

**NAYARA BERGAMO CASAGRANDE**

**TOMOGRAFIA DE IMPULSO PARA DETERMINAÇÃO INDIRETA DA  
DENSIDADE BÁSICA DE ÁRVORES EM PLANTIOS COMERCIAIS DE *Pinus taeda*  
L.**

Dissertação apresentada ao curso de Pós-graduação em Engenharia Florestal do Centro de Ciências Agroveterinárias da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Florestal.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Martha Andreia Brand.

Co-orientador: Dr. Alessandro Bayestorff da Cunha.

**LAGES, SC**

**2017**

Ficha catalográfica elaborada pelo(a) autor(a), com  
auxílio do programa de geração automática da  
Biblioteca Setorial do CAV/UDESC

BERGAMO CASAGRANDE, NAYARA  
TOMOGRAFIA DE IMPULSO PARA DETERMINAÇÃO INDIRETA  
DA DENSIDADE BÁSICA DE ÁRVORES EM PLANTIOS  
COMERCIAIS DE *Pinus taeda* L. / NAYARA BERGAMO  
CASAGRANDE. - Lages , 2017.  
94 p.

Orientadora: MARTHA ANDREIA BRAND  
Co-orientador: ALEXSANDRO BAYESTORFF DA CUNHA  
Dissertação (Mestrado) - Universidade do Estado  
de Santa Catarina, Centro de Ciências  
Agroveterinárias, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Florestal, Lages, 2017.

1. MÉTODOS NÃO-DESTRUTIVOS. 2. VELOCIDADE DAS  
ONDAS MECÂNICAS. 3. PROPRIEDADES FÍSICAS. I.  
ANDREIA BRAND, MARTHA . II. BAYESTORFF DA CUNHA,  
ALEXSANDRO. , .III. Universidade do Estado de  
Santa Catarina, Centro de Ciências  
Agroveterinárias, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Florestal. IV. Título.

**NAYARA BERGAMO CASAGRANDE**

**TOMOGRAFIA DE IMPULSO PARA DETERMINAÇÃO INDIRETA DA  
DENSIDADE BÁSICA DE ÁRVORES EM PLANTIOS COMERCIAIS DE *Pinus taeda*  
L.**

Dissertação apresentada ao curso de Mestrado em Engenharia Florestal do Centro de Ciências Agroveterinárias da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para a obtenção do grau de mestre em Engenharia Florestal.

**Banca examinadora:**

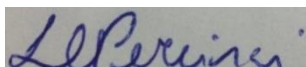
**Orientadora:**

---

Profª. Dra. Martha Andreia Brand

Universidade do Estado de Santa Catarina

**Membro:**



---

Dra. Luciana Cavalcante Pereira

**Membro:**

---

Prof. Dr. Marcos Felipe Nicoletti

Universidade do Estado de Santa Catarina

Lages, 10 de outubro de 2017



Aos meus pais, Susana e José Ricardo, e ao meu  
irmão Augusto.

Dedico.



## AGRADECIMENTOS

A Deus, por sempre me conceder sabedoria nas escolhas dos melhores caminhos, coragem para acreditar, força para não desistir e proteção para me amparar.

Ao Centro de Ciências Agroveterinárias CAV – UDESC, pela oportunidade de me aperfeiçoar no Mestrado.

A minha professora orientadora Dr<sup>a</sup>. Martha Andreia Brand, muito obrigada por acreditar que eu era capaz, pelos incentivos, pela orientação e dedicação. Você é um exemplo de profissional e de pessoa, um espelho que trago comigo desde a graduação, e quero levar para a vida.

Aos meus pais e meu irmão, pelo amor, apoio, confiança e motivação incondicional. Por participarem das alegrias e das tristezas, das reclamações e das comemorações, sempre com muito carinho e paciência, me ensinando a jamais desistir dos meus objetivos.

Aos professores, Nicoletti, Schimalski e Alexsandro, por terem me ajudado nesta jornada. Não esquecerei das inúmeras vezes que precisei de esclarecimentos, e com o computador embaixo do braço eu aparecia na porta de suas salas.

A minha “súdita” Maísa Koch, que nunca deixou de medir esforços para me ajudar. Bolsista exemplar, dedicada, e muito competente, obrigada por toda a correria semanal com os nossos corpos de prova.

A empresa Klabin S.A., pela estrutura e apoio para o desenvolvimento deste projeto. Ao engenheiro Renato Damásio, por toda dedicação e auxílio, e em seu nome agradecer imensamente à toda a equipe que esteve me ajudando nas coletas à campo, eficiência e comprometimento, são as palavras para descrever vocês, obrigada.

Aos funcionários da empresa Orbenk, os quais estavam sempre prontos para me ajudar na confecção dos corpos de prova.

A Marina Bortoluzzi, Camilla Ampessan, Caroline Costa, Bruna Marian e Leticia Carletti, obrigada por tudo, vocês sabem o quanto a caminhada foi árdua, obrigada por estarem ao meu lado em todos os momentos e principalmente por serem as pessoas maravilhosas que vocês são.

A Dianessa Danielli, pela amizade, ajuda, conversas, por dividir os momentos de stress e de alegria, nós conseguimos.

A UNIEDU, pela bolsa concedida.

A todos que de alguma forma participaram direta ou indiretamente para o desenvolvimento deste trabalho.





“A mente que se abre a uma nova ideia, jamais voltará ao seu tamanho original.”

Albert Einstein



## RESUMO

A qualidade da madeira oriunda de plantios florestais de *Pinus taeda* L. depende de inúmeros fatores relacionados a espécie, ao ambiente e as práticas silviculturais aplicadas. Dentre as propriedades da madeira que são afetadas pelas diversas condições supracitadas, destaca-se a densidade básica, a qual influencia todas as demais propriedades tecnológicas e o planejamento do uso industrial da madeira. Atualmente, os métodos tradicionais utilizados para determinação da densidade ainda necessitam da retirada de amostras de madeira e realização de análises laboratoriais. Uma das formas de antecipar as características e propriedades da madeira destas florestas é a aplicação de métodos não destrutivos nas árvores em pé. O objetivo deste estudo foi desenvolver uma metodologia de determinação da densidade básica da madeira em plantios de *Pinus taeda* L. por meio do uso do método de tomografia de impulso. Durante o período de um ano, mensalmente, foram selecionadas três árvores para cada idade pré-selecionada. Antes do corte das árvores, uma avaliação tomográfica da seção transversal do tronco foi realizada à altura do DAP. Em seguida, foram retirados de cada árvore, toretes a 0%, 33% e 66% da altura comercial da mesma, aplicada a avaliação tomográfica em cada torete, e por fim retirados discos em todas as alturas avaliadas. Os discos foram encaminhados para o laboratório para realização das análises físicas (determinação da densidade básica e teor de umidade na direção radial: casca/medula/casca, por meio de métodos destrutivos, segundo as normas da ABNT). Modelos estatísticos da literatura foram testados e o método *Stepwise* também foi utilizado, para gerar as equações entre a velocidade de propagação da onda mecânica e a densidade básica da madeira em duas idades diferentes. A velocidade da onda mecânica não apresentou alto coeficiente de correlação de Pearson com a variável densidade básica da madeira, para nenhum dos conjuntos de dados analisados. Em contrapartida, a umidade apresentou uma alta correlação com a densidade básica, tanto para a análise de todos os dados com -0,9505, quanto para os dados avaliados por altura, -0,9412, -0,9408, -0,9598 e -0,9819, para base, DAP, 33% e 66% da altura comercial, respectivamente. Entre os modelos estatísticos testados, para todas as análises, com exceção da altura a 66%, os melhores parâmetros encontrados foram para a modelo 17 ( $\ln DB = \beta_0 + \beta_1 * V^2 + \beta_2 * (V^2 * UM) + \beta_3 * (V * UM^2) + \beta_4 * UM^2$ ). Para o método de determinação da equação de ajuste *Stepwise*, a melhor equação para os dados analisados de maneira geral foi:  $DB = 1,13785 - 0,0111552 * UM - 0,00189255 * DAP$ . Os modelos que apresentaram os melhores ajustes, foram aqueles que contaram com a variável umidade presente de forma isolada e não associada a outra variável. A velocidade de onda mecânica não conseguiu explicar o comportamento da densidade básica da madeira em árvores em pé. Além dos baixos coeficientes de Pearson encontrados, a medida que a densidade básica diminui, a velocidade aumenta, comportamento este observado para os eixos longitudinal e radial.

**Palavras-chave:** Métodos não-destrutivos. Velocidade das ondas mecânicas. Propriedades físicas.



## ABSTRACT

The quality of wood from forest plantations of *Pinus taeda* L. depends on numerous factors related to the species, the environment and silvicultural practices applied. Among the properties of the wood that are affected by the several conditions mentioned above, stands out the basic density, which influences all other technological properties and the planning of the industrial use of wood. Currently the traditional methods used for density determination still require the removal of wood samples and laboratory analysis. A way to anticipate the characteristics/properties of wood of these forests is to apply non-destructive methods to standing trees. The objective of this study was to develop a methodology for determining the wood basic density in plantations of *Pinus taeda* L. through impulse tomography. During a one-year period, monthly, three trees were selected for each preselected age. Before the trees were felled, a tomographic analysis of the trunk cross section was performed at the height of the DBH. Then, short logs were removed from each tree at 0%, 33% and 66% of the commercial height of the trees, performed the tomographic analysis in each short log, and finally removed discs at all evaluated heights. Discs taken from the analysed heights were sent to the laboratory for physical analysis (determination of the basic density and moisture content in the radial direction: bark/pith/bark, by destructive methods, according to ABNT standards). Statistical models of literature were tested and the *Stepwise* method was also used to generate the equations between the propagation velocity of the stress wave and the wood basic density at two different ages. The stress wave velocity did not present a high Pearson correlation coefficient with the wood basic density, for none of the analysed datasets. On the other hand, moisture content presented a high correlation with the basic density, for the analysis of all data with -0,9505 and also for the data evaluated by height, -0,9412, -0,9408, -0,9598 and -0,9819 for base, DAP, 33% and 66% of the commercial height, respectively. Among the statistical models tested, for all analyses, except for height at 66%, the best parameters found were for model 17 ( $\ln DB = \beta_0 + \beta_1 * V^2 + \beta_2 * (V^2 * UM) + \beta_3 * (V * UM^2) + \beta_4 * UM^2$ ). For the *Stepwise* method, the best equation for the general data was:  $DB = 1,13785 - 0,0111552 * UM - 0,00189255 * DAP$ . The models that presented the best adjustments were those that had the variable moisture content present in an isolated way and not associated with another variable. The stress wave velocity could not explain the behavior of the basic density of the wood in standing trees. Beyond the low coefficients of Pearson, as the basic density decreases, the velocity increases, this behavior was observed for both, longitudinal and radial axis.

**Keywords:** Non-destructive methods. Stress wave velocity. Physical properties.



## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Mapa da localização do município de Otacílio Costa no estado de Santa Catarina. .....	43
<b>Figura 2</b> - Aplicação do tomógrafo de impulso e retirada das amostras em quatro pontos longitudinais ao longo do tronco. ....	45
<b>Figura 3</b> - Utilização do tomógrafo de impulso ARBOTOM 2D da Rinntech. ....	46
<b>Figura 4</b> - Posicionamento dos sensores na secção transversal do lenho das árvores. ....	46
<b>Figura 5</b> - Aplicação das pancadas de martetele para produção de ondas mecânicas. ....	47
<b>Figura 6</b> - Representação da retirada dos corpos de prova dos discos de cada árvore (no sentido casca/medula/casca), para a determinação da densidade básica e do teor de umidade. ....	49
<b>Figura 7</b> - Gráficos de superfície e de linhas, exemplificando os pontos de intersecção entre as linhas de viagem das ondas mecânicas. ....	51
<b>Figura 8</b> - A. Coordenadas geradas por meio do novo software. B. Mapa de superfície gerado por meio do método de interpolação Krigagem. ....	51
<b>Figura 9</b> - Sobreposição da imagem do disco contendo a demarcação dos corpos de prova e da "imagem tomográfica" gerada pelo método de Krigagem. ....	52
<b>Figura 10</b> - Processo de seleção dos pixels do mapa de superfície gerado no programa ArcGis, para determinação da velocidade média da onda mecânica de cada corpo de prova. ....	52
<b>Figura 11</b> - Comportamento da densidade básica ( $\text{g/cm}^3$ ) no sentido longitudinal (base-topo), para as duas idades avaliadas. ....	62
<b>Figura 12</b> - Comportamento da densidade básica ( $\text{g/cm}^3$ ) no sentido radial (casca-medula-casca), para as duas idades avaliadas. ....	64
<b>Figura 13</b> - Comportamento do teor de umidade (%) no sentido longitudinal (base-topo), para as duas idades avaliadas. ....	66
<b>Figura 14</b> - Comportamento do teor de umidade no sentido radial (casca-medula-casca), para as duas idades avaliadas. ....	67
<b>Figura 15</b> - Umidade nos diferentes meses do ano. ....	68
<b>Figura 16</b> - Distribuição do erro padrão da estimativa da variável densidade básica estimada, para o conjunto de todos os dados. ....	73
<b>Figura 17</b> - Distribuição do erro padrão da estimativa da variável densidade básica estimada, para os dados da base. ....	73

<b>Figura 18</b> - Distribuição do erro padrão da estimativa da variável densidade básica estimada, para os dados do DAP.....	74
<b>Figura 19</b> - Distribuição do erro padrão da estimativa da variável densidade básica estimada, para os dados à 33% da altura comercial. ....	74
<b>Figura 20</b> - Distribuição do erro padrão da estimativa da variável densidade básica estimada, para os dados à 66% da altura comercial. ....	75
<b>Figura 21</b> - Comportamento da velocidade de onda mecânica (m/s) no sentido longitudinal (base-topo), para as duas idades avaliadas. ....	78
<b>Figura 22</b> - Comportamento da velocidade de onda mecânica (m/s) no sentido radial (casca-medula-casca), para as duas idades avaliadas. ....	78



## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Modelos estatísticos testados para estimar a densidade básica da madeira de Pinus taeda L.....	54
<b>Tabela 2</b> - Estatística descritiva para a variável velocidade da onda mecânica (m/s). .....	57
<b>Tabela 3</b> - Estatística descritiva para a variável umidade (%). .....	57
<b>Tabela 4</b> - Estatística descritiva para a variável densidade básica (g/cm <sup>3</sup> ). .....	57
<b>Tabela 5</b> - Correlação de Pearson para os dados Gerais. ....	58
<b>Tabela 6</b> - Correlação de Pearson para os dados da Base. ....	59
<b>Tabela 7</b> - Correlação de Pearson para os dados do DAP. ....	59
<b>Tabela 8</b> - Correlação de Pearson para os dados à 33% de altura comercial. ....	59
<b>Tabela 9</b> - Correlação de Pearson para os dados à 66% de altura comercial. ....	59
<b>Tabela 10</b> - Densidade básica nos diferentes talhões. ....	60
<b>Tabela 11</b> - Densidade básica nas diferentes alturas da árvore para as duas idades avaliadas. ....	61
<b>Tabela 12</b> - Densidade básica nas diferentes posições radiais do disco para as duas idades avaliadas.....	63
<b>Tabela 13</b> - Umidade nos diferentes talhões.....	65
<b>Tabela 14</b> - Umidade nas diferentes alturas da árvore para as duas idades avaliadas. ....	65
<b>Tabela 15</b> - Umidade nas diferentes posições radiais do disco para as duas idades avaliadas. ....	65
<b>Tabela 16</b> - Umidade nas diferentes estações do ano.....	68
<b>Tabela 17</b> - Estimativas dos coeficientes de regressão e medidas dos modelos estatísticos para estimar a densidade básica da madeira para todos os dados. ....	69
<b>Tabela 18</b> - Estimativas dos coeficientes de regressão e medidas dos modelos estatísticos para estimar a densidade básica da madeira para os dados da base (Continua). ....	69
<b>Tabela 19</b> - Estimativas dos coeficientes de regressão e medidas dos modelos estatísticos para estimar a densidade básica da madeira para os dados do DAP. ....	70
<b>Tabela 20</b> - Estimativas dos coeficientes de regressão e medidas dos modelos estatísticos para estimar a densidade básica da madeira para os dados à 33% da altura. ....	71
<b>Tabela 21</b> - Estimativas dos coeficientes de regressão e medidas dos modelos estatísticos para estimar a densidade básica da madeira para os dados à 66% da altura (Continua). ....	71
<b>Tabela 22</b> - Equação gerada para cada conjunto de dados avaliados a partir do método Stepwise - Forward Selection.....	75

<b>Tabela 23</b> - Equação gerada para cada conjunto de dados avaliados a partir do método Stepwise	
- Backward Selection. ....	76

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	21
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	23
2.1 OBJETIVO GERAL .....	23
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	23
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	25
3.1 QUALIDADE DA MADEIRA .....	25
<b>3.1.1 Densidade</b> .....	26
<b>3.1.2 Umidade da madeira</b> .....	28
<b>3.1.3 Módulo de Elasticidade</b> .....	30
3.2 MÉTODOS DE ANÁLISE NÃO DESTRUTIVA DA QUALIDADE DA MADEIRA... 31	
<b>3.2.1 Uso do Resistógrafo</b> .....	32
<b>3.2.2 Uso do Pilodyn</b> .....	33
<b>3.2.3 Uso da Radiografia – Raio X</b> .....	33
<b>3.2.4 Uso de medidores de condutividade elétrica</b> .....	34
<b>3.2.5 Uso de Ultrassom</b> .....	34
<b>3.2.6 Uso de <i>Stress Wave</i></b> .....	34
3.3 TOMOGRAFIA DE IMPULSO .....	35
<b>3.3.1 Tomografia de Impulso na degradação</b> .....	38
<b>3.3.2 Tomografia de Impulso na determinação das propriedades físicas e mecânicas da madeira</b> .....	39
3.4 RECONSTRUÇÃO DA IMAGEM TOMOGRÁFICA .....	40
<b>4 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	43
4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA E COLETA DO MATERIAL .....	43
4.2 VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DAS ONDAS MECÂNICAS ATRAVÉS DO EXAME DE TOMOGRAFIA DE IMPULSO .....	45
4.3 DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE BÁSICA E DO TEOR DE UMIDADE EM LABORATÓRIO .....	48
4.4 PROCESSAMENTO DAS IMAGENS .....	50
4.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	52
4.6 MODELAGEM ESTATÍSTICA .....	53
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	57
5.1 ESTATÍSTICA DESCRITIVA DAS VARIÁVEIS .....	57
5.2 DENSIDADE BÁSICA .....	60
5.3 UMIDADE .....	65

5.4 MODELAGEM ESTATÍSTICA .....	68
<b>5.4.1 Modelos da Literatura .....</b>	<b>68</b>
<b>5.4.2 Stepwise .....</b>	<b>75</b>
5.5 PERFIL DA VELOCIDADE DE ONDA MECÂNICA .....	76
<b>6 CONCLUSÃO .....</b>	<b>79</b>
<b>7 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>81</b>
<b>8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>83</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A qualidade da madeira está relacionada a inúmeros fatores como, condições de crescimento, ambientais e práticas silviculturais. Processos industriais podem ser otimizados por meio da avaliação da qualidade da madeira, a qual vem ganhando importância no setor florestal devido ao uso de técnicas não-destrutivas que avaliam esta qualidade de forma rápida e eficiente (LARSSON; BENGTSSON; GUSTAFSSON, 2004).

Dentre as propriedades da madeira que são afetadas pelas diversas condições supracitadas, destaca-se a densidade, a qual influencia todas as demais propriedades tecnológicas. Esta variável fornece informações largamente utilizadas, pois a mesma interfere no planejamento do uso industrial da madeira, o qual enquadra o uso da mesma na construção civil, na confecção de painéis de MDF (DIAS; LAHR, 2004; BELINI et al., 2008), na geração de energia, ou ainda na produção de papel e carvão (SANTOS; SANSÍGOLO, 2007; MOKFIENSKI et al., 2008). A determinação da densidade básica da madeira é essencial para o controle dos processos industriais e para o desenvolvimento de processos mais eficientes e com maior rendimento da madeira na indústria.

Os métodos tradicionais empregados para determinação da densidade utilizam amostras de madeira como, corpos de prova, baguetas, discos ou cunhas, os quais posteriormente são direcionados a práticas laboratoriais (VITAL, 1984), consumindo tempo e tornando o processo economicamente indesejável, além de fornecerem as informações com defasagem em relação a velocidade que a indústria necessita.

A busca por técnicas não-destrutivas que estimem a densidade da madeira de forma rápida, eficiente e sem alterar o uso final do material vem sendo o principal desejo e linha de pesquisa de profissionais do setor florestal. O mais antigo método não-destrutivo de avaliação da madeira foi a inspeção visual (BUCUR, 2006), posteriormente um sistema de classificação por meio de tensão foi introduzido no mercado de madeira serrada, melhorando a eficiência de tal processo (GALLIGAN; MCDONALD, 2000).

O desenvolvimento de instrumentos nas duas últimas décadas, tem tornado possível o uso de técnicas não-destrutivas para avaliação do lenho das árvores. A vibração transversal e a velocidade das ondas ultrassônicas são ferramentas bastante eficientes na determinação do módulo de elasticidade (ESTEBAN; FERNANDEZ; PALACIOS, 2009). O desenvolvimento recente de pesquisas relacionadas ao uso de tecnologias acústicas na avaliação das propriedades e da qualidade de árvores em pé e toras, tem apresentado ampla aceitação pela indústria

florestal, revelando futuras oportunidades dentro deste setor (CARTER et al., 2005; WANG; ROSS; CARTER, 2007).

Segundo Guntekin, Emiroglu e Yilmaz (2013), métodos não-destrutivos baseados na passagem de ondas têm sido extensivamente estudados, e tem provado sua utilidade no levantamento das propriedades mecânicas dos produtos de madeira. O método que utiliza ondas de tensão além de ser considerado apropriado para o levantamento das condições internas da madeira, apresenta baixo custo, é portátil e inofensivo (REINPRECHT; HIBKY, 2011; WESSELS; MALAN; RYPSTRA, 2011; BRANCHERIAU et al., 2012; WANG, 2013).

A tomografia computadorizada foi primeiramente utilizada por Tomikawa et al. (1986), que inspecionaram postes de madeira. Desde então, esta técnica tem chamado atenção, e vem sendo investigada por apresentar excelente potencial na avaliação do interior do lenho. Os dois tipos de ondas, mecânicas e eletromagnéticas, podem ser utilizadas para fornecer informações sobre o objeto, sendo elas: som e ultrassom, eletricidade, raios  $\gamma$  e raios x (NICOLOTTI et al., 2003; WANG; ALLISON, 2008).

A tomografia de impulso consiste na reconstrução de secções transversais de objetos através de informações como, a distribuição da velocidade da onda ultrassônica à medida que a mesma se propaga dentro da secção investigada resultando em um gráfico de superfície da secção transversal ou imagem tomográfica (BRANCHERIAU et al., 2008).

Para a construção da imagem tomográfica, vários estudos já foram realizados para estabelecer o melhor método a ser empregado na interpolação dos dados. Estes estudos levam em consideração diferentes fatores, como anisotropia do material, sentido de viagem e forma de propagação da onda de tensão e umidade do material (MAURER et al., 2006; ZENG et al., 2013; FENG et al., 2014; DU et al., 2015).

