	815	1208
9	23	1065 B (± 80; 7,55)	957	1454
16	21	1067 B (± 86; 8,07)	859	1202
13	26	1086 B (± 62; 5,7)	975	1353
15	21	1088 B (± 71; 6,52)	845	1208
14	21	1100 B (± 74; 6,72)	930	1190
11	18	1118 C (± 44; 3,9)	892	1084
18	13	1137 C (± 95; 8,43)	919	1259
2	18	1142 C (± 64; 5,61)	939	1301
7	21	1149 C (± 71; 6,2)	903	1152
12	25	1156 C (± 84; 7,25)	997	1182
1	22	1159 C (± 81; 6,99)	973	1264
17	16	1175 C (± 77; 6,59)	898	1218
4	16	1180 C (± 91; 7,7)	829	1127
8	23	1261 D (± 118; 9,4)	955	1248
		1096 (± 103; 6,7)	922 (± 55; 5,9)	1237 (± 85; 6,9)

1 Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente, pelo teste de Scott-Knott, com significância 5% ($p < 0,05$). 2 Valores entre parênteses correspondem ao desvio padrão (m/s) seguido do coeficiente de variação (%).

A correlação entre o diâmetro do tronco das árvores de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* e o tempo médio de velocidade da onda que se difunde através do seu lenho apresenta um alto coeficiente de determinação (R^2) de 0,8994 (Figura 12). A correlação é satisfatória uma vez que, quanto maior o DAP do tronco das árvores, maior é o tempo de propagação e recepção da onda.

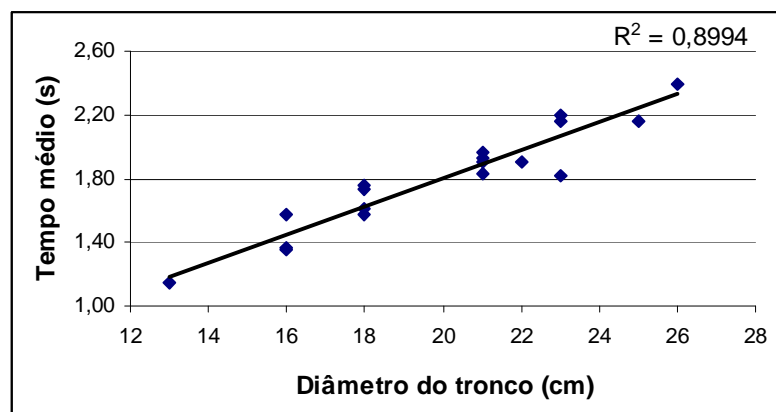


Figura 12 - Correlação entre o diâmetro do tronco e o tempo médio da velocidade da onda no lenho do tronco das árvores de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*

5.1.3 Propriedades físicas do lenho do tronco das árvores em pé

5.1.3.1 Densidade aparente do lenho por densitometria de raios X

A aplicação da densitometria de raios X utilizando o QTRS-01X na determinação da densidade aparente do lenho permitiu a leitura direta das amostras, evitando o uso de filme radiográfico. O processo de calibração, de leitura dos resultados e do processamento dos dados foi automático determinando de forma precisa e pontual a densidade aparente do lenho na seção radial.

Os perfis diametrais de densidade aparente do lenho do tronco de três árvores (7, 8 e 12) de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, representativas das 18 analisadas (Anexo D), indicam um aumento do seu valor a partir da medula, com estabilização no lenho externo, próximo à casca (Figura 14), conforme verificado por Ferreira (2009).

Os perfis de densidade aparente do lenho relacionam-se com a estrutura anatômica dos anéis de crescimento (item 5.1.1, Figura 9), com os maiores valores (em torno de $0,71 \text{ g/cm}^3$) no lenho tardio, em relação ao inicial (em torno de $0,44 \text{ g/cm}^3$). O limite dos anéis de crescimento no lenho das árvores de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, através do perfil radial de densidade por densitometria de raios X, é demarcado com maior nitidez, quando comparado com a imagem da seção transversal do lenho (Figura 9). A metodologia de demarcação dos anéis de crescimento pelo perfil radial de densidade aparente do lenho dos anéis de crescimento foi aplicada por Ferreira (2009) e Alvarado (2010) para árvores de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* e *Swietenia macrophylla*.

O lenho na região interna do tronco das árvores de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* apresenta menor valor de densidade aparente ($0,46 \text{ g/cm}^3$), em relação à região externa ($0,64 \text{ g/cm}^3$), caracterizando a presença da madeira juvenil e adulta, respectivamente. Verifica-se, também, que em algumas regiões do lenho do tronco das árvores de *P. caribaea* var. *hondurensis* ocorre um aumento da sua densidade aparente, pela impregnação do lume das células pela resina e, em consequência, maior atenuação dos feixes de raios X, dificultando a distinção dos limites dos anéis de crescimento (FERREIRA, 2009; FERREIRA et al., 2009) (Figura 14 árvore 8).

A densidade aparente do lenho das 18 árvores de *P. caribaea* var. *hondurensis* (Tabela 2) indica diferenças estatísticas significativas para a densidade aparente média, possibilitando agrupar as árvores em três classes, sendo (i) as de menor densidade (árvores 5, 3, 17, 16 e 10 com

densidade média de 0,46 g/cm³; variação de 0,41-0,48 g/cm³), (ii) densidade intermediária (árvores 12 18, 2, 9, 14, 4, 11, 13, 1 e 7 com densidade média de 0,53 g/cm³; variação de 0,50-0,56 g/cm³) e (iii) de maior densidade (árvores 15, 8 e 6 com densidade média de 0,64 g/cm³; variação de 0,63-0,65 g/cm³). O agrupamento das 3 classes pelo teste estatístico Scott-Knott, (com significância 5% ($p < 0,05$) reuniu árvores com densidade aparente média do lenho de valor similar – as árvores da classe (iii) de maior densidade aparente do lenho têm maior % de lenho tardio, principalmente, na madeira adulta resultando em aumento da sua densidade aparente média. As árvores da classe (i), de menor densidade aparente do lenho têm maior % de lenho inicial na madeira juvenil, reduzindo o valor médio da sua densidade aparente.

Os altos valores da densidade aparente média do lenho nas árvores da classe (iii) de maior densidade aparente são explicados pela impregnação do lume das células por resina, principalmente no lenho tardio, resultando em maior atenuação dos raios X.

A densidade mínima e máxima do lenho variou de 0,17-0,31 e 0,97-1,15 g/cm³, respectivamente, sendo que as árvores 4-8;6;7 e 5-1 foram as de menor e maior densidade aparente do lenho. Para as 18 árvores de *P. caribaea* var. *hondurensis* os valores de densidade aparente média, mínima e máxima foram de 0,54, 0,17 e 1,15 g/cm³ respectivamente, indicando uma elevada precisão do método de densitometria de raios X, com leitura de 40 µm de distância no sentido radial do tronco. Os valores de densidade aparente média do lenho das árvores de *P. caribaea* var. *hondurensis* são similares aos encontrados por Bendtsen et al. (1986) e Ferreira (2009).

O coeficiente de variação da densidade aparente do lenho média, mínima e máxima foi baixo, de 6,09-23,35% nas árvores 17 e 6, respectivamente, para a densidade aparente média do lenho; de 15,7-4,8% para a densidade aparente mínima e máxima, respectivamente. As variações da densidade do lenho resultam da incidência do feixe colimado de raios X em regiões do lenho com baixos (lenho inicial) e mais altos valores de densidade (lenho tardio).

Tabela 2 - Valores médios de densidade aparente (g/cm^3) do lenho para as árvores de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*

Árvore (n ^o)	Diâmetro do tronco (cm)	Densidade aparente (g/cm^3)		
		Média	Mínima	Máxima
5	18	0,41 A ¹ ($\pm 0,05$; 11,19) ²	0,21	0,97
3	16	0,45 A ($\pm 0,10$; 20,56)	0,28	1,03
17	16	0,47 A ($\pm 0,03$; 6,09)	0,20	1,03
16	21	0,48 A ($\pm 0,09$; 18,57)	0,27	1,10
10	18	0,48 A ($\pm 0,04$; 9,30)	0,26	1,01
12	25	0,50 B ($\pm 0,08$; 15,86)	0,28	1,12
18	13	0,51 B ($\pm 0,05$; 10,21)	0,27	1,01
2	18	0,51 B ($\pm 0,09$; 18,07)	0,26	1,12
9	23	0,52 B ($\pm 0,09$; 17,07)	0,29	1,05
14	21	0,52 B ($\pm 0,09$; 18,7)	0,26	1,07
4	16	0,53 B ($\pm 0,09$; 17,79)	0,17	1,11
11	18	0,53 B ($\pm 0,07$; 14,32)	0,30	1,11
13	26	0,55 B ($\pm 0,11$; 20,85)	0,19	1,13
1	22	0,56 B ($\pm 0,09$; 17,05)	0,25	1,15
7	21	0,56 B ($\pm 0,08$; 14,97)	0,31	1,11
15	21	0,63 C ($\pm 0,11$; 16,72)	0,27	1,14
8	23	0,64 C ($\pm 0,15$; 13,89)	0,31	1,14
6	23	0,65 C ($\pm 0,08$; 23,25)	0,31	1,08
		0,54 ($\pm 0,17$; 19,12)	0,26 ($\pm 0,04$; 15,7)	1,08 ($\pm 0,05$; 4,8)

1 Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente, pelo teste de Scott-Knott, com significância de 5% ($p < 0,05$). 2 Valores entre parênteses correspondem ao desvio padrão (g/cm^3) seguido do coeficiente de variação (%).

A correlação entre o diâmetro do tronco das árvores de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* e a densidade aparente média do lenho apresenta um baixo coeficiente de determinação (R^2) de 0,2312 (Figura 13), relacionado à presença de resina em áreas dispersas do lenho, resultando no aumento do valor da densidade aparente. Como resultado, a densidade aparente do lenho independe do valor do diâmetro do tronco das árvores.

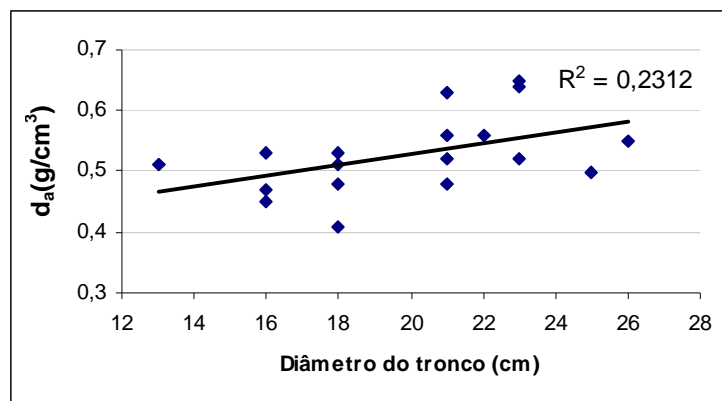


Figura 13 - Correção entre a densidade aparente média do lenho e o diâmetro do tronco das árvores de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*

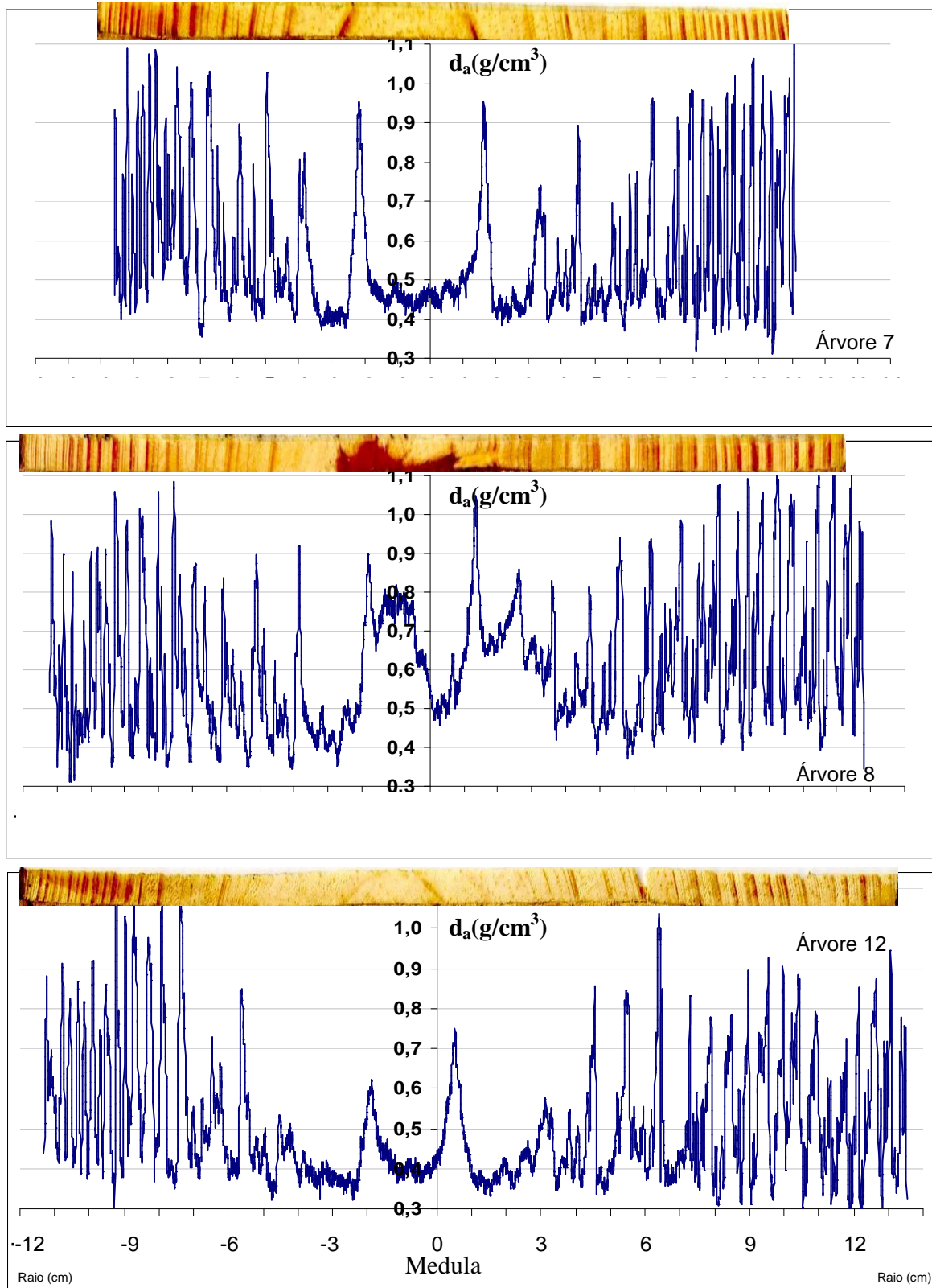


Figura 14 – Seção transversal do lenho do tronco das árvores 7, 8 e 12 de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, com a respectiva variação da densidade aparente do lenho (g/cm^3), na direção casca-casca

5.1.3.2 Densidade básica do lenho do tronco das árvores

A aplicação do método não destrutivo - máximo teor de umidade - possibilitou que, com 2 determinações de massa (completamente seca e completamente saturada) dos corpos de prova do lenho com forma irregular, a obtenção dos valores de densidade básica.

Os perfis diametrais de densidade básica do lenho do tronco de três árvores (7, 8 e 12) de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, representativas das 18 analisadas (Anexo E), indicam um aumento do seu valor a partir da medula, com estabilização no lenho externo, próximo à casca (Figura 15).

As árvores de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* mostram menores valores médios e com menor variação de densidade básica do lenho na região interna ($0,41 \text{ g/cm}^3$) em relação a sua região externa e com maior variação ($0,49 \text{ g/cm}^3$), caracterizando a madeira juvenil e adulta no tronco das árvores.

A densidade básica do lenho das 18 árvores de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* (Tabela 3) indica diferenças estatísticas significativas para a densidade aparente média, possibilitando agrupar as árvores em duas classes, sendo (i) as de menor densidade (árvores 5, 14, 16, 18, 2, 17, 9, 10 e 12, com densidade média de $0,42 \text{ g/cm}^3$; variação de $0,37-0,44 \text{ g/cm}^3$) e (ii) de maior densidade (árvores 3, 4, 11, 13, 15, 1, 7, 6 e 8, com densidade média de $0,49 \text{ g/cm}^3$; variação de $0,47-0,51 \text{ g/cm}^3$).

O agrupamento em 2 classes pelo teste estatístico Scott-Knott, (com significância 5% ($p < 0,05$)) reuniu árvores com valores similares de densidade básica média do lenho. Conforme verificado para a densidade aparente do lenho, as árvores da classe (ii) de maior densidade básica do lenho possuem maior % de lenho tardio principalmente na madeira adulta induzindo o aumento da densidade média. As árvores da classe (i), de menor densidade básica do lenho têm maior % de lenho inicial principalmente na região de madeira juvenil, reduzindo a densidade média.

O alto valor da densidade aparente média do lenho nas árvores da classe (ii) é devido à impregnação do lume das células pela resina (terpeno), principalmente as do lenho tardio. A resina afeta a saturação do lenho com água e, desta forma, o volume final, resultando em valores de densidade mais altos.

A densidade mínima e máxima do lenho variou de $0,26-0,41$ e $0,48-0,70 \text{ g/cm}^3$, respectivamente, sendo que as árvores 5-8 e 5-15;6 foram as de menor e maior densidade básica

do lenho. Para as 18 árvores de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* os valores de densidade básica média, mínima e máxima foram de 0,46, 0,26 e 0,70 g/cm³. O método do máximo teor de umidade aplicado na determinação da densidade básica do lenho (segmentos do lenho= 5 mm diâmetro; 1 comprimento; massa verde/volume saturado) difere do método densitométrico (lenho completo = 2 mm espessura; 40 µm distância; massa/volume 12% umidade), indicando, no entanto, a mesma tendência, embora com menor precisão em relação aos limites e valores de densidade dos anéis de crescimento. A densidade básica média do lenho das árvores de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* é próxima à apresentada por Bonduelle e Ceni (2002) e por Gonzalez *et al.* (2009).

O coeficiente de variação da densidade básica do lenho média, mínima e máxima foi baixo, de 8,71-22,89% nas árvores 17 e 15, respectivamente, para a densidade aparente média; de 11,3-11,4% para a densidade básica mínima e máxima, respectivamente. A variação da densidade deve-se ao efeito exercido pelos lenhos inicial e tardio dos anéis de crescimento anuais.

Tabela 3 – Valores médios de densidade básica (g/cm³) do lenho do tronco das árvores de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*

Árvore (n ^o)	Diâmetro do tronco (cm)	Densidade básica (g/cm ³)		
		Média	Mínima	Máxima
5	18	0,37 A ¹ (± 0,06; 17,05) ²	0,26	0,48
14	21	0,41 A (± 0,09; 22,04)	0,30	0,62
16	21	0,41 A (± 0,06; 16,01)	0,35	0,59
18	13	0,42 A (± 0,06; 14,42)	0,32	0,50
2	18	0,42 A (± 0,07; 18,03)	0,32	0,57
17	16	0,42 A (± 0,04; 8,71)	0,36	0,51
9	23	0,43 A (± 0,07; 16,76)	0,33	0,59
10	18	0,43 A (± 0,04; 9,77)	0,38	0,51
12	25	0,44 A (± 0,07; 16,16)	0,32	0,60
3	16	0,47 B (± 0,08; 17,9)	0,34	0,67
4	16	0,47 B (± 0,07; 14,43)	0,35	0,57
11	18	0,47 B (± 0,06; 12,78)	0,38	0,59
13	26	0,48 B (± 0,10; 21,24)	0,29	0,68
15	21	0,49 B (± 0,01; 22,89)	0,31	0,70
1	22	0,50 B (± 0,08; 15,37)	0,39	0,63
7	21	0,50 B (± 0,09; 17,53)	0,32	0,68
6	23	0,51 B (± 0,09; 18,36)	0,39	0,70
8	23	0,51 B (± 0,07; 13,55)	0,41	0,65
		0,46 (± 0,087; 18,9)	0,34 (± 0,04; 11,3)	0,60 (± 0,07; 11,4)

1 Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente, pelo teste Scott-Knott, significância de 5% (p<0,05).

