



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E ENGENHARIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

ROMÁRIO ALVES CARVALHO

**PROJETO DE DESENVOLVIMENTO DE UM DENSITÔMETRO DE ULTRASSOM
PARA ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS EM MADEIRA**

JERÔNIMO MONTEIRO – ES

2022

ROMÁRIO ALVES CARVALHO

**PROJETO DE DESENVOLVIMENTO DE UM DENSITÔMETRO DE ULTRASSOM
PARA ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS EM MADEIRA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em Ciências Florestais na Área de Concentração Ciências Florestais.
Orientador: Prof. Dr. Gilson Fernandes da Silva
Coorientador: Prof. Dr. Christiano Jorge Gomes Pinheiro

JERÔNIMO MONTEIRO – ES

2022

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de
Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

C331p Carvalho, Romário Alves, 1989-
Projeto de desenvolvimento de um densitômetro de ultrassom
para ensaios não destrutivos em madeira / Romário Alves
Carvalho. - 2022.
103 f. : il.

Orientador: Gilson Fernandes da Silva.

Coorientador: Christiano Jorge Gomes Pinheiro.

Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade
Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias e
Engenharias.

1. Eucalyptus. 2. Propriedades físicas da madeira. 3.
Densidade básica. 4. Onda ultrassônica. I. Silva, Gilson
Fernandes da. II. Pinheiro, Christiano Jorge Gomes. III.
Universidade Federal do Espírito Santo. Centro de Ciências
Agrárias e Engenharias. IV. Título.

CDU: 630*38

**PROJETO DE DESENVOLVIMENTO DE UM DENSITÔMETRO DE ULTRASSOM
PARA ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS EM MADEIRA**

ROMÁRIO ALVES CARVALHO

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em Ciências Florestais na Área de Concentração Ciências Florestais.

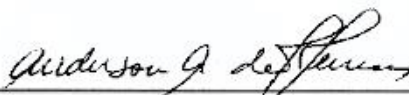
Aprovado em 26 de maio de 2022.



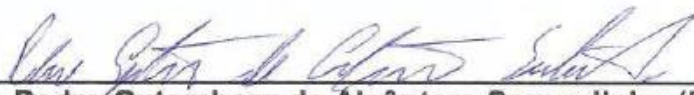
Dr. João Gabriel Missia da Silva (Examinador externo)
Universidade Federal do Espírito Santo



Prof. Dr. Julio Soriano (Examinador externo)
Faculdade de Engenharia Agrícola - UNICAMP



Prof. Dr. Anderson Alvarenga de Moura Meneses (Examinador externo)
Universidade Federal do Oeste do Pará



Prof. Dr. Pedro Gutemberg de Alcântara Segundinho (Examinador interno)
Universidade Federal do Espírito Santo



Prof. Dr. Gilson Fernandes da Silva (Orientador)
Universidade Federal do Espírito Santo

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha esposa
Tuane Amorim Fernandes, que não
poupou esforços para me ajudar neste
grande desafio pessoal e acadêmico.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiro a Deus que me concedeu saúde e paz, para trilhar este caminho. A UFES, especialmente ao Departamento de Ciências Florestais e da Madeira e ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, por me conceder esta oportunidade de capacitação, me oferecer uma grande estrutura física e pessoal altamente qualificado.

Ao meu orientador Gilson Fernandes da Silva e ao meu coorientador Christiano Jorge Gomes Pinheiro, que deram todo o suporte para transformarmos o projeto do Densitômetro em realidade.

Ao IFES e a coordenadora Paula Karolina, por me ceder o Laboratório de Ciências Florestais e ter me liberado para desenvolver a pesquisa no Departamento de Ciências Florestais e da Madeira, em Jerônimo Monteiro.

A Startup Plugin Roast, parceira no desenvolvimento do Densitômetro, que cedeu sua estrutura e know how e aos seus proprietários Manoel Filipe Medeiros de Faria e Wemerson Bruno Henriques, que abraçaram o projeto.

A minha esposa Tuane Amorim Fernandes pelo apoio incondicional, carinho e compreensão, pela minha ausência nos fins de semana de estudo.

Aos meus amigos e padrinhos Leonardo Portela Carvalho, Fernanda Carvalho e Rosemberg Cândido Celestino, que me receberam em seus lares, me dando total suporte e muita atenção.