A velocidade das ondas sonoras dentro da técnica tomográfica está relacionada ao módulo de elasticidade (MOE), a densidade da madeira e a umidade (RINNTECH, 2005; BUCUR, 2006; BRAZEE et al., 2010). Segundo Rollo (2009a), a tomografia de impulso pode ser utilizada para estimar a densidade da madeira por meio do ajuste de equações, as quais devem correlacionar a velocidade de onda mecânica e a densidade da madeira, a uma determinada umidade. Porém, mais estudos relacionados a esta finalidade devem ser realizados, uma vez que a maioria dos trabalhos referentes a tomografia de impulso são mais direcionados para a obtenção de informações ecológicas e de degradação biológica da madeira.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Determinar a viabilidade da aplicação da tomografia de impulso em árvores de *Pinus taeda* L. como ferramenta para a classificação da qualidade da madeira para o uso na indústria de celulose e papel e processamento mecânico.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- i) Determinar o perfil da velocidade de propagação das ondas mecânicas registradas no tomógrafo ao longo da altura e no diâmetro de árvores em dois talhões;
- ii) Determinar por meio de técnica destrutiva, em laboratório, o teor de umidade e a densidade básica da madeira nas mesmas alturas e no sentido casca/medula/casca das árvores analisadas em campo;
- iii) Determinar o perfil do teor de umidade da madeira ao longo da altura e no diâmetro de árvores em dois talhões;
- iv) Determinar a correlação entre a velocidade de propagação das ondas mecânicas e a propriedade de densidade básica obtida no laboratório;
- v) Estabelecer equações de ajuste para a determinação da densidade básica da madeira em função da velocidade de propagação da onda, umidade da madeira, diâmetro e altura das árvores.





### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 QUALIDADE DA MADEIRA

O termo qualidade da madeira já foi definido por diversos autores, dentre os mais recentes, destacam-se Rozenberg e Cahalan (1997), que afirmam que o termo é empregado para definir um conjunto de características relacionadas a uma determinada utilização. Panches (2004) ainda complementa esta definição enfatizando que a qualidade da madeira somente é avaliada de maneira correta quando relacionada a uma aplicação específica. O presente autor cita o exemplo da indústria de celulose e papel, onde a qualidade da madeira estaria interligada as dimensões de fibras, avaliação de componentes químicos e densidade.

A qualidade do produto oriundo de plantios florestais depende de inúmeros fatores relacionados a espécie, a idade, ao ambiente e as práticas silviculturais aplicadas. Dentre as variáveis mencionadas, pode-se destacar a utilização de florestas cada vez mais jovens com uma alta quantidade de lenho juvenil (BRAZ et al., 2014), que tem como consequência nas empresas de celulose o baixo rendimento do processo, o aumento da quantidade de álcali utilizado e a baixa qualidade do produto final, pois as propriedades anatômicas, físicas e químicas da madeira ficam comprometidas. Devido ao rápido crescimento, madeiras juvenis apresentam problemas relacionados à qualidade, onde a sua densidade e resistência mecânica tendem a diminuir (LATORRACA; ALBUQUERQUE, 2000; VIDAURRE et al., 2011).

A estrutura anatômica, composição química e propriedades físicas e mecânicas da madeira são responsáveis pelas variações da qualidade do material, estas diferenças podem apresentar-se em níveis inter e intraespecíficos (LATORRACA; ALBUQUERQUE, 2000; PEREIRA; TOMASELLI, 2004; VIDAURRE et al., 2013).

A anatomia da madeira consiste no estudo das células que compõem o lenho, bem como a sua organização e função. O conhecimento anatômico da madeira é imprescindível quando esta é empregada em qualquer tipo de processo industrial, pois a estrutura celular da madeira influencia diretamente o comportamento mecânico do material (BURGER; RICHTER, 1991).

A composição química da madeira também está relacionada às características mecânicas deste material, onde a estrutura tridimensional da lignina é responsável pela rigidez e resistência da madeira; baixos teores deste componente resultam em uma redução da resistência mecânica (VALE; DIAS; SANTANA, 2010).

Dentre as propriedades físicas mais empregadas na caracterização da madeira estão a densidade, o teor de umidade e a retratibilidade (FOREST PRODUCTS LABORATORY,

2010). Onde a densidade é a relação entre a massa e o volume ( $\text{g/cm}^3$  ou  $\text{kg/m}^3$ ), e a umidade é a quantidade de água presente na madeira em relação ao seu peso seco e a retratibilidade é a quantificação da instabilidade dimensional (%).

As propriedades mecânicas referem-se ao comportamento da madeira quando lhe são aplicadas forças exteriores que tendem a deformar a sua massa. Vários fatores influenciam as propriedades mecânicas, como a espécie, umidade da madeira, densidade e tempo de duração da carga durante o ensaio mecânico. Os dois parâmetros normalmente avaliados em testes de flexão estática são o módulo de ruptura (MOR) e o módulo de elasticidade (MOE) (SCANAVACA JÚNIOR; GARCIA, 2004).

### 3.1.1 Densidade

Kollmann (1959) define a densidade básica da madeira como a razão da massa seca dividida pelo volume saturado de uma amostra. Foelkel, Mora e Menochelli (1990) e Kollmann (1959) enfatizam a importância da densidade da madeira, pois sua finalidade pode ser determinada por meio da avaliação desta variável, uma vez que a mesma serve como referência de qualidade. Porém, deve-se levar em consideração que a madeira varia dentro de uma mesma árvore, entre árvores, entre espécies e entre gêneros, e esta variação implica em diferentes valores de densidade básica.

Diversos fatores exercem influência sobre a densidade, como a taxa de crescimento, local de origem, espaçamento, idade, procedência do material genético, diferentes gêneros, espécies, entre árvores da mesma espécie, e também dentro da mesma árvore, pois há variação no sentido longitudinal (base-topo) e radial (medula-casca) (CHIES, 2005).

Inúmeros pesquisadores afirmam que a densidade básica das árvores tende a aumentar com a idade, pois resulta em uma maior porcentagem de lenho tardio. Este último fator também está interligado ao decréscimo da densidade no sentido base-topo, uma vez que a quantidade de lenho tardio diminui significativamente nesta direção (MENDONÇA, 1982).

Na determinação da densidade da madeira pode haver a inclusão ou não do volume dos poros, visto que a madeira é um material poroso. A densidade real da madeira ou densidade da parede celular é determinada sem a inclusão do volume dos poros e é igual a  $1,53 \text{ g/cm}^3$ , apresentando baixa variação entre as espécies. Com a inclusão dos poros, a densidade da madeira é então expressa de duas formas: densidade básica, caracterizando-se por ser a relação entre a massa seca da madeira (seca em estufa a  $103 \pm 5^\circ\text{C}$ ) e o seu volume saturado; e a densidade aparente, a qual relaciona a massa e o volume da madeira a uma determinada

umidade (esta é padronizada internacionalmente em 12%, pois é o valor médio de equilíbrio da umidade da madeira com o ar) (VITAL, 1984; REZENDE; ESCOBEDO; FERRAZ, 1988).

O tipo de densidade a ser utilizada é determinado de acordo com a finalidade sobre a qual se requer mais informações. A densidade básica, geralmente é utilizada em inventários florestais, devido ao fato de o volume ser uma das variáveis mais facilmente obtidas em campo. Já a densidade aparente à 12% de umidade, é empregada em ensaios para caracterização físico-mecânica da madeira, sendo possível o conhecimento do seu comportamento em condições ambientais (VITAL, 1984; REZENDE; ESCOBEDO; FERRAZ, 1988).

Os métodos utilizados para determinação da densidade da madeira podem ser tanto destrutivos como não-destrutivos. Na aplicação dos métodos destrutivos é necessário que a árvore seja derrubada, para que a amostragem seja realizada. Já os métodos não destrutivos ou semidestrutivos exigem que apenas pequenas inserções sejam efetuadas, ou ainda, implicam na retirada de pequenas amostras do material (GOUVÊA et al., 2011; HEIN et al., 2009; THIERSCH et al., 2006).

Segundo Foelkel, Brasil e Barrichelo (1971), certa atenção é conferida aos métodos de determinação da densidade básica utilizando-se pequenas amostras de madeira, onde os métodos gravimétricos são os que mais se destacam. O método tradicional e mais conhecido é o da balança hidrostática, baseado no deslocamento da água quando a amostra é imersa na mesma. Outros métodos como o da medição direta do volume e o método da flutuação, também são empregados.

Uma técnica diferente para a determinação da densidade é descrita por Keylwerth (1954) apud Foelkel, Brasil e Barrichelo (1971), a qual utiliza a correlação existente entre a densidade da madeira e o seu máximo teor de umidade. Diversos autores como Smith (1954; 1955), empregaram este método posteriormente, confirmando a sua eficiência e confiabilidade dos dados obtidos. Para realização deste método são necessárias apenas duas pesagens, uma com a amostra completamente saturada em água e outra com a amostra seca em estufa ( $103 \pm 5$  °C). Smith (1955), em estudo comparando os métodos do máximo teor de umidade e de imersão em água confirmou a eficácia do primeiro método, o qual apresentou uma diferença menor do que 1% da média da densidade em relação ao método de imersão em água. Sendo assim, devido à sua simplicidade, o método do máximo teor de umidade mostra-se mais adequado para estudos de grande escala.

Sabe-se que a densidade está relacionada diretamente a outras propriedades da madeira, sendo, portanto, um importante índice de qualidade. Esta variável está diretamente relacionada às propriedades físicas e mecânicas da madeira, as quais são extremamente importantes na

caracterização de diferentes espécies, diferentes árvores de uma dada espécie ou até mesmo na distinção de diferentes regiões dentro de uma mesma árvore (FOELKEL, BRASIL; BARRICHELO, 1971).

Diante de todo o exposto, a densidade da madeira não é uma propriedade de fácil obtenção. Além de exigir a retirada de amostras para testes laboratoriais, estas fornecem apenas informações locais, sendo que um grande número de amostras é necessário para que haja uma estimativa global da variável em estudo. Como alternativa para otimizar o processo, a amostragem pode ser utilizada para calibrar medições de ondas de tensão com as propriedades físicas e mecânicas da madeira. Medições da velocidade de propagação de ondas de tensão podem ser realizadas e seguidas por uma amostragem no mesmo local. Estas amostras podem então ser testadas de forma destrutiva para que a correlação entre a velocidade de onda e as propriedades físico-mecânicas sejam estabelecidas. Fortes correlações vêm sendo encontradas em estudos onde a amostragem é realizada adequadamente (ALEXANDER, 1992; PEREIRA et al., 2007; LIN et al., 2011), nos quais os resultados mostram que a velocidade de onda é maior à medida que a densidade da madeira aumenta (HAINES; LEBAN; HERBE, 1996).

### **3.1.2 Umidade da madeira**

O teor de umidade da madeira (TU) consiste na relação entre a massa de água nela contida e a massa de madeira seca, sendo seu valor expresso em porcentagem (ABNT NBR 14929, 2003). Esta relação pode ser realizada de duas maneiras, considerando a massa inicial da madeira, ou seja, base úmida, ou então, a massa da madeira totalmente seca, denominada de base seca.

Segundo Simpson (1991), a água presente na madeira pode ser classificada da seguinte maneira:

- água livre ou capilar: a qual está presente dentro dos vasos, canais e lúmen das células. Este tipo de água não está ligada à madeira por forças de natureza química ou física;
- água de adesão ou higroscópica: encontra-se no interior da parede celular, onde geralmente forma pontes de hidrogênio com os polímeros naturais que a constituem.

Inicialmente, a redução da umidade é devida à evaporação da água livre ou capilar. À medida que toda essa água é removida da madeira, ela alcançará o ponto de saturação das fibras (PSF), onde apenas a água de adesão ou higroscópica, permanecerá. O teor de umidade que caracteriza o estado do PSF encontra-se normalmente entre 25 e 35%, com valor médio de 28% de umidade na base seca. Este ponto é de grande importância prática, pois as propriedades

físicas e mecânicas são influenciadas pelo conteúdo de água presente na madeira (SIMPSON, 1991).

De acordo com Galvão e Jankowsky (1985), a redução da umidade pode provocar o aumento do módulo de elasticidade e da densidade aparente. Já a estabilidade dimensional estará presente apenas acima do PSF. Ainda de acordo com estes autores a direção estrutural da madeira que apresenta menor alteração é a longitudinal, seguida da radial e tangencial. No entanto, as propriedades da madeira não sofrem alterações significativas com o aumento da umidade acima do ponto de saturação das fibras.

O método mais utilizado para determinar o teor de umidade da madeira é o chamado método gravimétrico ou da estufa, o qual é preciso, porém demorado e caro. Este método utiliza a diferença de massa de amostras antes e depois de passarem por um processo de secagem em estufa à  $103 \pm 2^\circ\text{C}$ , até peso constante (ABNT, 2003). Salienta-se a existência de outros métodos para determinar o teor de umidade da madeira, como por exemplo, os métodos de destilação e titulação, ou ainda, os medidores elétricos, que se baseiam na resistência oferecida pela madeira à passagem da corrente elétrica, a qual varia inversamente com o seu teor de umidade (GALVÃO; JANKOWSKY, 1985).

A madeira é um material de natureza higroscópica, ou seja, é capaz de absorver ou perder umidade para o meio, até atingir determinada umidade de equilíbrio com o mesmo. Devido a esta capacidade, as propriedades físicas e mecânicas são sensivelmente afetadas, da mesma maneira que a propagação de ondas mecânicas (LATORRACA et al., 2011).

A redução da umidade tende a proporcionar um aumento da velocidade de propagação das ondas mecânicas, característica presente mais intensamente abaixo do ponto de saturação das fibras, pois há um aumento sobre o módulo de elasticidade com maior intensidade do que sobre a densidade aparente. Sendo assim, espécies com maiores densidades e menores teores de água tendem a apresentar maiores velocidades ultrassônicas (CARRASCO; AZEVEDO JÚNIOR, 2003; OLIVEIRA; SALLES, 2005; BUCUR, 2006).

A velocidade máxima de propagação das ondas mecânicas corresponde à condição seca da madeira e a tendência decrescente é linear até o ponto de saturação das fibras (devido aos efeitos combinados da redução do módulo de elasticidade e do aumento da densidade). Após este ponto, há uma tendência de inflexão e a velocidade continua a diminuir linearmente devido apenas ao aumento da densidade (BUCUR, 2006), no entanto, de acordo com Machado, Palma e Simões (2009) e Dackermann et al. (2014), acima do PSF a velocidade de onda apresenta-se praticamente estável, com pouca ou nenhuma mudança.

### 3.1.3 Módulo de Elasticidade

O módulo de elasticidade segundo Scanavaca Júnior e Garcia (2004), é um dos parâmetros de maior importância determinados pelo teste de flexão estática, uma vez que ao receber uma força aplicada perpendicularmente ao eixo longitudinal da madeira pode caracterizar a resistência da mesma.

De maneira mais específica, o módulo de elasticidade é uma grandeza proporcional à rigidez de um material quando o mesmo é submetido a uma tensão externa. Refere-se a habilidade deste material em recuperar a sua forma e tamanho originais depois que esta força é removida. O módulo de elasticidade para tensão de compressão ou tração é conhecido como módulo de Young (Y), e o módulo de elasticidade para tensão de flexão é definido por E (PANSHIN; de ZEEUW, 1970).

Segundo Moreschi (2010) a força exercida sobre a face tangencial da madeira provoca uma deformação, essa força até determinado ponto conhecido como limite proporcional ou limite elástico, causa apenas deformações elásticas, ou seja, reversíveis, a partir de então, as deformações passam a ser plásticas, denominadas irreversíveis.

Estas deformações dependem da maneira como a força é aplicada na madeira e ainda da diferença na estruturação interna da madeira. Ao atuar sobre determinada área ou volume a força recebe o nome de tensão ( $\sigma$ ), a qual pode ser dividida em três tipos primários: tensão de compressão, que reduzirá as dimensões do corpo; tensão de tração, a qual proporciona um aumento das dimensões do corpo; e a tensão de cisalhamento, que promove o movimento em sentidos opostos dos planos paralelos da madeira. A combinação destes três tipos de tensões caracteriza a tensão de flexão (PANSHIN; de ZEEUW, 1970).

Várias características influenciam as propriedades mecânicas da madeira de maneira geral, dentre elas destaca-se o teor de umidade, o qual à medida que aumenta até o PSF provoca uma redução da resistência mecânica, acima deste ponto a resistência tende a se manter constante (STANGERLIN et al., 2010a).

Diversos estudos relacionados a correlação entre a velocidade de ondas mecânicas e o módulo de elasticidade já foram realizados, evidenciando forte correlação entre estas duas variáveis (ROSS et al., 1997; WANG et al., 2000; CARRASCO; AZEVEDO JÚNIOR, 2003; DIVOS; TANAKA, 2005; GUNTEKIN; EMIROGLU; YILMAZ, 2013). Ross e Pellerin (1994) resumiram os resultados de diferentes pesquisas relacionadas à relação entre o módulo de elasticidade e ondas de tensão, onde confirmaram a alta correlação entre estas duas variáveis.

Dackermann et al. (2014), também evidenciam o uso da velocidade de ondas de tensão na predição do módulo de elasticidade da madeira.

Tendo em vista que a qualidade da madeira implica principalmente no conhecimento de determinadas propriedades físico-mecânicas do material, alguns estudos que correlacionam a velocidade de propagação da onda com propriedades como módulo de elasticidade, densidade e umidade, podem ser encontrados na literatura (GONÇALVEZ; VALLE; COSTA, 2001; CARRASCO; AZEVEDO JÚNIOR, 2003; OLIVEIRA; SALES, 2005; DIVOS; TANAKA, 2005; BUCUR, 2006; GUNTEKIN; EMIROGLU; YILMAZ, 2013). Estes autores afirmam que a velocidade de onda mecânica é determinada por estas três propriedades físico-mecânicas.

### 3.2 MÉTODOS DE ANÁLISE NÃO DESTRUTIVA DA QUALIDADE DA MADEIRA

Os métodos utilizados para análise da madeira podem ser tanto de caráter destrutivo quanto não destrutivo. A avaliação não destrutiva foi inicialmente proposta por Jayne (1959), o qual observou que as propriedades de armazenamento e dissipação de energia da madeira (que pode ser medida através de técnicas estáticas e dinâmicas) estão relacionadas as estruturas que determinam as propriedades mecânicas deste material. A técnica não destrutiva por sua vez, é definida como a ciência capaz de identificar as propriedades de um determinado material sem alterar a sua capacidade de uso final, utilizando estas informações para fazer inferências e tomar decisões sobre as aplicações mais adequadas do material avaliado (ROSS; BRASHAW; PELLERIN, 1998).

Na área florestal, a avaliação não destrutiva tem sido utilizada para uma série de finalidades. Em florestas urbanas esta análise possibilita detectar defeitos internos do lenho, e assim estabelecer medidas adequadas de manejo para a árvore avaliada, aumentando sua longevidade e sanidade biológica (FERREIRA, 2009). Em florestas plantadas, é possível avaliar a qualidade do lenho caracterizando a madeira para posterior planejamento e aplicação da mesma (ROLLO, 2009a).

Alguns métodos não destrutivos necessitam da retirada de amostras do tronco da árvore, sendo assim, estes caracterizam-se como invasivos. Já nos métodos de caráter não invasivo, onde não são necessárias amostras do lenho, a avaliação ocorrerá através da resistência a perfuração da madeira, de medições das velocidades de ondas mecânicas, pelo impacto de ferramentas ou ainda pela fixação de pregos ou grampos no lenho (CASTRO, 2011).

As vantagens dos métodos não destrutivos em relação aos métodos convencionais são significativas, destacando-se a possibilidade de utilização posterior da peça avaliada, a rapidez

na aplicação e análise do método, a confiabilidade dos valores obtidos, a redução de perdas, classificação das peças em classes de qualidade e resistência, detecção de defeitos internos antes do abate do indivíduo e, a vantagem financeira proporcionada, tornando estes métodos economicamente interessantes (CHIES, 2005; AMODEI, 2011).

Diversas formas de propagação de energia através ou em volta de um material podem ser utilizadas pelos métodos não destrutivos para determinar as características desejadas. Essa energia pode ser gerada tanto por cargas estáticas ou dinâmicas, quanto por ondas eletromagnéticas ou elásticas (SCHAD; SJAMOLDT; ROSS, 1996). A passagem de ondas para a análise da qualidade da madeira vem se destacando neste âmbito, onde diversos tipos de energia podem ser utilizadas, como som, ultrassom, eletricidade, raios  $\gamma$  e raios X (NICOLOTTI et al., 2003).

Há vários métodos não destrutivos que podem ser utilizados para avaliar e determinar a qualidade e as propriedades da madeira, como os métodos mecânicos (resistência à perfuração), elétricos (os quais utilizam a correlação entre a resistência elétrica e a umidade/apodrecimento), acústicos (velocidade do som), térmicos (radiação do calor) e ondas eletromagnéticas (radiação IR/NIR, raios X) (NIEMZ, 2009).

### **3.2.1 Uso do Resistógrafo**

O Resistógrafo é baseado na correlação entre a resistência a perfuração e a densidade e dureza da madeira. As medições são realizadas através da penetração de uma haste de 3mm de diâmetro e comprimento variável, à uma velocidade constante. A queda abrupta na energia necessária para a penetração a certa profundidade do tronco pode indicar a presença de tecido lesionado naquele ponto. Para cada milímetro de penetração são registrados 100 valores de resistência, os quais são transferidos e armazenados na memória do equipamento na forma de um gráfico de dificuldade à penetração (LIMA et al., 2007).

Diferentes propriedades como dureza, densidade, classes de resistência, seção transversal residual, biodegradação e também defeitos naturais podem ser determinados com a análise dos resistogramas (TEDER et al., 2011). Segundo Gouvêa et al. (2011) a resistência medida com este equipamento pode ser correlacionada com a densidade da madeira. Porém Kasal e Anthony (2004) ressaltam uma variação considerável nos parâmetros de ajuste da correlação entre o equipamento e a densidade, evidenciando a principal desvantagem deste método, a inspeção localizada, sendo necessárias várias perfurações para que uma visão geral da condição do membro possa ser levantada.



### **3.2.2 Uso do Pilodyn**

O Pilodyn é um equipamento desenvolvido na Suíça, para avaliar a degradação superficial da madeira em postes de apoio a telecomunicações. Este equipamento mede a penetração de um pino na madeira, sob pressão constante de uma mola, a qual apresenta seu princípio de compressão inversamente proporcional à densidade da madeira (MCKENZIE et al., 2003). A praticidade do método permitiu expandir a sua aplicação, o qual ajuda na definição de parâmetros de qualidade relativos à densidade da madeira e auxilia na integração de diferentes tipos de madeira segundo classes e categorias (FEIO, 2007; TEDER et al., 2011). De acordo com Teder et al. (2011), a umidade e a direção da penetração exercem efeito sobre os resultados, uma vez que a profundidade da penetração é maior na direção radial do que na direção tangencial. Nesta última é necessário que o pino atravesse diferentes camadas de lenho inicial e lenho tardio, mas na direção radial a penetração ocorre somente em uma parte do anel de crescimento.

### **3.2.3 Uso da Radiografia – Raio X**

A radiografia utiliza uma fina seção transversal de madeira, disposta sobre um filme radiográfico, de onde são obtidas as radiografias da madeira. Em seguida, o filme radiográfico é exposto à uma fonte de raios X, formando a imagem da estrutura transversal do material avaliado (CHAGAS; ROQUE; TOMAZELLO FILHO, 2005). Os mesmos autores enfatizam que esta técnica permite medir a densidade aparente em pequenas amostras, medir a largura dos lenhos inicial e tardio, e conseqüentemente do anel de crescimento, e ainda determinar a porcentagem de lenho tardio.

Enquanto a radiografia oferece a capacidade de ver as características internas da madeira, existem limitações e desvantagens referentes a esta técnica. A investigação radiográfica pode identificar deterioração e defeitos no material de madeira, porém, pode ser difícil estabelecer a profundidade do defeito e a extensão da deterioração também não pode ser quantificada. A radiografia consiste também em uma forma mais cara de testes não destrutivos do que muitos outros métodos alternativos (KASAL; LEAR; ANTHONY, 2010).

### 3.2.4 Uso de medidores de condutividade elétrica

O vitalômetro é um medidor de condutividade elétrica, o qual tem um eletrodo inserido no tronco da árvore para medição da resistência elétrica dos tecidos em intervalos de 1 cm. Diferentes tipos de madeira refletem diferentes quantidades de íons livres, sendo que quanto maior esta quantidade menor será a resistência elétrica do material. O lenho sadio apresenta quantidades menores de íons livres do que tecidos deteriorados (ROLLO, 2009b). Segundo Albers, Pokorny e Johnson (2003), quando o teor de umidade da madeira está abaixo do PSF ou a mesma está impregnada com resina, há maiores dificuldades de interpretação dos resultados por meio do uso desta técnica.