2 Valores entre parênteses correspondem ao desvio padrão (g/cm³) seguido do coeficiente de variação (%).

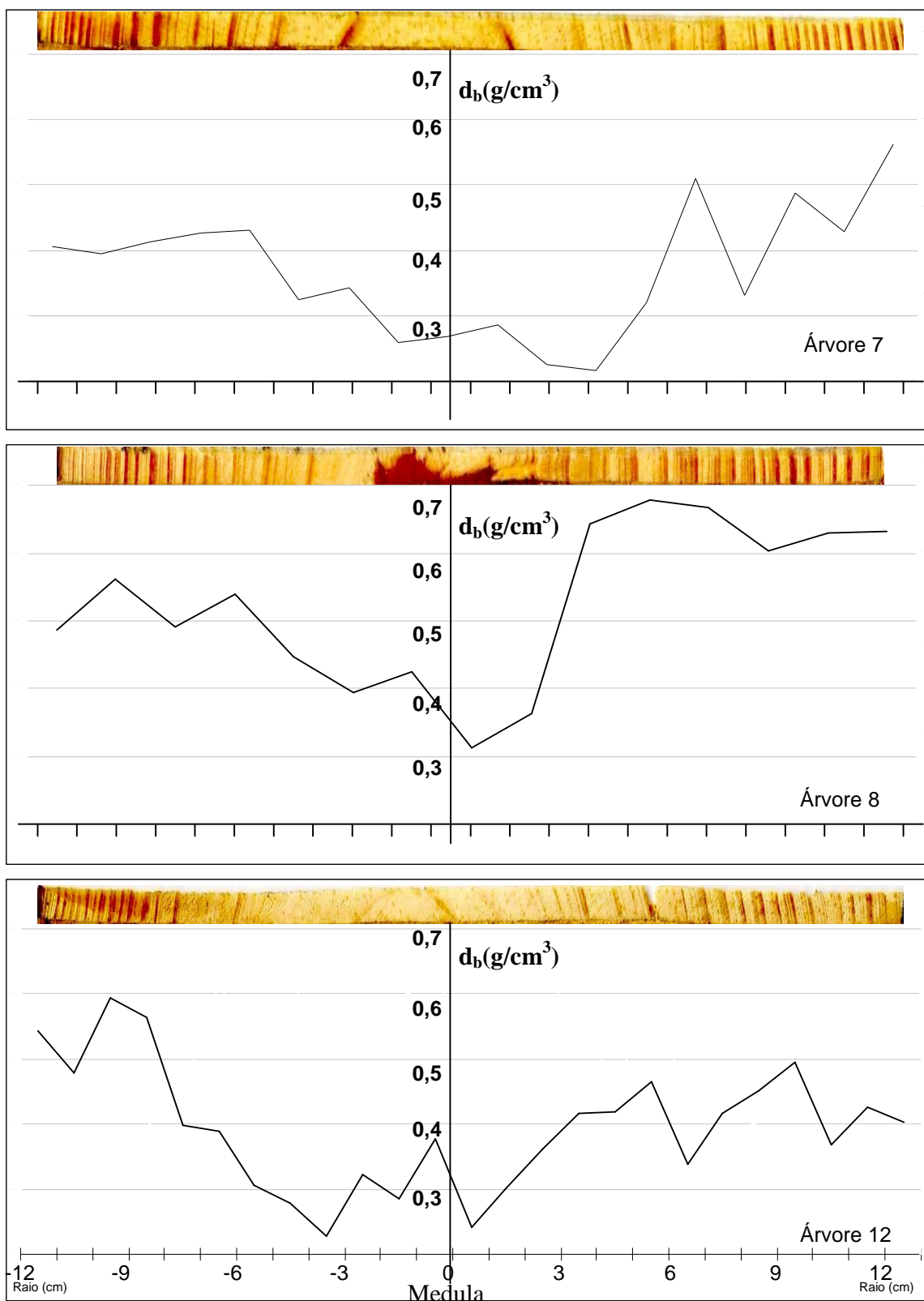


Figura 15 - Seção transversal do lenho do tronco das árvores 7, 8 e 12 *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, com a respectiva variação da densidade básica do lenho (g/cm^3), na direção casca-casca

A correlação entre o diâmetro do tronco das árvores de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* e a densidade básica média do lenho apresenta um baixo coeficiente de determinação (R^2) de 0,1438 (Figura 16), indicando que densidade básica do lenho independe do diâmetro do tronco das árvores, possivelmente pelo efeito do teor de resina.

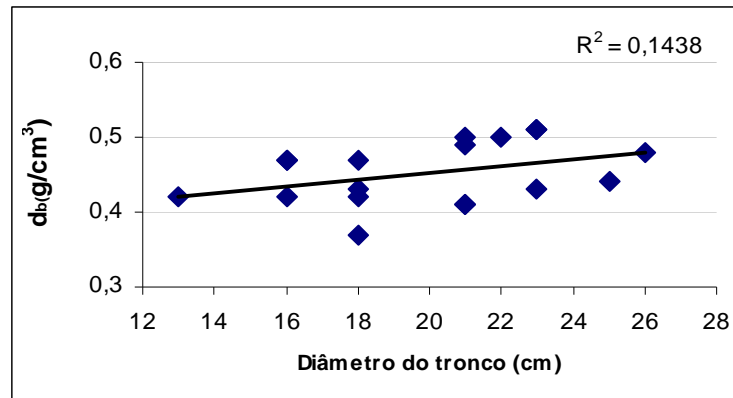


Figura 16 - Correlação entre a densidade básica média do lenho e o diâmetro do tronco das árvores de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*

5.1.3.3 Teor de umidade do lenho do tronco das árvores

Os perfis diametrais do teor de umidade do lenho do tronco de 3 árvores (7, 8 e 12) de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, representativas das 18 analisadas (Anexo E), indicam uma diminuição do valor a partir da medula, com estabilização no lenho externo, próximo à casca (Figura 17).

As árvores de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* mostram na região interna do lenho maiores valores médios de teor de umidade (cerca de 112%) e com menor variação, em relação à externa com menor valor (cerca de 78%) e maior variação.

O teor de umidade médio do lenho das 18 árvores de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* (Tabela 4) indica diferenças estatísticas significativas, possibilitando agrupá-las em 3 classes, sendo (i) as de menor teor de umidade (árvores 1, 7, 16, 8, 14 e 15, com teor de umidade médio de 63 %; variação de 55-76%), (ii) intermediário (árvores 10, 11, 13, 17, 4, 9 e 6, com teor de umidade médio de 86 %; variação de 83-92%) e (iii) de maior teor de umidade (árvores 2, 5, 18, 3 e 12, com teor de umidade médio de 104 %; variação de 97-110%).

O agrupamento das 3 classes pelo teste estatístico Scott-Knott, (com significância 5% ($p < 0,05$)) reúne árvores com teor médio de umidade similar. As árvores da classe (iii) com teor de

umidade mais elevado têm maior % de lenho inicial constituído por traqueídes de parede celular delgada e com água capilar preenchendo o seu lume e os espaços intercelulares na região da madeira juvenil, principalmente, aumentando o valor médio do teor de umidade. As árvores da classe (i) com menor teor de umidade do lenho têm maior % de lenho tardio, principalmente, na madeira adulta, constituído por traqueídes de parede espessa e com maior frequência de canais de resina reduzindo o valor do teor de umidade.

O teor de umidade mínimo e máximo do lenho variou de 25-67 e 83-187%, respectivamente, sendo que as árvores 1;7-12 e 16-5 de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, foram as de menor e maior teor de umidade do lenho. Para as 18 árvores os valores de teor de umidade médio, mínimo e máximo foram de 83, 23 e 187%, respectivamente.

O coeficiente de variação de teor de umidade médio, mínimo e máximo foi alto, 17,4-67,1% , nas árvores 10 e 7 respectivamente, para teor de umidade médio; 33,2-18,7% nos teores para teores de umidade mínima e máximo, respectivamente. A variação do teor de umidade deve-se ao efeito dos lenhos inicial e tardio dos anéis de crescimento anuais.

Tabela 4 - Valores médios do T.U. (%) do lenho do tronco das árvores de *P. caribaea* var. *hondurensis*

Árvore (n ^o)	Diâmetro do tronco (cm)	Teor de umidade (%)		
		Médio	Mínimo	Máximo
1	22	55 A ¹ (± 26; 47,1) ²	25	119
7	21	56 A (± 38; 67,1)	25	131
16	21	58 A (± 16; 28,1)	33	83
8	23	65 A (± 20; 29,6)	23	100
14	21	67 A (± 22; 33,8)	32	108
15	21	76 A (± 28; 37,2)	42	137
10	18	83 B (± 15; 17,4)	66	114
11	18	83 B (± 21; 25,8)	45	121
13	26	87 B (± 30; 36,4)	26	137
17	16	77 B (± 27; 35,3)	36	128
4	16	90 B (± 26; 28,3)	51	141
9	23	89 B (± 21; 23,1)	58	129
6	23	92 B (± 35; 37,9)	31	140
2	18	97 C (± 37; 37,7)	51	164
5	18	104 C (± 47; 45)	35	187
18	13	102 C (± 37; 36)	59	174
3	16	109 C (± 32; 29,2)	49	148
12	25	110 C (± 32; 29,4)	67	156
		83 (± 33; 40)	42 (± 14; 33,2)	134 (± 25; 18,7)

1 Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente, pelo teste de Scott-Knott, com significância 5% (p<0,05). 2 Valores entre parênteses correspondem ao desvio padrão (%) seguido do coeficiente de variação (%).

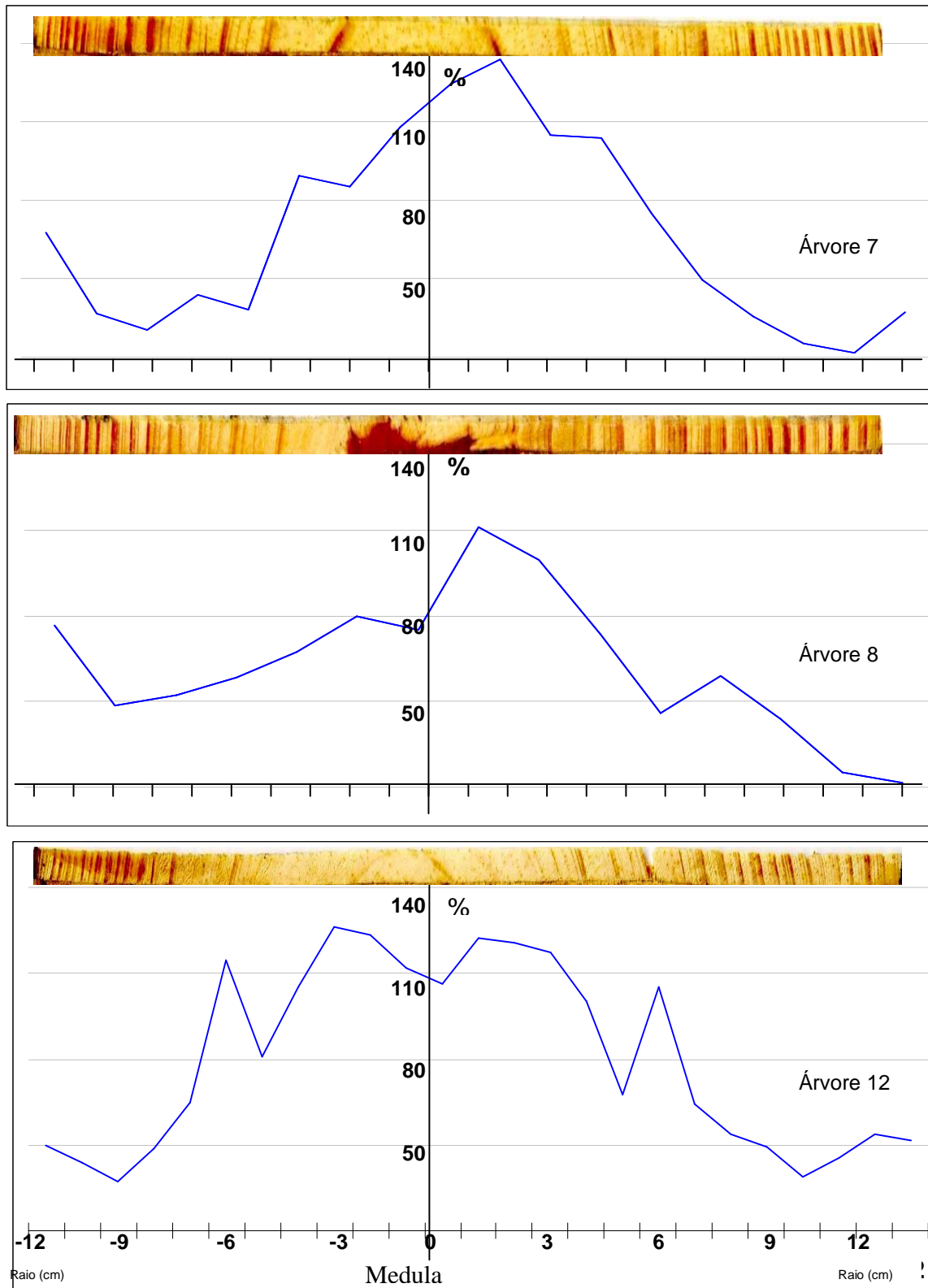


Figura 17 - Seção transversal do lenho do tronco das árvores 7, 8 e 12 de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, com a respectiva variação do teor de umidade (%) do lenho na direção casca-casca

A correlação entre o diâmetro do tronco e o teor de umidade médio do lenho das árvores de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* apresentou valor de 0,0756 para o coeficiente de determinação (R^2), considerado baixo (Figura 18).

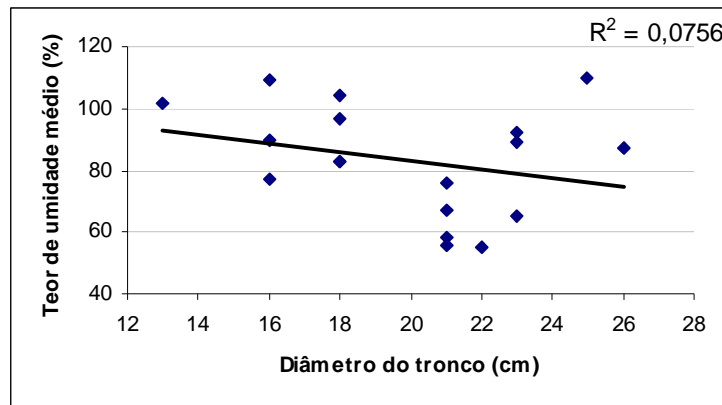


Figura 18 - Correlação entre o teor de umidade do lenho e o diâmetro do tronco das árvores de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*

5.1.4 Velocidade de onda e as propriedades físicas do lenho do tronco das árvores

O coeficiente de determinação de Pearson, probabilidade do teste t para $H_0: \rho=0$ para as variáveis densidade básica e aparente, teor de umidade e velocidade de onda no lenho das árvores de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, com número de caso (N)= 381 é apresentado na Tabela 5.

O valor do coeficiente de Pearson para a correlação entre a velocidade de onda e a densidade básica e aparente do lenho foi de -0,161 e -0,168, respectivamente, sendo negativo e de baixo valor.

A correlação entre a velocidade de onda e o teor de umidade de umidade do lenho foi de 0,157, sendo positiva e, da mesma forma, com baixo valor.

A análise da qualidade do lenho através da variável velocidade de onda, não apresentou correlação satisfatória, confirmando a afirmação de Calegari et al. (2008), que indicam que a velocidade de onda para as árvores vivas não deve levar em conta apenas módulo de elasticidade dinâmico e a massa específica do material, uma vez que existem outros fatores que influenciam na propagação das ondas, tais como: características anatômicas, teor de umidade, massa específica, inclinação e distorção da grã, nós, bem como tipo de transdutores/sensores e tamanho de amostras.

A correlação entre o teor de umidade e a densidade básica e aparente do lenho foi de -0,463 e -0,399, respectivamente, sendo negativa. Essas correlações negativas podem ser confirmadas pelos gráficos no Anexo E, onde é possível verificar a sincronia do aumento do teor de umidade com a diminuição da densidade básica e vice-versa.

A correlação da densidade básica e aparente do lenho foi de 0,846, sendo positiva e de alto valor, confirmando as metodologias de densitometria de raios X e do máximo teor de umidade para determinação da densidade aparente e da densidade básica.

Em relação à significância pelo teste t, as variáveis de densidade básica e aparente, teor de umidade e velocidade da onda mecânica no lenho das árvores de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* foram altamente significativas.

Pereira (2009) obteve boa correlação de (R^2 de 0,9284) para velocidade de onda e densidade aparente do lenho de segmentos do tronco de árvores de *Schizolobium parahyba*, *Eucalyptus saligna* e de *Caesalpinia echinata*, em condições de laboratório, com as amostras do lenho na umidade de equilíbrio (12%).

Tabela 5 - Coeficiente de correlação de Pearson, seguido da probabilidade do teste t para $H_0: \rho = 0$ para a densidade básica (g/cm^3), aparente (g/cm^3), teor de umidade (%) e velocidade de onda (m/s) no lenho do tronco das árvores de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*

Parâmetros do lenho	Densidade básica	Teor de umidade	Velocidade de onda	Densidade aparente
Densidade básica	1	-	-	-
Teor de umidade	- 0,463 $\leq 0,01$	1	-	-
Velocidade de onda	- 0,168 $\leq 0,01$	0,157 $\leq 0,01$	1	-
Densidade aparente	0,846 $\leq 0,01$	- 0,399 $\leq 0,01$	- 0,161 $\leq 0,01$	1

(1) $\leq 0,01$ – rejeita-se H_0 com valor de $\rho \neq 0$; $< 0,05$ – rejeita-se H_0 com valor de $\rho \neq 0$ significativo pelo teste t; $> 0,05$ – não se rejeita H_0 , pois valor de $\rho \neq 0$ não é significativo pelo teste t

5.2 Propriedades do lenho do tronco das árvores em pé de *Tectona grandis*

5.2.1 Caracterização macroscópica do lenho e dos anéis de crescimento

A análise da seção transversal do lenho o do tronco das árvores de *Tectona grandis* possibilitou a sua caracterização macroscópica, bem como a dos anéis de crescimento. O lenho possui cerne castanho escuro, distinto do alburno, de coloração clara, amarelada. Os anéis de crescimento são demarcados pelo parênquima marginal associado aos vasos de maior diâmetro, com as regiões de lenho inicial e tardio. Os vasos são distintos, distribuídos em anéis semi-porosos, vazios ou obstruídos por substância esbranquiçada. A estrutura anatômica do lenho de árvores de *Tectona grandis*, similar à descrita, é citada na literatura por inúmeros autores, como Chowdhury, (1939); Freitas (1958); Cardoso (1991); Sudheendrakumar et al. (1993); Prys e Bhat (1998); Tomazello e Cardoso (1999); Richter e Dallwitz (2000); Govaere et al. (2003) e Oliveira (2011). Observa-se na região central do lenho das árvores de *Tectona grandis* a formação de anéis de crescimento mais largos e lenho inicial de maior espessura ao tardio (Posição 1); a 50% do raio, os anéis de crescimento são mais estreitos com lenho inicial-tardio de espessura similar (Posição 2); na região externa do lenho, os anéis de crescimento têm espessura constante e lenho inicial mais estreito, em relação ao lenho tardio (Posição 3) (Figura 19). Além dos anéis de crescimento anuais, foram observados os anéis de crescimento falsos no lenho das árvores que, de acordo com Priya e Bhat (1998), são induzidos pela incidência de precipitação no período seco e a ocorrência de estresse hídrico na estação chuvosa.

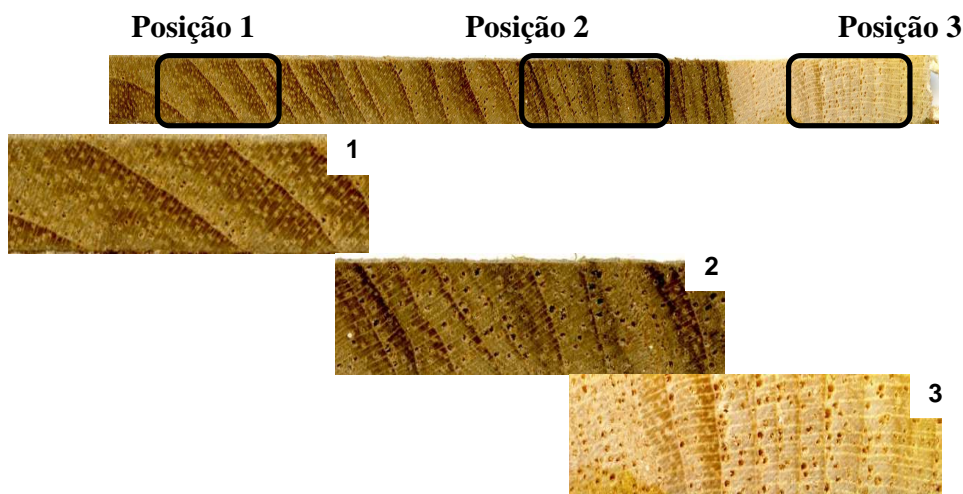


Figura 19 - Seção transversal do lenho do tronco de árvore de *Tectona grandis* evidenciando os anéis de crescimento nas regiões próximas à medula (1), intermediária (2) e à casca (3) (10X, Figuras 1, 2 e 3)

5.2.2 Propriedades do lenho do tronco das árvores por tomografia de impulso

A aplicação do tomógrafo de impulso como método não destrutivo, a partir de imagens tomográficas, possibilitou a reconstrução de toda a seção transversal do lenho do tronco na altura do DAP das árvores. As imagens geradas no campo permitiram a análise imediata, sendo o equipamento de fácil manuseio e interpretação dos resultados por meio da diferença de tonalidade indicando regiões sadias (coloração azul) e afetadas (coloração vermelho/violeta).

As imagens tomográficas da seção transversal do lenho do tronco das 18 árvores de *Tectona grandis*, de 52 anos, obtidas através do tomógrafo de impulso (Figura 21) registram, de modo geral, a predominância da coloração verde (região interna, menor velocidade de onda) e de áreas dispersas de coloração azul (região externa, maior velocidade de onda). Os números indicam a posição da fixação dos pregos e dos sensores no lenho do tronco das árvores de *Tectona grandis*. As árvores 6, 9 e 12 não apresentaram uma seção circular do tronco, necessitando a construção de novas seções para o atendimento dos requisitos do software.