Aos meus pais, irmãos e meu cunhado Moacir Dias.

Aos professores do DCFM Pedro Gutemberg de Alcantâra Segundinho, Rejane Costa Alves, Fabrício Gomes Gonçalves, Graziela Baptista Vidaurre, Jordão Cabral Moulin, pela ajuda, contribuições e disponibilidade.

Aos alunos Romário Christo, Alehandro Lopes Gama, Leonor da Cunha Mastela, Clara Gaspar Fossi de Souza, Heloísa Gomes, João Antônio e ao pesquisador João Gabriel Missia da Silva, que não pouparam esforços para me ajudar na parte experimental da pesquisa.

Aos servidores Elecy Palácio, José Geraldo Oliveira e Elizangela Almeida, por desempenharem um ótimo trabalho, e por estarem sempre à disposição para esclarecerem as minhas dúvidas.

RESUMO

CARVALHO, Romário Alves. **Projeto de desenvolvimento de um densitômetro de ultrassom para ensaios não destrutivos em madeira.** 2022. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES. Orientador: Gilson Fernandes da Silva. Coorientador: Christiano Jorge Gomes Pinheiro.

Existem poucas técnicas eficazes para se determinar a densidade básica de árvores em campo. O ensaio não destrutivo de propagação de ondas ultrassônicas tem potencial para prever as propriedades da madeira, se conhecida as variáveis deste processo. O objetivo desta pesquisa foi desenvolver um densitômetro para prever a densidade básica da madeira, utilizando o princípio da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas. Foram projetados e montados dois protótipos do equipamento: uma versão sem amplificador (Protótipo I) e outra amplificada (Protótipo II). Foram determinadas as velocidades de propagação da onda ultrassônica, utilizando os protótipos do equipamento, para seis espécies de eucalipto. Realizou-se a propagação de ondas ultrassônicas, com o equipamento James V-Meter IV, para validar o densitômetro. Para a estimação da densidade básica da madeira empregou-se a modelagem matemática da propagação de ondas longitudinais. As entradas do modelo foram o módulo de elasticidade longitudinal à flexão estática, o coeficiente de Poisson longitudinal-radial e a velocidade de propagação da onda ultrassônica. Para avaliar a eficiência e eficácia do densitômetro comparou-se a densidade básica obtida pelo densitômetro com a obtida pelo método de referência da balança hidrostática. O Protótipo I subestimou a velocidade de propagação do ultrassom na madeira ($3.947,21 \text{ m.s}^{-1}$) e o Protótipo II fez medições de velocidade ($4.751,55 \text{ m.s}^{-1}$) concordantes com o equipamento de ultrassom de referência que obteve o valor médio de $4.769,17 \text{ m.s}^{-1}$. O Protótipo II utilizando a modelagem tridimensional da propagação de ondas na madeira foi o que obteve a melhor estimação da densidade básica, com RMSE de 8,94% e viés de 1,66%, enquanto o Protótipo I obteve o RMSE de 23,12% e viés de 1,5%.

Palavras-chave: *Eucalyptus*; propriedades físicas da madeira; densidade básica; onda ultrassônica.

ABSTRACT

Carvalho, Romário Alves. **Development project of an ultrasound densitometer for non-destructive testing on wood**. 2022. Thesis (Doctorate in Forest Sciences) – Federal University of Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES. Advisor: Gilson Fernandes da Silva. Co-adviser: Christiano Jorge Gomes Pinheiro.