### 3.2.5 Uso de Ultrassom

Na avaliação das propriedades da madeira, som e ultrassom têm sido utilizados de forma bastante ampla. Em termos gerais som significa uma onda elástica que se espalha em materiais e seu comportamento é diferente de acordo com o material (KETTUNEN, 2006). A aplicação e a medição da técnica de ultrassom é baseada no posicionamento de dois transdutores acelerômetros sobre o material a ser avaliado. A onda ultrassônica é então introduzida por um dos transdutores e recebida pelo outro, sendo a contagem do tempo fornecida em microssegundos pelo próprio aparelho (LEMPRIERE, 2002). A partir do tempo e da distância percorrida pela onda é possível determinar a velocidade da mesma.

A propagação de ondas de ultrassom está diretamente relacionada com as propriedades elásticas do material avaliado (STANGERLIN et al., 2010b). Se o material estiver deteriorado, sua rigidez diminui, sendo assim, baixas velocidades ou tempos de propagação maiores são geralmente indicativos de piores condições da madeira. É possível então, correlacionar a velocidade de impulso do ultrassom com a qualidade da madeira, uma vez que este método pode detectar defeitos como rachaduras, nós, deteriorações e desvios na orientação das grãos, apresentando certa correlação com as propriedades físicas e mecânicas da madeira (LIN et al., 2008; AMODEI et al., 2010).

### 3.2.6 Uso de *Stress Wave*

Este tipo de método é similar ao método do “ultrassom”, com a diferença de que neste as ondas são introduzidas por impacto e no de ultrassom por transdutores (BODIG, 2001). O

tempo de voo ou a velocidade calculada correspondente é o parâmetro de onda de tensão mais utilizado durante as investigações de madeira (DACKERMANN et al., 2014). O uso de ondas de tensão em técnicas não destrutivas baseia-se na propagação de ondas sonoras através do material, sendo amplamente utilizado para detectar vazios interiores e deterioração de membros estruturais, bem como medição das propriedades mecânicas da madeira (KASAL; LEAR; TANNERT, 2010). A velocidade de onda neste método é calculada da mesma maneira descrita no método anterior.

Uma das técnicas mais utilizadas e reconhecidas dentro da propagação de ondas de tensão é a tomografia de impulso, a qual permite a reconstrução de seções transversais inteiras do lenho de árvores, através da passagem de ondas mecânicas. Desta maneira, é possível analisar a presença de defeitos como por exemplo, rachaduras, nós, ou degradações causadas por agentes deteriorantes, pois estes alteram as propriedades físicas, químicas e mecânicas da madeira. A imagem tomográfica gerada pelo software do aparelho em resposta as diferentes velocidades de transmissão das ondas mecânicas em uma determinada superfície, está relacionada as propriedades físico-mecânicas do lenho (densidade, módulo de elasticidade, umidade), e conseqüentemente, à qualidade do mesmo (RINNTECH, 2005; PEREIRA et al., 2007). Partindo deste contexto, a técnica de tomografia de impulso surge como uma opção promissora devido à relevância das informações obtidas e também pela facilidade de operação.

### 3.3 TOMOGRAFIA DE IMPULSO

A tomografia de impulso é uma técnica não-destrutiva que permite a reconstrução de seções transversais inteiras de árvores em busca de informações fornecidas pela passagem de ondas mecânicas através da madeira. Esta técnica baseia-se no princípio de cronometragem das ondas mecânicas, ou seja, na medição do tempo de transmissão das ondas entre os sensores. A velocidade do impulso no interior da árvore está altamente correlacionada com a densidade, umidade e módulo de elasticidade do indivíduo avaliado, propriedades estas que refletem o estado de sanidade do lenho, onde rachaduras, cavidades e podridão promovem a redução do tempo de transmissão das ondas (LAWDAY; HODGES, 2000; BUCUR, 2003; RINNTECH, 2005).

Diferentes tipos de energia fornecem informações sobre diferentes propriedades físicas e mecânicas do objeto investigado (SOCCO et al., 2004). Na tomografia de impulso, são utilizadas ondas mecânicas sonoras para obtenção das informações desejadas (RINNTECH,

2005), as quais são aplicadas de maneira prática sem que ocorra a destruição da integridade da madeira sob inspeção.

O tomógrafo de impulso é composto por sensores que são fixados em seções transversais da árvore. O número de sensores é definido pelo usuário, considerando que árvores de menor diâmetro exigem menos sensores, assim como um maior número de sensores será necessário para árvores de maior diâmetro. É importante ressaltar que a resolução e precisão dos dados aumenta à medida que um maior número de sensores é utilizado. Com o auxílio de um martelo especial, estes sensores recebem um determinado número de pancadas, produzindo ondas mecânicas que percorrem a madeira. Assumindo que as ondas de tensão percorrem um caminho reto, este tempo de percurso é computado, e a velocidade de propagação da onda é então calculada pelo software do equipamento (RINNTECH, 2005).

Os dados são exibidos sob a forma de matrizes, gráficos de linha e de superfície. A matriz de velocidade gerada pelo software do equipamento utiliza a equação (1) para calcular as respectivas velocidades, em metros por segundo. O gráfico de linhas faz o uso de linhas coloridas para exibir a velocidade entre os pares de sensores, porém não é possível especializar o defeito na madeira. Utilizando-se algoritmos matemáticos, o software gera o gráfico de superfície ou imagem tomográfica a partir do gráfico de linhas, o qual permite a localização de defeitos presentes na seção avaliada (RINNTECH, 2005). Estas são as informações-chaves fornecidas pelo tomógrafo de impulso para avaliação do estado interno da madeira.

$$v = \frac{s}{t} \quad (1)$$

Onde,

v = velocidade da onda mecânica (m/s);

s = distância entre os sensores (cm);

t = tempo utilizado para a onda percorrer determinada distância ( $\mu$ s).

A distribuição da velocidade sobre um plano cartesiano de pixels é gerada de acordo com a disposição geométrica dos sensores na superfície do elemento. A definição dos parâmetros para a aquisição de dados depende das condições experimentais e da escala das características investigadas (DACKERMANN et al., 2014).

Como a madeira é uma substância orgânica, a velocidade de propagação da onda varia com a direção da grã. A velocidade da onda sonora através da grã é cerca de um quinto a um

terço o valor da mesma no sentido longitudinal (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 2010). A onda de tensão pode passar através de um tronco de árvore por meio de três caminhos diferentes: perpendicular aos anéis de crescimento (radialmente), paralelamente aos anéis de crescimento (tangencialmente), e atravessando os anéis de crescimento (perpendicular), sendo que a velocidade de propagação da onda é maior no sentido longitudinal, posteriormente no radial e por fim no tangencial. Esta característica deve-se ao fato de que no sentido longitudinal a onda viajará ao longo das células verticalmente, com apenas algumas ou nenhuma barreira para passar, enquanto que no sentido transversal as ondas encontram inúmeras interfaces e limites nas paredes celulares, viajando a uma velocidade mais lenta (ROSS; PELLERIN 1994; WANG et al., 2004; KEUNECKE et al., 2007; LACHENBRUCH et al., 2010; LIN et al., 2011; DACKERMANN et al., 2014).

De acordo com Rinn (1999), no caso da seção transversal, a presença e a posição da medula e a orientação dos anéis de crescimento devem ser levados em consideração, para evitar a influência da anisotropia na transmissão das ondas nos sentidos radiais e tangenciais.

Sendo a velocidade da onda mecânica associada às propriedades físicas e mecânicas da madeira, como densidade, módulo de elasticidade e umidade (GONÇALVEZ; VALE; COSTA, 2001; CARRASCO; AZEVEDO JÚNIOR, 2003; OLIVEIRA; SALES, 2005; RINNTECH, 2005; BUCUR, 2006), em condições secas (12% de umidade) a velocidade da onda mecânica é sempre maior do que a velocidade da onda em madeira saturada (OLIVEIRA; SALES, 2005; OLIVEIRA et al., 2005; BUCUR, 2006).

De maneira geral, as ondas mecânicas propagam-se de forma mais rápida em madeiras sadias e de alta qualidade do que em madeiras deterioradas e de baixa qualidade (WANG et al., 2004; WANG, 2013), pois a podridão modifica as propriedades físicas e mecânicas da madeira, degradando os componentes das paredes celulares, reduzindo a massa, as propriedades elásticas e a resistência interna do material (RAYNER; BODDY, 1988). Consequentemente, a velocidade de propagação das ondas mecânicas também será maior em espécies de madeira mais densa, enquanto que espaços vazios, rachaduras, e degradações de maneira geral, fazem com que a onda diminua sua velocidade, uma vez que a mesma precisa encontrar um caminho diferente em torno dos defeitos, desviando os mesmos, assim fazendo com o que o tempo de percurso da onda seja maior (DACKERMANN et al., 2014).

Como a propagação de ondas de tensão é basicamente um fenômeno mecânico, a tomografia de impulso além de ter sido frequentemente utilizada para detectar defeitos internos na madeira, também conta com estudos recentes na correlação existente entre a velocidade de propagação das ondas mecânicas e a densidade e módulo de elasticidade da madeira.

### 3.3.1 Tomografia de Impulso na degradação

Inúmeras pesquisas têm sido realizadas para avaliar a eficiência do método não-destrutivo de tomografia de impulso na identificação e estimativa de áreas deterioradas na madeira de árvores em pé. Os primeiros trabalhos relacionados à avaliação do lenho de árvores através da passagem de ondas mecânicas datam da primeira metade dos anos 1980 (BUCUR, 1983, 1985), onde ondas de ultrassom foram aplicadas a indivíduos arbóreos a fim de estudar a influência da constante elástica no incremento do lenho e estabelecer comparações com a densitometria de raio X.

Gilbert e Smiley (2004), utilizaram a tomografia e a inspeção visual para avaliar 27 seções transversais de 13 árvores. A tomografia de impulso foi capaz de identificar e quantificar as lesões observadas, sendo apenas cerca de 3% de todas as leituras consideradas falsas positivas, mostrando áreas deterioradas onde não havia a presença da mesma e, menos de 9% das leituras foram consideradas falsas negativas, ou seja, havia a presença de áreas deterioradas e a tomografia não as identificou.

Pereira et al. (2007), analisaram a confiabilidade dos dados fornecidos pela tomografia de impulso para avaliação do interior do lenho das espécies *Eucalyptus saligna* Sm, *Schizolobium parahyba* (Vell.) Blake e *Caesalpinia echinata* Lam., por meio da comparação entre a velocidade de propagação da onda mecânica com dados de densidade aparente obtidos por meio da densitometria de raio X. O estudo mostrou que a tomografia de impulso apresentou dados similares aos produzidos pela densitometria de raio X, evidenciando a eficiência do método empregado na obtenção de informações relativas a integridade das amostras de lenho das respectivas espécies avaliadas.

Amodei et al. (2010) utilizaram o tomógrafo de impulso para avaliar o lenho de árvores de *Tectona grandis*, obtendo um levantamento preliminar da qualidade da madeira. O método detectou a presença de zonas distintas no lenho por meio da variação da velocidade de ondas mecânicas indicada pelo gráfico de superfície gerado pelo software do aparelho, o qual permite localizar espacialmente as zonas deterioradas. Os autores atribuem estas diferenças às possíveis variações de densidade e umidade da madeira.

Ikhsan et al. (2010), avaliaram a correlação entre a velocidade das ondas mecânicas e as variações das propriedades internas em árvores de ágar (*Aquilaria crassna*). As amostras possuíam grandes espaços vazios ou então, seu interior estava impregnado por resina, e por fim amostras com nenhum defeito. O estudo comprovou que as ondas mecânicas não conseguem atravessar as áreas deterioradas ou então com a presença de resina, sendo assim as ondas acham

caminhos diferentes, contornando estas áreas, fazendo com que o tempo de transmissão das mesmas aumente e conseqüentemente a sua velocidade diminua. Os autores também enfatizam que é possível obter informações referentes as propriedades internas das árvores por meio do uso das imagens tomográficas geradas.

Rollo et al. (2013), compararam dados obtidos pelo resistógrafo e pelo tomógrafo de impulso em seções de toretes de *Eucalyptus saligna* Sm., de forma a avaliar a qualidade dos dados obtidos pela tomografia. Os autores encontraram forte correlação entre os dois métodos, obtendo um modelo com alto coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,9977, confirmando a confiabilidade dos dados obtidos através da técnica de tomografia de impulso.

Estas pesquisas demonstram parte dos estudos que vêm sendo desenvolvidos relacionados a avaliação da eficiência do método não-destrutivo de tomografia de impulso na identificação de áreas deterioradas no lenho das árvores. Vários outros trabalhos referentes a esta área podem ser encontrados na literatura (SOCCO et al., 2004; AXMON; HANSSON; SÖRNMO, 2004; LIN et al., 2008; WANG; ALISSON, 2008; BRAZEE et al., 2010; ULIANA, 2010; CASTRO et al., 2011; LIN et al., 2011; LI et al., 2012; LIN; YANG, 2015).

### **3.3.2 Tomografia de Impulso na determinação das propriedades físicas e mecânicas da madeira**

Nos últimos anos a tomografia de impulso revelou uma linha de pesquisa diferente, onde a velocidade de propagação da onda mecânica ganhou novas aplicações, deixando de ser apenas destinada a pesquisas relacionadas a deterioração do lenho de árvores, e passando a correlacionar esta velocidade com as propriedades físicas e mecânicas (densidade, umidade e módulo de elasticidade) da madeira propriamente dita, ou seja, estudos vêm sendo desenvolvidos com vista a utilizar a técnica de tomografia de impulso como ferramenta na estimativa direta destas propriedades.

Vários estudos confirmam a forte correlação existente entre a velocidade das ondas mecânicas geradas pela tomografia de impulso e a densidade da madeira (OLIVEIRA; SALES, 2006; PEREIRA et al., 2007; LIN et al., 2011), porém, poucos estabelecem modelos estatísticos que permitam estimar a densidade básica de árvores em pé, oferecendo desta forma mais uma aplicabilidade ao método da tomografia e melhorando a prática de obtenção da densidade em florestas plantadas, a qual ainda ocorre através de método destrutivo.

Rollo et al. (2014) avaliando a correlação entre os dados de densidade aparente obtidos por densitometria de raio X e os dados de velocidade da onda mecânica, provenientes da

tomografia de impulso, afirmam que esta técnica reflete adequadamente esta propriedade da madeira. Rollo (2009a) estudou o ajuste de equações para a estimativa da densidade básica em árvores em pé, de espécies nativas, por meio da tomografia de impulso. Os resultados apresentaram coeficientes de determinação satisfatórios para sua medida de acurácia, tanto em equações para as classes de densidade estabelecidas, quanto para equações generalizadas para todas as espécies. O efeito da umidade sobre a velocidade da onda mecânica é bastante enfatizado pela autora, pois o mesmo constatou que a velocidade da onda mecânica em condições secas (12%) é sempre maior que a velocidade em condições de saturação da madeira.

Latorraca et al. (2011) utilizaram o tomógrafo de impulso para analisar o lenho de árvores de *Pinus caribaea* e associar o efeito da umidade na formação da imagem tomográfica. Os resultados da pesquisa confirmam a influência da umidade da madeira sobre a velocidade da onda mecânica, e conseqüentemente sobre a formação da imagem tomográfica. Oliveira e Sales (2005) ao estudarem algumas espécies de pinus e eucalipto também encontraram esta tendência, sendo que a velocidade da onda mecânica tende à diminuir à medida que o teor de umidade da madeira aumenta. Porém, mais estudos devem ser realizados para estabelecer o grau de influência da umidade sobre a velocidade das ondas.

Outras pesquisas realizadas envolvem o estudo da correlação existente entre o módulo de elasticidade e a velocidade de propagação da onda mecânica (WANG et al., 2000; GUNTEKIN; EMIROGLU; YILMAZ, 2013), os efeitos da anisotropia sobre o tempo de transmissão da onda mecânica (DIKRALLAH et al., 2006; MAURER et al., 2006), ou ainda estudos como o de Gao et al. (2012) que investigam o efeito da temperatura do ambiente na velocidade das ondas sonoras em árvores em pé, desenvolvendo modelos matemáticos que possam estar compensando essas diferenças.

### 3.4 RECONSTRUÇÃO DA IMAGEM TOMOGRÁFICA

A correlação da imagem tomográfica com as condições físicas e mecânicas da seção transversal analisada exige muitas vezes, que o valor da velocidade de propagação da onda mecânica em cada célula da grade da imagem tomográfica seja conhecido. Este é o problema-chave que vem sendo encontrado por pesquisadores da área florestal recentemente, pois sabe-se que a construção da imagem tomográfica utiliza métodos geoestatísticos, como a interpolação dos dados fornecidos, porém, várias pesquisas estão sendo realizadas a fim de aprimorar e encontrar o método que melhor represente as condições reais da seção transversal avaliada.



Li et al. (2012) fizeram o uso do programa Matlab para construir mapas da velocidade de propagação das ondas mecânicas e da dureza do material avaliado. A função do programa utilizada conta com a exibição de isolinhas, as quais tiveram o espaço vazio entre as mesmas preenchido com cores constantes correspondendo ao mapa de cores.

Lin et al. (2008) e Lin et al. (2011), a fim de avaliarem as variações da densidade da madeira através da tomografia de impulso converteram a imagem tomográfica em 256 tons de cinzas utilizando o software do equipamento Arbotom 2D. Em seguida, a velocidade da onda mecânica em cada pixel da imagem tomográfica foi calculada utilizando um programa próprio personalizado, baseado na relação linear entre os valores da escala de cinza e a velocidade. Para estabelecer a correlação entre a imagem tomográfica e a densidade do disco avaliado, corpos de prova foram retirados e tiveram a sua densidade determinada, encontrando uma correlação positiva entre a propriedade avaliada e a velocidade da onda mecânica. Os autores ressaltam que o software deste equipamento leva em consideração as diferenças de velocidade nas direções radial e tangencial e, as padroniza.

Sabe-se que a imagem tomográfica vem acompanhada de uma paleta de cores que representa o intervalo de velocidades de impulso que atravessam a seção transversal avaliada. Sendo assim, Rollo et al. (2014) em estudo desenvolvido com o aparelho Arbotom, utilizaram uma paleta de cores do software que possui um espectro de 1,021 cores, as quais foram reconhecidas pelo software Adobe Photoshop para que cada pixel da imagem tomográfica tivesse uma velocidade atribuída e esta imagem fosse então correlacionada com a densidade aparente do material avaliado. Basicamente o mesmo procedimento foi desenvolvido por Pereira et al. (2007) em pesquisa realizada a fim de analisar a confiabilidade das informações fornecidas pela tomografia de impulso, através da correlação desta com os dados obtidos por meio da densitometria de raio-X.

Comparando dados obtidos pelo resistógrafo e pelo tomógrafo de impulso, Rollo et al. (2013) utilizaram o software de geoprocessamento TNT Mips versão 7.2 para realizar a demarcação das bandas de cores (RGB) que compõe a imagem tomográfica e assim determinar a velocidade de propagação da onda mecânica através da composição de níveis de cinza em cada uma das bandas. Para cada imagem tomográfica foi construída uma paleta de cores, possibilitando a identificação da velocidade de propagação da onda em cada elemento da matriz. Posteriormente modelos linearizados foram testados para que a correlação entre os dois métodos utilizados fosse então estabelecida.

Outra estratégia apresentada para reconstruir a imagem tomográfica é encontrada no estudo de Zeng et al. (2013), o qual utiliza um método de interpolação espacial baseado em

elipses. Sendo que o raio percorrido por determinada velocidade irá exercer certa influência sobre a área ao seu redor (zona afetada), sendo o formato desta zona elíptico. Desta maneira, o valor de cada célula da grade da zona afetada é igual ao valor do raio correspondente. Se uma célula da grade encontra-se sobre a influência de várias elipses, o seu valor corresponderá à média dos valores de todas estas elipses. Os autores avaliaram a eficiência do método na identificação de defeitos em amostras sobre a presença de fontes externas de interferência, como gotas de água e variações estruturais. Os resultados mostram a capacidade do método em fornecer informações acuradas de áreas danificadas sobre a presença destes agentes de interferência.

Uma reconstrução da imagem tomográfica utilizando o método de interpolação espacial é apresentada por Feng et al. (2014), onde o principal objetivo da pesquisa é predizer valores de velocidade de propagação da onda em pontos desconhecidos. Os autores consideraram que cada ponto na seção transversal está relacionado a outros pontos, onde os pontos adjacentes estão mais intimamente relacionados do que pontos distantes. Desta forma, a premissa básica que suporta o método empregado é a atribuição de pesos a estes pontos, onde os mais próximos recebem pesos maiores do que pontos mais distantes. Os resultados obtidos foram bastante positivos, apresentando uma excelente correlação entre a imagem tomográfica obtida e as condições físicas das amostras.

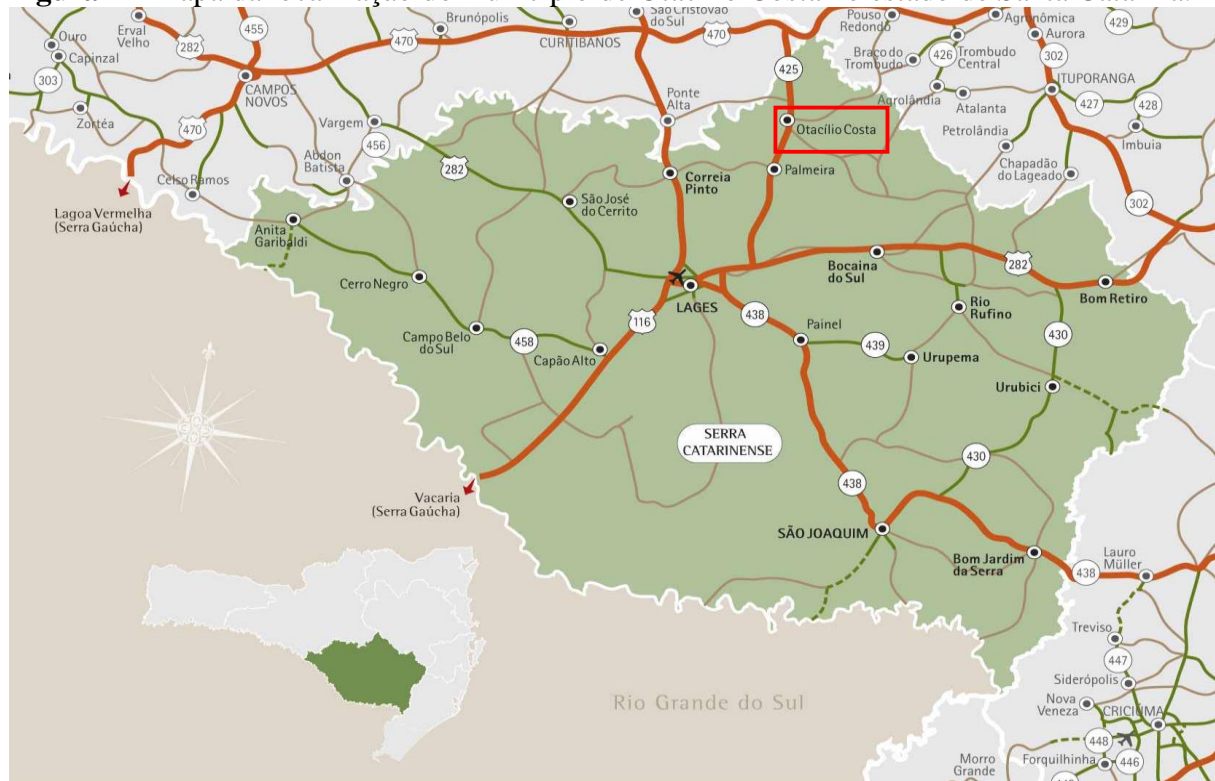
Du et al. (2015) sugerem uma nova técnica para reconstrução da imagem tomográfica, a qual considera o uso de um método ‘melhorado’ de interpolação espacial baseado em elipses, o qual permite estimar a velocidade de uma célula da grade afetada pelas zonas elípticas correspondentes as velocidades próximas, porém levando em consideração o comprimento do raio que a velocidade percorreu, pois este influencia o formato da zona afetada; e também inclui uma compensação da velocidade, devido à presença de anisotropia na madeira. O experimento confirma um melhor desempenho apresentado pelo método proposto frente as outras técnicas empregadas, detectando pequenos e complicados defeitos.