O lenho do tronco das árvores 2, 11 e 13 de *Tectona grandis* mostrou-se, pela predominância da coloração verde e azul, representativa das melhores condições de sanidade. Por outro lado, o lenho das árvores 7, 8 e 18 de *Tectona grandis*, evidencia um estado de sanidade mais crítico, caracterizado pelas áreas de coloração vermelha e violeta. No tronco de algumas árvores de *Tectona grandis* foram observadas áreas de coloração avermelhada e amarelada, localizadas na região periférica do lenho entre os sensores 3-4; 4-5; 5-6; 6-7; 7-8; 8-9 e 11-1 (árvores 1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 13, 14, 15, 16, 17 e 18). As manchas indicam redução localizada de velocidade de onda, possivelmente devido à ineficiência (perda parcial) do contato da ponta dos pregos metálicos e dos sensores com a região do lenho (alburno) ou problemas de sensibilidade na emissão/recepção das ondas entre esses sensores ou devido a curta distância entre os sensores. O Anexo G indica que o diâmetro do tronco das árvores analisadas variou de 14-26 cm, com o diâmetro máximo e mínimo mensurado nas árvores 13 e 16, respectivamente. A distância entre os sensores variou de 7,4-4 cm nas árvores 13 e 16, respectivamente. A curta distância de fixação entre os sensores (recomendação de acima de 12-15 cm) não induziu a formação das áreas amareladas e avermelhadas, considerando que na árvore 11 (18 cm de diâmetro) não foram verificadas manchas que indicassem a queda abrupta de velocidade de onda.

A imagem tomográfica da área diametral – faixa selecionada para a confecção do perfil de velocidade de onda - do lenho do tronco das árvores das 18 árvores de *Tectona grandis*, com as respectivas velocidades de onda é apresentada no Anexo H e, para 3 árvores (8, 9 e 18) representativas da espécie, na Figura 22. Pela análise dos perfis de velocidade de onda, verifica-se, de modo geral, a delimitação de três regiões distintas do lenho (i) externa-esquerda com velocidade máxima de onda (valor médio de 1279 m/s) e coloração azulada, (ii) interna com menor velocidade de onda (valor médio de 1041 m/s) e coloração verde-amarela e (iii) externa-direita com menor velocidade mínima de onda (valor médio de 962 m/s) e com coloração amarela-vermelha.

A velocidade média da onda mecânica do lenho do tronco das 18 árvores de *Tectona grandis* (Tabela 6) indica diferenças estatísticas significativas, agrupando as árvores em seis classes: (i) as de menor velocidade (árvore 18, com velocidade média de 772 m/s); (ii) intermediária inferior (árvores 17, 16, 10 e 15, com velocidade média de 960 m/s; variação de 951-985 m/s); (iii) intermediária média (árvores 1, 11, 14, 13, 5, 2, 12, 7, 3 e 4, com velocidade média de 1080 m/s; variação de 1039-1145 m/s); (iv) intermediária superior (árvore 8, com velocidade média de 1242 m/s); (v) maior velocidade de onda (árvore 6, com velocidade média de 1392 m/s); e (vi) velocidade limite máxima (árvore 9, com velocidade média de 1510 m/s). O teste estatístico Scott-Knott, (com significância 5%; $p < 0,05$) permitiu agrupar as árvores, cuja faixa tomográfica selecionada apresentou velocidade de onda média semelhante. Ou seja, as árvores da classe (vi), de maior velocidade de onda são estatisticamente mais sadias do que as da classe (i), menor velocidade de onda.

A velocidade mínima e máxima da onda mecânica no lenho variou de 413-1200 e 1147-1906 m/s, respectivamente, sendo que as árvores 18-9 e 17-6 foram as de menor e maior velocidade de onda. Para as 18 árvores de *Tectona grandis* os valores de velocidade de onda média, mínima e máxima foram de 1076, 413 e 1906 m/s, respectivamente.

Os coeficientes de variação da velocidade de onda média, mínima e máxima foram baixos, de 3,12 a 31,99% nas árvores 5 e 18, respectivamente, para a velocidade média; de 19,3-17,2% na velocidade de onda mínima e máxima, respectivamente, confirmando a uniformidade da velocidade de onda na seção analisada.

Tabela 6 – Valores médios de velocidade de onda mecânica (m/s) do lenho do tronco das árvores de *T. grandis*

Árvore (n ^o)	Diâmetro do tronco (cm)	Velocidade de onda mecânica (m/s)		
		Média	Mínima	Máxima
18	20	772 A ¹ (± 247; 31,99) ²	413	1271
17	19	951 B (± 114; 11,96)	681	1075
16	14	949 B (± 110; 11,62)	696	1200
10	23	955 B (± 210; 22,01)	669	1350
15	15	985 B (± 75; 7,58)	803	1147
1	24	1039 C (± 77; 7,43)	911	1239
11	18	1049 C (± 58; 5,51)	915	1168
14	15	1058 C (± 125; 11,86)	882	1289
13	26	1073 C (± 187; 17,41)	866	1470
5	16	1070 C (± 33; 3,12)	1007	1131
2	21	1064 C (± 158; 14,84)	878	1368
12	25	1094 C (± 130; 11,86)	919	1311
7	25	1091 C (± 138; 12,66)	849	1352
3	21	1115 C (± 120; 10,73)	817	1286
4	16	1145 C (± 104; 9,1)	796	1258
8	21	1242 D (± 205; 16,5)	980	1650
6	19	1392 E (± 269; 19,33)	1003	1906
9	17	1510 F (± 173; 11,43)	1200	1899
		1076 (± 215; 20,07)	849 (± 164; 19,3)	1394 (± 232; 17,2)

1 Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente, pelo teste de Scott-Knott, significância 5% ($p < 0,05$).

2 Valores entre parênteses correspondem ao desvio padrão (m/s) seguido do coef. de variação (%).

A correlação entre o diâmetro do tronco das árvores de *Tectona grandis* e o tempo médio de viagem da onda que se difunde através do seu lenho apresenta um coeficiente de determinação (R^2) de 0,6579 (Figura 20). A correlação é satisfatória uma vez que, quanto maior o DAP do tronco, maior é o tempo de propagação e recepção da onda.

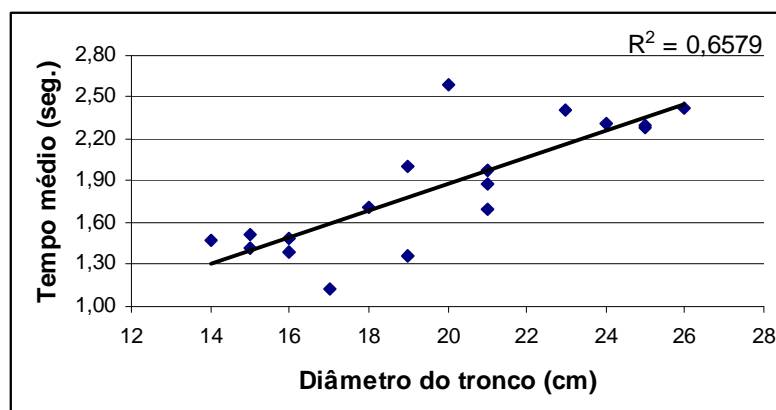


Figura 20 - Correlação entre o diâmetro do tronco e o tempo médio de velocidade da onda no lenho das árvores de *Tectona grandis*

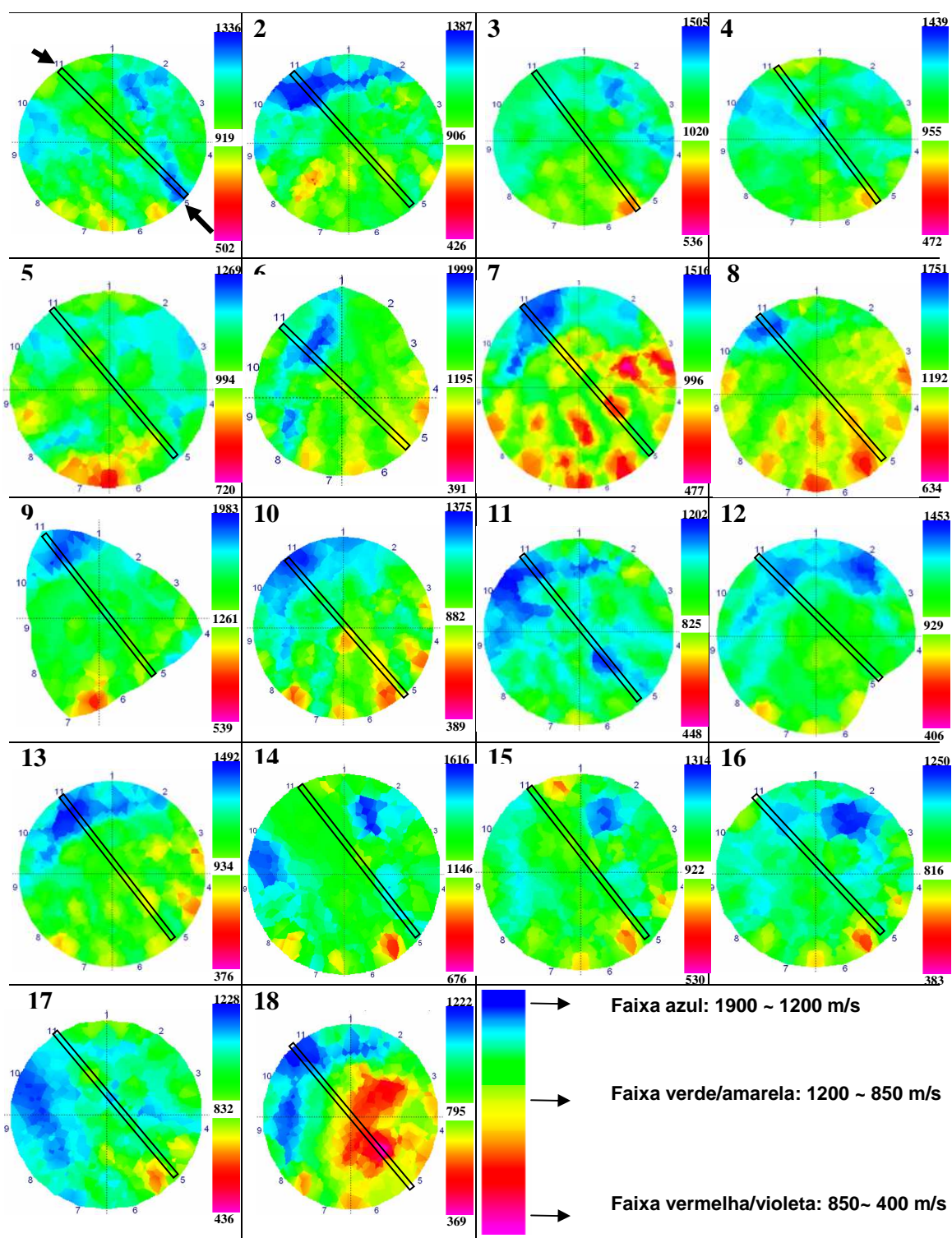


Figura 21 - Imagem tomográfica da seção transversal do tronco das 18 árvores de *Tectona grandis*, obtida através tomógrafo de impulso, no modelo de cor "rainbow" e a escala de cores com as faixas de velocidade. As setas indicam a amostra posição do lenho extraída a sonda de pressler (Árvore 1)

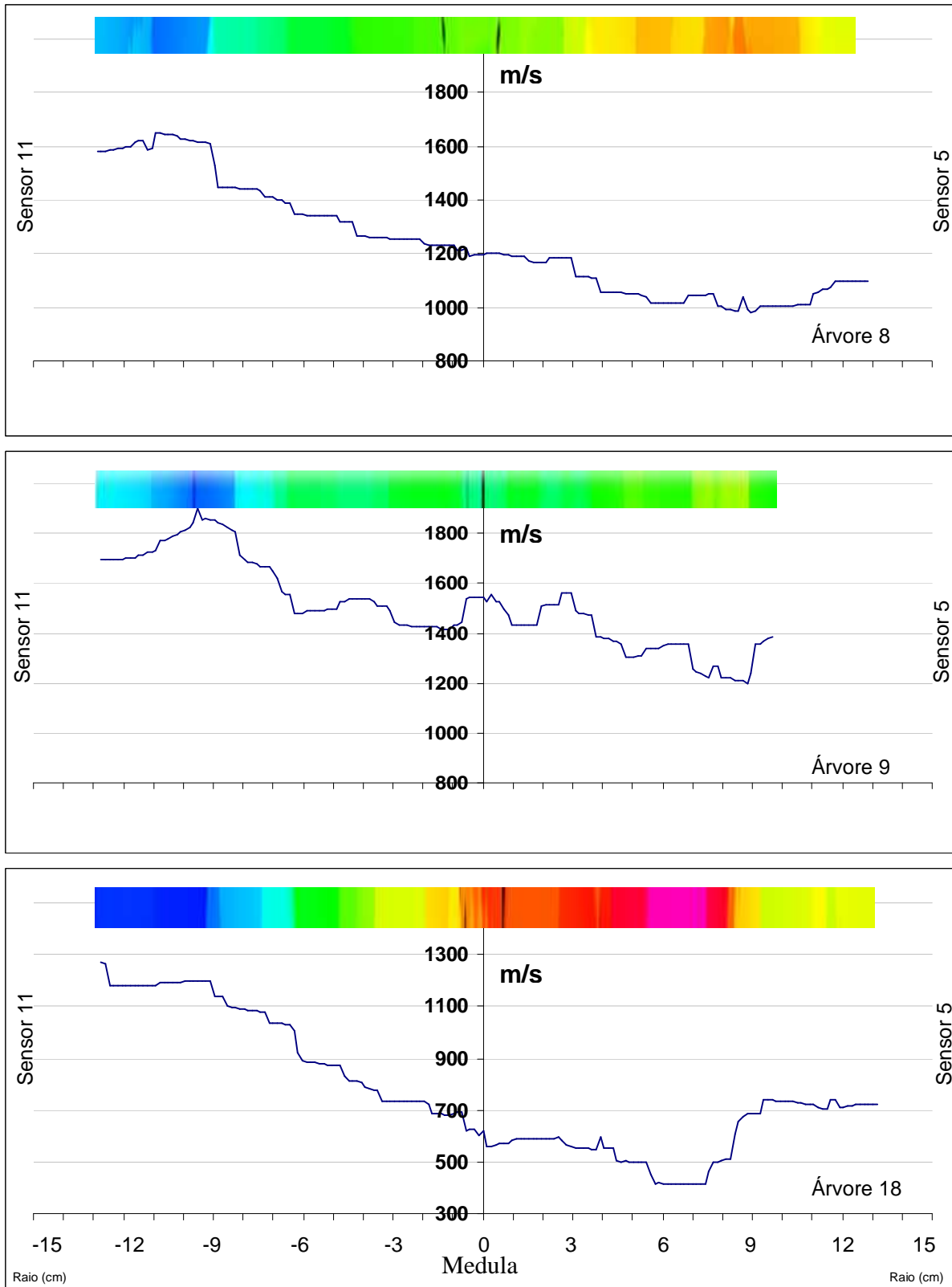


Figura 22 - Imagem tomográfica da área diametral do lenho do tronco das árvores 8, 9 e 18 de *Tectona grandis*, com a respectiva cor "rainbow" e velocidade da onda (m/s)

5.2.3 Propriedades físicas do lenho do tronco das árvores em pé

5.2.3.1 Densidade aparente do lenho por densitometria de raios X

A aplicação da densitometria de raios X utilizando o QTRS-01X na determinação da densidade aparente do lenho permitiu a leitura direta das amostras, evitando o uso de filme radiográfico. O processo de calibração, de leitura dos resultados e do processamento dos dados foi automático determinando de forma precisa e pontual a densidade aparente do lenho na seção radial.

Os perfis diametrais de densidade aparente do lenho do tronco de 3 árvores (4, 9 e 15) (Figura 23), de *Tectona grandis*, representativas das 18 analisadas (Anexo I), indicam um aumento do seu valor a partir da medula, com estabilização no lenho externo, próximo à casca, conforme verificado por Oliveira (2011).

Os perfis de densidade aparente do lenho relacionam-se com a estrutura anatômica dos anéis de crescimento (item 5.2.1, Figura 19), com os maiores valores (em torno de $0,78 \text{ g/cm}^3$) no lenho tardio, em relação ao inicial (em torno de $0,59 \text{ g/cm}^3$) (Figura 24). O limite dos anéis de crescimento no lenho das árvores de *Tectona grandis*, através do perfil radial de densidade por densitometria de raios X, é demarcado com maior nitidez, quando comparado com a seção transversal do lenho (Figura 19). A densitometria de raios X é uma metodologia que permite a determinação do limite exato dos anéis de crescimento e a identificação da presença de anéis de crescimento falsos, formados no lenho das árvores pela resposta da atividade cambial à variabilidade climática, como estresse hídrico (veranico) na estação de chuvas (PRIYA e BHAT, 1998, citados por OLIVEIRA, 2011).

O lenho da região interna do tronco das árvores de *Tectona grandis* apresenta menor valor de densidade aparente do lenho ($0,54 \text{ g/cm}^3$) em relação à região externa ($0,71 \text{ g/cm}^3$), caracterizando a presença da madeira juvenil e adulta, respectivamente.

A densidade aparente do lenho das 18 árvores de *Tectona grandis* (Tabela 7) indica diferenças estatísticas significativas, possibilitando agrupar as árvores em 6 classes: (i) as de menor densidade (árvores 9 e 11, com densidade média de $0,57 \text{ g/cm}^3$; variação de $0,56-0,58 \text{ g/cm}^3$); (ii) densidade intermediária inferior (árvores 1, 12 e 13, com densidade média de $0,61 \text{ g/cm}^3$; variação de $0,61-0,62 \text{ g/cm}^3$); (iii) intermediária média (árvores 8, 7, 4, 15, 18, 10 e 17, com densidade média de $0,63 \text{ g/cm}^3$; variação de $0,62-0,64 \text{ g/cm}^3$); (iv) intermediária superior

(árvores 2, 6 e 5, com densidade média de 0,67 g/cm³, variação de 0,67-0,68 g/cm³); (v) de densidade máxima inferior (árvores 3 e 16, com densidade média de 0,70 g/cm³, variação de 0,69-0,71 g/cm³); e (vi) densidade limite máxima (árvore 14, de densidade média de 0,75 g/cm³).

O agrupamento das 6 classes pelo teste estatístico Scott-Knott, (com significância 5% (p<0,05) reuniu árvores com densidade aparente média do lenho de valor similar – as árvores da classe (vi) de maior densidade aparente do lenho têm maior % de lenho tardio, principalmente, na madeira adulta resultando em aumento da densidade aparente média do lenho. As árvores da classe (i), de menor densidade aparente do lenho têm maior % de lenho inicial na madeira juvenil, reduzindo o valor médio da densidade aparente do lenho.

A densidade mínima e máxima do lenho variou de 0,29-0,49 e 0,76-1,04 g/cm³, respectivamente, sendo que as árvores 18-16 e 9-13 foram as de menor e maior densidade aparente do lenho, respectivamente. Para as 18 árvores de *T. grandis* os valores de densidade aparente média, mínima e máximo foram de 0,64, 0,29 e 1,04 g/cm³, respectivamente, indicando uma elevada precisão do método de densitometria de raios X, com leitura de 40 µm de distância no sentido radial do tronco. Os valores de densidade aparente média do lenho de teca, obtidos no presente estudo (0,64 g/cm³), estão próximos aos encontrados por Lima *et al.* (2009) e Pimentel *et al.* (2008).

Tabela 7 - Valores médios de densidade aparente (g/cm³) do lenho do tronco das árvores de *Tectona grandis*

Árvore (n ^o)	Diâmetro do tronco (cm)	Densidade aparente (g/cm ³)		
		Média	Mínima	Máxima
9	17	0,56 A ¹ (± 0,07; 12,76) ²	0,34	0,76
11	18	0,58 A (± 0,08; 13,90)	0,32	0,83
1	25	0,61 B (± 0,08; 13,89)	0,35	0,95
12	25	0,61 B (± 0,09; 14,82)	0,35	0,91
13	27	0,62 B (± 0,09; 15,04)	0,34	1,04
8	21	0,62 C (± 0,08; 12,86)	0,40	0,85
7	25	0,63 C (± 0,07; 10,88)	0,43	0,88
4	17	0,63 C (± 0,08; 13,37)	0,36	0,89
15	15	0,63 C (± 0,07; 11,54)	0,40	0,91
18	21	0,63 C (± 0,09; 13,74)	0,29	0,90
10	23	0,64 C (± 0,08; 12,24)	0,34	0,91
17	19	0,64 C (± 0,08; 11,94)	0,43	0,97
2	21	0,67 D (± 0,10; 14,35)	0,31	0,94
6	20	0,67 D (± 0,09; 13,35)	0,31	0,95
5	16	0,68 D (± 0,09; 12,66)	0,36	0,91
3	21	0,69 E (± 0,08; 11,65)	0,39	1,01
16	15	0,71 E (± 0,08; 11,11)	0,49	0,98
14	15	0,75 F (± 0,09; 12,42)	0,39	1,02
		0,64 (± 0,09; 14,76)	0,37 (± 0,05; 13,5)	0,92 (± 0,07; 7,3)

1 Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente, pelo teste Scott-Knott (p<0,05).