There are few effective techniques for determining the basic density of trees in the field. The non-destructive ultrasonic wave propagation test has the potential to predict the properties of wood, if the variables of this process are known. The objective of this research was to develop a densitometer to predict the basic density of wood, using the principle of propagation speed of ultrasonic waves. Two prototypes of the equipment were designed and assembled: a version without amplifier (Prototype I) and another amplified (Prototype II). The propagation speeds of the ultrasonic wave were determined, using the equipment prototypes, for six species of eucalyptus. The propagation of ultrasonic waves was carried out with the James V-Meter IV equipment to validate the densitometer. To estimate the basic density of wood, a mathematical modeling of the propagation of longitudinal waves was used. The model inputs were the longitudinal modulus of elasticity at static bending, the longitudinal-radial Poisson's ratio, and the ultrasonic wave propagation velocity. To evaluate the efficiency and effectiveness of the densitometer, the basic density obtained by the densitometer was compared with that obtained by the reference method of the hydrostatic balance. Prototype I underestimated the ultrasound propagation velocity in wood ($3,947.21 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) and Prototype II made velocity measurements ($4,751.55 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) in agreement with the reference ultrasound equipment that obtained the average value of $4,769.17 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Prototype II using the three-dimensional modeling of wave propagation in wood was the one that obtained the best estimate of the basic density, with RMSE of 8.94% and bias of 1.66%, while Prototype I obtained the RMSE of 23.12 % and bias of 1.5%.

Keywords: Eucalyptus; physical properties of wood; basic density; ultrasonic wave.

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1 - Velocidade de propagação de ondas com o Protótipo I na madeira de eucalipto em duas condições de umidade **Erro! Indicador não definido.**
- Tabela 2 - Valores mínimos (Min.), máximos (Máx.), médios (Média) e coeficiente de variação (CV) para a velocidade de ultrassom (C) das diferentes espécies de eucaliptos avaliadas a 12% de umidade. **Erro! Indicador não definido.**
- Tabela 3 - Valores médios do módulo de elasticidade longitudinal (MOE) para as madeiras de cinco espécies de eucalipto a 12% de umidade. **Erro! Indicador não definido.**
- Tabela 4 - Densidade Básica (DB) de espécies de eucalipto estimada pelo Protótipo I **Erro! Indicador não definido.**
- Tabela 5 - Resultados dos testes iniciais em madeira . **Erro! Indicador não definido.**
- Tabela 6 - Valores mínimos (Min.), máximos (Máx.), médios (Média) e coeficientes de variação (CV) para a velocidade da onda de ultrassom (C) **Erro! Indicador não definido.**
- Tabela 7 - Valores médios do módulo de elasticidade longitudinal (MOE) para os 2 conjuntos de CPs de *Eucalyptus* sp. **Erro! Indicador não definido.**
- Tabela 8 - Valores mínimos (Min.), máximos (Máx.), médios (Média) e coeficientes de variação (CV) para a velocidade da onda de ultrassom (C) obtidas pelo equipamento James V-Meter IV **Erro! Indicador não definido.**
- Tabela 9 - Densidade Básica (DB) estimada pelo Protótipo II..... **Erro! Indicador não definido.**
- Tabela 10 - Valores médios da densidade básica para as madeiras das cinco espécies de *Eucalyptus*..... **Erro! Indicador não definido.**
- Tabela 11 - Valores médios da densidade básica para os 2 conjuntos de CPs de *Eucalyptus* sp. **Erro! Indicador não definido.**
- Tabela 12 - Resultados da raiz do quadrado do erro médio (RMSE) e viés obtidos com a estimação da densidade com o Protótipo I..... **Erro! Indicador não definido.**
- Tabela 13 - Resultados da raiz do quadrado do erro médio (RMSE) e viés obtidos com a estimação da densidade com o Protótipo II. **Erro! Indicador não definido.**
- Tabela 14 - Valores mínimos (Min.), máximos (Máx.), médios (Média) e coeficientes de variação (CV) para a velocidade do James V-Meter IV..... **Erro! Indicador não definido.**

Tabela 15 - Resultados da raiz do quadrado do erro médio (RMSE) e viés obtidos com a validação do método de estimação da densidade básica por ultrassom ... **Erro! Indicador não definido.**