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA E COLETA DO MATERIAL

Foram selecionadas árvores de dois povoamentos florestais de *Pinus taeda* L., provenientes de áreas de plantio da empresa Klabin S.A. localizadas na fazenda Lajeado II, município de Otacílio Costa, Santa Catarina, nas coordenadas 581.185,171, 6.944.252,966 e 582.089,115, 6.943.815,480, de latitude e longitude para os talhões B5A (15 anos) e C0B (16 anos), respectivamente (Figura 1).

**Figura 1** - Mapa da localização do município de Otacílio Costa no estado de Santa Catarina.



Fonte: MAPA da Serra Catarinense, [201\_]. Disponível em: <[www.santacatarinaturismo.com.br/destinos.php?id=29](http://www.santacatarinaturismo.com.br/destinos.php?id=29)>. Acesso em: 6 nov. 2017.

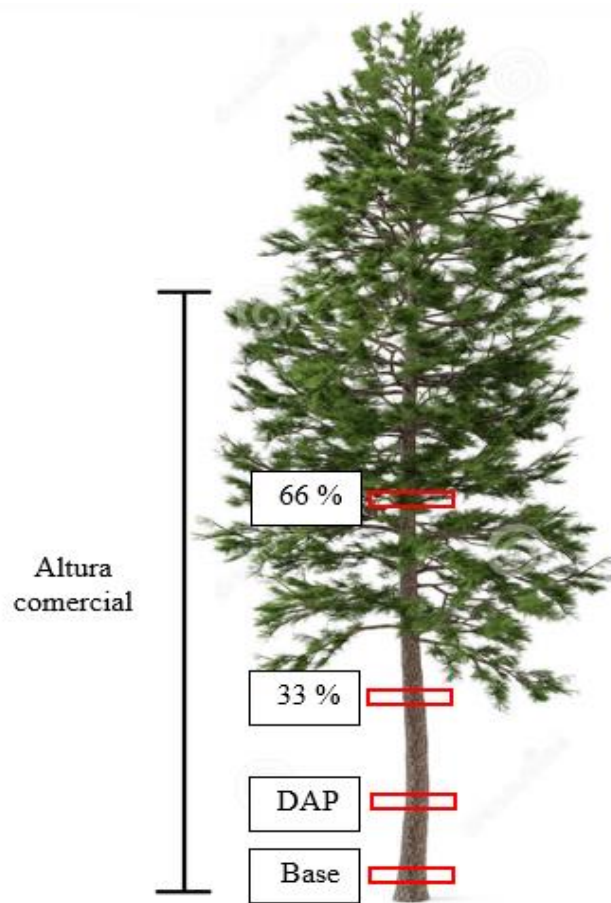
O estudo consistiu em 12 coletas realizadas mensalmente para o mapeamento da influência da época do ano, principalmente sobre a variação no teor de umidade da madeira. Em cada coleta, 3 árvores foram selecionadas para cada talhão, totalizando 72 árvores ao final do experimento. A escolha das árvores foi realizada de acordo com a árvore dg (árvore de diâmetro quadrático médio) de cada povoamento. Dados estes fornecidos pela equipe de inventário da empresa Klabin S.A.

Antes da derrubada das árvores, uma avaliação tomográfica da seção transversal do tronco foi realizada à altura do DAP (diâmetro à altura do peito). Em seguida, foram retirados de cada árvore toretes a 0% (base), 33% e 66% da altura comercial, utilizando como parâmetro, o diâmetro mínimo de oito centímetros, estabelecido pela empresa.

Os toretes tiveram as suas extremidades envolvidas em plástico filme e foram encaminhados para o Laboratório de Tecnologia da Madeira, do Departamento de Engenharia Florestal, da Universidade do Estado de Santa Catarina, onde no mesmo dia uma avaliação tomográfica foi realizada em cada um. Os toretes apresentaram aproximadamente setenta centímetros de comprimento nas posições mencionadas, sendo trinta e cinco centímetros para cada lado, com exceção da posição 0% (base) onde os mesmos foram seccionados para cima. O diâmetro do fuste à altura de 100% não comporta o uso do tomógrafo de impulso utilizado, pois é necessária uma distância mínima de 10,5 cm entre os sensores, o que se tornou inviável, uma vez que a esta altura trabalhou-se com diâmetro de 8 cm, portanto não foram realizadas leituras tomográficas a 100% da altura comercial.

Após a realização da leitura tomográfica, discos de aproximadamente 5 cm de espessura foram retirados em todas as alturas, exatamente na área onde o tomógrafo de impulso foi aplicado (Figura 2). Os discos foram encaminhados para realização das análises físicas (determinação da densidade básica e teor de umidade por métodos destrutivos na direção radial: casca/medula/casca).

**Figura 2** - Aplicação do tomógrafo de impulso e retirada das amostras em quatro pontos longitudinais ao longo do tronco.

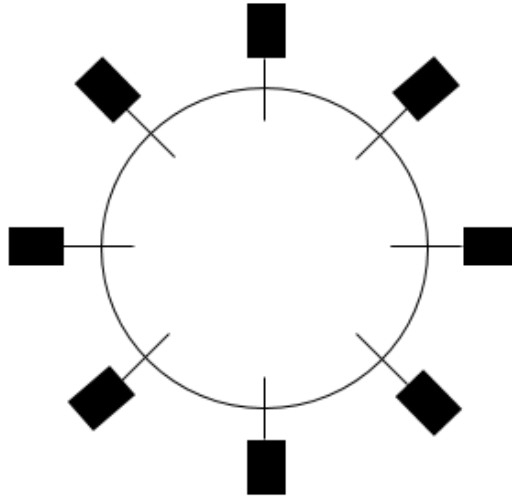


Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

#### 4.2 VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DAS ONDAS MECÂNICAS ATRAVÉS DO EXAME DE TOMOGRAFIA DE IMPULSO

Para a realização da leitura tomográfica da seção transversal do tronco das árvores e dos toretes, foi utilizado o tomógrafo de impulso ARBOTOM 2D da Rinntech (Figura 3). As medidas de velocidade nas árvores em pé e nos toretes foram realizadas em oito pontos, separados de forma equidistante ao redor da circunferência da árvore. Os pregos, feitos especialmente de aço inoxidável, foram introduzidos no xilema das árvores de maneira que um ângulo de 90° entre os pregos e o eixo do tronco foi estabelecido, em seguida acoplou-se oito sensores do equipamento nos mesmos, os quais realizam tanto a emissão quanto a recepção de sinais (Figura 4). Alguns parâmetros importantes, tais como, a forma da secção transversal, espécie, distância entre os sensores, e outros, foram inseridos no software do equipamento para que as medições fossem devidamente realizadas.

**Figura 3** - Utilização do tomógrafo de impulso ARBOTOM 2D da Rinntech.



Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

**Figura 4** - Posicionamento dos sensores na secção transversal do lenho das árvores.



Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

Após a montagem do sistema, cada sensor recebeu cinco pancadas de martelo (Figura 5), podendo aumentar em número, até que a percentagem de erro atingisse a faixa de valor aceitável (entre 0 e 10%), de acordo com a Tabela Delta %, do software Arbotom 1.73a. As ondas mecânicas geradas percorrem o lenho até alcançarem os demais sensores e, assim, gerar os tempos de propagação da onda utilizados no cálculo de sua velocidade. As velocidades das ondas entre os sensores foram calculadas automaticamente pelo software do aparelho, gerando uma tabela das velocidades de onda e produzindo uma imagem tomográfica da secção transversal do tronco das árvores.

**Figura 5** - Aplicação das pancadas de martelete para produção de ondas mecânicas.



Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

Cada pixel da imagem tomográfica gerada pelo software pode ser entendido como um caminho percorrido pela onda mecânica, o qual tem a sua velocidade estimada. O tomograma também vem acompanhado de uma paleta de cores, a qual representa a variação das velocidades de impulso que atravessam a seção transversal.

Os sensores localizados nos sentidos norte e sul tiveram a sua localização demarcada, para que posteriormente a localização de cada sensor fosse mapeada no disco utilizado para obtenção da densidade básica. Desta maneira, foi possível comparar as imagens tomográficas com as imagens retiradas de cada disco após a demarcação dos corpos de prova no mesmo.

#### 4.3 DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE BÁSICA E DO TEOR DE UMIDADE EM LABORATÓRIO

Os quatro discos coletados de cada árvore foram seccionados em corpos de prova para a determinação do teor de umidade com base na norma NBR 7190, e determinação da densidade básica através do método do Máximo Teor de Umidade.

Para a determinação do teor de umidade os corpos de prova foram pesados em balança analítica com precisão de 0,0001g, obtendo assim a massa inicial (g) de cada um. Após a determinação do peso inicial, os corpos de prova foram saturados em água, dentro de dessecadores que permitiram a aplicação de vácuo para acelerar o processo e ter certeza de que o mesmo se daria por completo. Este procedimento foi necessário para que o peso do material totalmente saturado fosse obtido para determinação da densidade básica. Em seguida, os corpos de prova foram colocados em estufa de circulação forçada de ar com temperatura aproximada de 85 °C por dois dias, com a porta da mesma aberta, para que o excesso de água fosse evaporado. Após estes dois dias, a porta da estufa foi fechada e a temperatura passou a ser de  $103 \pm 2$  °C. Durante o processo de secagem a massa dos corpos de prova foi acompanhada, até que a variação entre duas medidas consecutivas fosse menor ou igual a 0,5% da última massa medida. Esta massa foi então, considerada como massa seca. O teor de umidade na base seca foi determinado a partir da seguinte equação (2):

$$UM (\%) = \frac{m_i - m_s}{m_s} \times 100 \quad (2)$$

Onde:

$m_i$ : massa inicial (g);

$m_s$ : massa seca (g);

UM: teor de umidade (%).

Para a determinação da densidade básica o método empregado é o do máximo teor de umidade. Para este método são necessárias apenas duas pesagens, uma da amostra completamente saturada em água e a outra da mesma totalmente seca da madeira, pois o mesmo admite que a densidade da substância madeira é constante (1,53 g/cm<sup>3</sup>) (Foelkel et al., 1971). Sendo assim, a densidade básica foi determinada pela equação (3):

(3)



$$DB(g/cm^3) = \frac{1}{\frac{m_{sat}}{m_s} - 0,346}$$

Onde:

$m_{sat}$ : massa totalmente saturada (g);

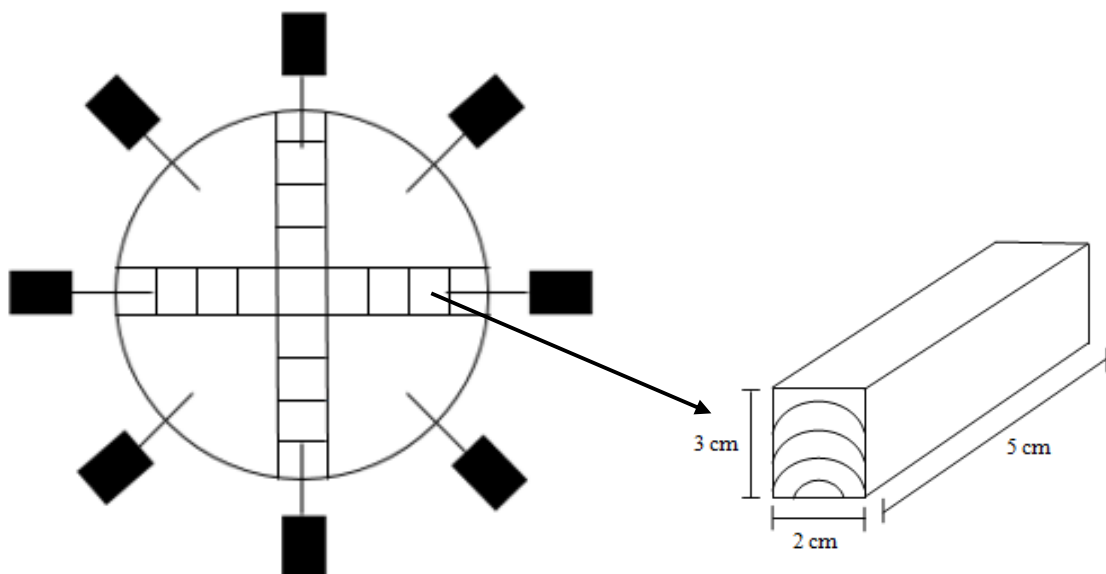
$m_s$ : massa seca (g);

DB: densidade básica da madeira ( $g/cm^3$ ).

Os discos de aproximadamente 5 cm de espessura foram cortados na mesma posição em que foram fixados os sensores do tomógrafo à campo ou nos toretes em laboratório. Cada disco foi dividido em quadrantes com marcação em forma de cruz. Em cada marcação, foram cortados filetes com 3 cm de largura até atingirem a medula. Os filetes foram ainda seccionados de 3 em 3 cm para a obtenção do perfil de densidade ao longo do disco (Figura 6).

Tal procedimento foi adotado para que a correta localização da determinação da densidade básica na madeira pudesse ser identificada na imagem tomográfica, permitindo assim correlacionar as variáveis densidade básica e velocidade de propagação da onda mecânica. Essas linhas de passagem foram identificadas com o auxílio do software de geoprocessamento ArcGis, o qual permitiu a sobreposição da imagem tomográfica da seção transversal com a imagem do disco demarcado com os seus respectivos corpos de prova.

**Figura 6** - Representação da retirada dos corpos de prova dos discos de cada árvore (no sentido casca/medula/casca), para a determinação da densidade básica e do teor de umidade.



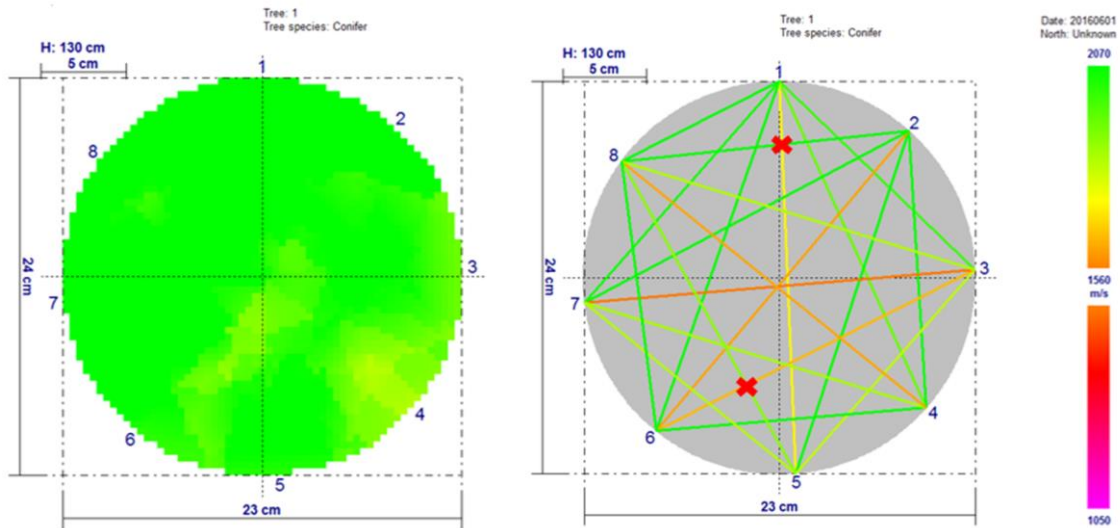
#### 4.4 PROCESSAMENTO DAS IMAGENS

Para esta etapa um programa personalizado foi desenvolvido baseado no método do Inverso da Distância Ponderada para realização da interpolação espacial dos dados. Esta fase é de extrema importância, uma vez que o coeficiente de determinação dos modelos estatísticos empregados refletirá o grau de ajuste entre as variáveis de densidade básica e velocidade de propagação das ondas mecânicas.

Os dados passaram por um processamento prévio, onde uma dentre as três leituras tomográficas realizadas à campo foi escolhida para cada disco. Em seguida realizou-se o levantamento dos “outliers” presentes em cada matriz de velocidades, para que estes outliers fossem retirados e substituídos, a fim de minimizar o efeito negativo causado pelos mesmos, e homogeneizar os dados. Após o tratamento das matrizes de velocidade, tabelas com as respectivas velocidades e distâncias entre os sensores foram geradas para cada disco, a fim de alimentar o software desenvolvido.

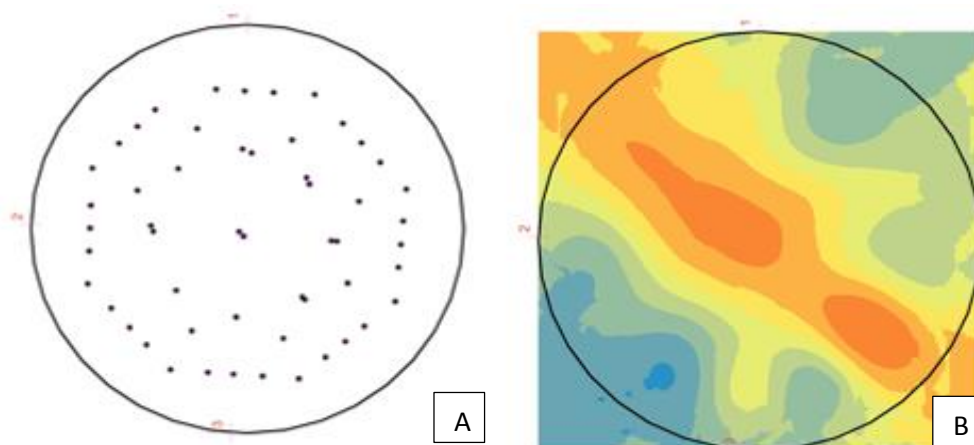
O programa Python foi utilizado para criação do software de interpolação, sendo que através deste programa foi possível estudar, planejar, testar e finalizar a melhor programação dentro do objetivo apresentado. Para o ajuste desta programação várias tentativas foram realizadas, até o software fornecer de forma eficiente e confiável as coordenadas (X, Y e Z) para cada ponto de intersecção entre as linhas de viagem das ondas mecânicas dentro do gráfico de superfície (Figura 7), procedimento este realizado individualmente para cada um dos 288 discos avaliados. Posteriormente, com as coordenadas geradas (Figura 8), foi necessário a aplicação de outro método de interpolação, o método de Krigagem, sendo este utilizado para finalizar o processo de espacialização total dos dados (Figura 8), com o auxílio do software ArcGis, no qual medidas de ajuste para o efeito de anisotropia encontrado na madeira também foram realizados.

**Figura 7** - Gráficos de superfície e de linhas, exemplificando os pontos de intersecção entre as linhas de viagem das ondas mecânicas.



Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

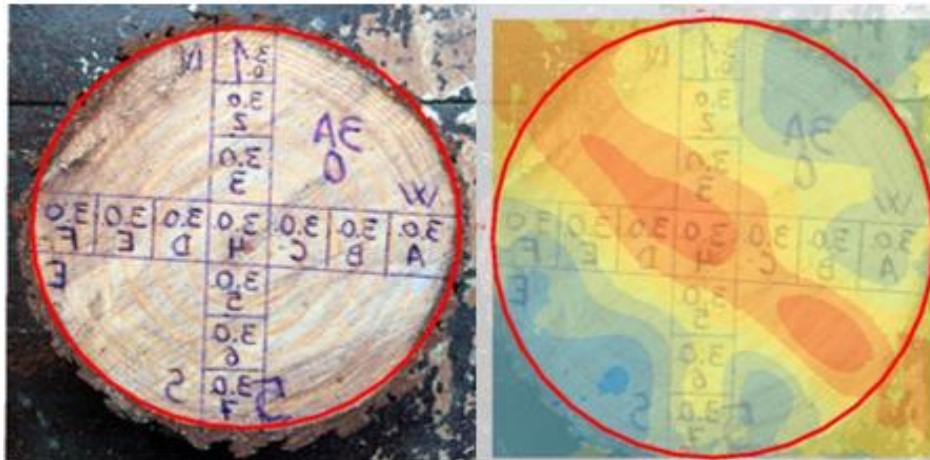
**Figura 8** - A. Coordenadas geradas por meio do novo software. B. Mapa de superfície gerado por meio do método de interpolação Krigagem.



Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

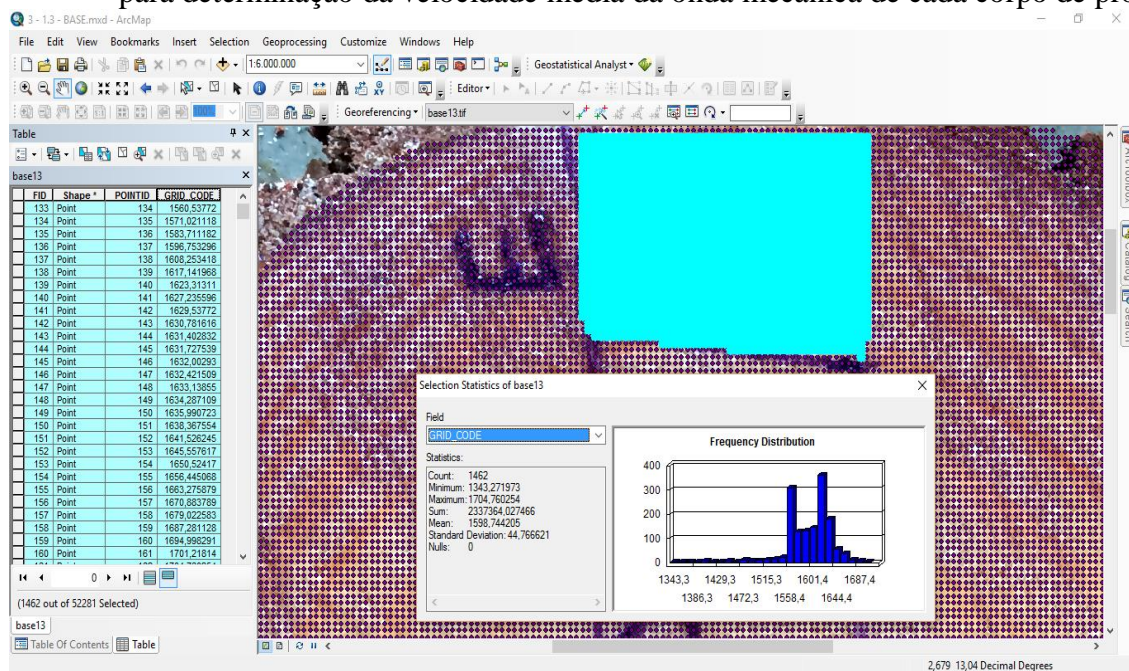
Com o mapa de superfície gerado a partir do processo de Krigagem, foi possível realizar a sobreposição da “imagem tomográfica” e da imagem do disco contendo a demarcação dos corpos de prova (Figura 9). Assim, é possível selecionar todos os pixels presentes dentro de cada corpo de prova e determinar a velocidade média das ondas mecânicas que por ali foram conduzidas (Figura 10), permitindo a realização do processo de correlação entre as variáveis (velocidade da onda mecânica x densidade básica). Este procedimento foi realizado individualmente para cada um dos 3.458 corpos de prova.

**Figura 9** - Sobreposição da imagem do disco contendo a demarcação dos corpos de prova e da "imagem tomográfica" gerada pelo método de Krigagem.



Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

**Figura 10** - Processo de seleção dos pixels do mapa de superfície gerado no programa ArcGis, para determinação da velocidade média da onda mecânica de cada corpo de prova.



Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

#### 4.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Dentro da estatística descritiva quatro parâmetros foram analisados: a média das variáveis observadas, o desvio padrão (medida de dispersão das variáveis), coeficiente de variação, o qual expressa a variabilidade dos dados, e o coeficiente de correlação de Pearson, que mede o grau de correlação entre as variáveis, bem como o seu sentido (positivo ou negativo).