2 Valores entre parênteses correspondem ao desvio padrão (g/cm³) seguido do coef. de variação (%).

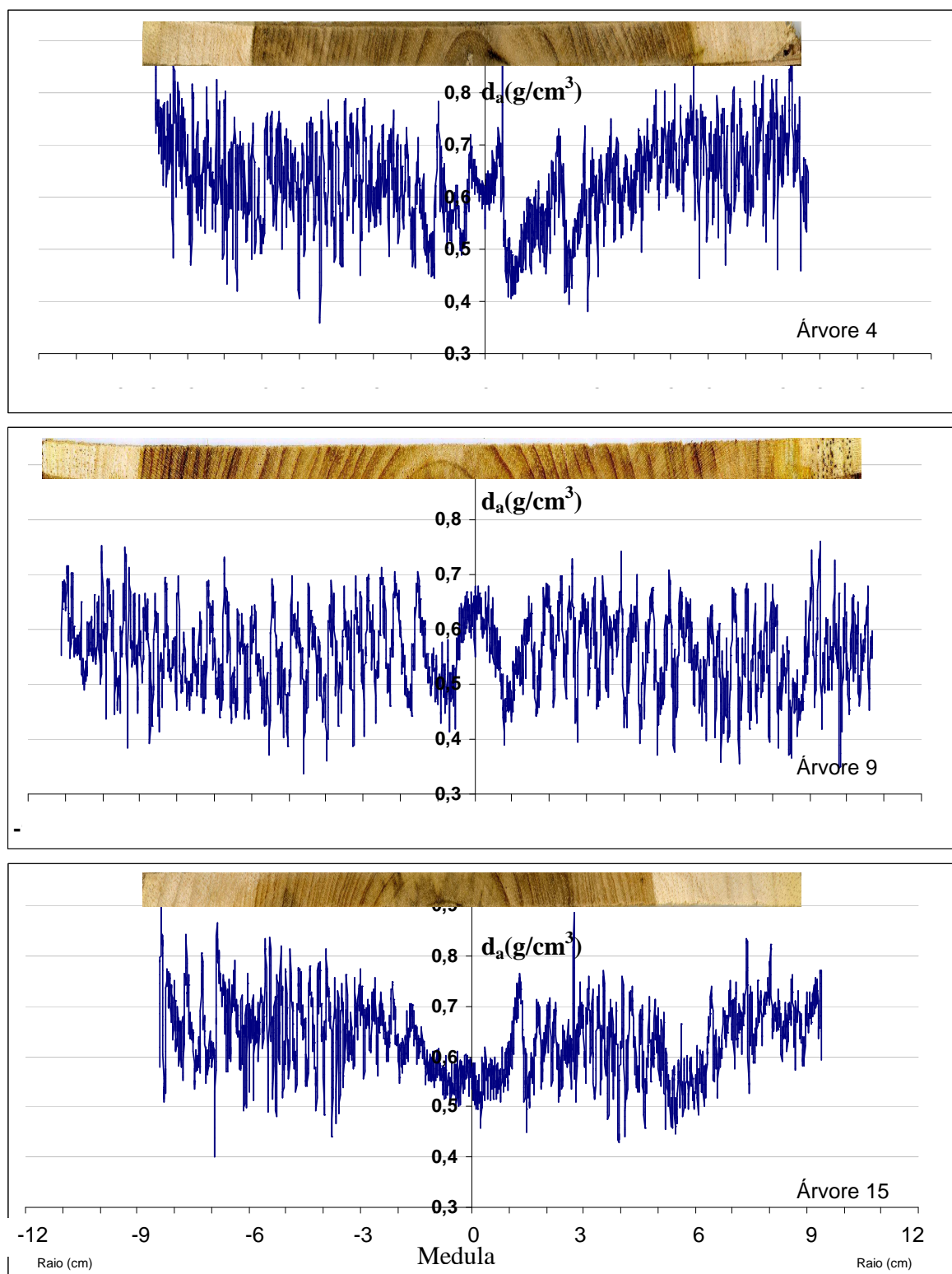


Figura 23 - Seção transversal do lenho do tronco das árvores 4, 9 e 15 de *Tectona grandis*, com a respectiva variação da densidade aparente do lenho (g/cm^3), na direção casca-casca

O coeficiente de variação da densidade aparente do lenho média, mínima e máxima foi baixo, de 10,88-15,04% nas árvores 7 e 13, respectivamente, para a densidade aparente média do lenho; de 13,5-7,3% para a densidade aparente mínima e máxima, respectivamente. As variações da densidade do lenho resultam da incidência do feixe colimado de raios X em regiões do lenho com baixos (lenho inicial) e mais altos valores de densidade (lenho tardio).

A correlação entre o diâmetro do tronco das árvores de *Tectona grandis* e a densidade aparente média do lenho apresenta um baixo coeficiente de determinação (R^2) de 0,1259 (Figura 24). Ou seja, a densidade aparente independe do diâmetro do tronco.

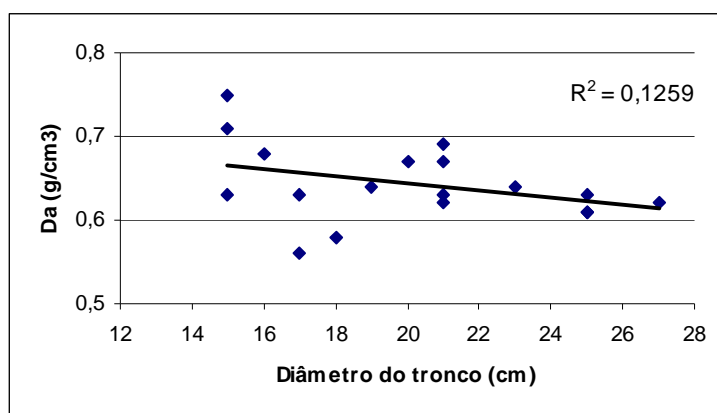


Figura 24 - Correlação entre a densidade aparente média do lenho e o diâmetro do tronco das árvores de *Tectona grandis*

5.2.3.2 Densidade básica do lenho do tronco das árvores

A aplicação do método não destrutivo - máximo teor de umidade - possibilitou que, com 2 determinações de massa (completamente seca e completamente saturada) dos corpos de prova do lenho com forma irregular, a obtenção dos valores de densidade básica.

Os perfis diametrais de densidade básica do lenho do tronco de 3 árvores (4, 12 e 17) de *Tectona grandis*, representativas das 18 analisadas (Anexo J), indicam um aumento do seu valor a partir da medula, com estabilização no lenho externo, próximo à casca (Figura 26).

As árvores de *Tectona grandis* mostram menores valores médios de densidade básica do lenho na região interna do tronco ($0,48 \text{ g/cm}^3$) e com menor variação em relação a sua região externa ($0,62 \text{ g/cm}^3$), com maior variação, caracterizando a madeira juvenil e adulta, respectivamente.

A densidade básica do lenho das 18 árvores de *Tectona grandis* (Tabela 8) indica diferenças estatísticas significativas, possibilitando agrupar as árvores em 5 classes: (i) as de menor densidade (árvores 11 e 9, com densidade média de 0,49 g/cm³; variação de 0,48-0,49 g/cm³); (ii) densidade intermediária inferior (árvores 15, 4, 1 e 13, com densidade média de 0,51 g/cm³; variação de 0,50-0,52 g/cm³); (iii) densidade intermediária média (árvores 8, 3, 10, 18, 17, 12, 17, 2, 6 e 5, com densidade média de 0,55 g/cm³; variação de 0,53-0,57 g/cm³); (iv) densidade intermediária superior (árvore 16, com densidade média de 0,58 g/cm³); e (v) de densidade máxima (árvore 14, com densidade média de 0,62 g/cm³).

O agrupamento em 5 classes pelo teste estatístico Scott-Knott, (com significância 5% ($p < 0,05$)) agrupou árvores com valores similares de densidade básica média do lenho. Conforme verificado para a densidade aparente do lenho, as árvores da classe (v) de maior densidade básica do lenho possuem maior % de lenho tardio principalmente na madeira adulta induzindo o aumento da densidade média. As árvores da classe (i), de menor densidade básica do lenho têm maior % de lenho inicial principalmente na região de madeira juvenil, reduzindo a densidade média.

A densidade mínima e máxima do lenho variou de 0,42-0,55 e 0,52-0,69 g/cm³, respectivamente, sendo que as árvores 4-15-11 e 14 de *Tectona grandis*, foram as de menor e maior densidade básica do lenho. Para as 18 árvores de *Tectona grandis* os valores de densidade básica média, mínima e máxima foram de 0,54, 0,42 e 0,69 g/cm³. O método do máximo teor de umidade aplicado na determinação da densidade básica do lenho (segmentos do lenho = 5 mm diâmetro; 1 comprimento; massa verde/volume saturado) difere do método densitométrico (lenho completo = 2 mm espessura; 40 µm distância; massa/volume 12% umidade), indicando, no entanto, a mesma tendência, embora, com menor precisão em relação aos limites e valores de densidade dos anéis de crescimento. O valor médio de densidade básica do lenho das árvores de *Tectona grandis* é próximo ao apresentado por Roque e Ledezma (2003), *apud* Lima *et al.* (2009).

O coeficiente de variação da densidade básica do lenho média, mínima e máxima foi baixo, de 3,94-10,76% nas árvores 17 e 4, respectivamente, para a densidade aparente média; de 7,7-6,9% para a densidade básica mínima e máxima, respectivamente. A variação da densidade deve-se ao efeito dos lenhos inicial e tardio dos anéis de crescimento anuais.

Tabela 8 - Valores médios de densidade básica (g/cm^3) do lenho do tronco das árvores de *Tectona grandis*

Árvore (n ^o)	Diâmetro do tronco (cm)	Densidade básica (g/cm^3)		
		Média	Mínima	Máxima
11	18	0,48 A ¹ ($\pm 0,04$; 7,21) ²	0,42	0,56
9	17	0,49 A ($\pm 0,02$; 8,55)	0,43	0,52
15	15	0,50 B ($\pm 0,04$; 6,18)	0,42	0,54
4	16	0,51 B ($\pm 0,05$; 10,76)	0,42	0,61
1	24	0,52 B ($\pm 0,04$; 5,88)	0,46	0,60
13	26	0,52 B ($\pm 0,02$; 5,55)	0,49	0,56
8	21	0,53 C ($\pm 0,03$; 4,73)	0,47	0,57
3	21	0,54 C ($\pm 0,03$; 5,11)	0,50	0,63
10	23	0,54 C ($\pm 0,03$; 4,83)	0,47	0,60
18	20	0,53 C ($\pm 0,03$; 6,34)	0,46	0,60
17	25	0,55 C ($\pm 0,03$; 8,76)	0,50	0,59
12	25	0,54 C ($\pm 0,03$; 5,61)	0,48	0,62
17	19	0,54 C ($\pm 0,04$; 3,94)	0,47	0,59
2	21	0,55 C ($\pm 0,05$; 7,56)	0,47	0,64
6	19	0,56 C ($\pm 0,03$; 7,35)	0,47	0,60
5	16	0,57 C ($\pm 0,03$; 5,38)	0,51	0,64
16	14	0,58 D ($\pm 0,03$; 7,19)	0,54	0,66
14	15	0,62 E ($\pm 0,05$; 5,96)	0,55	0,69
		0,54 ($\pm 0,05$; 6,5)	0,47 ($\pm 0,04$; 7,7)	0,60 ($\pm 0,04$; 6,9)

1 Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente, pelo teste de Scott-Knott, significância 5% ($p < 0,05$).

2 Valores entre parênteses correspondem ao desvio padrão (g/cm^3) seguido do coef. de variação (%).

A correlação entre o diâmetro do tronco das árvores de *Tectona grandis* e a densidade básica média do lenho apresenta um baixo coeficiente de determinação (R^2) de 0,0269 (Figura 25), indicando que densidade básica do lenho independe do diâmetro do tronco das árvores.

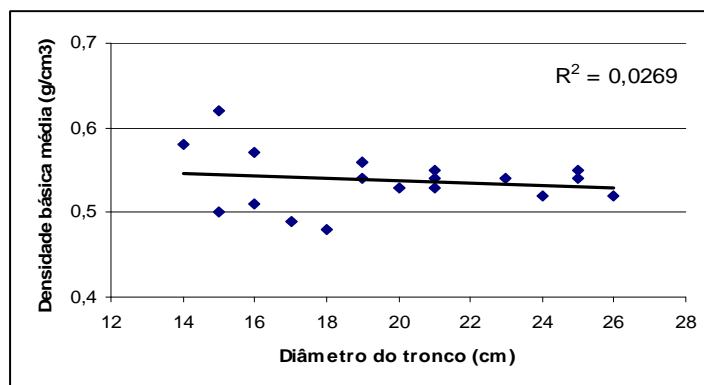


Figura 25 - Correlação entre a densidade básica média do lenho e o diâmetro do tronco das árvores de *Tectona grandis*

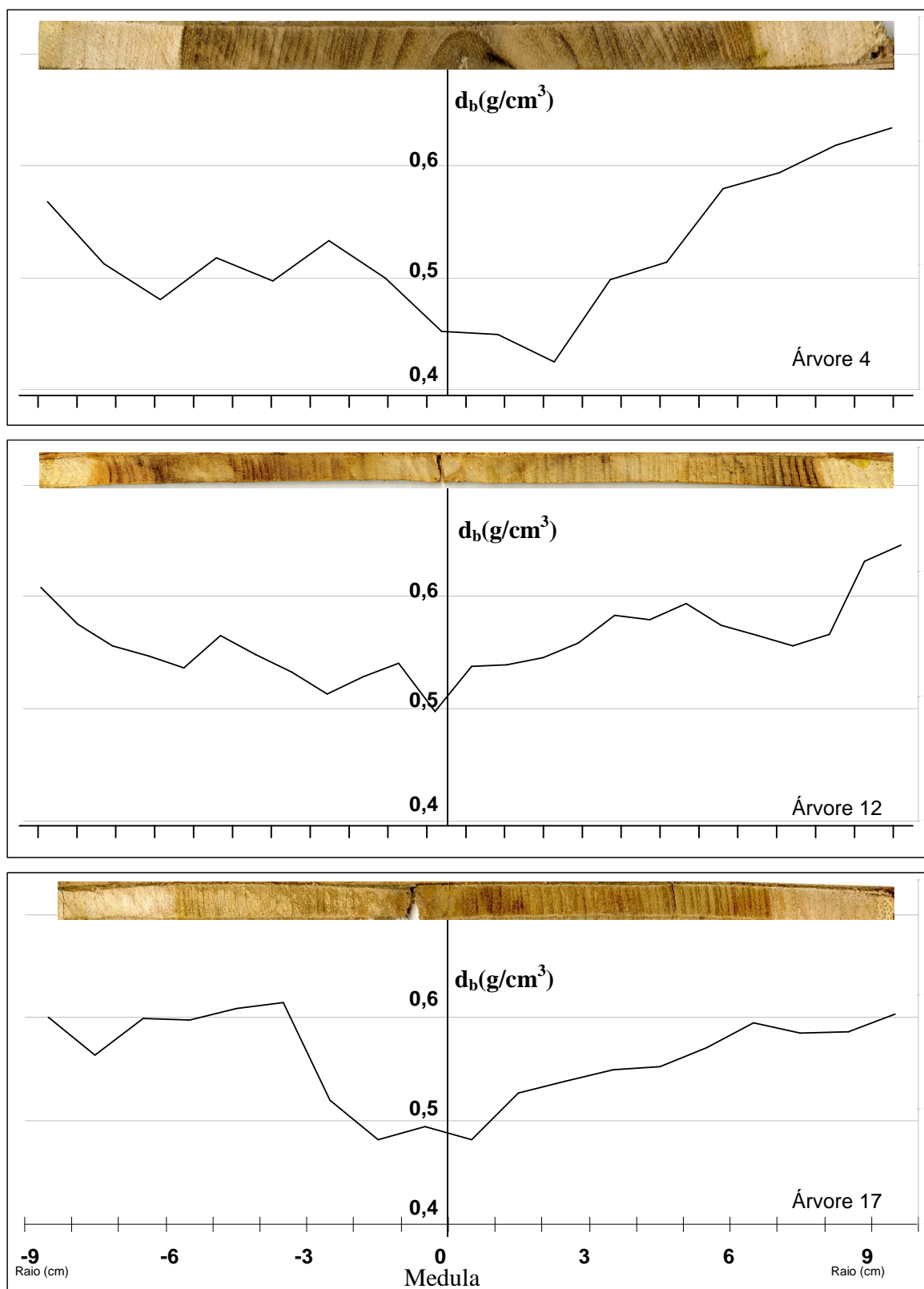


Figura 26 - Seção transversal do lenho do tronco das árvores 4, 12 e 17 de *Tectona grandis*, com a respectiva variação da densidade básica do lenho (g/cm^3), na direção casca-casca

5.2.3.3 Teor de umidade do lenho do tronco das árvores

Os perfis diametrais de teor de umidade do lenho do tronco de 3 árvores (4, 12 e 17) de *Tectona grandis*, representativas das 18 analisadas (Anexo J), indicam uma diminuição do seu valor a partir da medula, com estabilização no lenho externo, próximo à casca (Figura 28).

As árvores de *Tectona grandis* mostram na região interna do lenho maiores valores médios de teor de umidade (em torno de 114%) e com menor variação, em relação à externa com menor valor (em torno 98%).

O teor de umidade do lenho das 18 árvores de *Tectona grandis* (Tabela 9) indica diferenças estatísticas significativas, agrupando as árvores em 5 classes: (i) as mais baixas (árvore 5, com teor de umidade médio de 88%); (ii) intermediária inferior (árvores 2, 16, 14 e 17, com teor de umidade médio de 98%; variação de 97-101%); (iii) intermediária média (árvores 6, 7, 8, 15, 10 e 3, com teor de umidade médio de 109%; variação de 104-116%); (iv) intermediária superior (árvores 11, 12, 13 e 18, com teor de umidade médio de 118%, com variação de 114-119%); e (v) de maior valor (árvores 9, 1 e 4, com teor de umidade médio de 124%, variação de 122-124%).

O agrupamento das 5 classes pelo teste estatístico Scott-Knott, (com significância 5% ($p < 0,05$)) reúne árvores com teor médio de umidade similar. As árvores da classe (v) com teor de umidade mais elevado têm maior % de lenho inicial constituído por fibras de parede celular delgada e com água capilar preenchendo o seu lume e os espaços intercelulares na região da madeira juvenil, principalmente, aumentando o valor médio do teor de umidade. As árvores da classe (i) com menor teor de umidade do lenho têm maior % de lenho tardio, principalmente, na madeira adulta, constituído por fibras de parede espessa reduzindo o valor do teor de umidade.

O teor de umidade mínimo e máximo do lenho do tronco variou de 65-110 e 109-159%, respectivamente, sendo que o lenho das árvores 15-1 e 5-3 de *Tectona grandis*, foram as de menor e maior teor de umidade do lenho. Para as 18 árvores de *Tectona grandis*, os valores de teor de umidade médio, mínimo e máximo do lenho foram de 110, 65 e 159%.

O coeficiente de variação do teor de umidade médio, mínimo e máximo foi baixo, de 6,50-18,55% nas árvores 12 e 18, respectivamente, o teor de umidade médio; de 13,45-9,9% para teores de umidade mínimo e máximo, respectivamente. A variação do teor de umidade deve-se ao efeito dos lenhos inicial e tardio dos anéis de crescimento anuais.

Tabela 9 - Valores médios do teor de umidade (%) do lenho do tronco das árvores de *Tectona grandis*

Árvore (n ^o)	Diâmetro do tronco (cm)	Teor de umidade (%)		
		Médio	Mínimo	Máximo
5	16	88 A (± 14; 9,48)	71	109
2	21	97 B (± 9; 7,38)	82	123
16	14	97 B (± 20; 10,68)	90	114
14	15	99 B (± 8; 11,02)	84	128
17	19	101 B (± 7; 14,98)	91	123
6	19	104 C (± 13; 8,70)	89	129
7	25	106 C (± 9; 9,29)	78	121
8	21	109 C (± 10; 6,39)	99	123
15	15	108 C (± 13; 7,53)	65	136
10	23	110 C (± 9; 9,13)	85	129
3	21	116 C (± 9; 11,57)	102	159
11	18	114 D (± 10; 9,20)	95	141
12	25	120 D (± 13; 6,50)	102	144
13	26	119 D (± 11; 12,95)	102	135
18	20	119 D (± 9; 18,55)	98	142
9	17	122 E (± 7; 6,78)	110	146
1	24	125 E (± 8; 9,09)	104	141
4	16	124 E (± 12; 10,79)	102	155
		110 (± 13; 13,45)	92 (± 13; 13,45)	133 (± 13; 9,9)

1 Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente, pelo teste de Scott-Knott, significância 5% ($p < 0,05$).

2 Valores entre parênteses correspondem ao desvio padrão (%) seguido do coef. de variação (%).

A correlação entre o diâmetro do tronco e o teor de umidade médio do lenho das árvores de *Tectona grandis* apresentou valor de 0,1646 para o coeficiente de determinação (R^2) considerado baixo (Figura 27).