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tipos de ondas gerados a partir de um impacto na superfície de um material elástico.	27
Figura 2 - Planos e direções de simetria da madeira	31
Figura 3 - Influência do conteúdo de umidade nos módulos de elasticidade de Abeto.	35
Figura 4 - Velocidade do pulso ultrassônico ao longo da direção longitudinal e a correspondente atenuação como funções do conteúdo de umidade para metasequóias.	35
Figura 5 - Influência da frequência na velocidade de propagação da onda ultrassônica na madeira	37
Figura 6 - Transdutores - (A) Transdutores Planos de 150 kHz, (B) Transdutores Exponenciais, (C) Transdutores Planos 54 kHz.	39
Figura 7 – Esquema metodológico para o desenvolvimento do densitômetro bem como sua comparação com o método tradicional de se medir a densidade básica da madeira.	Erro! Indicador não definido.
Figura 8 - Diagrama de blocos do Protótipo I desenvolvido no projeto	Erro! Indicador não definido.
Figura 9 - Protótipo I (A) e seus módulos: placa conversora (B); gerador de funções (C); transdutores (D) e display (E).	Erro! Indicador não definido.
Figura 10 - Código fonte do Protótipo I desenvolvido na pesquisa	Erro! Indicador não definido.
Figura 11 - Técnica de transmissão direta de ultrassom	Erro! Indicador não definido.
Figura 12 - Ensaio de propagação de ondas com o Protótipo I.	Erro! Indicador não definido.
Figura 13 - Ensaio de flexão estática para a determinação do módulo de elasticidade da madeira	Erro! Indicador não definido.

- Figura 14 – Visão geral do Protótipo II (A) e o amplificador operacional na protoboard (B) **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 15 - Diagrama dos blocos do Protótipo II desenvolvido na pesquisa **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 16 - Propagação de ondas usando o Ultrassom James V-Meter MK IV ... **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 17 - Regressão linear (superior) e gráfico de Bland-Altman (inferior) entre as velocidades de propagação do Protótipo II e do ultrassom James de 54 kHz. **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 18 - Regressão linear (superior) e gráfico de Bland-Altman (inferior) entre as velocidades de propagação do Protótipo II e do ultrassom James de 500 kHz. .. **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 19 - Densidade básica estimada versus a observada, distribuição e histograma de frequência dos erros percentuais para a modelagem unidimensional. **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 20 - Densidade básica estimada versus a observada, distribuição e histograma de frequência dos erros percentuais para a modelagem tridimensional. **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 21 - Densidade básica estimada versus a observada, distribuição e histograma de frequência dos erros percentuais usando a modelagem unidimensional para a madeira de *Eucalyptus* sp. **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 22 - Densidade básica estimada versus a observada, distribuição e histograma de frequência dos erros percentuais usando a modelagem tridimensional para a madeira de *Eucalyptus* sp. **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 23 - Densidade básica estimada versus a observada, distribuição e histograma de frequência dos erros percentuais usando a modelagem tridimensional para a validação do método de estimação pelo densitômetro. **Erro! Indicador não definido.**

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Preço dos equipamentos.....	25
Quadro 2 - Equipamentos para realização de ensaios não-destrutivos	30
Quadro 3 - Especificações dos componentes do densitômetro e seus preços	Erro!
Indicador não definido.	
Quadro 4 - Componentes do Protótipo II.....	Erro! Indicador não definido.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 OBJETIVOS	17
1.1.1 Objetivo Geral.....	17
1.1.2 Objetivos específicos.....	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
2.1 DENSIDADE BÁSICA DA MADEIRA.....	18
2.1.1 Variáveis que se relacionam com a densidade da madeira.....	19
2.1.2 Posição de amostragem e técnicas de determinação da densidade	21
2.2 ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS	22
2.2.1 Custos dos equipamentos para ensaios não-destrutivos da madeira.....	25
2.3 PROPAGAÇÃO DE ONDAS ULTRASSÔNICAS.....	26
2.3.1 Modelagem matemática da propagação de ondas	27
2.3.2 Propagação de ondas na madeira	29
2.4 VARIÁVEIS QUE INFLUENCIAM NA PROPAGAÇÃO DE ONDAS NA MADEIRA.....	30
2.4.1 Planos de simetria da madeira	30
2.4.2 Módulo de elasticidade da madeira	32
2.4.3 Coeficiente de Poisson	32