Para a análise estatística das variáveis do lenho das árvores de *Pinus taeda* L. separadamente: velocidade da onda mecânica, densidade básica e umidade, foi utilizado o programa SISVAR (FERREIRA, 2011). O teste de Scott-Knott (95% de probabilidade) foi empregado devido ao fato de que nenhuma média pode pertencer a mais de um agrupamento neste teste, facilitando a compreensão e discussão dos dados.

#### 4.6 MODELAGEM ESTATÍSTICA

Com base nos valores de densidade básica determinados em laboratório e das velocidades obtidas pela tomografia de impulso, foram testados os seguintes modelos estatísticos apresentados na Tabela 1, para todos os dados analisados de forma única, e para os mesmos analisados separadamente, base, DAP, 33% e 66% da altura comercial.

A estimativa da densidade básica, nos modelos logarítmicos, ao determinar o antilogaritmo da variável, ocasiona erros sistemáticos denominados de discrepâncias logarítmicas. Sendo assim, para que seja possível a comparação entre as equações logarítmicas e as não logarítmicas, é necessário utilizar um fator de correção (SCHNEIDER, 1997). A discrepância na estimativa dos modelos logarítmicos, foi corrigida multiplicando-se a densidade básica estimada pelo fator de correção de Meyer (equação 4):

$$Meyer = e^{0,5.(Syx)^2} \quad (4)$$

Onde:

$e$ : exponencial; e

$Syx$ : erro padrão de estimativa.

Os melhores modelos foram determinados partindo das seguintes medidas de acurácia: maior coeficiente de determinação ( $R^2aj$ ) e menor erro padrão da estimativa ( $Syx$ ).

**Tabela 1** - Modelos estatísticos testados para estimar a densidade básica da madeira de *Pinus taeda* L.

Número	Modelo	Autor
1	$\ln DB = \beta_0 + \beta_1 * \ln (V^2 * UM)$	Spurr
2	$DB = \beta_0 + \beta_1 * (V^2 * UM)$	Brown
3	$DB = \beta_0 + \beta_1 * V^2 + \beta_2 * (V^2 * UM) + \beta_3 * UM$	Stoate
4	$DB = \beta_0 + \beta_1 * V + \beta_2 * V^2 + \beta_3 * (V * UM) + \beta_4 * (V^2 * UM) + \beta_5 * UM$	Meyer
5	$DB = \beta_0 + \beta_1 * V^2 + \beta_2 * (V^2 * UM) + \beta_3 * (V * UM^2) + \beta_4 * UM^2$	Naslund modificada
6	$\ln DB = \beta_0 + \beta_1 * \ln V + \beta_2 * \ln UM$	Schumacher-Hall
7	$\ln DB = \beta_0 + \beta_1 * \ln (1/V)$	Schumacher
8	$DB = \beta_0 + \beta_1 * V + \beta_2 * V^2$	Hohenadl-Krenn
9	$\ln DB = \beta_0 + \beta_1 * \ln V$	Husch
10	$\ln DB = \beta_0 + \beta_1 * \ln V + \beta_2 * \ln V^2 + \beta_3 * \ln UM + \beta_4 * \ln UM^2$	Prodan
11	$\ln DB = \beta_0 + \beta_1 * \ln V + \beta_2 * 1/V$	Brenac
12	$\ln DB = \beta_0 + \beta_1 * \ln V^2$	Spurr
13	$DB = \beta_0 + \beta_1 * V$	Rollo
14	$\ln DB = \beta_0 + \beta_1 * (1/V)$	Rollo
15	$\ln DB = \beta_0 + \beta_1 * (1/V) + \beta_2 * UM^2$	Rollo
16	$\ln DB = \beta_0 + \beta_1 * \ln V + \beta_2 * UM^2$	Rollo
17	$\ln DB = \beta_0 + \beta_1 * V^2 + \beta_2 * (V^2 * UM) + \beta_3 * (V * UM^2) + \beta_4 * UM^2$	Naslund

Nota: DB = densidade básica (g/cm<sup>3</sup>); V = velocidade da onda mecânica (m/s); UM = umidade da madeira (%);  $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$  e  $\beta_5$  = coeficientes de regressão; ln = logaritmo natural ou neperiano.

Além dos modelos da literatura testados, o procedimento de seleção de variáveis *Stepwise* também foi utilizado para encontrar as melhores equações para determinação da densidade básica.

Para o procedimento *Stepwise*, foram realizadas diversas transformações matemáticas das variáveis independentes (velocidade, umidade, DAP e altura), as transformações matemáticas mais fortemente correlacionadas com a variável dependente (densidade básica), foram adicionadas e removidas de um modelo de regressão uma de cada vez, com o objetivo de obter um modelo que conte apenas com variáveis significativas, porém que não exclua nenhuma variável útil.

As duas opções fornecidas pelo programa STATGRAPHICS® Centurion para o método *Stepwise* foram utilizadas, sendo elas:

1) *Forward Selection*: a qual começou com um modelo contendo somente uma constante e foi sendo inserida uma variável de cada vez, até alcançar a melhoria do ajuste de forma significativa (STATGRAPHICS® Centurion XVI User Manual, 2010);

2) *Backward Selection*: a qual começou com um modelo contendo todas as variáveis e foi sendo removida uma variável de cada vez até que todas as variáveis restantes fossem estatisticamente significativas (STATGRAPHICS® Centurion XVI User Manual, 2010).





## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 ESTATÍSTICA DESCRITIVA DAS VARIÁVEIS

A estatística descritiva das variáveis velocidade da onda mecânica, umidade e densidade básica da madeira, para todos os dados e para cada altura avaliada, são apresentadas nas Tabelas 2, 3 e 4.

**Tabela 2** - Estatística descritiva para a variável velocidade da onda mecânica (m/s).

<b>Estatística Descritiva - Velocidade (m/s)</b>					
<b>Parâmetros</b>	<b>Dados Gerais</b>	<b>Base</b>	<b>DAP</b>	<b>33% de altura</b>	<b>66% de altura</b>
<b>Média</b>	1407,93	1424,94	1380,19	1378,48	1459,36
<b>Desvio padrão</b>	90,95	119,41	106,94	115,90	149,19
<b>CV (%)</b>	6,46	8,38	7,75	8,41	10,22

Nota: DAP – diâmetro à altura do peito (1,30 m), CV – coeficiente de variação (%).

**Tabela 3** - Estatística descritiva para a variável umidade (%).

<b>Estatística Descritiva - Umidade (%)</b>					
<b>Parâmetros</b>	<b>Dados Gerais</b>	<b>Base</b>	<b>DAP</b>	<b>33% de altura</b>	<b>66% de altura</b>
<b>Média</b>	62,46	59,73	60,51	65,83	66,14
<b>Desvio padrão</b>	2,07	2,52	2,55	2,02	2,11
<b>CV (%)</b>	3,31	4,23	4,21	3,06	3,19

Nota: DAP – diâmetro à altura do peito (1,30 m), CV – coeficiente de variação (%).

**Tabela 4** - Estatística descritiva para a variável densidade básica (g/cm<sup>3</sup>).

<b>Estatística Descritiva - Densidade Básica (g/cm<sup>3</sup>)</b>					
<b>Parâmetros</b>	<b>Dados Gerais</b>	<b>Base</b>	<b>DAP</b>	<b>33% de altura</b>	<b>66% de altura</b>
<b>Média</b>	0,3916	0,4203	0,4107	0,3565	0,3550
<b>Desvio padrão</b>	0,02	0,03	0,03	0,02	0,02
<b>CV (%)</b>	6,14	7,15	7,36	6,38	6,75

Nota: DAP – diâmetro à altura do peito (1,30 m), CV – coeficiente de variação (%).

Analisando as médias das variáveis, algumas considerações podem ser levantadas. Em relação à velocidade da onda mecânica, a variação entre a média de todos os conjuntos de dados, não excedeu um percentual de 5,6% da maior para a menor velocidade, caracterizando uma diferença de 81 m/s. Sendo assim, se pode afirmar que o tratamento das matrizes de velocidade realizado na fase inicial do processamento dos dados para retirada dos outliers teve êxito, diminuindo a variabilidade dos dados.

A umidade apresentou um percentual de diferença de 9,7% entre a maior e menor umidade determinada, percentual este, explicado pela variabilidade de teor de umidade presente tanto no eixo longitudinal quanto radial da madeira, comportamento já esperado.

A densidade básica por sua vez, apresentou uma diferença de 15,5% entre a maior e menor média de densidade observadas, este dado vem de encontro com a diferença encontrada pela umidade, uma vez que as duas estão correlacionadas fortemente.

O desvio padrão e o coeficiente de variação são medidas de dispersão que indicam a regularidade dos dados em função da média da variável analisada. A diferença entre os dois encontra-se na forma como os mesmos expressam a variabilidade dos dados estatísticos, onde o desvio padrão conta com os dados na mesma unidade de medida, ou seja, apresenta o resultado em valores absolutos, já o coeficiente de variação exclui a influência da ordem de grandeza da variável, apresentando a dispersão dos mesmos em termos relativos.

Para o desvio padrão, a variável que apresentou maior dispersão foi a velocidade da onda mecânica. Dentro das posições avaliadas, o DAP apresentou a menor variabilidade dos dados e a 66% da altura comercial ficou com a maior dispersão, quando tratados os dados de forma geral, uma melhora pode ser observada no desvio padrão.

Para todas as variáveis, o coeficiente de variação foi baixo, não excedendo 10,22 %, confirmando a homogeneidade dos dados coletados, ou seja, há uma menor dispersão dos mesmos em torno da média.

Nas Tabelas 5, 6, 7, 8 e 9 encontra-se a correlação de Pearson entre todas as variáveis estudadas, velocidade da onda mecânica, umidade, altura, DAP e densidade básica da árvore, para todos os dados e para cada altura avaliada.

**Tabela 5** - Correlação de Pearson para os dados Gerais.

<b>Correlação - Pearson (Dados Gerais) - n: 3.458</b>					
	<b>V (m/s)</b>	<b>UM (%)</b>	<b>h (m)</b>	<b>DAP (cm)</b>	<b>DB (g/cm<sup>3</sup>)</b>
<b>V (m/s)</b>	1,0000				
<b>UM (%)</b>	0,0441	1,0000			
<b>h (m)</b>	-0,2393	0,2173	1,0000		
<b>DAP (cm)</b>	-0,3993	0,1527	0,5660	1,0000	
<b>DB (g/cm<sup>3</sup>)</b>	-0,0546	-0,9505	-0,2395	-0,2312	1,0000

Nota: n – número de elementos; V – velocidade da onda mecânica; UM – umidade; h – altura; DAP – diâmetro à altura do peito (1,30 m); DB – densidade básica.

**Tabela 6 - Correlação de Pearson para os dados da Base.**

<b>Correlação - Pearson (Base) – n: 1.066</b>					
	<b>V (m/s)</b>	<b>UM (%)</b>	<b>h (m)</b>	<b>DAP (cm)</b>	<b>DB (g/cm<sup>3</sup>)</b>
<b>V (m/s)</b>	1,0000				
<b>UM (%)</b>	-0,0820	1,0000			
<b>h (m)</b>	-0,1467	0,0872	1,0000		
<b>DAP (cm)</b>	-0,3946	0,1049	0,5662	1,0000	
<b>DB (g/cm<sup>3</sup>)</b>	0,0744	-0,9412	-0,1235	-0,2150	1,0000

Nota: n – número de elementos; V – velocidade da onda mecânica; UM – umidade; h – altura; DAP – diâmetro à altura do peito (1,30 m); DB – densidade básica.

**Tabela 7 - Correlação de Pearson para os dados do DAP.**

<b>Correlação - Pearson (DAP) – n: 986</b>					
	<b>V (m/s)</b>	<b>UM (%)</b>	<b>h (m)</b>	<b>DAP (cm)</b>	<b>DB (g/cm<sup>3</sup>)</b>
<b>V (m/s)</b>	1,0000				
<b>UM (%)</b>	-0,0054	1,0000			
<b>h (m)</b>	-0,3668	0,2111	1,0000		
<b>DAP (cm)</b>	-0,3265	0,1794	0,5658	1,0000	
<b>DB (g/cm<sup>3</sup>)</b>	0,0384	-0,9408	-0,2564	-0,2533	1,0000

Nota: n – número de elementos; V – velocidade da onda mecânica; UM – umidade; h – altura; DAP – diâmetro à altura do peito (1,30 m); DB – densidade básica.

**Tabela 8 - Correlação de Pearson para os dados à 33% de altura comercial.**

<b>Correlação - Pearson (33%) – n: 801</b>					
	<b>V (m/s)</b>	<b>UM (%)</b>	<b>h (m)</b>	<b>DAP (cm)</b>	<b>DB (g/cm<sup>3</sup>)</b>
<b>V (m/s)</b>	1,0000				
<b>UM (%)</b>	-0,0056	1,0000			
<b>h (m)</b>	-0,1231	0,2466	1,0000		
<b>DAP (cm)</b>	-0,1795	0,1534	0,5673	1,0000	
<b>DB (g/cm<sup>3</sup>)</b>	-0,0261	-0,9598	-0,2226	-0,1693	1,0000

Nota: n – número de elementos; V – velocidade da onda mecânica; UM – umidade; h – altura; DAP – diâmetro à altura do peito (1,30 m); DB – densidade básica.

**Tabela 9 - Correlação de Pearson para os dados à 66% de altura comercial.**

<b>Correlação - Pearson (66%) – n: 605</b>					
	<b>V (m/s)</b>	<b>UM (%)</b>	<b>h (m)</b>	<b>DAP (cm)</b>	<b>DB (g/cm<sup>3</sup>)</b>
<b>V (m/s)</b>	1,0000				
<b>U (%)</b>	0,1567	1,0000			
<b>h (m)</b>	-0,0905	0,1983	1,0000		
<b>DAP (cm)</b>	-0,2303	0,3363	0,5662	1,0000	
<b>DB (g/cm<sup>3</sup>)</b>	-0,1860	-0,9819	-0,1902	-0,3543	1,0000

Nota: n – número de elementos; V – velocidade da onda mecânica; UM – umidade; h – altura; DAP – diâmetro à altura do peito (1,30 m); DB – densidade básica.

A velocidade da onda mecânica não apresentou alto coeficiente de correlação de Pearson com a variável densidade básica da madeira, para nenhum dos conjuntos de dados analisados. Em contrapartida, a umidade apresentou uma alta correlação com a densidade básica, tanto para a análise de todos os dados com -0,9505, quanto para os dados avaliados por altura, -0,9412, -0,9408, -0,9598 e -0,9819, para base, DAP, 33% e 66% da altura comercial, respectivamente. Quanto maior a porcentagem de água na madeira, menor a densidade básica da mesma, visto que a água ocupará um maior espaço, e a fração madeira será menor.

As variáveis altura e diâmetro da árvore apresentaram um baixo coeficiente de correlação de Pearson com a densidade básica, tanto para a análise de todos os dados, quanto para as alturas avaliadas.

## 5.2 DENSIDADE BÁSICA

Os valores de densidade básica da madeira de *Pinus taeda* L. para as duas idades avaliadas, são apresentados na Tabela 10.

**Tabela 10** - Densidade básica nos diferentes talhões.

<b>Talhões</b>	<b>Densidade Básica (g/cm<sup>3</sup>)</b>
<b>B5A – 15 anos</b>	0,3984 a
<b>C0B – 16 anos</b>	0,3847 a
<b>Média</b>	<b>0,3912</b>
<b>CV (%)</b>	<b>15,27</b>

\*Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo Teste de Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade.

Verifica-se que a densidade básica média do lenho das árvores ficou entre 0,3984 g/cm<sup>3</sup> e 0,3847 g/cm<sup>3</sup> para os talhões, B5A e C0B, respectivamente, sendo o primeiro de 15 anos e o segundo de 16 anos. Ambos os talhões, receberam o mesmo material genético, o mesmo trato silvicultural, sem nenhum desbaste e dispõem do mesmo tipo de solo e índice de sítio, não apresentando diferença estatística significativa entre eles.

Os valores médios de densidade básica encontrados para as idades de 15 e 16 anos ficaram próximos dos encontrados na literatura. Mendes (1993), avaliando a influência da idade em *Pinus taeda* L. sobre a qualidade da madeira para a produção de celulose, encontrou valores de 0,367 g/cm<sup>3</sup> e 0,389 g/cm<sup>3</sup> para as idades de 14 e 16 anos, respectivamente.

Já Santini, Haselein e Gatto (2000), analisando as propriedades físicas e mecânicas da madeira de três coníferas de florestas plantadas, encontrou densidade básica de 0,41 g/cm<sup>3</sup> para a espécie de *Pinus taeda* L., com 13 anos de idade, sendo que o povoamento analisado foi submetido a um desbaste entre o 8º e o 10º ano.

Trabalhos como o de Xavier (2009), o qual estudou a variabilidade da massa específica básica de *Pinus taeda* L. em diferentes idades de plantio, encontrou densidade de 0,3842 g/cm<sup>3</sup> para 16 anos de idade. Ampessan (2015) trabalhando com a qualidade da madeira de *Pinus taeda* L., de 14, 16 e 19 anos de idade, encontrou valores de 0,3662 g/cm<sup>3</sup> e 0,3833 g/cm<sup>3</sup> para as idades de 14 e 16 anos, respectivamente.

A densidade básica da madeira é uma das propriedades da madeira mais importantes, pois é a que melhor expressa sua qualidade para fins tecnológicos e industriais, atribuindo o uso mais adequado para a mesma. Sendo assim, estudos referentes à variação desta propriedade tanto no eixo longitudinal como no eixo radial da árvore, são de extrema importância para conhecimento do material de estudo.

A variação da densidade básica longitudinalmente, pode ser observada na Tabela 11, onde as posições base e DAP, destacaram-se por apresentar as maiores densidades básicas, 0,4196 g/cm<sup>3</sup> e 0,4107 g/cm<sup>3</sup>, respectivamente, diferindo-se estatisticamente das posições 33% e 66% da altura comercial, com as menores densidades.

**Tabela 11** - Densidade básica nas diferentes alturas da árvore para as duas idades avaliadas.

<b>Alturas</b>	<b>Densidade Básica (g/cm<sup>3</sup>)</b>
<b>0 (0%)</b>	0,4196 a
<b>1 (DAP)</b>	0,4107 b
<b>3 (33%)</b>	0,3561 c
<b>6 (66%)</b>	0,3559 c
<b>Média</b>	<b>0,3912</b>
<b>CV (%)</b>	<b>15,27</b>

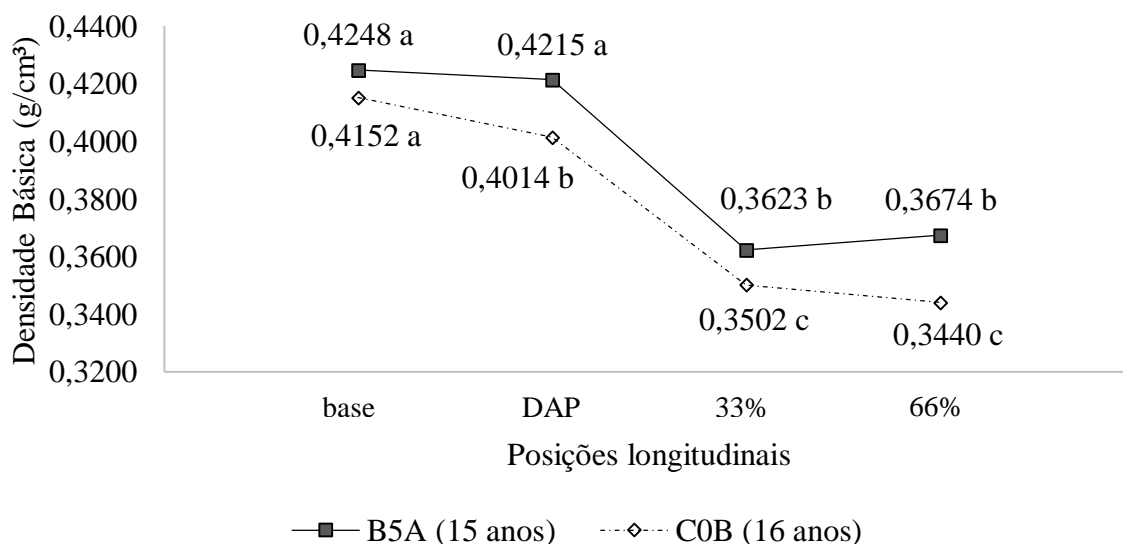
\*Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo Teste de Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade.

À medida que a altura analisada no fuste aumenta, a densidade diminui, comportamento este já esperado, devido à idade do indivíduo. Isso porque, a maiores alturas há um menor número de anéis de crescimento, onde a presença de madeira adulta diminui gradativamente, restando apenas madeira juvenil, com menor densidade e menor quantidade de lenho tardio. Relação inversa é encontrada na madeira mais próxima da base, onde a densidade básica é

maior. Esta relação base-topo do presente estudo também foi encontrada em pesquisas desenvolvidos por Klock (2000), Hassegawa (2003), Ampessan (2015), Melo et al. (2013) e Melo (2015), para o gênero *Pinus*.

A Figura 11 apresenta a tendência encontrada para a densidade básica média ao longo do fuste, para todas as posições avaliadas (base, DAP, 33% e 66% da altura comercial), e para as duas idades estudadas. Diferença estatística significativa foi encontrada entre as posições, sendo que para a idade de 15 anos, esta diferença está entre base/DAP e 33%/66% da altura comercial. Já para a idade de 16 anos a diferença está entre base, DAP e 33%/66% da altura comercial.

**Figura 11** - Comportamento da densidade básica ( $\text{g/cm}^3$ ) no sentido longitudinal (base-topo), para as duas idades avaliadas.



Fonte: Elaborado pelo autora, 2017.

\*Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo Teste de Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade.

Em relação a variação radial, pode-se observar na Tabela 12 que a densidade básica foi maior na casca (posições radiais 1 e 5), e diminuiu gradativamente em direção a medula, neste caso as posições radiais 2 e 4 seriam as partes intermediárias dos discos analisados e o número 3 a medula.

**Tabela 12** - Densidade básica nas diferentes posições radiais do disco para as duas idades avaliadas.

<b>Posição Radial</b>	<b>Densidade Básica (g/cm<sup>3</sup>)</b>
<b>1 (casca)</b>	0,4460 a
<b>2 (intermediária)</b>	0,3658 b
<b>3 (medula)</b>	0,3531 c
<b>4 (intermediária)</b>	0,3655 b
<b>5 (casca)</b>	0,4466 a
<b>Média</b>	<b>0,3912</b>
<b>CV (%)</b>	<b>13,9</b>

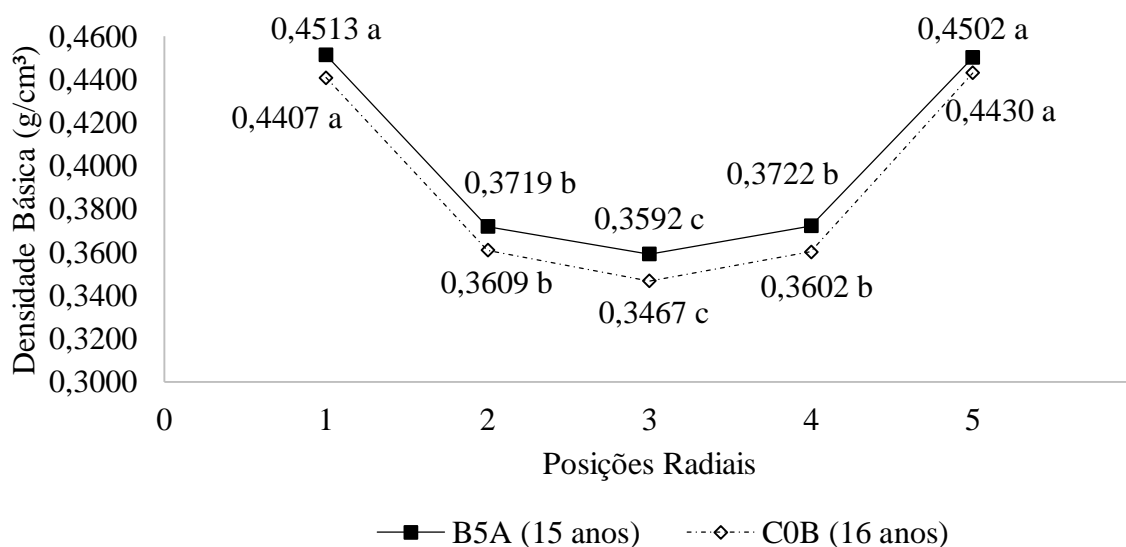
\*Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo Teste de Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade.