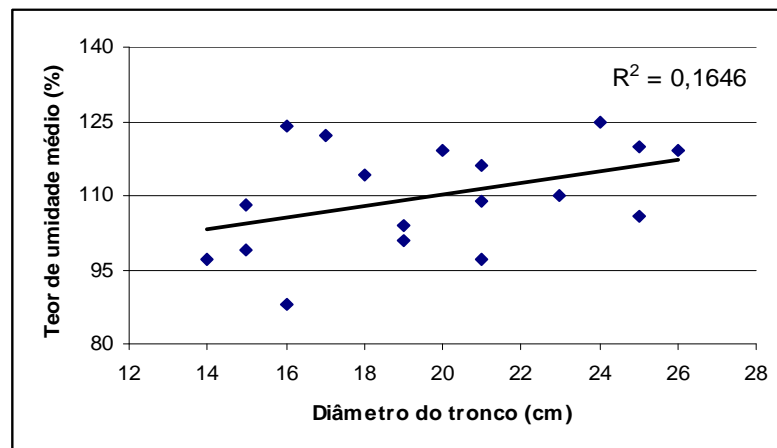


Figura 27 - Correlação entre o teor de umidade do lenho e o diâmetro do tronco das árvores de *Tectona grandis*

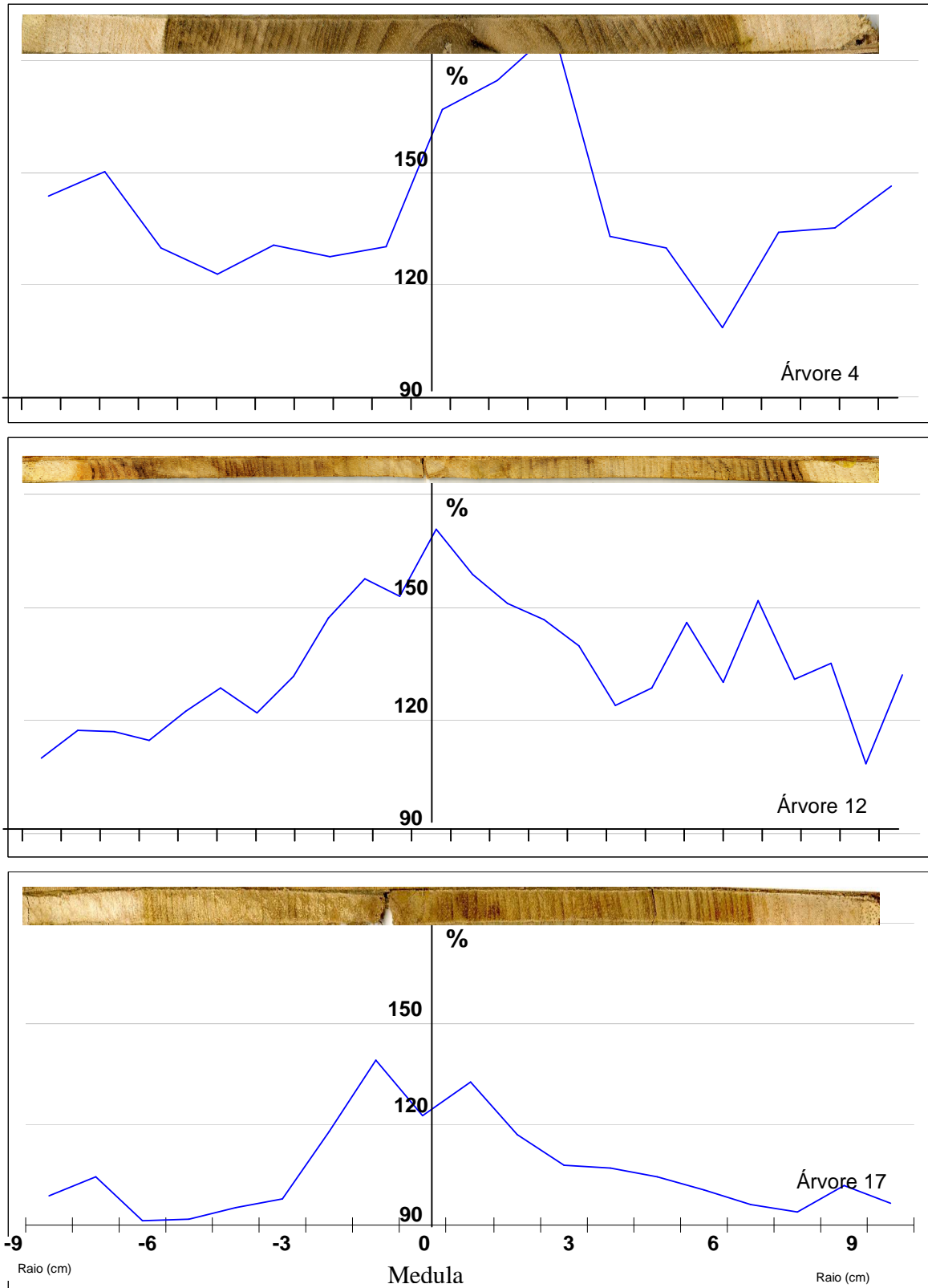


Figura 28 – Seção transversal do lenho do tronco das árvores 4, 12 e 17 de *Tectona grandis*, com a respectiva variação do teor de umidade do lenho (5), na direção casca-casca

5.2.4 Velocidade de onda mecânica com as propriedades físicas do lenho de *Tectona grandis*

O coeficiente de Pearson, probabilidade do teste t para $H_0: \rho=0$ para as variáveis densidade básica e aparente, teor de umidade e velocidade de onda no lenho das árvores de *Tectona grandis*, com número de casos (N)= 355, são apresentados na Tabela 10.

O valor do coeficiente de Pearson para a correlação entre a velocidade de onda e a densidade básica e aparente do lenho foi de -0,008 e 0,065, respectivamente, sendo negativo para a densidade básica e de baixo valor para as duas densidades. A correlação entre a velocidade de onda e o teor de umidade de umidade do lenho foi de 0,083, sendo positiva e, da mesma forma, com baixo valor.

A análise da qualidade da madeira através da variável velocidade de onda, não apresentou correlação satisfatória, confirmando a afirmação de Calegari et al. (2008), onde os autores na avaliação da velocidade de onda para as árvores vivas não se deve levar em conta apenas módulo de elasticidade dinâmico e a massa específica do material, uma vez que, existem outros fatores que influenciam na propagação das ondas, tais como: características anatômicas, teor de umidade, massa específica, inclinação e distorção da grã, nós, bem como tipo de transdutores/sensores e tamanho de amostras.

A correlação entre o teor de umidade e a densidades básica e aparente do lenho foi de -0,527 e -0,458, respectivamente, sendo negativa. Tais correlações negativas podem ser confirmadas pelos gráficos no Anexo J, onde é possível perceber a sincronia do aumento do teor de umidade com a diminuição da densidade básica e vice-versa.

A correlação da densidade básica e aparente do lenho foi de 0,769, sendo positiva e de alto valor, confirmando a metodologia de densitometria de raios X para determinação da densidade aparente e a metodologia do máximo teor de umidade para determinação da densidade básica.

Em relação à significância pelo teste t, as variáveis de densidade básica e aparente, teor de umidade e velocidade da onda mecânica no lenho das árvores de *Tectona grandis* não foram significativas.

Tabela 10 - Coeficiente de correlação de Pearson, seguido da probabilidade do teste t para $H_0: \rho = 0$ para a densidade básica (g/cm^3), aparente (g/cm^3), teor de umidade (%) e velocidade de onda (m/s) no lenho das árvores de *Tectona grandis*

Parâmetros do lenho	Densidade básica	Teor de umidade	Velocidade de onda	Densidade aparente
Densidade básica	1	-	-	-
Teor de umidade	- 0,527 $\leq 0,01$	1	-	-
Velocidade de onda	- 0,008 0,876	0,083 0,120	1	-
Densidade aparente	0,769 $\leq 0,01$	- 0,458 $\leq 0,01$	0,065 0,224	1

(¹) $\leq 0,01$ – rejeita-se H_0 com valor de $\rho \neq 0$; $< 0,05$ – rejeita-se H_0 com valor de $\rho \neq 0$ significativo pelo teste t; $> 0,05$ – não se rejeita H_0 , pois valor de $\rho \neq 0$ não é significativo pelo teste t.

5.3 Propriedades do lenho do tronco das árvores em pé de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* e de *Tectona grandis*

Na avaliação comparativa da imagem da seção transversal do lenho do tronco das árvores das duas espécies, obtida pelo tomógrafo de impulso verificam-se as situações: (i) *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, observam-se menor variação da cores, maior homogeneidade e predominância da coloração azul (região central) e esverdeada (região periférica) e em (ii) para *Tectona grandis* maior variação de cores, maior heterogeneidade e predominância da coloração verde, azul (dispersa em diferentes regiões do lenho) até amarela, vermelha e violeta (em regiões localizadas do lenho de algumas árvores). Essas diferenças nas imagens da seção transversal podem estar relacionadas com estado de sanidade do lenho das árvores das duas espécies: as árvores de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* são mais jovens (18 anos) e não foram submetidas à desrama ou outras práticas de manejo que afetem a qualidade do lenho; as de *Tectona grandis* são adultas (52 anos), tendo sido aplicados sucessivos desbastes e, nas últimas décadas, extraídas amostras do lenho com sondas de Pressler para análises da anatomia e da estrutura dos anéis de crescimento, induzindo a formação de regiões internas de tecido de cicatrização.

Apesar de não haver diferença significativa para os valores médios de velocidade de onda no lenho das duas espécies, nas árvores de *Tectona grandis* a velocidade média é menor e com maior variação (1076 ± 215 m/s), bem como existe uma maior variação das velocidades médias mínima e máxima, de $849 (\pm 164)$ e $1394 (\pm 232)$ m/s, respectivamente, em relação às árvores de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* (Figuras 11 e 21; Tabela 11).

A densidade aparente média do lenho foi significativamente mais elevada nas árvores de *Tectona grandis*; os valores de densidade mínima e máxima média são mais discrepantes no lenho das árvores de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* (Tabela 11) sendo indicativos dos lenhos inicial e tardio dos anéis de crescimento anuais, destacados pela densitometria de raios X (Figuras 14 e 23). A densidade básica média do lenho foi, da mesma forma, maior e mais significativa nas árvores de *Tectona grandis*; observou-se maior discrepância no lenho das árvores de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, embora com menor diferença pela amostragem de segmentos do lenho com 1 cm de comprimento (Figuras 16 e 23; Tabela 11).

O teor de umidade médio do lenho foi significativamente mais elevado nas árvores de *Tectona grandis*; observou-se a maior discrepância dos valores médios mínimo e máximo no lenho das árvores de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, pela sua estrutura anatômica caracterizada pelos lenhos inicial e tardio dos anéis de crescimento anuais.

Tabela 11 - Densidade básica (g/cm^3), aparente (g/cm^3), teor de umidade (%) e velocidade de onda (m/s) no lenho do tronco das árvores de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* e *Tectona grandis*.

Parâmetros/espécies	<i>Pinus caribaea</i> var. <i>hondurensis</i>			<i>Tectona grandis</i>		
	Média	Mínimo	Máximo	Média	Mínimo	Máximo
Velocidade de onda (m/s)	1096 a (± 103)	922 (± 55)	1237 (± 85)	1076 a (± 215)	849 (± 164)	1394 (± 232)
Densidade aparente (g/cm^3)	0,54 a ($\pm 0,17$)	0,26 ($\pm 0,04$)	1,08 ($\pm 0,05$)	0,64 b ($\pm 0,09$)	0,37 ($\pm 0,05$)	0,92 ($\pm 0,07$)
Densidade básica (g/cm^3)	0,46 a ($\pm 0,087$)	0,34 ($\pm 0,04$)	0,60 ($\pm 0,07$)	0,54 b ($\pm 0,05$)	0,47 ($\pm 0,04$)	0,60 ($\pm 0,04$)
Teor de umidade (%)	83 a (± 33)	42 (± 14)	134 (± 25)	110 b (± 13)	92 (± 13)	133 (± 13)

(¹) $\leq 0,01$ – rejeita-se H_0 com valor de $p \neq 0$; $< 0,05$ – rejeita-se H_0 com valor de $p \neq 0$ significativo pelo teste t; $> 0,05$ – não se rejeita H_0 , pois valor de $p \neq 0$ não é significativo pelo teste t. Valores entre parênteses correspondem ao desvio padrão (%)

6 CONCLUSÕES

Os resultados do presente trabalho, permitem concluir que:

- (i) a tomografia de impulso e a densitometria de raios X possibilitam a caracterização do lenho das árvores de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* e de *Tectona grandis*;
- (ii) a estrutura anatômica macroscópica do lenho e dos anéis de crescimento descrita característica das coníferas (*Pinus*) e das folhosas (*Tectona*) é similar à apresentada na literatura especializada;
- (iii) as imagens tomográficas da seção transversal do lenho indicam um bom estado de sanidade (*Pinus*) e regiões afetadas do lenho (*Tectona*); a velocidade de onda é maior na região interna em relação à externa (*Pinus*) e maior em um dos raios, decrescendo em direção à medula e do raio oposto (*Tectona*) do lenho, e permite agrupar as árvores em 4 (*Pinus*) e 6 (*Tectona*) classes; observa-se a correlação do diâmetro do tronco com o tempo médio da velocidade de onda;
- (iv) os perfis diametrais de densidade aparente e básica do lenho indicam aumento da medula para a casca e estabilização no lenho externo; os perfis radiais de densidade aparente permitem a precisa demarcação dos anéis de crescimento anuais; os valores médios de densidade agrupam as árvores em 3-2 (*Pinus*) e 6-5 (*Tectona*) classes não se observando correlação com o diâmetro do tronco;
- (v) os perfis diametrais indicam uma diminuição do teor de umidade da medula para a casca e estabilização no lenho externo; permitem agrupar as árvores em 3 (*Pinus*) e 5 (*Tectona*) classes e não se correlacionam com o diâmetro do tronco;
- (vi) o coeficiente de correlação de Pearson indicou valores negativos e significativos entre a velocidade de onda e a densidade aparente e básica do lenho (*Pinus*) e entre a velocidade de onda e a densidade básica do lenho (*Tectona*); positiva e não significativa para o teor de umidade (*Pinus*) e positiva e não significativa para o teor de umidade e a densidade aparente (*Tectona*); negativa entre o teor de umidade e a densidade aparente e básica do lenho.
- (vii) a velocidade média de onda no lenho é menor com maior variação das velocidades médias mínima e máxima em *Tectona*, em relação às árvores de *Pinus*.
- (viii) a densidade aparente e básica média do lenho foi significativamente mais elevada (*Tectona*) e os valores de densidade mínima e máxima média foram mais discrepantes no lenho das árvores de *Pinus*.

(ix) o teor de umidade médio do lenho foi significativamente superior em *Tectona*, com a maior discrepância dos valores médios mínimo e máximo no lenho das árvores de *Pinus*.

REFERÊNCIAS

- ALMODEI, J.B.; OLIVEIRA, B.R.U.; GURGEL, M.M.; MEDEIROS, R.A.; LATORRACA, J.V.F. Avaliação tomográfica de árvores de *Tectona grandis* L. f. para avaliação preliminar da qualidade da madeira. In: SIMPÓSIO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA DO RIO DE JANEIRO, 2., 2010, Rio de Janeiro. **Anais...** Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. 1 CD-ROM.
- ALVARADO, J.R.; TOMAZELLO FILHO, M.; POLLITO, P.A.Z.; LOBÃO, M.S. Variação da densidade do lenho e relação com a largura dos anéis de crescimento de árvores de mogno, *Swietenia macrophylla*, da floresta tropical amazônica do Peru. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 86, p. 171-179, 2010.
- ALZATE, S.B.A. **Caracterização da madeira de árvores de clones de *Eucalyptus grandis*, *E. saligna* e *E. grandis* x *urophylla***. 2004. 133p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais – Tecnologia de Produtos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.
- AMARAL, A.C.B. **Implantação da metodologia de densitometria de raios X em madeira**. 1994. 143 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1994.
- AMARAL, A.C.B.; TOMAZELLO FILHO, M. Avaliação das características dos anéis de crescimento de *Pinus taeda* pela microdensitometria de raios X. **Revista Ciência e Tecnologia**, Piracicaba, v.6, n.11, p. 17-23, 1998.
- AMARAL, A.C.B.; FERREIRA, M.; COUTO, H.T.Z. do Métodos de avaliação da densidade básica da madeira de populações de pinheiros tropicais. **IPEF**, Piracicaba, v. 15, p. 47-67, 1977.
- BENDTSEN, B.A.; SENFT, J. Mechanical and anatomical properties in individual growth ring of plantation grown eastern cottonwood and loblolly pine., **Wood and Fiber Science**, Madison, v. 18, n. 1, p. 23–38, 1986.
- BENJAMIN, C.A. **Estudo da estrutura anatômica e das propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Corymbia (Eucalyptus) citriodora* e *Eucalyptus grandis***. 2006. 158p. Tese (Doutorado de Agronomia – Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agronômicas – Universidade Estadual Paulista “Júlio Mesquita Filho”, Botucatu, 2006.
- BERNI, C.A.; BOLZA, E.; CHRISTENSEN, F.J. **South American timbers: the characteristics, properties and uses of 190 species**. Melbourne: Ivory House, 1979. 229 p.
- BONDUELLE, A.; CENI, E.A. Usinagem do *Pinus*: esforço e potência. **Revista da Madeira**, Curitiba, p. 144-147, 2002. Edição especial.
- BUCUR, V. Environment modifiers of wood structural parameters detected with ultrasonic waves. In: **Acoustics of wood**. Heidelberg; Berlin: Springer-Verlag, chap. 9, p. 242-270, 2006.

BUSNARDO, C.A., GONZAGA, J.V.; FOELKEL, C.; MENOCELLI, S. Em busca da qualidade ideal da madeira do eucalipto para produção de Celulose. IV. Altura ideal da amostragem para avaliação da densidade para árvores de *E. grandis*. In: CONGRESSO ANUAL DA ABCP, Semana do Papel, São Paulo, 1987.

CALEGARI, L.; STANGERLIN, D.M.; SANTINI, E.J.; HASEILEN, C.R.; GATTO, D.A., DO CARMO, P.I.O.; FILHOS, L.C.P.S., Avaliação de alguns fatores influentes na velocidade ultrassônica na madeira. **FLORESTA**, Curitiba, PR, v. 38, n. 4, p. 607-615, 2008.

CALIL JÚNIOR, C.; MINÁ, A.J.S. Vibração transversal: um método eficiente para classificação de peças estruturais de madeira. Campina Grande/PB: **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 7, n. 2, p. 335-338, 2003.

CARDOSO, N.S. **Caracterização anatômica da madeira, fenologia e relações com a atividade cambial de árvores de Teca (*Tectona grandis* L.f.) – Verbenaceae**. 1991. 117p. Dissertação (Mestre em Ciências Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1991.

CARMO, A.P.T. **Avaliação de algumas propriedades da madeira de seis espécies de eucalipto**. 1996. 74p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1996.

CHIMELO, J.P. **Manual de preservação de madeiras**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, Divisão de Madeiras, v. 1, cap.3 1986. p. 41 – 67: Anatomia da madeira.

CHOWDHURY, K.A. The formation of growth rings in Indian trees. **Indian Forestry. Records**, New Delhi, n. 1, p. 1-3. 1939.

CHUDNOFF, M. **Tropical timbers of the world**. Washington DC: U.S. Department of Agriculture, Forest Service., 1984. 466 p. (Agriculture handbook)

COSTA, D.S.P.; TOMAZELLO FILHO, M.; CASTRO, V.R. Comparação de métodos de densitometria de raios X na determinação do perfil radial de densidade de *Cedrela odorata*, cedro, Meliaceae. In: SIICUSP - SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, 8., 2010. resumo 2785, Piracicaba-SP, 2010.

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

DONALDSON, L.A Wood anatomy of five exotic hardwoods grown Samoa. **New Zealand Journal of Forestry Science**, Rotorua, v. 14, n. 3, p. 18-30, 1984.

DVORAK, W.S.; MOURA, V.P.G. Provenance and family variation of *Pinus caribaea* var. *hondurensis* from Guatemala and Honduras, grown in Brazil, Colombia and Venezuela. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, n. 2, p. 225-234, 2001.

FERREIRA, A.T.B. **Caracterização da estrutura do lenho, dos anéis de crescimento e dos canais de resina de árvores de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*** Barr. et Golf. 2009. 84 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

FERREIRA, A.T.B.; TOMAZELLO FILHO, M. Caracterização dos anéis de crescimento de árvores de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* Barr. et Golf. por densitometria de raios X. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 37, n. 83, p. 287-298, set. 2009.

FOELKEL, C.E.B.; BRASIL, M.A.M.; BARRICHELO, L.E.G. Métodos para determinação da densidade básica de cavacos para coníferas e folhosas. **IPEF**, Piracicaba, n. 2/3, p. 65-74, 1971.

FOREST PRODUCTS LABORATORY **Wood handbook**: Wood as an engineering material. Washington: U.S.D.A., 1987. 466 p. (Agriculture Handbook, 72).

FREITAS, M.C.P.G. **Madeiras da Índia portuguesa**. Memórias da Junta de Investigações do Ultramar. Segunda série. Lisboa, 1963. 93 p.

GALVANI, E. Estudo comparativo dos elementos do balanço hídrico climatológico para duas cidades do Estado de São Paulo e para Paris. *Confins* 2008, posto Acesso em; 10 nov. 2008. Disponível em: URL : <http://confins.revues.org/4733>

GALVÃO, A.P.M.; JANKOWSKY, I.P. **Secagem racional da madeira**. São Paulo: Nobel, 1985. 111p.

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, 2004.

GOLFARI, L.; CASER, R.L.; MOURA, V.P.G. **Zoneamento ecológico esquemático para reflorestamento no Brasil**. Belo Horizonte: PNUD/FAO/IBDF/BRA-45, 1978. 66 p. (Série Técnica, 1).

GONÇALEZ, J.C.; VIEIRA, F. S.; CAMARGOS, J.A.A; ZERBINI, N.J.J. Influência do sítio nas propriedades da madeira de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. **Cerne**, Lavras, v. 15, n. 2, p. 251-255, 2009.

GOVAERE, G.; CARPIO, I. ; CRUZ, L. **Descripción anatómica, durabilidad y propiedades físicas y mecánicas de *Tectona grandis***. Laboratorio de Productos Forestales, Costa Rica:Universidad de Costa Rica, 2003. 15p.

HUGHES, J.F.; SARDINHA, R.M.A. The application of optical densitometry in the study of wood structure and properties. **Journal of Microscopy**, Oxford, v. 104, n. 1, p. 91-103, 1975.

JANE, F.W. **The Structure of Wood**. 2nd. Ed. London: Adam and Charles Black, 1956. 427 p.

KAOSA-ARD, A. *Tectona grandis* (L.f.) natural distribution and related factors. **Silvicultura**, São Paulo, v. 30, n. 2, p. 173-179, 1983.

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

KRIBBS, D.S. **Commercial foreign woods on the American market**. New York: Dover Publication, 1959. 164p.

LAMPRECHT, H. **Silvicultura nos trópicos**, Berlim: GTZ, 1990. 343p

LIMA, I.L.; FLORSHEIM, S.M.B.; LONGUI, E.L. Influência do espaçamento em algumas propriedades físicas da madeira de *Tectona grandis* Linn. F. **Cerne**, Lavras, v. 15, p. 244-250, 2009.