2.4.4 Teor de umidade.....	34
2.4.5 Frequência da onda ultrassônica.....	37
2.5 COMPONENTES BÁSICOS DE UM ULTRASSOM	38
2.5.1 Transdutor Piezoelétrico.....	38
2.5.2 Filtros.....	40
2.5.3 Amplificador de sinal.....	40
2.5.4 Microcontrolador.....	40
2.5.5 <i>Software</i>	41
3 METODOLOGIA.....	Erro! Indicador não definido.
3.1 FASE I DA METODOLOGIA – DESENVOLVIMENTO DOS PROTÓTIPOS PARA MEDIÇÃO DA DENSIDADE BÁSICA DA MADEIRA	Erro! Indicador não definido.
3.1.1 Desenvolvimento do Protótipo I	Erro! Indicador não definido.
3.1.1.1 Desenvolvimento e descrição do <i>hardware</i>	Erro! Indicador não definido.
3.1.1.2 Desenvolvimento e descrição do <i>software</i>	Erro! Indicador não definido.
3.1.1.3 Testes preliminares.....	Erro! Indicador não definido.
3.1.1.4 Ensaaios utilizando o Protótipo I em madeira	Erro! Indicador não definido.
3.1.1.4.1 Cálculo da velocidade de propagação da onda	Erro! Indicador n^o definido.
3.1.1.4.2 Medição do módulo de elasticidade da madeira	Erro! Indicador não definido.
3.1.1.4.3 Determinação da umidade da madeira ...	Erro! Indicador não definido.
3.1.1.4.4 Estimação da densidade básica da madeira pelo Protótipo I	Erro! Indicador não definido.
3.1.2 Desenvolvimento do Protótipo II	Erro! Indicador não definido.
3.1.2.1 Desenvolvimento e descrição do <i>hardware</i>	Erro! Indicador não definido.
3.1.2.2 Desenvolvimento e descrição do <i>software</i>	Erro! Indicador não definido.
3.1.2.3 Testes preliminares.....	Erro! Indicador não definido.
3.1.2.4 Ensaaios utilizando o Protótipo II em madeira.....	Erro! Indicador não definido.
3.1.2.4.1 Cálculo da velocidade de propagação da onda com o Protótipo II .	Erro! Indicador não definido.
3.1.2.4.2 Medição do módulo de elasticidade da madeira	Erro! Indicador não definido.
3.1.2.4.4 Cálculo da velocidade de propagação da onda com o Ultrassom <i>James V-Meter MK IV</i>	Erro! Indicador não definido.
3.1.2.4.5 Determinação da umidade da madeira ...	Erro! Indicador não definido.

- 3.1.2.4.6 Estimação da densidade básica da madeira **Erro! Indicador não definido.**
- 3.2 FASE II DA METODOLOGIA – MEDIÇÃO DA DENSIDADE DA MADEIRA EM LABORATÓRIO UTILIZANDO MÉTODO CONVENCIONAL.... **Erro! Indicador não definido.**
- 3.3 FASE III DA METODOLOGIA – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DE DENSIDADE BÁSICA DA MADEIRA ESTIMADA PELO DENSITÔMETRO DE ULTRASSOM COM O RESULTADO OBTIDO EM LABORATÓRIO **Erro! Indicador não definido.**
- 3.3.1 Densidade estimada pelo Protótipo I **Erro! Indicador não definido.**
- 3.3.2 Densidade obtida pelo Protótipo II **Erro! Indicador não definido.**
- 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO..... **Erro! Indicador não definido.**
- 4.1 RESULTADOS DO DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO I . **Erro! Indicador não definido.**
- 4.1.1 Resultados dos testes preliminares **Erro! Indicador não definido.**
- 4.1.2 Resultados dos ensaios utilizando o Protótipo I em madeira..... **Erro! Indicador não definido.**
- 4.1.2.1 Velocidade de propagação da onda ultrassônica **Erro! Indicador não definido.**
- 4.1.2.2 Módulo de elasticidade longitudinal. **Erro! Indicador não definido.**
- 4.1.3 Estimação da densidade básica da madeira pelo Protótipo I **Erro! Indicador não definido.**
- 4.2 RESULTADOS DO DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO II **Erro! Indicador não definido.**
- 4.2.1 Resultados dos testes preliminares **Erro! Indicador não definido.**
- 4.2.2 Velocidade de propagação da onda ultrassônica com o Protótipo II **Erro! Indicador não definido.**
- 4.2.3 Módulo de elasticidade **Erro! Indicador não definido.**
- 4.2.4 Análise de concordância entre a velocidade de propagação do Protótipo II e do ultrassom de referência James V-Meter IV **Erro! Indicador não definido.**
- 4.2.5 Estimação da densidade básica da madeira pelo Protótipo II **Erro! Indicador não definido.**
- 4.3 DENSIDADE BÁSICA OBTIDA PELO MÉTODO DA ABNT 11941/2003 ... **Erro! Indicador não definido.**
- 4.4 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS ENTRE O VALOR DA DENSIDADE BÁSICA ESTIMADA PELO DENSITÔMETRO COM O RESULTADO DO MÉTODO DE REFERÊNCIA DA ABNT 11941/2003..... **Erro! Indicador não definido.**
- 4.4.1 Protótipo I versus método de referência **Erro! Indicador não definido.**
- 4.4.2 Protótipo II versus método de referência **Erro! Indicador não definido.**
- 4.4.2.1 Validação do modelo tridimensional **Erro! Indicador não definido.**
- 5 CONCLUSÕES **Erro! Indicador não definido.**