Este comportamento também já era esperado, uma vez que quanto mais próximo a medula há uma maior quantidade de lenho juvenil, o qual nas coníferas é caracterizado por apresentar uma massa específica inferior ao lenho adulto, pois apresenta uma menor porcentagem de lenho tardio, com traqueóides mais curtos, quantidades desproporcionais de lenho de compressão, grã distorcida e bolsas de resina. Em contra partida, o lenho adulto localizado próximo a casca, possui uma massa específica mais alta, devido os seus traqueóides mais longos, paredes celulares espessas, alta porcentagem de lenho tardio, baixa porcentagem de lenho de compressão, maior porcentagem de celulose e baixa porcentagem de nós (BENDTSEN, 1978).

A variação no sentido radial é a mais importante fonte de variação na madeira. A densidade da madeira aumenta rapidamente durante o seu período juvenil, diminui este ritmo em uma fase intermediária de crescimento, até tornar-se constante na fase madura da árvore. Estas três fases distintas estão presentes na maioria das árvores de rápido crescimento, caracterizando uma maior quantidade de lenho tardio presente no anel de crescimento, desenvolvimento do lenho adulto após o juvenil e do lenho de transição, sendo portanto, responsáveis pela variação na densidade encontrada no sentido medula-casca (MELO et al., 2013 e MELO, 2015).

A Figura 12 ilustra a tendência encontrada para a densidade básica média no sentido radial (casca-medula-casca), para as duas idades avaliadas. Para ambas as idades avaliadas, houve diferença estatística significativa entre as posições 1/5, 2/4 e 3.

**Figura 12** - Comportamento da densidade básica ( $\text{g/cm}^3$ ) no sentido radial (casca-medula-casca), para as duas idades avaliadas.



Fonte: Elaborado pelo autora, 2017.

\*Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo Teste de Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade.

Estes resultados estão de acordo com dados encontrados por Cown e Ball (2001), os quais estudaram o comportamento da densidade da madeira em 10 famílias de *Pinus radiata* em sete locais diferentes, considerando a influência da idade da árvore, do sítio e da genética dos mesmos.

Melo (2015), avaliando a variação da densidade básica radial em *Pinus taeda* L. em 4 diferentes idades, 8, 14, 18 e 26, também encontrou o mesmo comportamento, um aumento da densidade partindo da medula para a casca. Oliveira et al. (2006), ao verificar a influência da idade da floresta e a variabilidade radial de algumas das propriedades da madeira de *Pinus taeda* L., também observaram o mesmo comportamento para a densidade no sentido medula-casca.

Pesquisas com *Pinus elliottii* Engelm. em diferentes idades também deixam evidente o comportamento da densidade básica no sentido radial, onde a mesma aumenta do centro (medula) em direção à periferia (casca) (MELO et al., 2013).

A densidade correlaciona diretamente o rendimento em massa, as propriedades físicas da madeira e a umidade. A variação do teor de umidade da madeira nas direções radial e longitudinal no tronco das árvores é negativamente correlacionada com a sua densidade. Madeiras que apresentam maior densidade possuem menor volume de espaços vazios internos, conseqüentemente, há uma redução na quantidade de água livre ou de capilaridade encontrada nas mesmas.



### 5.3 UMIDADE

O teor de umidade tanto entre os talhões (Tabela 13) quanto, na análise da mesma nos sentidos longitudinal e radial (Tabelas 14 e 15), acompanha o comportamento da densidade básica, porém de forma inversamente proporcional. Ou seja, quanto maior a umidade, menor a densidade, evidenciando a correlação entre estas duas variáveis.

**Tabela 13** - Umidade nos diferentes talhões.

<b>Talhões</b>	<b>Umidade (%)</b>
<b>B5A – 15 anos</b>	62,05 a
<b>C0B – 16 anos</b>	62,87 b
<b>Média</b>	<b>62,49</b>
<b>CV (%)</b>	<b>8,42</b>

\*Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo Teste de Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade.

**Tabela 14** - Umidade nas diferentes alturas da árvore para as duas idades avaliadas.

<b>Alturas</b>	<b>Umidade (%)</b>
<b>0 (0%)</b>	59,74 a
<b>1 (DAP)</b>	60,50 b
<b>3 (33%)</b>	65,86 c
<b>6 (66%)</b>	66,09 c
<b>Média</b>	<b>62,49</b>
<b>CV (%)</b>	<b>8,42</b>

\*Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo Teste de Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade.

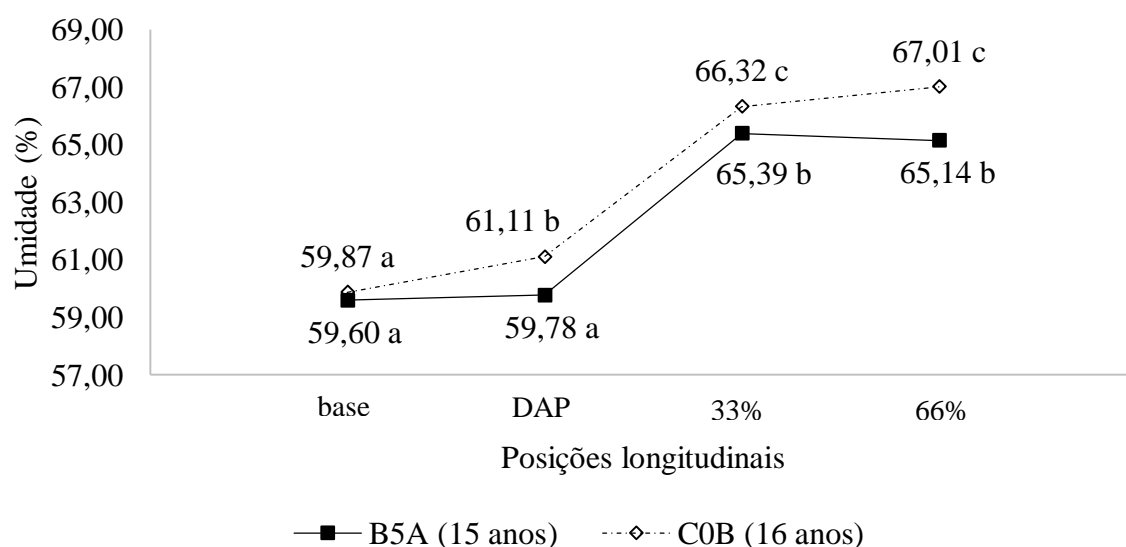
**Tabela 15** - Umidade nas diferentes posições radiais do disco para as duas idades avaliadas.

<b>Posição Radial</b>	<b>Umidade (%)</b>
<b>1 (casca)</b>	57,80 a
<b>2 (intermediária)</b>	64,67 b
<b>3 (medula)</b>	65,80 c
<b>4 (intermediária)</b>	64,62 b
<b>5 (casca)</b>	57,77 a
<b>Média</b>	<b>62,49</b>
<b>CV (%)</b>	<b>8,03</b>

\*Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo Teste de Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade.

As Figuras 13 e 14, ilustram o comportamento da umidade nos dois diferentes eixos da madeira, longitudinal e radial. Foi possível observar que há um aumento de 5,54% do teor de umidade, no sentido base-topo, para a idade de 15 anos e de 7,14% para o talhão de 16 anos. Diferença estatística significativa pode ser observada entre as posições longitudinais, sendo que para a idade de 15 anos as posições base/DAP diferem das posições 33%/66% da altura comercial; já para a idade de 16 anos esta diferença encontra-se entre base, DAP e 33%/66% da altura comercial. Da região interna do lenho para a externa, a redução do teor de umidade chega à uma média entre os dois raios de 7,84% do teor de umidade para a idade de 15 anos e de 8,22% para o talhão de 16 anos. Para ambas as idades avaliadas, houve diferença estatística significativa entre as posições 1/5, 2/4 e 3.

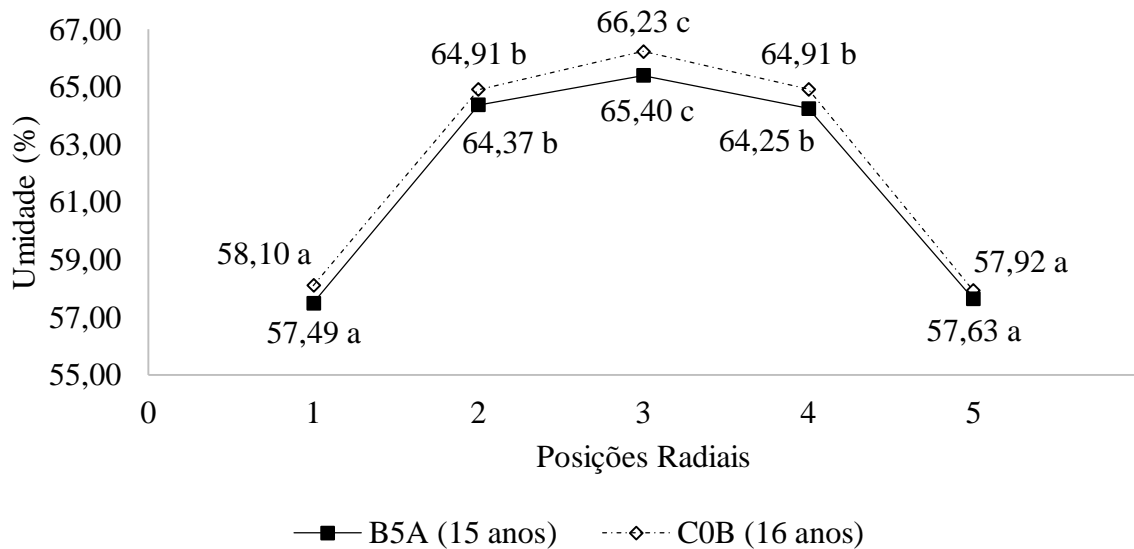
**Figura 13** - Comportamento do teor de umidade (%) no sentido longitudinal (base-topo), para as duas idades avaliadas.



Fonte: Elaborado pelo autora, 2017.

\*Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo Teste de Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade.

**Figura 14** - Comportamento do teor de umidade no sentido radial (casca-medula-casca), para as duas idades avaliadas.

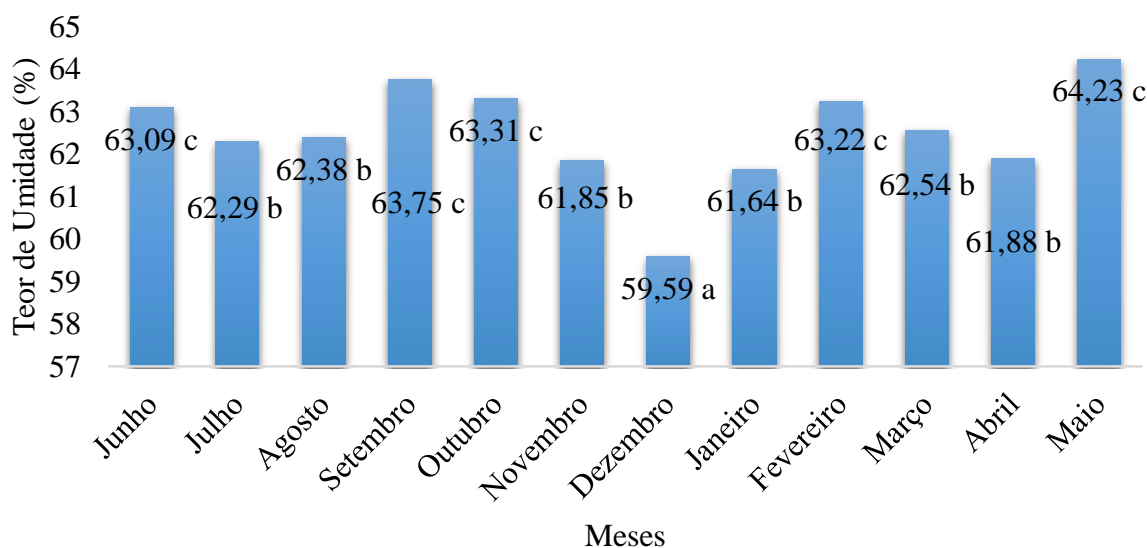


Fonte: Elaborado pelo autora, 2017.

\*Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo Teste de Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade.

Os teores de umidade mais elevados são encontrados mais próximos do topo, e mais próximos da medula da árvore, nestes locais há uma maior porcentagem de lenho inicial, o qual é composto por células de parede celular delgada, e conseqüentemente, dispõem de maiores lúmens, permitindo que uma maior quantidade de água capilar possa ser armazenada nestes espaços. Em contrapartida, quanto mais próximo da base da árvore, e da casca, há uma maior porcentagem de lenho tardio, o qual é caracterizado por células de parede espessa, que reduzem o percentual de umidade, uma vez que os seus lúmens são menores.

Já a Figura 15 e a Tabela 16 analisam a umidade nas diferentes estações e meses do ano. A primavera foi a única estação a apresentar diferença estatística significativa, porém, esta diferença não excede 1,5% entre as estações do ano. Para os meses do ano, os valores não seguiram um padrão de comportamento, mas também não apresentaram grande diferença entre si, sendo esta de 4,64% entre os meses de maior e menor umidade. Desta maneira, não houve necessidade de analisar a umidade de forma estratificada.

**Figura 15** - Umidade nos diferentes meses do ano.

Fonte: Elaborado pelo autora, 2017.

\*Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo Teste de Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade.

**Tabela 16** - Umidade nas diferentes estações do ano.

Estação do Ano	Umidade (%)
<b>OUTONO</b>	63,07 b
<b>INVERNO</b>	62,85 b
<b>PRIMAVERA</b>	61,57 a
<b>VERÃO</b>	62,46 b
<b>Média</b>	<b>62,49</b>
<b>CV (%)</b>	<b>8,42</b>

\*Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo Teste de Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade.

## 5.4 MODELAGEM ESTATÍSTICA

### 5.4.1 Modelos da Literatura

As estimativas dos coeficientes de regressão, do coeficiente de determinação ( $R^2_{aj}$ ) e do erro padrão da estimativa ( $S_{yx}$ ), são apresentados nas Tabelas 17, 18, 19, 20 e 21, para todos os dados e para as alturas analisadas (base, DAP, 33% e 66% da altura comercial).

Os modelos que apresentaram os melhores ajustes, para todas as análises, foram aqueles que contam com a variável umidade presente de forma isolada, ou seja, se a umidade está presente apenas em alguma conformação de variável, por exemplo, velocidade\*umidade, a mesma não consegue explicar o comportamento da densidade básica tão bem quanto quando a

mesma aparece isolada. Da mesma maneira, os menores erros encontrados, são para estas equações, onde a variável umidade encontra-se presente de forma isolada.

**Tabela 17** - Estimativas dos coeficientes de regressão e medidas dos modelos estatísticos para estimar a densidade básica da madeira para todos os dados.

Modelo	Modelos ajustados para todos os dados						R <sup>2</sup> aj	Syx (%)
	Coeficientes de Regressão							
	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_4$	$\beta_5$		
1	1,5924	-0,1359	-	-	-	-	0,0719	5,8
2	0,4409	-3,96E-10	-	-	-	-	0,0647	5,9
3	1,5565	-2,35E-07	3,75E-09	-0,0186	-	-	0,9060	1,9
4	5,5110	-0,0055	1,67E-06	8,35E-05	-2,52E-08	-0,0786	0,9064	1,9
5	0,9871	-3,59E-07	7,49E-09	-8,04E-08	-9,51E-05	-	0,9106	1,8
6	6,5145	-0,0154	-1,77604	-	-	-	0,8942	2,0
7	-0,5250	0,0572	-	-	-	-	-0,0108	6,1
8	0,9941	-0,0008	2,85E-07	-	-	-	-0,0099	6,2
9	-0,5250	-0,0572	-	-	-	-	-0,0108	6,1
10	6,5145	0,0000	-0,0077	0,0000	-0,8880	-	0,8653	2,0
11	-25,2495	2,9358	4251,2339	-	-	-	-0,0089	6,0
12	-0,5250	-0,0286	-	-	-	-	-0,0108	6,1
13	1,0827	-0,0111	-	-	-	-	-0,0113	6,2
14	-1,0023	88,2898	-	-	-	-	-0,0101	6,1
15	-0,0627	19,7739	-0,0002	-	-	-	0,9011	1,9
16	0,0368	-0,0118	-0,0002	-	-	-	0,9010	1,9
17	0,5784	-9,60E-07	2,07E-08	-2,45E-07	-0,0002	-	0,9096	1,8

Nota: R<sup>2</sup>aj = coeficiente de determinação ajustado; Syx (%) = erro padrão da estimativa.

**Tabela 18** - Estimativas dos coeficientes de regressão e medidas dos modelos estatísticos para estimar a densidade básica da madeira para os dados da base (Continua).

Modelo	Modelos ajustados para os dados da Base						R <sup>2</sup> aj	Syx (%)
	Coeficientes de Regressão							
	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_4$	$\beta_5$		
1	0,4402	-0,07034	-	-	-	-	0,0140	7,0
2	0,4458	-2,08E-10	-	-	-	-	0,0055	7,1
3	1,5223	-2,16E-07	3,68E-09	-0,0186	-	-	0,8921	2,3
4	2,6096	-0,0015	3,17E-07	2,52E-05	-5,10E-09	-0,0365	0,8898	2,4
5	0,9585	-2,55E-07	5,10E-09	-3,65E-08	-0,0001	-	0,8953	2,3
6	5,6735	0,0056	-1,6100	-	-	-	0,8722	2,6
7	-1,2601	-0,0538	-	-	-	-	-0,0103	7,1
8	1,0013	-0,0008	3,01E-07	-	-	-	0,0433	7,0
9	-1,2601	0,0538	-	-	-	-	-0,0103	7,1

**Tabela 18** - Estimativas dos coeficientes de regressão e medidas dos modelos estatísticos para estimar a densidade básica da madeira para os dados da base (Conclusão).

<b>Modelos ajustados para os dados da Base</b>								
<b>Modelo</b>	<b>Coefficientes de Regressão</b>						<b>R<sup>2</sup>aj</b>	<b>Syx (%)</b>
	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_4$	$\beta_5$		
<b>10</b>	5,6735	0,0000	0,0028	0,0000	-0,8050	-	0,8432	2,6
<b>11</b>	-21,4370	2,5034	3391,0299	-	-	-	0,0407	6,8
<b>12</b>	-1,2601	0,0269	-	-	-	-	-0,0103	7,1
<b>13</b>	0,3936	1,87E-05	-	-	-	-	-0,0087	7,2
<b>14</b>	-0,8356	-47,7492	-	-	-	-	-0,0126	7,1
<b>15</b>	-0,0592	-0,8073	-0,0002	-	-	-	0,8839	2,4
<b>16</b>	-0,0785	0,0026	-0,0002	-	-	-	0,8839	2,4
<b>17</b>	0,4899	-6,71E-07	1,31E-08	-8,16E-08	-0,0003	-	0,8960	2,3

Nota: R<sup>2</sup>aj = coeficiente de determinação ajustado; Syx (%) = erro padrão da estimativa.

**Tabela 19** - Estimativas dos coeficientes de regressão e medidas dos modelos estatísticos para estimar a densidade básica da madeira para os dados do DAP.

<b>Modelos ajustados para os dados do DAP</b>								
<b>Modelo</b>	<b>Coefficientes de Regressão</b>						<b>R<sup>2</sup>aj</b>	<b>Syx (%)</b>
	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_4$	$\beta_5$		
<b>1</b>	0,8331	-0,0930	-	-	-	-	0,0298	7,2
<b>2</b>	0,4550	-3,81E-10	-	-	-	-	0,0390	7,2
<b>3</b>	1,3219	-1,17E-07	1,98E-09	-0,0152	-	-	0,8836	2,5
<b>4</b>	-4,7028	0,0089	-3,39E-06	-0,0002	5,52E-08	0,0831	0,8878	2,5
<b>5</b>	0,8670	-8,28E-08	7,75E-10	2,91E-08	-0,0002	-	0,8815	2,5
<b>6</b>	5,7884	0,0167	-1,6582	-	-	-	0,8815	2,5
<b>7</b>	-1,0926	-0,0277	-	-	-	-	-0,0134	7,3
<b>8</b>	0,2921	0,0002	-5,83E-08	-	-	-	-0,0262	7,5
<b>9</b>	-1,0926	0,0277	-	-	-	-	-0,0134	7,3
<b>10</b>	5,7884	0,0000	0,0084	0,0000	-0,8291	-	0,8525	2,5
<b>11</b>	-2,4088	0,1885	210,9154	-	-	-	-0,0279	7,3
<b>12</b>	-1,0926	0,0139	-	-	-	-	-0,0134	7,3
<b>13</b>	0,3958	1,09E-05	-	-	-	-	-0,0128	7,4
<b>14</b>	-0,8668	-35,2955	-	-	-	-	-0,0134	7,3
<b>15</b>	-0,0373	-36,6085	-0,0002	-	-	-	0,8864	2,5
<b>16</b>	-0,2685	0,0283	-0,0002	-	-	-	0,8864	2,5
<b>17</b>	0,2801	-2,83E-07	3,70E-09	4,85E-08	-0,0004	-	0,8862	2,4

Nota: R<sup>2</sup>aj = coeficiente de determinação ajustado; Syx (%) = erro padrão da estimativa.

**Tabela 20** - Estimativas dos coeficientes de regressão e medidas dos modelos estatísticos para estimar a densidade básica da madeira para os dados à 33% da altura.

<b>Modelos ajustados para os dados à 33% de altura</b>								
<b>Modelo</b>	<b>Coefficientes de Regressão</b>						<b>R<sup>2</sup>aj</b>	<b>Syx (%)</b>
	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_4$	$\beta_5$		
1	0,4418	-0,0792	-	-	-	-	0,0284	6,2
2	0,3818	-2,0E-10	-	-	-	-	0,0234	6,3
3	0,9859	4,29E-08	-6,83E-10	-0,0095	-	-	0,9190	1,8
4	2,9981	-0,0028	9,99E-07	3,91E-05	-1,41E-08	-0,0378	0,9212	1,8
5	0,6858	-5,18E-08	1,96E-09	-5,19E-08	-3,86E-05	-	0,9217	1,8
6	7,6825	-0,0297	-2,0307	-	-	-	0,9182	1,8
7	-0,8539	0,0249	-	-	-	-	-0,0135	6,3
8	0,5432	-0,0003	9,06E-08	-	-	-	-0,0237	6,5
9	-0,8539	-0,0249	-	-	-	-	-0,0135	6,3
10	7,6825	0,0000	-0,0148	0,0000	-1,0153	-	0,8888	1,8
11	-6,3888	0,6467	934,5226	-	-	-	-0,0261	6,3
12	-0,8539	-0,0124	-	-	-	-	-0,0135	6,3
13	0,3636	-5,11E-06	-	-	-	-	-0,0138	6,4
14	-1,0607	37,3218	-	-	-	-	-0,0133	6,3
15	-0,0546	42,7450	-0,0002	-	-	-	0,9230	1,8
16	7,6825	-0,0297	-1,0153	-	-	-	0,9182	1,8
17	-0,0439	-2,14E-07	6,78E-09	-1,56E-07	-0,0001	-	0,9244	1,7

Nota: R<sup>2</sup>aj = coeficiente de determinação ajustado; Syx (%) = erro padrão da estimativa.

**Tabela 21** - Estimativas dos coeficientes de regressão e medidas dos modelos estatísticos para estimar a densidade básica da madeira para os dados à 66% da altura (Continua).