LIN, C.J.; TSAI, M.J.; LEE, C.J.; WANG, S.Y.; LIN, L.D. Effects of ring characteristics on the compressive strength and dynamic modulus of elasticity of seven softwood species. **Holzforschung**, Berlin, v. 61, p. 414-418, 2007.

LORENZI, H; SOUZA, H.M.; TORRES, M.A.V.; BACHER, L.B. **Árvores Exóticas no Brasil: madeiras, ornamentais e aromáticas**. Nova Odessa: Instituto Plantarum, 2003. 368 p.

LOUZADA, J.L.; KNAPIC, S.; PEREIRA, H. **Variação das componentes da densidade entre e dentro das árvores de *Quercus faginea***. Repository Universidade Técnica de Lisboa, 2010. p. 483-492.

MEDEIROS, J.G.S. **Anéis de crescimento de árvores de *Araucaria columnaris* Hook.: caracterização anatômica, densitométrica e aplicação no monitoramento ambiental**. 2005. 86 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

MIQUELONI, P.D.; ROGOSCHI, N.; TOMAZELLO FILHO, M. Caracterização da densidade da madeira de árvores de *Tectona grandis* através de densitometria de raios X. In: SIICUSP - SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, 15., 2007. resumo 745, Piracicaba-SP, 2007.

MOTHE, F.; SCIAMA, D.; LEBAN, J.M.; NEPVEU, G. Localisation de la transition bois initial - bois final dans un cerne de chêne par analyse microdensitométrique. **Annales des Sciences Forestières**, Champenoux, v. 4, n. 55, p. 437-449, 1998.

MOYA, R.; BERROCAL A.; SERRANO, J.R. M. 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*, Madrid, v. 18, n. 2, p. 119-131, 2009.

OLIVEIRA, B.R.U. **Dendrocronologia de árvores de teca na região de Cárceres, Mato Grosso**. 2011. 97 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2011.

OLIVEIRA, F.G.R. de; SALES, A. Efeito da densidade e do teor de umidade na velocidade ultrassônica da madeira. *Minerva*, São Carlos, v. 2, n. 1, p. 25-31, 2005.

OLIVEIRA, J.T.S. Estudo das propriedades físicas e tecnológicas da madeira de pindaíba (*Xilopia sericea* st. Hil.) IV. Densidade, umidade e secagem da madeira. *Revista Árvore*, Viçosa, v. 14, n. 2, p. 139-154, 1990.

OLIVEIRA, J.T.S.; HELLMEISTER, J.C.; TOMAZELLO FILHO, M. Variação do teor de umidade e da densidade básica na madeira de sete espécies de eucalipto. *Revista Árvore*, Viçosa, v. 29, n. 1, p. 115-127, 2005.

ONG, S.H. **A study in the variation in some structural features and some wood properties of *Pinus caribaea***. 1978. 286 p. Tese (Doutorado em Ciências) - Department of Forest, University of Oxford, Oxford, 1978.

PANTOJA, P.A. **Aplicação da espectroscopia de infravermelho próximo na caracterização da carga de petróleo para o processo de destilação atmosférica**. 2006. 88 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

PEREIRA, J.C.D. Um método alternativo para a determinação do peso seco de amostras de madeira. *Boletim de Pesquisa Florestal*, Colombo, n. 35, p. 59-65, jul./dez. 1997.

PEREIRA, L.C.R. **Tomografia de impulso para estimativa da densidade da madeira**. 2009. 48 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

PEREIRA, L.C.R.; 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.

PICUS. **Picus home page**. Disponível em: <<http://www.argus-electronic.de/index.php/en/picus-sonic-tomograph/faq-sonic>> Acesso: 30 set. 2010.

PIMENTEL, M.M.; SELEGATO, P.A.M.; GARCIA, J.N.; LIMA, I.L. Variações das propriedades da madeira de *Tectona grandis* (Linn. F. (teca) em função do espaçamento e da posição radial na tora. In: SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DO INSTITUTO FLORESTAL, 2., 2008. São Paulo. *Anais...* São Paulo: Instituto Florestal, v. 39, 2008. 6 p.(Série Registros).

PLUMPTRE, R.A. *Pinus caribaea*. v. 2: Wood properties. **Tropical Forestry Papers**, Oxford, n. 17, p. 1 - 148, 1984.

POLGE, H. Study of wood density variations by densitometric analysis of X-ray negatives of samples taken with a Pressler Auger. Symposium of I.U.F.R.O., Section 41, Melbourne, 1965. 19 p.

PONCE, R.H.; WATAI, L.T. **Manual de secagem da madeira**. Brasília: IPT/STI, 1985. 70 p. (Série Documentos, 22).

PRIYA, P. B.; BHAT, K. M. False ring formation in teak (*Tectona grandis* L.f.) and the influence of environmental factors. **Forest Ecology and Management**, Amsterdã, n. 108, p. 215-222, 1998.

QMS - QMS Tree Ring Analyzer Model QTRS-01X. Users Guide. Quintek Measurement Systems, Knoxville, TN.

RANZANI, G.; FREIRE, O.; KINJO, T. **Carta de solos do município de Piracicaba**. Piracicaba: ESALQ/USP, Centro de Estudos de Solos, 1966. 85p.

RICHTER, H.G.; DALLWITZ, M.J. Commercial timbers: descriptions, illustrations, identification, and information retrieval. 2000. Versão em português. Disponível em: <http://delta-intkey.com>. Acesso em: 25 jun. 2009.

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

ROLLO, F.M.A. **Identificação de padrões de resposta à tomografia de impulso em tipuanas (*Tipuana tipu* (Benth.) O. Kuntze)**. 2009. 126p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

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.

ROSS, R.J.; BRASHAW, B.K.; WANG, X.; WHITE, R.H.; PELLERIN, R.F. Wood and timber condition assessment manual. **Forest Products Laboratory**, Madison, 2004.

SAS INSTITUTE. **SAS/STAT User`s guide: version 6.08**. Carrey, v.2. 1997. 846p.

SBS – SOCIEDADE BRASILEIRA DE SILVICULTURA. Disponível em: http://www.sbs.org.br/area_plantada.htm. Acesso em: 10 jan. 2011.

SCARAMUZZI, G. A comparison of some methods for determining the basic density of increment cores of euramerican poplar hybrids. **WORLD FORESTRY CONGRESS**, 6., 1966. Madrid. **Proceedings...** v. 3, , Madrid, 1966. p. 3454-3459..

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

SCHWEINGRUBER, F.H. **Tree rings and environment: Dendroecology.** Berna: Paul Haupt Publishers, 1996. 609 p.

SETTE JUNIOR, C.R. **Aplicação de potássio e sódio no crescimento e na qualidade do lenho de árvores de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden.** 2010. 153 p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.

SETTE JUNIOR, C.R.; TOMAZELLO FILHO, M; DIAS, C.T.S.; CHAGAS, M.P.; LACLAU, J.P. Efeito da aplicação de potássio e sódio nas características do lenho de árvores de *Eucalyptus grandis* W. Hill, aos 24 meses de idade. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 39, n. 3, p. 535-546, 2009.

SEVERO, E.T.D. **Estudo sobre o efeito da vaporização nas propriedades e comportamento de secagem da madeira de *Eucalyptus dunnii* Maid.** 1998. 200 p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1998.

SILVA, J.C. **Caracterização da madeira de *Eucalyptus grandis* de diferentes idades visando sua utilização na indústria moveleira.** 2002. 160 p. Tese (Doutorado em Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.

SILVA, J.C.; OLIVEIRA, J.T.S.; TOMAZELLO FILHO, M.; KEINERT JR.; MATOS, J.L.M. Influência da idade e da posição radial na massa específica da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden. **Revista Floresta**, Paraná, v. 34, n. 1, p. 13-22, jan./abr. 2004.

SILVA, M.E.C.M; LOUZADA, J.L.P.C. Utilização da microdensitometria por raios X na avaliação qualitativa da madeira de choupo (*Populus x euramericana*.cv I.214).In: SIMPÓSIO DEL CHOPO,1., 2001. Zamora. **Proceedings...** Zamora, 2001. p.469-478.

SMITH, D.M. **A comparison of two methods for determining the specific gravity of small, samples of second growth Douglas-Fir.** U.S. Forest Products Laboratory. 1955. 21 p.(Report, 2033).

SMITH, D.M. **Maximum moisture content method for determining specific gravity of small wood samples.** U.S. Forest Products Laboratory, 1954. 8 p. (Report n.2014).

STAMM, A.J. **Wood and cellulose science.** New York:The Ronald Press , 1964. 549 p.

SUDO, S. Identification of tropical woods. **Bulletin of the Government Forest Experiment Station**, Tokyo, p.259-284.1963.

SUDHEENDRAKUMAR, V.V.; NAIR, K.S.S.; CHACKO, K.C. Phenology and seasonal growth trend of teak at Nilambur (Kerala). **Indian Journal of Forestry**, Kerala, n. 1, p. 42-46, 1993.

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

TOMAZELLO FILHO, M. Variação radial da densidade básica e da estrutura anatômica da madeira de *Eucalyptus gummifera*, *E. microcorys* e *E. pilularis*. **IPEF**, Piracicaba, n. 30, p. 45-54, 1985.

TOMAZELLO FILHO M.; BRAZOLIN, S.; CHAGAS, M.P.; OLIVEIRA, J.T.S.; BALLARIN, A.W. Application of technique in nondestructive evaluation of eucalyptus wood. **Maderas: Ciencia y Tecnologia**. Concepcion, v. 10, n. 2, p. 139-150, 2008.

TOMAZELLO FILHO, M.; CARDOSO, N.S. Seasonal cambium variations of the vascular cambium of teak (*Tectona grandis* L. f.) in Brazil. CAB international. **Tree-Rings Analysis**, p. 147-154. 1999.

TOMAZELLO FILHO, M.; CHAGAS, M.P.; ROQUE, R.M. Manual de aplicação de densitometria de raios-X em amostras de madeira, CRAD e CERD. Piracicaba-SP. 2005.32p.

ULIANA, L.R. **Aplicação da tomografia de impulso na avaliação da qualidade de árvores de maçaranduba, *Manikara hubrei* (Ducke) Chevalier**. 2010. 157 p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.

VAGANOV, E.A.; HUGHES, M.K.; SHASHKIN, A.V. **Growth dynamics of conifer tree rings. Images of past and future environments**. Germany: Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 2006. 354 p.

VIANA, L.C. **Uso do infravermelho próximo para predição de propriedades tecnológicas da madeira de *Eucalyptus***. 2008. 120 p. Dissertação (Mestre em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2008.

VINTILA, E. Untersuchungen über raumgewicht und schwindmasse von fruhund spatholz bei nadelholzern. **Holz als Roh-und Werkstoff**, Berlin, v. 2, n. 1, p. 345-357, 1939.

VITAL, B.R. Métodos de determinação da densidade básica. Viçosa, SIF, 1984. 21p. (Boletim Técnico, 1).

WEAVER, P.L. *Tectona grandis* L.f. Teak. SO-ITF-SM-64. New Orleans, LA: U.S. Department of Agriculture, **Forest Service**, Southern Forest Experiment Station. 1993. 18 p.

YAMAMOTO, K.; SULAIMAN, O.; KITIGAN, C.; CHOON, L. W.; NHAN, N.T. Moisture distribution in stems of *Acacia mangium*, *A. auriculiformis* and hybrid *Acacia* trees. **Jarq**, Tóquio, v. 37, n. 3, p. 207-212, 2003.

ANEXOS

Anexo A – Análise de variância das variáveis analisadas das árvores de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*

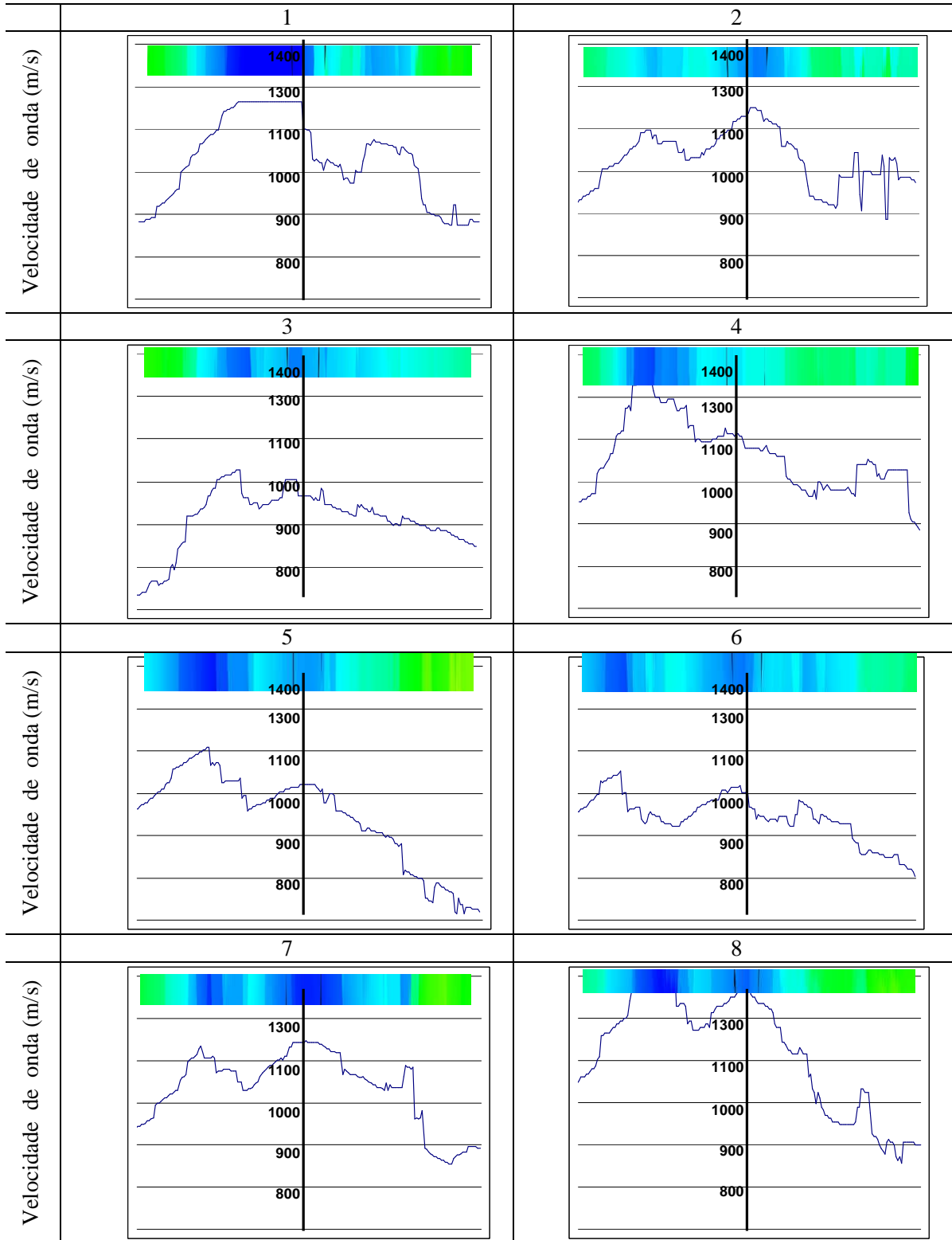
Variável		Soma de quadrados	(G.L)*	Quadrado médio	F	Significância
Velocidade de onda (m/s)	Árvore	1453751,62	17	80763,98	13,06	< 0,01
	Erro	2257298,48	364	6184,38		
	Total	3711050,09	381			
Densidade aparente (g/cm ³)	Árvore	1,41	17	0,08	9,23	< 0,01
	Erro	3,09	364	0,01		
	Total	4,50	381			
Densidade básica (g/cm ³)	Árvore	0,88	17	0,05	7,66	< 0,01
	Erro	2,34	364	0,01		
	Total	3,22	381			
Teor de umidade (%)	Árvore	123189,48	17	6843,86	8,19	< 0,01
	Erro	304920,35	364	835,40		
	Total	428109,83	381			

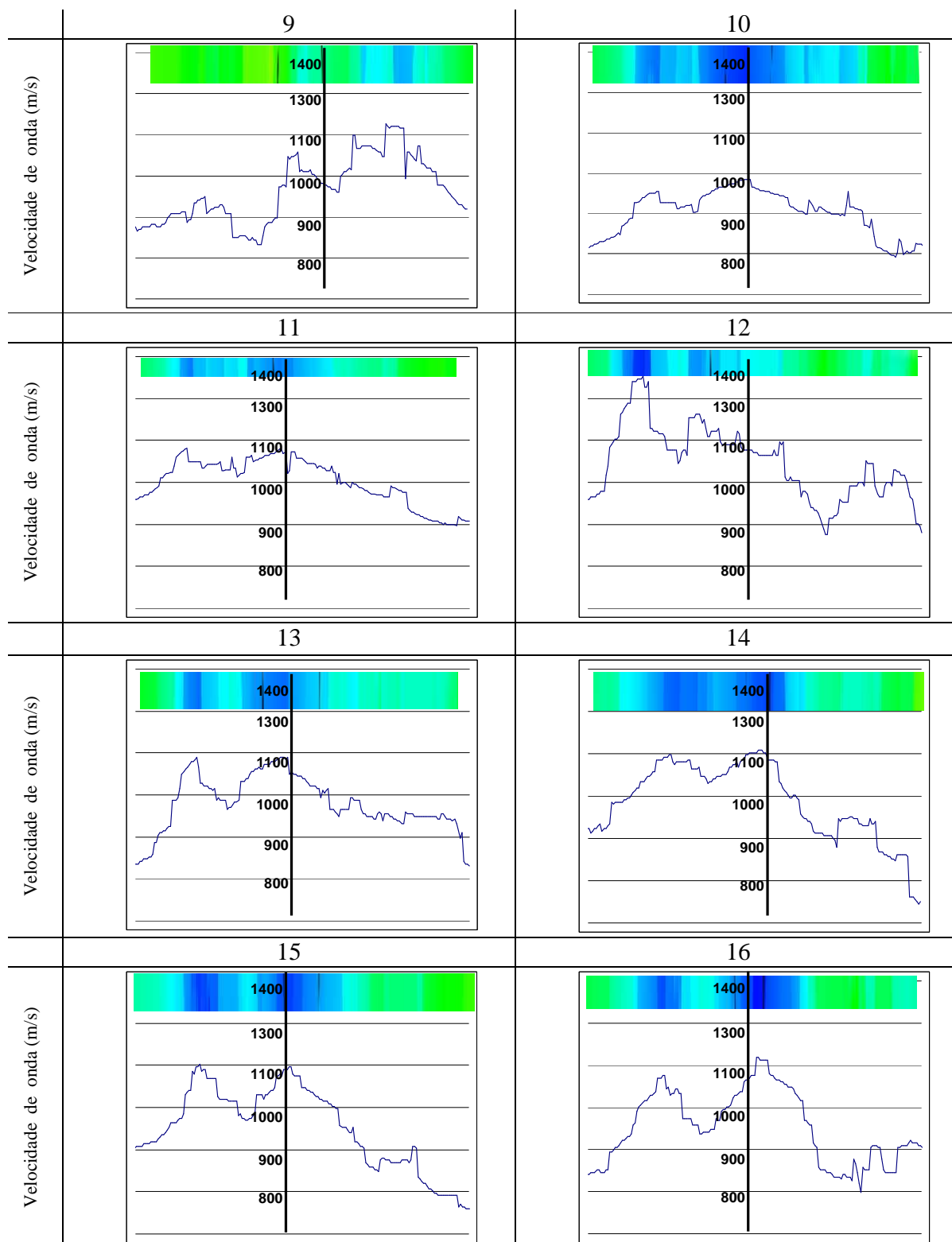
* Graus de liberdade

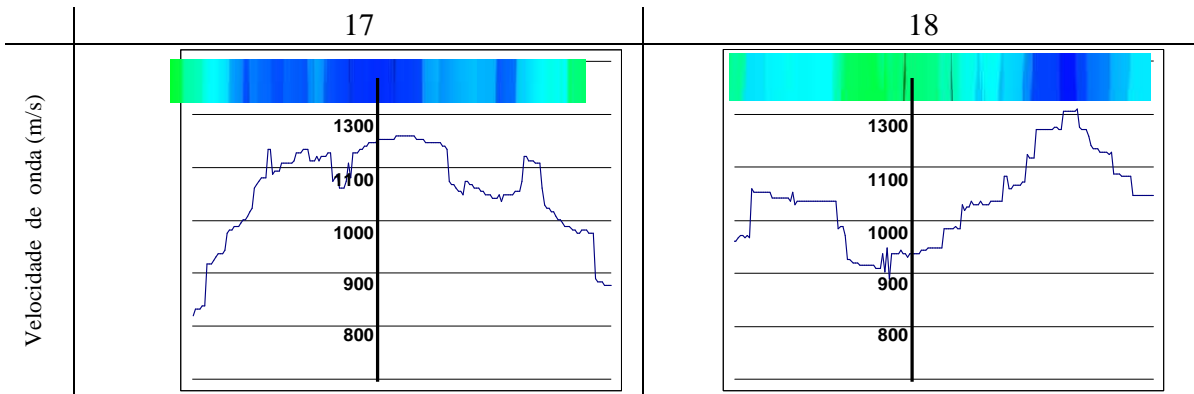
Anexo B - Diâmetro do tronco das árvores de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*

Árvore	Diâmetro do tronco (cm)	Distância entre sensores (cm)
1	22	6,3
2	18	5,1
3	16	4,6
4	16	4,6
5	18	5,1
6	23	6,6
7	21	6,0
8	23	6,6
9	23	6,6
10	18	5,1
11	18	5,1
12	25	7,1
13	26	7,4
14	21	6,0
15	21	6,0
16	21	6,0
17	16	4,6
18	13	3,7