6 REFERÊNCIAS.....	Erro! Indicador não definido.
APÊNDICE A– Código Fonte do Protótipo II.....	Erro! Indicador não definido.

1 INTRODUÇÃO

Em 2020 a área total de árvores plantadas no Brasil alcançou 9,55 milhões de hectares (IBÁ, 2021). O setor de florestas plantadas impulsiona a economia nacional

com um Produto Interno Bruto (PIB) setorial de R\$ 116,6 bilhões, representando 1,58% do PIB brasileiro e 6,0% do PIB industrial. O Brasil se destaca no comércio mundial como o maior exportador de celulose (IBÁ, 2021).

Os plantios de eucalipto no Brasil ocupam 7,47 milhões de hectares enquanto as áreas com pinus somam 1,7 milhão de hectares, e outras espécies, entre elas seringueira, acácia, teca e paricá, representam cerca de 380 mil hectares (IBÁ, 2021).

Para este setor dinâmico da economia brasileira é importante levantar dados que caracterizam as florestas ainda não abatidas, dando suporte para as decisões gerenciais estratégicas das empresas, como a escolha de um clone ou a definição da destinação da madeira (LOPES, 2018).

Esta caracterização pode ser feita por meio da densidade da madeira, sendo a densidade a propriedade mais utilizada para a avaliação da qualidade da madeira, podendo ser usada como variável para a seleção genética de espécies florestais, na estimação de carbono fixado, na definição do uso da madeira e em inventários florestais (BRASIL; FERREIRA, 1972; ARANTES et al., 2016; ROCHA, 2018).

A densidade básica é um dos principais parâmetros de qualidade da madeira quando se visa sua utilização como matéria prima industrial ou energética. O conhecimento dessa propriedade possibilita ajustar o beneficiamento, a tomada de decisão da aplicação da madeira, os cálculos de transporte e logística. Quando aplicada ao inventário florestal, pode ser usada para estimar a quantidade de madeira em massa, bem como a massa de carbono fixado (SILVA, 2019a; BRASIL; FERREIA, 1972; ROCHA, 2018; ARANTES et al., 2016).

Os métodos clássicos para a obtenção da densidade básica são técnicas destrutivas. Estas envolvem a utilização de amostras de madeira, principalmente baguetas obtidas com a sonda Pressler, e corpos de prova, discos ou cunhas retirados após corte raso da árvore. Estas técnicas utilizam análises laboratoriais, que em alguns casos podem levar semanas para se obter o resultado. Devido ao custo e mão de obra também há restrição no número de amostras a serem avaliadas (GOUVÊA et al., 2011a; PEDROSO, 2014).

Devido a sua importância e o problema apresentado é fato que o setor florestal necessita cada vez mais do apoio da ciência para o desenvolvimento de novas tecnologias. A utilização de técnicas de análises não destrutivas na madeira permite a flexibilidade, agilidade, precisão, redução dos custos e manutenção da condição preliminar estrutural do material, quando comparadas aos métodos tradicionais destrutivos (SILVA, 2019b).

As principais técnicas não destrutivas que permitem estimar a densidade da madeira em campo utilizam o princípio da resistência à perfuração e penetração. Dentre estas técnicas, destacam-se o Resistógrafo e o Pilodyn, que são equipamentos que possuem alto custo de aquisição, não apresentam os resultados de forma direta, necessitam de operadores qualificados e muitas vezes produzem resultados com grande variação e baixa assertividade (GOUVÊA et al., 2011a; DIJK, 2014; RODRIGUES et al., 2008).