<b>Modelos ajustados para os dados à 66% de altura</b>								
<b>Modelo</b>	<b>Coefficientes de Regressão</b>						<b>R<sup>2</sup>aj</b>	<b>Syx (%)</b>
	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_4$	$\beta_5$		
1	1,0563	-0,1117	-	-	-	-	0,0984	6,3
2	0,3895	-2,42E-10	-	-	-	-	0,0894	6,4
3	1,1760	-3,98E-08	5,74E-10	-0,0124	-	-	0,9639	1,3
4	1,5318	-0,0006	1,68E-07	6,43E-06	-1,95E-09	-0,0163	0,9649	1,3
5	0,7439	-5,46E-08	1,36E-09	-2,61E-08	-6,81E-05	-	0,9667	1,2
6	7,8692	-0,0266	-2,0790	-	-	-	0,9561	1,4
7	-0,0922	0,1299	-	-	-	-	0,0211	6,6
8	0,4133	-4,92E-05	6,30E-09	-	-	-	0,0067	6,7
9	-0,0922	-0,1299	-	-	-	-	0,0211	6,6
10	7,8692	0,0000	-0,0133	0,0000	-1,0395	-	0,9271	1,4
11	-0,4634	-0,0853	67,1127	-	-	-	0,0069	6,6
12	-0,0922	-0,0649	-	-	-	-	0,0211	6,6
13	0,3986	-2,99E-05	-	-	-	-	0,0208	6,7
14	-1,1727	194,9498	-	-	-	-	0,0211	6,6

**Tabela 21** - Estimativas dos coeficientes de regressão e medidas dos modelos estatísticos para estimar a densidade básica da madeira para os dados à 66% da altura (Conclusão).

Modelos ajustados para os dados à 66% de altura								
Modelo	Coeficientes de Regressão						R <sup>2</sup> aj	Syx (%)
	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_4$	$\beta_5$		
<b>15</b>	-0,0205	39,6522	-0,0002	-	-	-	0,9635	1,3
<b>16</b>	0,1862	-0,0246	-0,0002	-	-	-	0,9633	1,3
<b>17</b>	0,0449	-1,54E-07	4,17E-09	-8,89E-08	-0,0002	-	0,9652	1,2

Nota: R<sup>2</sup>aj = coeficiente de determinação ajustado; Syx (%) = erro padrão da estimativa.

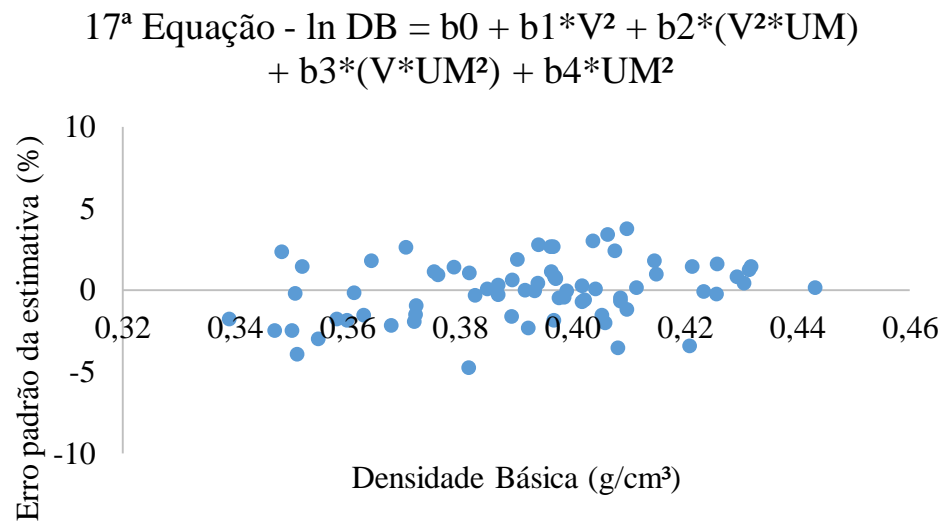
Avaliando as medidas de acurácia dos modelos de regressão testados, não identifica-se uma melhora no desempenho dos mesmos quando os dados são tratados separadamente ou em conjunto. O que enfatiza o pequeno grau de variabilidade dentro das amostras.

Foram escolhidos os três melhores modelos dentro de cada cenário analisado, partindo do coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>aj) mais alto e do menor erro padrão da estimativa (Syx) encontrados. Sendo assim, as melhores equações, para o conjunto de dados analisado de forma única, foram 4, 5 e 17; para os dados da base, 3, 5 e 17; para os dados do DAP, 4, 15 e 17; para os dados a 33% da altura comercial, 5, 15 e 17; e para os dados a 66% da altura comercial, 4, 5 e 17. Para todas as análises, com exceção da altura à 66%, os melhores parâmetros encontrados foram para a modelo 17 ( $\ln DB = b_0 + b_1*V^2 + b_2*(V^2*UM) + b_3*(V*UM^2) + b_4*UM^2$ ), porém, para 66% da altura comercial, o melhor modelo foi o 5, apresentando os melhores coeficientes quando comparado com os demais conjuntos de dados analisados.

Os gráficos apresentados a seguir demonstram a distribuição do erro padrão da estimativa em função da densidade básica da madeira, para os melhores modelos observados para cada conjunto de dados (Figuras 16, 17, 18, 19 e 20). Observa-se que o melhor desempenho foi da equação 5, para o conjunto de dados à 66% da altura comercial, no entanto, a variação para os demais não ocorre de forma significativa, classificando todos como uma boa distribuição.

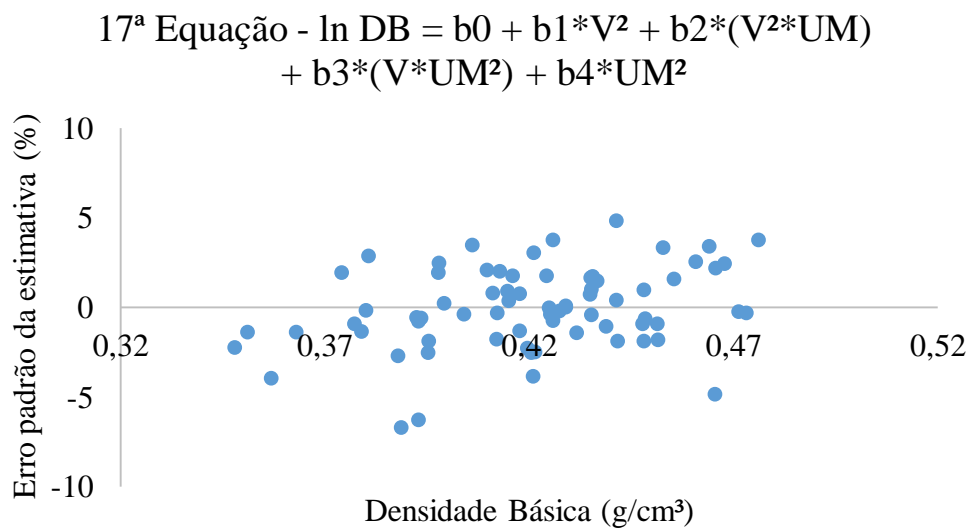


**Figura 16** - Distribuição do erro padrão da estimativa da variável densidade básica estimada, para o conjunto de todos os dados.



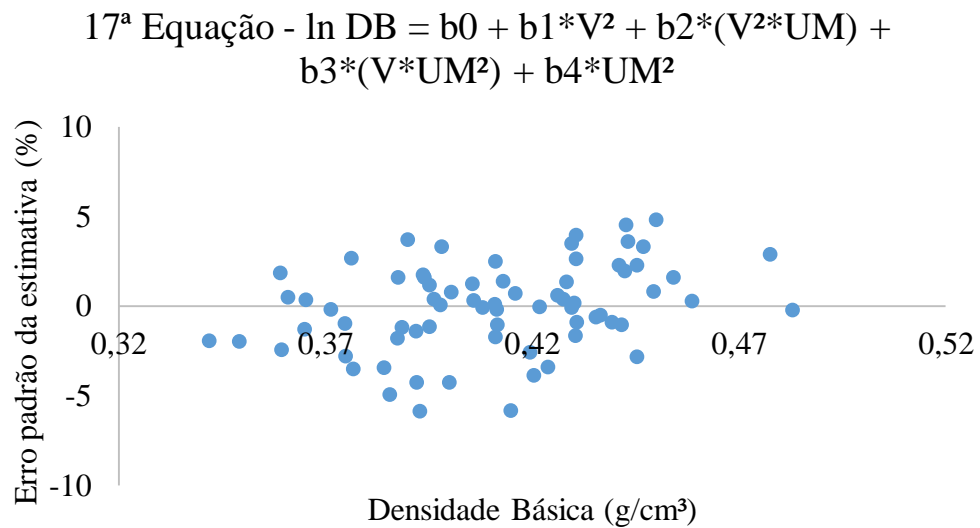
Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

**Figura 17** - Distribuição do erro padrão da estimativa da variável densidade básica estimada, para os dados da base.



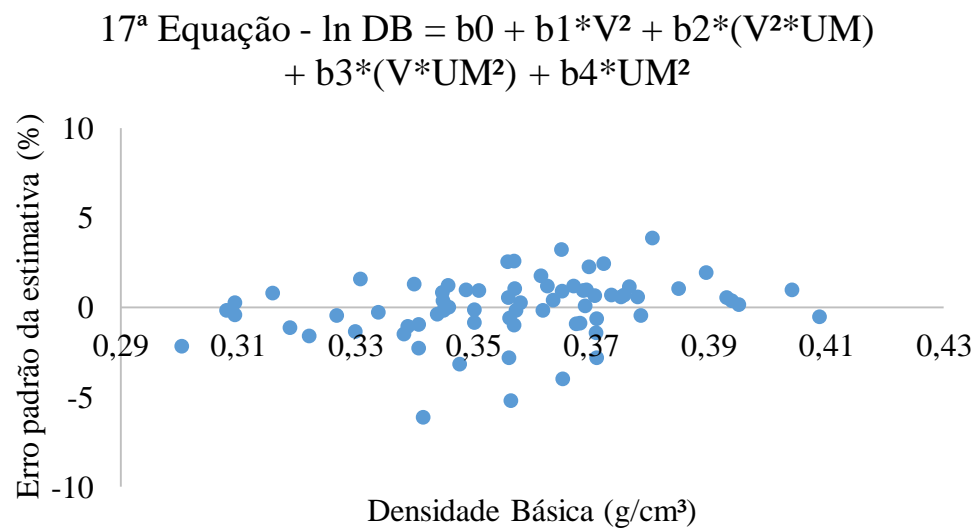
Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

**Figura 18** - Distribuição do erro padrão da estimativa da variável densidade básica estimada, para os dados do DAP.



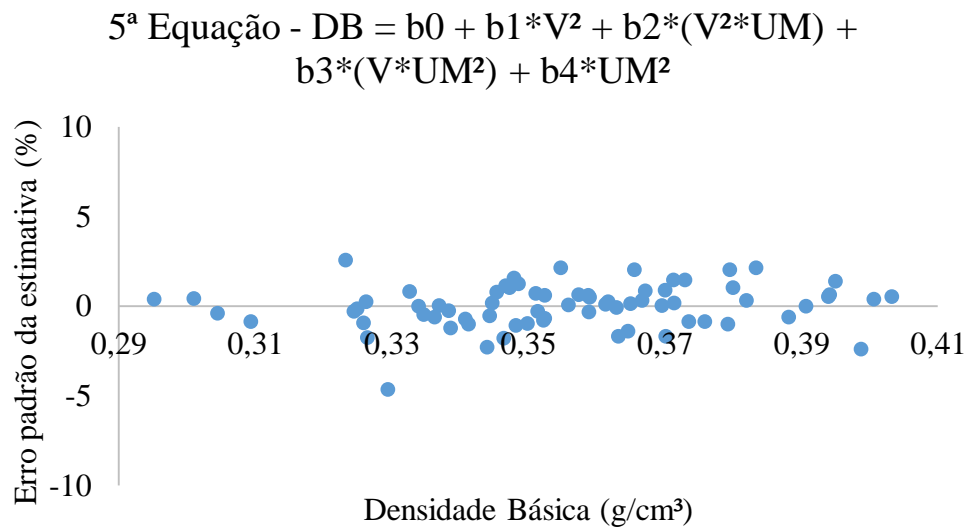
Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

**Figura 19** - Distribuição do erro padrão da estimativa da variável densidade básica estimada, para os dados a 33% da altura comercial.



Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

**Figura 20** - Distribuição do erro padrão da estimativa da variável densidade básica estimada, para os dados a 66% da altura comercial.



Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

#### 5.4.2 Stepwise

Para o método *Stepwise*, duas técnicas foram empregados, *Forward Selection* e *Backward Selection*, ambos já descritos neste trabalho. Os dois métodos foram testados para todos os conjuntos de dados analisados, sendo a melhor equação para cada cenário apresentada nas Tabelas 22 e 23, juntamente com o seu coeficiente de determinação ( $R^2_{aj}$ ), parâmetro que auxiliou a escolha do melhor modelo.

**Tabela 22** - Equação gerada para cada conjunto de dados avaliados a partir do método *Stepwise* - *Forward Selection*.

Dados	<i>Forward Selection</i> Equação	$R^2_{aj}$
<b>Dados Gerais</b>	$DB = 0,631231 - 9,20066E-7*UM^3 - 8,00281E-7*DAP^3$	91,87
<b>Base</b>	$DB = 0,65783 - 0,00000102828*UM^3 (\%) - 3,73909E-8*DAP^4$	90,13
<b>DAP</b>	$DB = 1,12667 - 0,00199389*DAP - 0,0109758*UM$	88,97
<b>33%</b>	$DB = 0,717947 - 0,0000831893*UM^2$	94,57
<b>66%</b>	$DB = 0,607377 - 8,33894E-7*UM^3 (\%) - 2,69178E-7*V*DAP$	97,29

Nota: DB = densidade básica (g/cm<sup>3</sup>); UM = umidade (%); DAP = diâmetro à altura do peito (1,30 m); V = velocidade da onda mecânica (m/s);  $R^2_{aj}$  = coeficiente de determinação (%).

**Tabela 23** - Equação gerada para cada conjunto de dados avaliados a partir do método *Stepwise - Backward Selection*.

<i>Backward Selection</i>		
Dados	Equação	R <sup>2</sup> aj
<b>Dados Gerais</b>	DB = 1,13785 - 0,0111552*UM - 0,00189255*DAP	92,21
<b>Base</b>	DB = 0,729236 - 0,00987124*DAP - 4,40633E-8*V <sup>2</sup> - 0,0000931511*UM <sup>2</sup> + 8,11359*DAP/V - 0,0000238891*h <sup>3</sup> + 0,0000141029*V*h	91,24
<b>DAP</b>	DB = 1,09367 - 0,0000498553*DAP*h - 0,0109447*UM	88,86
<b>33%</b>	DB = -1,52683 + 0,00462096*V - 0,029062*DAP - 0,00000294058*V <sup>2</sup> + 6,32385E-10*V <sup>3</sup> - 0,0687797*Raiz (UM) + 38,3233*DAP/V + 0,0000235701*V*h - 0,000460411*U*h	94,16
<b>66%</b>	DB = -576,745 - 0,00528105*h - 1,68978*DAP - 0,244666*UM <sup>2</sup> + 0,00291885*UM <sup>3</sup> + 122,548*Raiz (UM) - 0,0000116538*UM <sup>4</sup> + 0,00016462*DAP <sup>3</sup> + 13,7654*Raiz (DAP) + 5,61714*DAP/V + 0,00000367535*V*h	97,23

Nota: DB = densidade básica (g/cm<sup>3</sup>); UM = umidade (%); DAP = diâmetro à altura do peito (1,30 m); V = velocidade da onda mecânica (m/s); h = altura da árvore (m); R<sup>2</sup>aj = coeficiente de determinação (%).

Todas as equações ajustadas, para ambos os métodos, apresentaram a variável umidade presente de forma isolada, o que vem reforçar o comportamento das variáveis encontrado nos modelos da literatura testados.

A velocidade mais uma vez, sozinha não consegue explicar a densidade básica da madeira. Com exceção do método *Backward Selection* para a altura de 33%, a mesma não apareceu de forma isolada em nenhum outro modelo ajustado.

É possível observar tanto nos modelos da literatura testados, quanto nos modelos definidos a partir do método *Stepwise*, que o coeficiente de determinação ajustado (R<sup>2</sup>aj) é mais alto nas posições mais elevadas da árvore, comportamento este que pode ser explicado pela menor variação da densidade básica e do teor de umidade no sentido radial nestas posições, contribuindo para um melhor R<sup>2</sup>aj.

## 5.5 PERFIL DA VELOCIDADE DE ONDA MECÂNICA

A velocidade de onda mecânica não conseguiu explicar o comportamento da densidade básica da madeira em árvores em pé. Além dos baixos coeficientes de Pearson encontrados, à medida que a densidade básica diminui, a velocidade aumenta, comportamento este observado

tanto para o eixo longitudinal, quanto para o eixo radial. Castro (2011), também encontrou o mesmo comportamento em estudo realizado com *Pinus caribaea* var. *hondurensis* e *Tectona grandis*, onde a densidade básica das espécies aumentaram da medula em direção à casca, e a velocidade de onda diminuiu, da mesma maneira que o teor de umidade, que também foi menor quando mais próximo da casca.

Outros estudos encontraram uma relação positiva significativa entre a densidade da madeira e velocidade de onda mecânica (AMODEI, 2011; LIN et al., 2011), diferindo dos resultados aqui observados. Ou ainda, uma relação inversa entre teor de umidade e velocidade da onda mecânica, como no trabalho de Rollo (2009a), o qual avaliou a correlação entre a velocidade de onda mecânica e a densidade básica de dez espécies nativas de madeira.

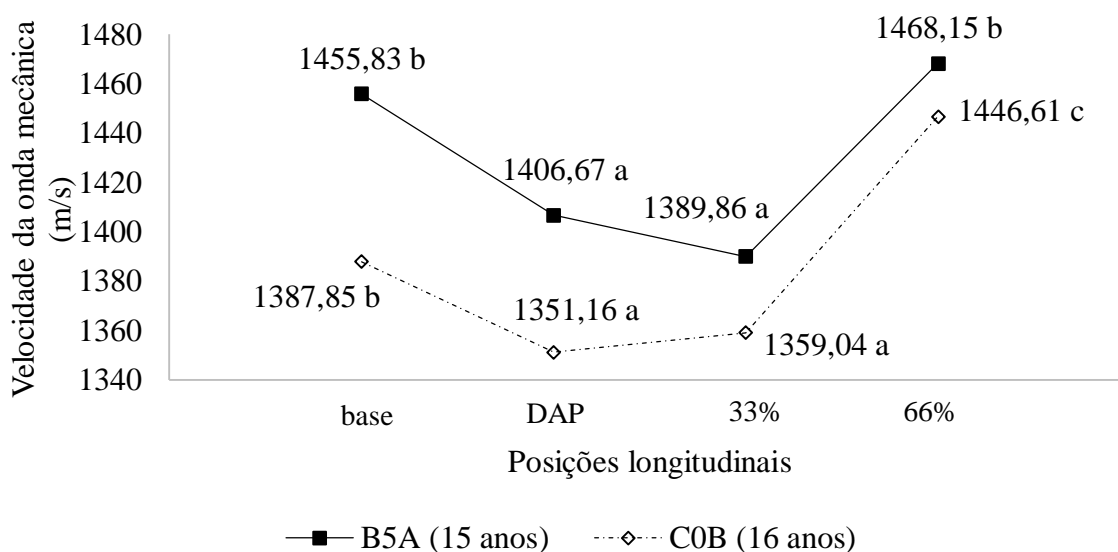
Vários estudos encontraram correlação entre a velocidade de onda mecânica e a densidade aparente da madeira, como Oliveira; Sales (2006) e Rollo et al. (2014), porém, a densidade aparente elimina o efeito da umidade, principalmente abaixo do ponto de saturação das fibras. A variável umidade apresenta grande influência tanto na densidade básica como na velocidade de onda mecânica.

A velocidade de onda mecânica em árvores vivas não deve levar em consideração apenas a densidade da madeira, outros fatores como módulo de elasticidade, teor de umidade, características anatômicas, tipo da grã e tamanho da amostra, também influenciam na forma de propagação das ondas e devem ser considerados (CALEGARI et al., 2008).

A Figura 21 apresenta a tendência encontrada para a velocidade de onda mecânica média ao longo do fuste, para todas as posições avaliadas (base, DAP, 33% e 66% da altura comercial), e para as duas idades estudadas. Diferença estatística significativa é encontrada entre as posições, sendo que para a idade de 15 anos, esta diferença está entre DAP/33% da altura comercial e base/66% da altura comercial. Já para a idade de 16 anos a diferença está entre base, DAP/33% da altura comercial e 66% da altura comercial.

A Figura 22 ilustra a tendência encontrada para a velocidade de onda mecânica média no sentido radial (casca-medula-casca), para as duas idades avaliadas. Para ambas as idades avaliadas, houve diferença estatística significativa entre as posições 1/5, 2/4 e 3.

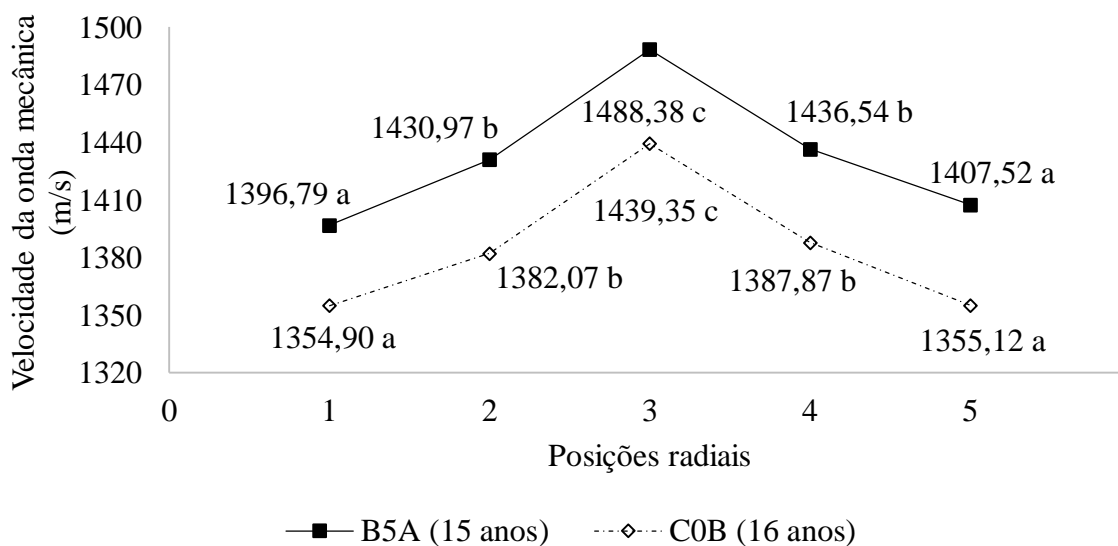
**Figura 21** - Comportamento da velocidade de onda mecânica (m/s) no sentido longitudinal (base-topo), para as duas idades avaliadas.



Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

\*Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo Teste de Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade.

**Figura 22** - Comportamento da velocidade de onda mecânica (m/s) no sentido radial (casca-medula-casca), para as duas idades avaliadas.



Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

\*Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo Teste de Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade.

## 6 CONCLUSÃO

As posições longitudinais e radiais influenciam nos valores da velocidade da onda mecânica na madeira de *Pinus taeda* L. A velocidade da onda mecânica é maior na base e no topo, decrescendo à medida que a mesma direciona-se ao centro da árvore. O inverso acontece no sentido radial, onde quanto mais próximo da medula maior a velocidade da onda mecânica.

A variável com maior correlação com a densidade básica foi a umidade, apresentando um alto coeficiente de determinação, ficando este entre -0,9408 e -0,9819 entre todos os conjuntos de dados analisados, caracterizando uma correlação fortemente negativa.

Para as condições deste povoamento, a variável velocidade da onda mecânica não consegue explicar a densidade básica da madeira. E ao contrário do que alguns estudos afirmam, a velocidade da onda mecânica tem relação inversa com a densidade básica da madeira, ou seja, à medida que a densidade básica diminui a velocidade da onda mecânica aumenta.