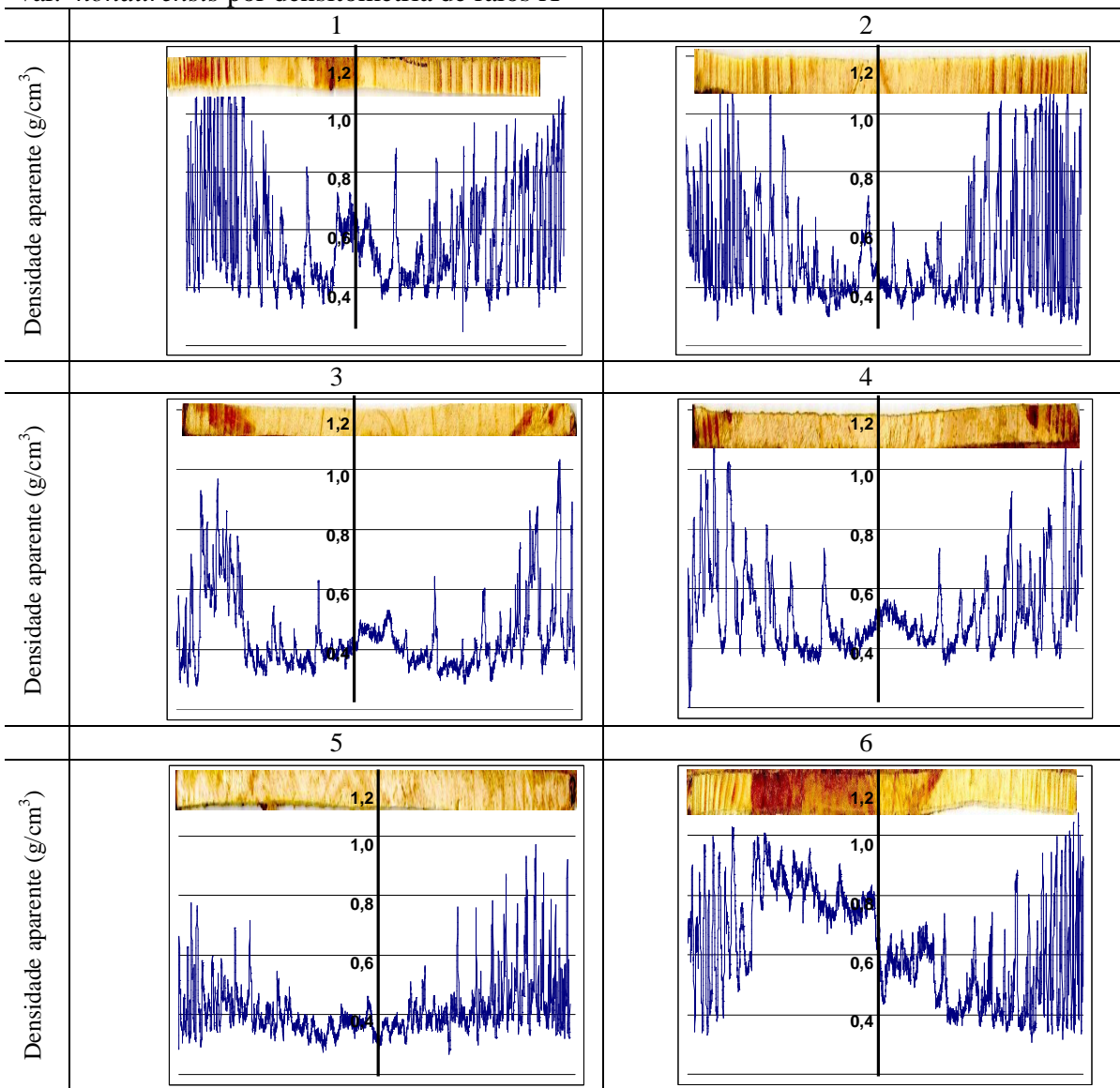
Anexo C - Perfis de velocidade de onda mecânica do lenho do tronco das árvores de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*

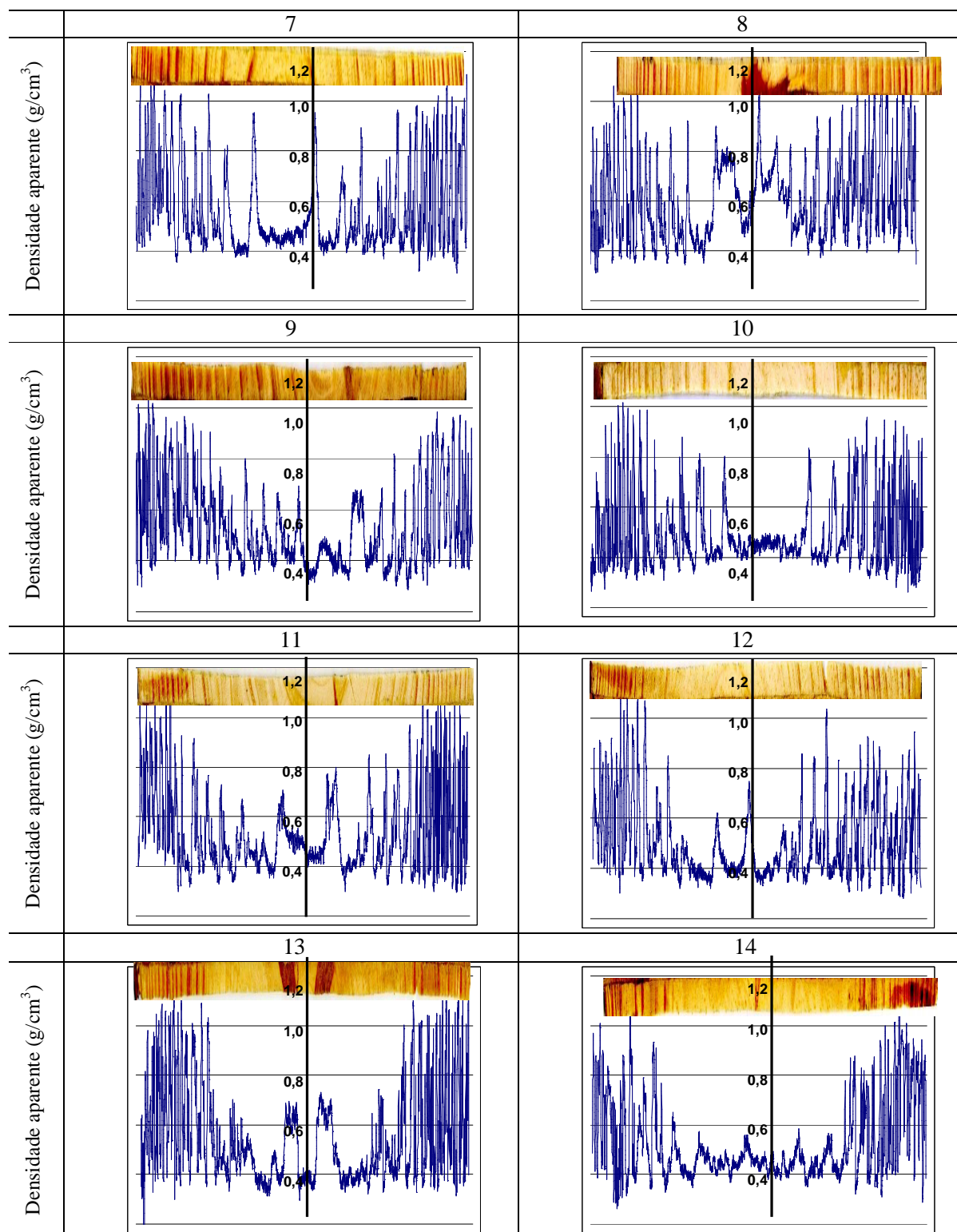


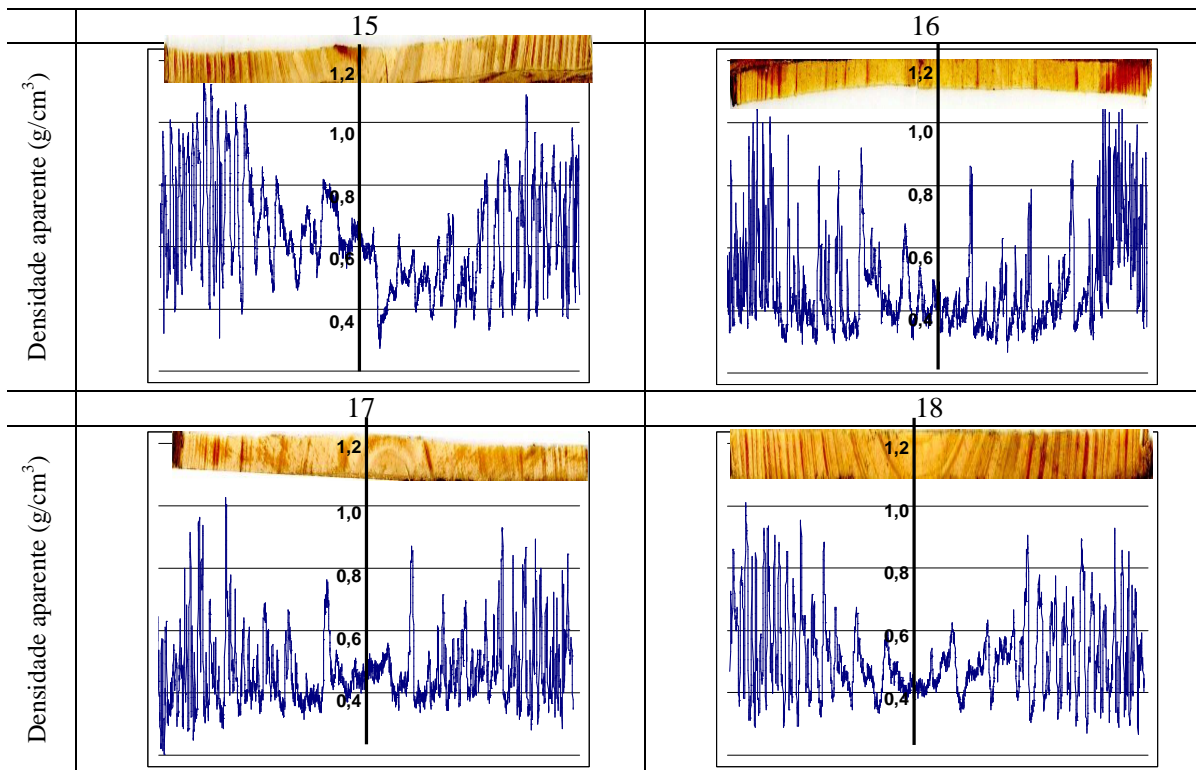




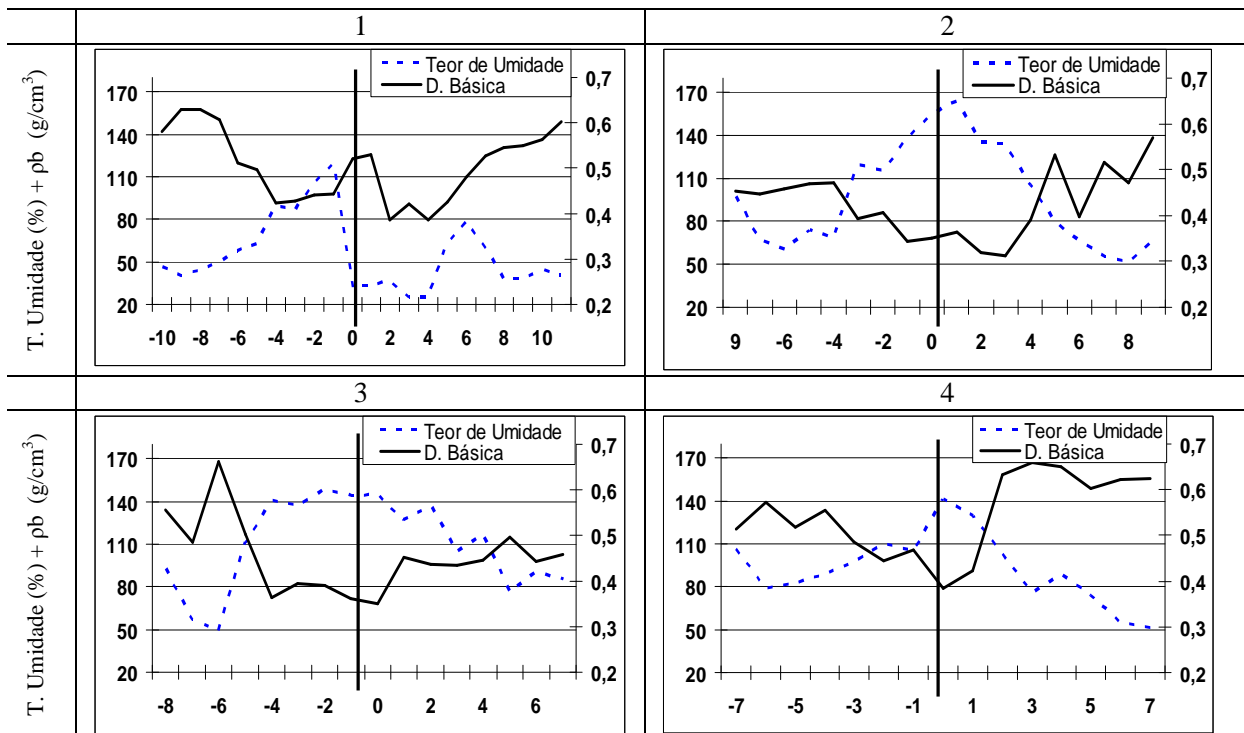
Anexo D - Perfis de densidade aparente do lenho do tronco das árvores de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* por densitometria de raios X

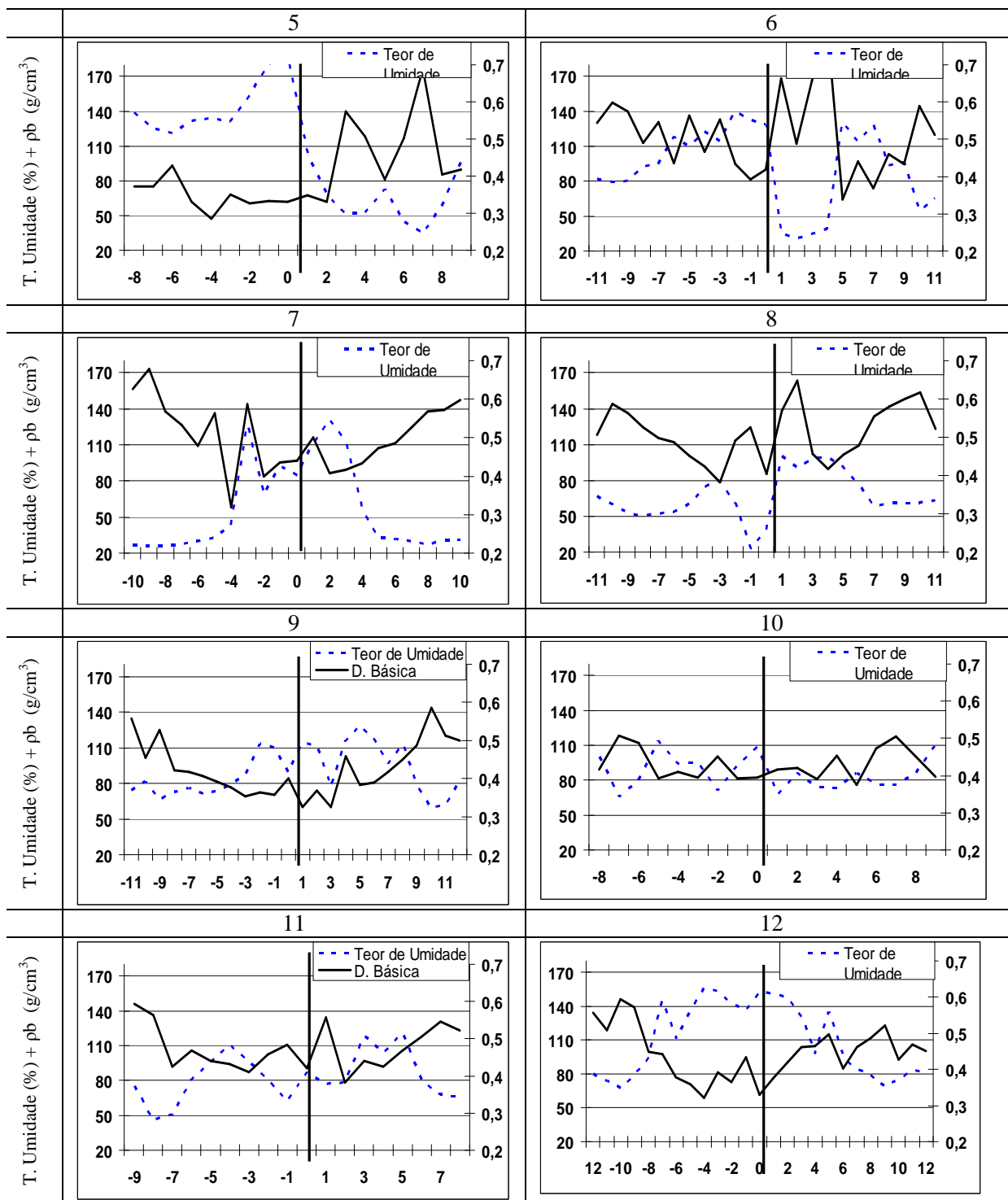


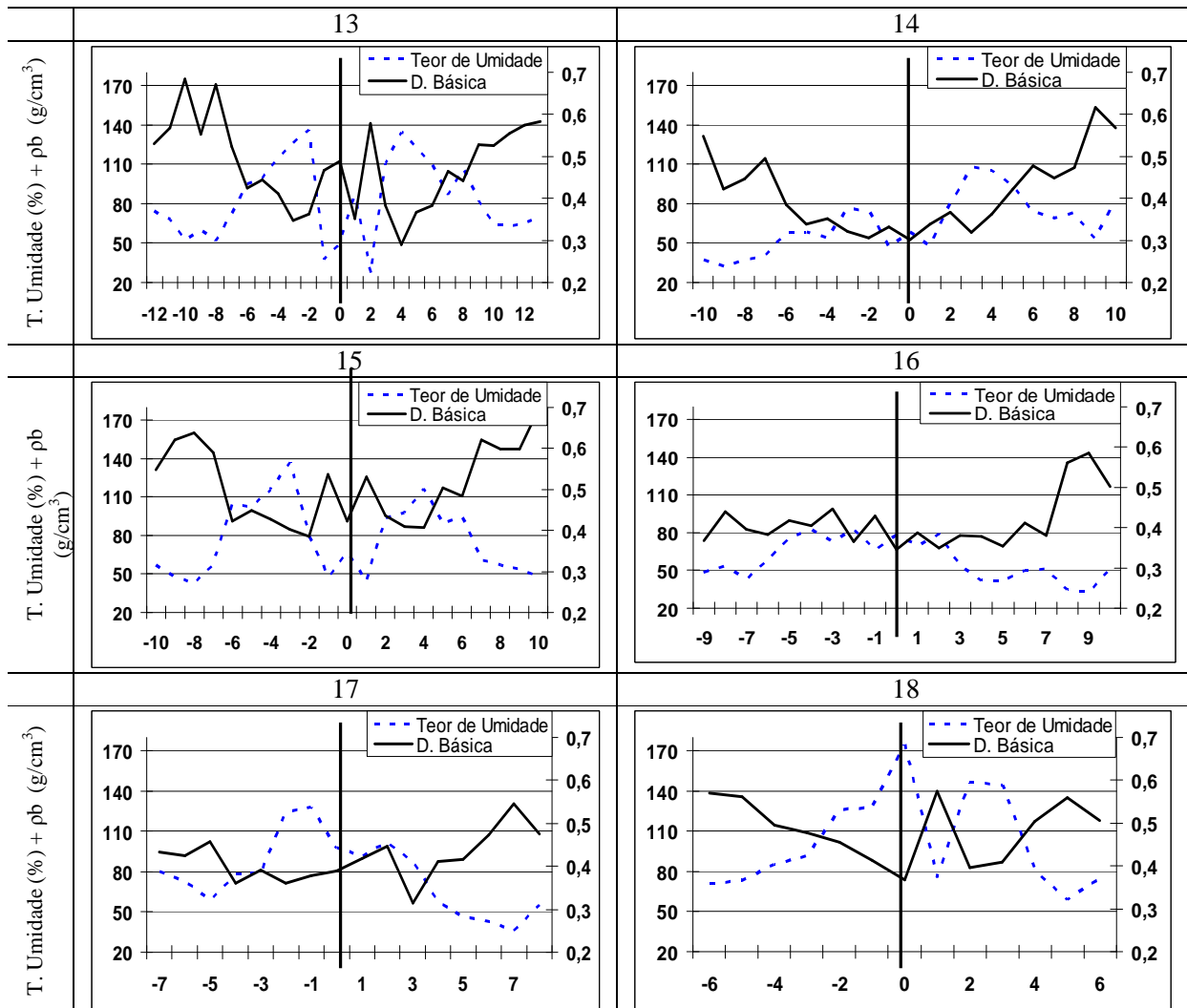




Anexo E - Perfis de densidade básica e umidade do lenho do tronco das árvores de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*