Os modelos estatísticos obtidos da literatura evidenciaram os fatos apresentados acima, onde a variável umidade quando presente de maneira isolada, consegue obter um melhor ajuste das equações, e em contrapartida, modelos que contam apenas com a variável velocidade da onda mecânica, não apresentaram bons ajustes.

O método *Stepwise* ajudou a comprovar o comportamento das variáveis, onde a umidade esteve presente em todas as equações geradas, e a velocidade quando presente, encontrava-se associada à outra variável.





## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para que fosse possível realizar a leitura tomográfica, uma distância mínima de 10,5 cm entre os sensores do tomógrafo de impulso foi levada em consideração. Este fato foi descoberto ao longo da prática deste estudo, sendo apresentado como um fator limitante a aplicação do aparelho. Bem como, a necessidade de desenvolvimento de um software, capaz de reconstruir a imagem tomográfica gerada pelo aparelho através da sua matriz de velocidades.

Foi comprovado, nesta pesquisa, que não é viável a aplicação do tomógrafo de impulso para determinação da densidade básica da madeira em árvores em pé. Assim, se sugere novos estudos relacionando a umidade da madeira com a variável de interesse para a determinação da densidade básica da madeira de forma rápida e não destrutiva.

Neste sentido, se recomenda o estudo da viabilidade técnica da aplicação de equipamentos de medição de umidade nos fustes das árvores em campo para a determinação da densidade básica por meio de equações de ajuste.

Isso porque, os dados obtidos com esta pesquisa deixaram evidente a forte correlação existente entre o teor de umidade da madeira e a densidade básica, fortalecendo a hipótese de que é viável a aplicação de medidores de umidade como uma alternativa para a determinação indireta da densidade básica da madeira.



## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBERS, J. S.; POKORNY, J. D.; JOHNSON, G. R. How to detect and assess hazardous defects in trees. In: POKORNY, J.D. (Coord.). **Urban tree risk management: a community guide to program design and implementation**. St. Paul: USDA, Forest Service, Northeastern Area, State and Private Forestry, 2003. chap. 3, p. 41-116.
- ALEXANDER, A. M. **Accuracy of predicting in situ compressive strength of deteriorated concrete seawall by NDT methods**. In: Proc. Nondestructive Evaluation of Civil Structures and Materials. Boulder, CO: University of Colorado, p. 68-82, 1992.
- AMODEI, J. B. **Avaliação da qualidade da madeira de *Tectona grandis* L.f. por meio de análises tomográfica, microdensitométrica e anatômica**. 2011. 50p. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais e Florestais) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2011.
- AMODEI, J. B. et al. Avaliação preliminar da qualidade da madeira de *Tectona grandis* L. f. através da tomografia de impulso. **Floresta e Ambiente**, v. 17, n. 2, p. 124-128, 2010.
- AMPESSAN, C. G. M. **Idade da madeira na qualidade da polpa e do papel**. 2015. 134p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal – Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages. 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Madeira – Determinação do teor de umidade de cavacos – Método por secagem em estufa**, NBR 14929. 2003. 17p.
- AXMON, J.; HANSSON, M.; SÖRNMO, L. Experimental study on the possibility of detecting internal decay in standing *Picea abies* by blind impact response analysis. **Forestry**, v. 77, n. 3, p. 179-192, 2004.
- BELINI, U. L. et al. Caracterização da estrutura anatômica, densidade básica e morfologia de cavacos da madeira de *Eucalyptus grandis* para a produção de painéis MDF. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 32, n. 4, p. 707-713, 2008.
- BENDTSEN, B. A. Properties of wood from improved and intensively managed trees. **For. Prod. J.** v. 28, n. 10, p. 61-72, 1978.
- BODIG, J. The process of NDE research for wood and wood composites. **The e-Journal of Nondestructive Testing**, v. 6, n. 3, 2001.

BRANCHERIAU, L. et al. Ultrasonic tomography of green wood using a non-parametric imaging algorithm with reflected waves. **Annals of Forest Science**, v. 65, n. 7, p. 712-712, 2008.

BRANCHERIAU, L. et al. Application of ultrasonic tomography to characterize the mechanical state of standing trees (*Picea abies*). **Journal of Physics: Conference Series**, v. 353, n. 1, 2012.

BRAZ, R. L. et al. Caracterização anatômica, física e química da madeira de clones de *Eucalyptus* cultivados em áreas sujeitas à ação de ventos. **Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)**, v. 5, n. 2, p. 127-137, 2014.

BRAZEE, N. J. et al. Non-destructive assessment of internal decay in three hardwood species of northeastern North America using sonic and electrical impedance tomography. **Forestry**, v. 84, n. 1, p. 33-39, 2010.

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

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

\_\_\_\_\_ **Nondestructive characterization and imaging of wood**. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, Germany, 2003.

\_\_\_\_\_ **Acoustics of wood**. 2.ed. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag; 2006. 394p.

BURGER, L. M.; RITCHER, H. G. **Anatomia da madeira**. São Paulo: Ed. Nobel, 1991. 154p.

CALEGARI, L. et al. Avaliação de alguns fatores influentes na velocidade ultra-sônica na madeira. **Floresta**, Curitiba, v. 38, n. 4, p. 607-615, 2008.

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

CARTER, P. et al. Acoustic testing to enhance western forest values and meet customer wood quality needs. **Productivity of western forests: A forest products focus**, USDA Forest Service, Pacific Northwest Research Station, Portland, p. 121–129, 2005.

CASTRO, V. R. **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.)**. 2011. 108p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

CASTRO, V. R. et al. Avaliação do perfil radial do lenho de árvores de teca (*Tectona grandis* L.f.) através da tomografia de impulso. **Floresta e Ambiente**, v. 18, n. 2, p. 144-152, 2011.

CHAGAS, M. P.; ROQUE, R. M.; TOMAZELLO FILHO, M. **Manual de aplicação densitometria de raios-X em amostras de madeira, Crad e Cerd**. 2005. 32f. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

CHIES, D. **Influência do espaçamento sobre a qualidade e o rendimento da madeira serrada de *Pinus taeda* L.** 2005. 123f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

COWN, D. J.; BALL, R. D. Wood densitometry of 10 *Pinus radiata* families at seven contrasting sites: influence of tree age, site and genotype. **New Zealand Journal of Forestry Science**, v. 31, n. 1, p. 88-100, 2001.

DACKERMANN, U. et al. In situ assessment of structural timber using stress-wave measurements. **Materials and Structures**, v. 47, n. 5, p. 787-803, 2014.

DIAS, F. M.; LAHR, F. A. R. Estimativa de propriedades de resistência e rigidez da madeira através da densidade aparente. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 65, p. 102-113, 2004.

DIKRALLAH, A. et al. Experimental analysis of acoustic anisotropy of green wood by using guided waves. Conference: **ESWM and COST Action E35 Meeting**, Florença, Itália, p. 149-154, 2006.

DIVOS, F.; TANAKA, T. Relation between static and dynamic modulus of elasticity of wood. **Acta Silv. Lign. Hung.**, v. 1, p. 105-110, 2005.

DU, X. et al. Stress wave tomography of wood internal defects using ellipse-based spatial interpolation and velocity compensation. **BioResource**, v. 10, n. 3, p. 3948-3962, 2015.

ESTEBAN, L. G.; FERNANDEZ, F. G.; PALACIOS, P. MOE prediction in *Abies pinsapo* Boiss. timber: Application on an artificial neural network using non-destructive testing. **Computers and Structures**, v. 87, p. 1360-1365, 2009.

FEIO, A. O. Ensaio Não Destrutivos em Estruturas de Madeira - Métodos Globais, **Ensaio in Engenharia e Vida**, Lisboa, n. 28, 2007.

FENG, H. et al. Tomographic image reconstruction using an interpolation method for tree decay detection. **BioResources**, v. 9, n. 2, p. 3248-3263, 2014.

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. 84p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia (UFLA)**, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, 2011.

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**, n. 2/3, p. 65-74, 1971.

FOELKEL, C. E.; MORA, E.; MENOCELLI, S. Densidade básica: sua verdadeira utilidade como índice de qualidade da madeira de eucalipto para produção de celulose. In: **Congresso Florestal Brasileiro**, Campos do Jordão, 1990.

FOREST PRODUCTS LABORATORY. **Wood handbook: wood as an engineering material.** Madison: U.S. Department of Agriculture, 2010. 508p.

GALLIGAN, W. L.; McDONALD, K. A. Machine grading of lumber. Practical concerns for lumber producers. **General Technical Report FPL-GTR-7**, USDA Forest Service, 2000.

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

GAO, S. et al. Effect of temperature on acoustic evaluation of standing trees and logs: Part 1—Laboratory investigation. **Wood and Fiber Science**, v. 44, n. 3, p. 286–297, 2012.

GILBERT, E. A.; SMILEY, E. T. PiCUS Sonic Tomography for the quantification of decay in white oak (*Quercus Alba*) and hickory (*Carya spp.*). **Journal of Arboriculture**, v. 30, n. 5, p. 277-280, 2004.

GOUVÊA, A. F. G. et al. Determinação da densidade básica da madeira de Eucalyptus por diferentes métodos não destrutivos. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 35, n. 2, p. 349-358, 2011.

GONÇALVEZ, J. C.; VALLE, A. T.; COSTA, A. F. Estimativas das constantes elásticas da madeira por meio de ondas ultra-sonoras (ultra-som). **Cerne**, v. 7, n. 2, p. 81-92, 2001.

GUNTEKIN, E.; EMIROGLU, Z. G.; YILMAZ, T. Prediction of bending properties for Turkish red pine (*Pinus brutia* Ten.) lumber using stress wave method. **BioResources**, v. 8, n. 1, p. 231-237, 2013.

HASSEGAWA, M. **Qualidade da madeira de *Pinus taeda* L. de procedência da África do Sul**. 2003. 107p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2003.

HAINES, D. W.; LEBAN, J. M.; HERBE, C. Determination of Young's modulus for spruce, fir and isotropic materials by resonance flexure method with comparison to static flexure and other dynamic methods. **Wood Science and Technology**, v. 30, p. 253-263, 1996.

HEIN, P. R. G. et al. Near infrared spectroscopy for estimating wood basic density in *Eucalyptus urophylla* and *Eucalyptus grandis*. **Cerne**, Lavras, v. 15, n. 2, p. 133-141, 2009.

IKHSAN, A. M. N. et al. Internal properties assessment in agar wood trees using ultrasonic velocity measurement. RnD Seminar 2010: Research and Development Seminar 2010, Bangi, Malaysia, 7p., 2010.

JAYNE, B. A. Vibrational properties of wood as indices of quality. **Forest Products Journal**, v. 9, n. 11, 1959.

KASAL, A.; ANTHONY, R. Advances in situ evaluation of timber structures. **Progress in Structural Engineering and Materials**, v. 6, n. 2, p. 94-103, 2004.

KASAL, B.; LEAR, G.; ANTHONY, R. (2010) Radiography. In: Kasal, B.; Tannert, T. (eds) In situ assessment of structural timber. RILEM state-of-the-art reports. Springer, Dordrecht, p. 51-62.

KASAL, B.; LEAR, G.; TANNERT, T. (2010) Stress waves. In: Kasal, B.; Tannert, T. (eds) In situ assessment of structural timber. RILEM state-of-the-art reports. Springer, Dordrecht, p. 16-33.

KETTUNEN, O. P. (2006). **Wood structure and properties**. Switzerland: Trans Tech Publications Ltd. 401p.

KEUNECKE, D. et al. Determination of Young's and shear moduli of common yew and Norway spruce by means of ultrasonic waves. **Wood Science Technology**, v. 41, n. 4, p. 309-327, 2007.

KLOCK, U. **Qualidade da madeira juvenil de *Pinus maximinoi* H. E. Morre**. Curitiba. 2000. 297p. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Paraná. 2000.

KOLLMAN, F. Tecnología de la madera y sus aplicaciones. Madrid: **Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias y Servicios de la Madera**, p. 359-394, 1959.

LACHENBRUCH, B. et al. Relationships of density microfibril angle, and sound velocity with stiffness and strength in mature wood of Douglas-fir. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 40, p. 55-64, 2010.

LARSSON, B.; BENGTSSON, B.; GUSTAFSSON, M. Nondestructive detection of decay in living trees. **Tree Physiology**, v. 24, n. 7, p. 853–858, 2004.

LATORRACA, J. V.; ALBUQUERQUE, C. E. Efeito do rápido crescimento sobre as propriedades da madeira. **Floresta e Ambiente**, Seropedica. v. 7, n. 1, p. 279-291, 2000.

LATORRACA, J. V. F. et al. Efeito da umidade da madeira na propagação de ondas mecânicas. **Floresta e Ambiente**, v. 18, n. 4, p. 451-459, 2011.

LAWDAY, G.; HODGES, P. A. The analytical use of stress waves for the detection of decay in standing trees. **Forestry**, v. 73, n. 5, p. 447-456, 2000.

LEMPRIERE, B. M. (2002) **Ultrasound and elastic waves**. USA: Academic Press. 241p.

LI, L. et al. Acoustic tomography in relation to 2D ultrasonic velocity and hardness mappings. **Wood Science and Technology**, v. 46, n. 1, p. 551-561, January 2012.



LIMA, J. T. et al. Uso do resistógrafo para estimar a densidade básica e a resistência à perfuração da madeira de *Eucalyptus*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 75, p. 85-93, 2007.

LIN, C. J. et al. Application of an ultrasonic tomographic technique for detecting defects in standing trees. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 62, n. 4, p. 434-441, 2008.

LIN, C. J. et al. Stress wave tomography for the quantification of artificial hole detection in camphor trees (*Cinnamomum camphora*). **Taiwan Journal of Forest Science**, v. 26, n. 1, p. 17-32, 2011.

LIN, C. J.; YANG, T. H. Detection of acoustic velocity and electrical resistance tomographies for evaluation of peripheral-inner wood demarcation in urban royal palms. **Urban Forestry and Urban Greening**, v. 14, n. 3, p. 583-589, 2015.

MACHADO, J.; PALMA, P.; SIMÕES, S. **Ultrasonic indirect method for evaluating clear wood strength and stiffness**. In: Conference NDTCE'09, Non-Destructive Testing in Civil Engineering, France, 2009.

MAURER, H. et al. A simple anisotropy correction procedure for acoustic wood tomography. **Holzforschung**, v. 60, n. 5, p. 567-573, 2006.

McKENZIE, H. M. et al. Processing young plantation-grown *Eucalyptus nitens* for solid wood products: 2., predicting product quality from tree, increment core, disc and 1-m billet properties. **New Zealand Journal of Forestry Science**, Rotorua, v. 33, n. 1, p. 79-113, 2003.

MELO, R. R. et al. Variação radial e longitudinal da densidade básica da madeira de *Pinus elliottii* Engelm. com diferentes idades. **Ciência da Madeira (Brazilian Journal Wood Science)**, Pelotas, v. 4, n. 1, p. 83-92, 2013.

MELO, R. R. Radial and longitudinal variation of *Pinus taeda* L. wood basic density in different ages. **Revista de Ciências Agrárias (Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences)**, v. 58, n. 2, p. 192-197, 2015.

MENDES, C. J. Influência da idade em *Pinus taeda* sobre a qualidade de madeira para produção de celulose. **Série Técnica IPEF**, Piracicaba, v. 9, n. 27, p. 81-90, 1993.

MENDONÇA, M. A. **Características da madeira de *Pinus elliottii* com diferentes idades e propriedades do papel**. 1982. 124p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal – Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 1982.

MOKFIENSKI, A. et al. A importância relativa da densidade da madeira e do teor de carboidratos no rendimento de polpa e na qualidade do produto. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 18, n. 3, p. 401-413, 2008.

MORESCHI, J. C. **Propriedades tecnológicas da madeira**. Curitiba: Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal, Setor de Ciências Agrárias/UFPR, 2010. 176p.

NICOLOTTI, G. et al. Application and comparison of three tomographic techniques for detection of decay in trees. **Journal of Arboriculture**, v. 29, n. 2, p. 66-78, 2003.

NIEMZ, P. (2009) **Methods of non-destructive wood testing**. Zurich: Institute for Building Materials.

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

OLIVEIRA, F. G. R.; SALES, A. Relationship between density and ultrasonic velocity in Brazilian tropical woods. **Bioresource Technology**, v. 97, n. 8, p. 2443-2446, 2006.

OLIVEIRA, F. G. R. et al. Moisture content effect of ultrasonic velocity in *Goupia glabra*. **Materials Research**, Oxford, v. 8, n. 1, p. 11-14, 2005.

OLIVEIRA, F. L. et al. Propriedades da madeira de *Pinus taeda* L. em função da idade e da posição radial na tora. **Revista Instituto Florestal**, São Paulo, v. 18, n. único, p. 59-70, 2006.

PANSHIN, A. J.; de ZEEUW, C. **Textbook of wood technology**. 3.ed. New York: McGraw-Hill Book, 1970, 705p.

PEREIRA, J. C. D.; TOMASELLI, I. A Influência do desbaste na qualidade da madeira de *Pinus elliottii* Engelm. var. *elliottii*. **Boletim de Pesquisa Florestal**. Colombo, p. 61-69. 2004.

PEREIRA, L. C. et al. Tomografia de impulso para avaliação do interior do lenho de árvores. **Revista da Sociedade Brasileira de Arborização Urbana**, v. 2, n. 2, p. 65-75, 2007.

PUNCHES, J. **Tree growth, forest management, and their implications for wood quality**. Oregon State University. 8p. 2004.

RAYNER, A. D. M.; BODDY, L. **Fungal decomposition of wood. Its biology and ecology.** Chichester, New York. 1988. 587p.

REINPRECHT, L.; HIBKY, M. The type and degree of decay in spruce wood analyzed by the ultrasonic method in three anatomical directions. **BioResources**, v. 6, n. 4, p. 4953-4968, 2011.

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

RINN, F. Device for investigation materials: combined three-dimensional stress-wave and impedance tomography using sensor chains. PCT/DE00/01467(1999.05.11). 1999.

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

ROLLO, L. C. P. **Tomografia de impulso para estimativa da densidade da madeira. 2009.** 49f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2009a.

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

ROLLO, F. M. A. et al. Comparação entre leituras de resistógrafo e imagens tomográficas na avaliação interna de troncos de árvores. **Cerne**, Lavras, v. 19, n. 2, p. 331-337, abr./jun. 2013.

ROLLO, L. C. P. et al. Can the impulse propagation speed from cross-section tomography explain the conditioned density of wood? **Wood Science Technology**, v. 48, p. 689-701, 2014.

ROSS, R. J.; PELLERIN, R. F. Nondestructive testing for assessing wood members in structures: A review. **General Technical Report, FPL-GTR-70**, USDA Forest Service, 40p., 1994.

ROSS, R. J. et al. Relationship between log and lumber modulus of elasticity. **Forest Products Journal**, v. 47, n. 2, p. 89-92, 1997.

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

ROZENBERG, P.; CAHALAN, C. Spruce and wood quality: Genetic Aspects (A Review). **Silvae Genetica**, v. 4, n. 5, p. 270-274, 1997.

SANTOS, S.; SANSÍGOLO, C. A. Influência da densidade básica da madeira de clones de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* na qualidade da polpa branqueada. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 7, n. 1, p. 53-63, 2007.

SANTINI, E. J.; HASELEIN, C. R.; GATTO, D. A. Análise comparativa das propriedades físicas e mecânicas da madeira de três coníferas de florestas plantadas. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 10, n. 1, p. 85-93, 2000.

SCANAVACA JÚNIOR, L.; GARCIA, J. N. Determinação das propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Eucalyptus urophylla*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 65, p. 120 - 129, 2004.

SCHAD, K. C.; SJAMOLDT, D. L.; ROSS, R. J. Nondestructive methods for detecting defects in softwoods logs. **US Forest Products Laboratory, Research Paper, FPL-RP-546**, Madison, 1996.

SCHNEIDER, P. R. **Análise de regressão aplicada à Engenharia Florestal**. 2.ed. Santa Maria, RS: UFSM, 1997. 217p.

SIMPSON, W. T. **Dry kiln operator's manual**. Madison: United States Department of Agriculture – USDA, 1991. 274p.

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

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**, n. 2033, 1955.

SOCCO, L. V. et al. Feasibility of ultrasonic tomography for nondestructive testing of decay on living trees. **Research in Nondestructive Evaluation**, v. 15, p. 31-54, 2004.

STANGERLIN, D. M. et al. Propriedades de flexão estática da madeira de *Carya illinoensis* em duas condições de umidade. **Ciência da Madeira**, Pelotas, v. 01, n. 02, p. 70-79, 2010a.

STANGERLIN, D. M. et al. Uso do ultrassom para estimativa das propriedades mecânicas da madeira de *Peltophorum dubium*. **Ciência da Madeira**, Pelotas, v. 1, n. 2, p. 44-53, 2010b.

STATGRAPHICS® Centurion XVI User Manual. StatPoint Technologies, Inc. 2010

TEDER, M. et al. Overview of some non-destructive methods for in-situ assessment of structural timber. In: **3rd International Conference Civil Engineering**, p. 137-143, 2011.

THIERSCH, C. R. et al. O uso de modelos matemáticos na estimativa da densidade básica da madeira em plantios de clones de *Eucalyptus sp.* **Cerne**, Lavras, v. 12, n. 3, p. 264-278, 2006.

TOMIKAWA, Y. et al. Non-destructive inspection of a wooden pole using ultrasonic computed tomography. **IEEE Transactions of Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control**, v. 33, n. 4, p. 354-358, 1986.

ULIANA, L. R. **Aplicação da tomografia de impulso na avaliação da qualidade do lenho de árvores de maçaranduba, *Manilkara huberi* (Ducke) Chevalier**. 2010. 156p. Tese (Doutorado em Tecnologia de Produtos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade São Paulo, Piracicaba, 2010.

VALE, A. T.; DIAS, I. S.; SANTANA, M. A. E. Relações entre propriedades químicas, físicas e energéticas da madeira de cinco espécies de cerrado. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 20, n. 1, p. 137-145, 2010.

VIDAURRE, G. B. et al. Lenho juvenil e adulto e as propriedades da madeira. **Floresta e Ambiente**, Seropedica, v. 18, p. 10-18, 2011.

VIDAURRE, G. B. et al. Propriedades da madeira de reação. **Floresta e Ambiente**, Seropedica, v. 20, p. 1-37, 2013.

VITAL, B. R. **Métodos de determinação da densidade da madeira**. Viçosa: Sociedade de Investigações Florestais, 1984. 21p.

WANG, X. et al. Strength and stiffness assessment of standing trees using a nondestructive stress wave technique. **Research Paper, FPL-RP-585**, USDA Forest Service, 9p., 2000.

WANG, X. et al. Assessment of decay in standing timber using stress wave timing non-destructive evaluation tools: a guide for use and interpretation. General Technical Report

FLP-GTR-147, Madison, US. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, WI, 12p. 2004.

WANG, X.; ROSS, R. J.; CARTER, P. Acoustic evaluation of wood quality in standing trees. Part 1. Acoustic wave behavior in standing trees. **Wood and Fiber Science**, v. 39, n. 1, p. 28–38, 2007.

WANG, X.; ALISSON, B. Decay detection in red oak trees using a combination of visual inspection, acoustic testing, and resistance microdrilling. **Journal of Arboriculture**, Champaign, v. 34, n. 1, p. 1-4, 2008.

WANG, X. Acoustic measurements on tress and logs: a review and analysis. **Wood Science and Technology**, v. 47, n. 5, p. 965-975, 2013.

WESSELS, C. B.; MALAN, F. S.; RYPSTRA, T. A review of measurement methods used on standing trees for the prediction of some mechanical properties of timber. **European Journal of Forest Research**, v. 130, n. 6, p. 881-893, 2011.

XAVIER, J. A. **Variabilidade da massa específica básica de *Pinus taeda* L. em diferentes idades de plantio**. 2009. 26f. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Industrial Madeireira) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

ZENG, L. et al. Interference resisting design for guided stress tomography. **Smart Materials and Structures**, v. 22, n. 5, p. 1-12, 2013.