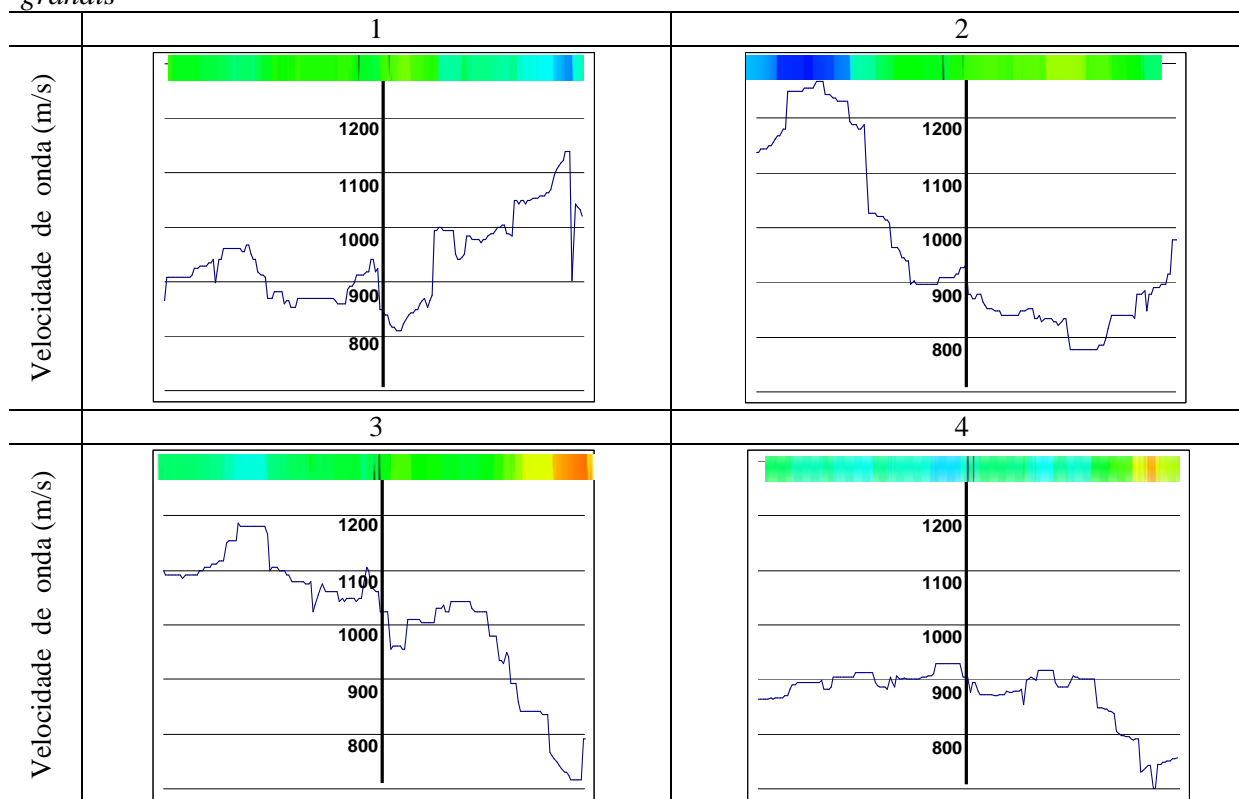
Anexo F – Análise de variância das variáveis do lenho do tronco das árvores de *Tectona grandis*

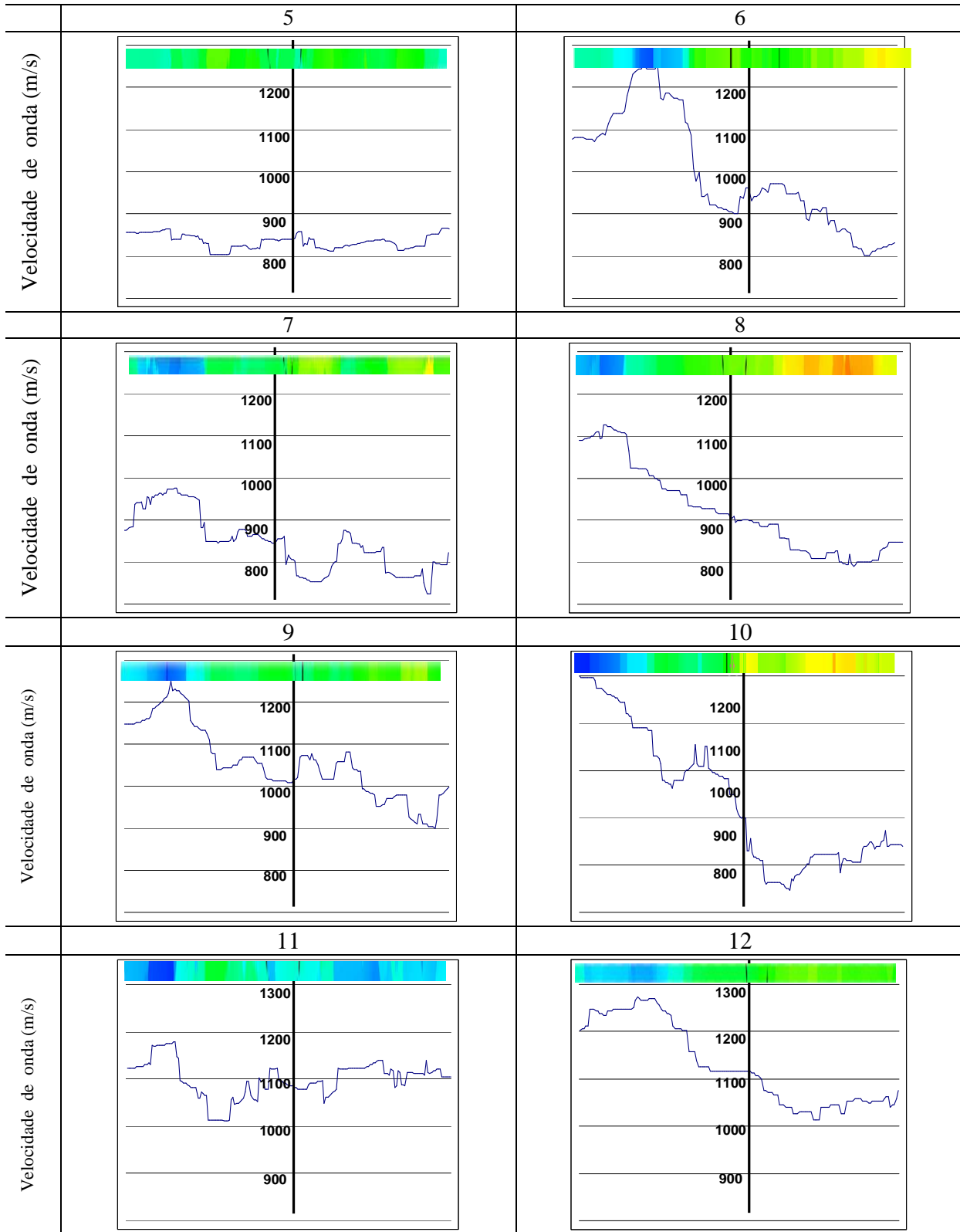
Variável		Soma de quadrados	(G.L)*	Quadrado médio	F	Significância
Velocidade de onda (m/s)	Árvore	12186445,91	17	716849,76	30,92	< 0,01
	Erro	7813608,33	337	23185,78		
	Total	20000054,24	354			
Densidade aparente (g/cm ³)	Árvore	0,67	17	0,04	23,47	< 0,01
	Erro	0,57	337	1,7E-03		
	Total	1,24	354			
Densidade básica (g/cm ³)	Árvore	0,32	17	0,02	14,93	< 0,01
	Erro	0,42	337	1,2E-03		
	Total	0,74	354			
Teor de umidade (%)	Árvore	36591,08	17	2152,42	17,65	< 0,01
	Erro	41101,58	337	121,96		
	Total	77692,66	354			

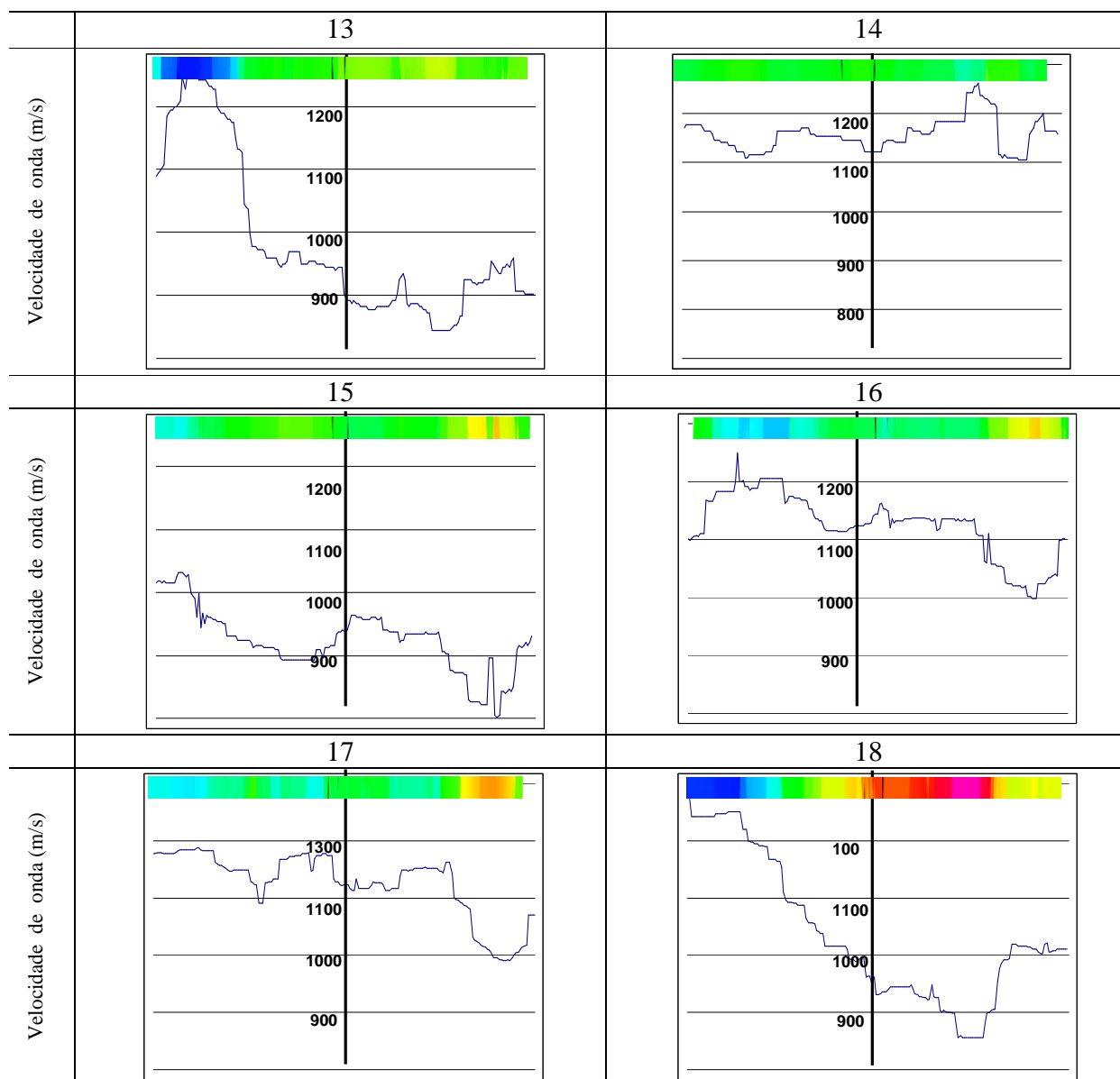
* Graus de liberdade

Anexo G – Diâmetro do tronco das árvores de *Tectona grandis*

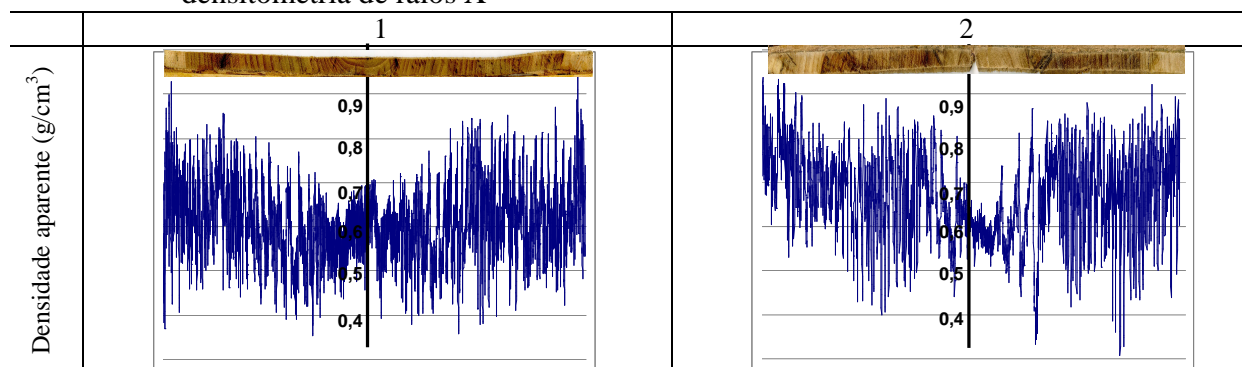
Árvore	Diâmetro (cm)	Distância entre sensores (cm)
1	24	6,9
2	21	6,0
3	21	6,0
4	16	4,6
5	16	4,6
6	19	5,4
8	21	6,0
9	17	4,9
10	23	6,6
11	18	5,1
12	25	7,1
13	26	7,4
14	15	4,3
15	15	4,3
16	14	4,0
17	25	7,1
17	19	5,4
18	20	5,7

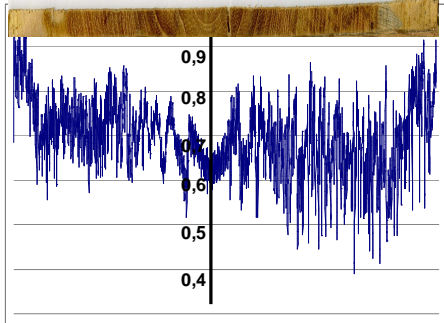
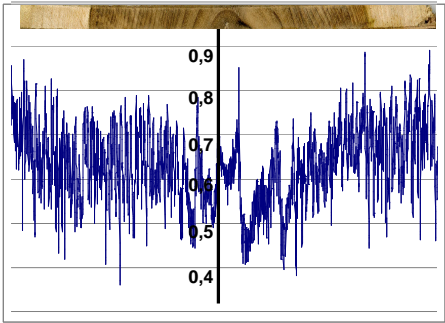
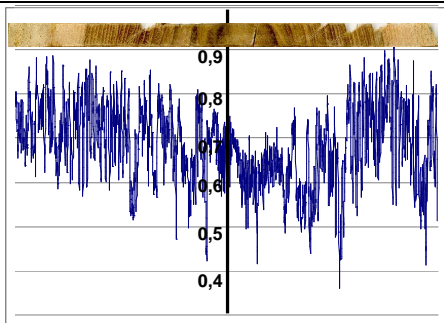
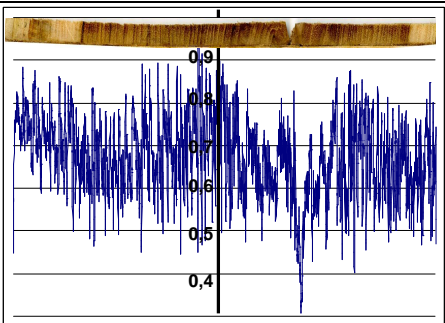
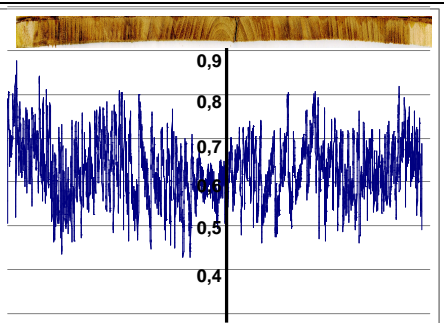
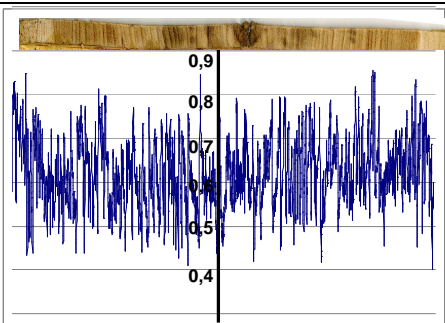
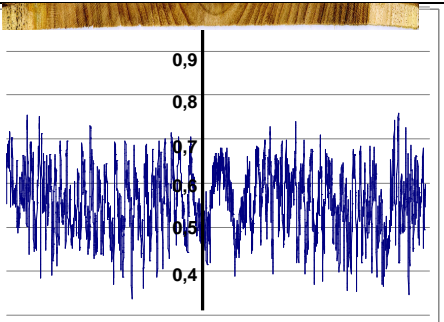
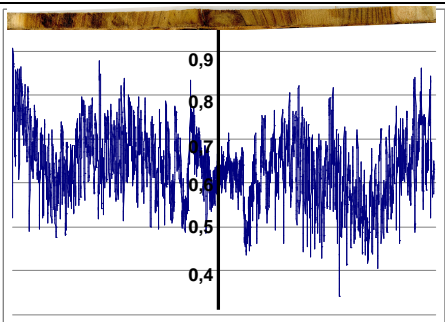
Anexo H - Perfis de velocidade de onda mecânica do lenho do tronco das árvores de *Tectona grandis*

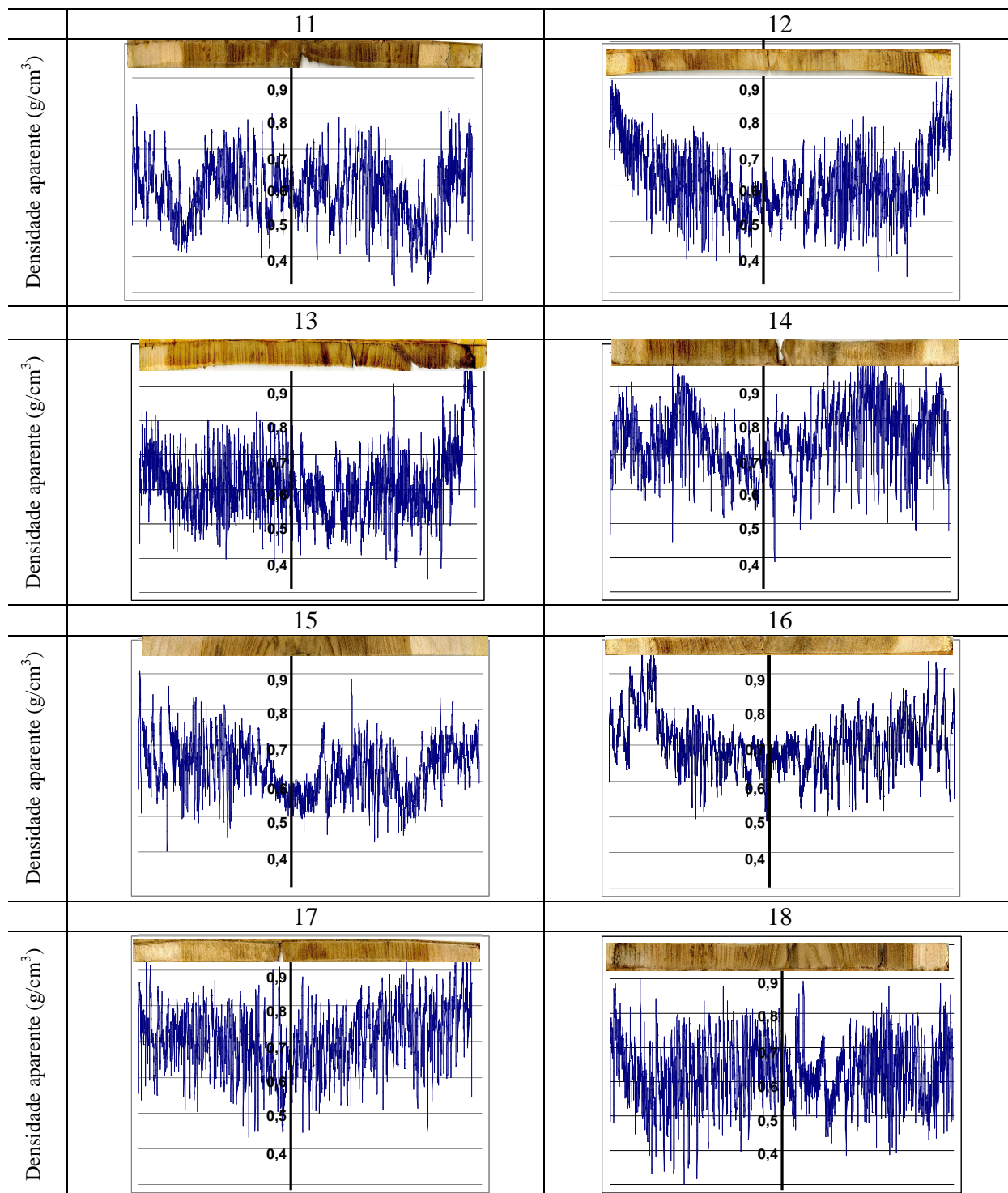




Anexo I - Perfis de densidade aparente do lenho do tronco das árvores de *Tectona grandis* por densitometria de raios X



Densidade aparente (g/cm ³)	<p style="text-align: center;">3</p> 	<p style="text-align: center;">4</p> 
Densidade aparente (g/cm ³)	<p style="text-align: center;">5</p> 	<p style="text-align: center;">6</p> 
Densidade aparente (g/cm ³)	<p style="text-align: center;">7</p> 	<p style="text-align: center;">8</p> 
Densidade aparente (g/cm ³)	<p style="text-align: center;">9</p> 	<p style="text-align: center;">10</p> 



Anexo J - Perfis de densidade básica e umidade do lenho do tronco das árvores de *Tectona grandis*