Seria um grande avanço na caracterização de árvores vivas e madeira serrada um equipamento capaz de prever a sua densidade básica, que seja portátil, de baixo custo, de fácil operação e que possa ser empregado em qualquer condição de umidade. Esta solução tecnológica pode ser desenvolvida utilizando o princípio da propagação de ondas ultrassônicas na madeira, uma vez que as propriedades acústicas da madeira são temas de vários estudos e sua modelagem matemática já é conhecida (MEYERS, 1994; BUCUR, 2005; WANG, 2013; ROSS, 2015).

Apesar dos estudos em acústica da madeira, não existe no mercado nenhum equipamento para se medir a densidade da madeira de forma direta usando o tempo de propagação da onda ultrassônica, especialmente para indivíduos vivos. Assim, o desenvolvimento de um densitômetro de ultrassom para medir a densidade da madeira de árvores vivas é algo inédito, e para construí-lo com tecnologia totalmente nacional, é necessário desenvolver seu *hardware* e *software*.

A modelagem matemática da propagação de ondas longitudinais em sólidos elásticos sustenta que este equipamento seria capaz de prever a densidade da madeira se conhecida a velocidade de propagação do som no material, seu módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson (MEYERS, 1994; BUCUR, 2005). Porém, para testar esta hipótese, faz-se necessário construir um equipamento capaz de medir o tempo de propagação do som. Com esta informação, deve-se realizar o estudo das variáveis envolvidas neste processo, que são o módulo de elasticidade da madeira, sua densidade básica, o coeficiente de Poisson e a velocidade de propagação da onda ultrassônica. Também é necessário realizar a integração do sistema, fazer sua calibração, realizar a validação, estabelecer as condições de operação e identificar seus limites.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver um densitômetro para medir a densidade da madeira utilizando o princípio da velocidade de propagação de ondas de ultrassom.

1.1.2 Objetivos específicos

- Estudar as variáveis envolvidas na propagação de ondas ultrassônicas na madeira a fim de se obter um *hardware* e *software* que meça a densidade básica da madeira com precisão;
- Realizar ensaios em laboratório para se medir a densidade básica da madeira de eucalipto por métodos convencionais;
- Comparar as medidas de densidade obtidas por meio dos protótipos desenvolvidos com as medidas de densidade obtidas nos ensaios de laboratório, de modo a se concluir acerca da acurácia dos equipamentos projetados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 DENSIDADE BÁSICA DA MADEIRA

A densidade (ρ) é uma propriedade intrínseca dos materiais, sua unidade no SI (Sistema Internacional de Unidades) é o quilograma por metro cúbico (kg/m^3) (SERWAY, JEWETT, 2014). A densidade básica da madeira é definida pela norma NBR 11941 da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (2003) como a relação da massa seca em estufa a $(105 \pm 2)^\circ\text{C}$ pelo respectivo volume da madeira acima do ponto de saturação das fibras.

A densidade básica da madeira é o índice mais utilizado para avaliação de sua qualidade (BRASIL; FERREIRA, 1972; ROCHA, 2018) ela pode ser usada como parâmetro para a seleção genética de espécies florestais, na estimação de carbono fixado e na definição do uso da madeira (FERREIRA, KAGEYAMA, 1978). Na indústria de papel e celulose a densidade básica da madeira é essencial para estimar a impregnação dos reagentes aos cavacos e desempenha a função de indicador do consumo específico de madeira (QUEIROZ et al., 2004). No setor de energia, a densidade é uma propriedade decisiva para a seleção de madeira, uma vez que quanto maior a densidade da madeira maior será a densidade relativa aparente do carvão vegetal produzido (SILVA, 2019a).

Segundo Silva (2019b), a densidade da madeira é a propriedade mais pesquisada e utilizada para analisar possíveis alterações entre os materiais genéticos, com o ambiente de crescimento das árvores, variáveis climáticas, idade de corte, espaçamentos de plantio, técnicas de manejo da plantação, ocorrência de distúrbios fisiológicos, doenças e pragas, e da interação entre estes fatores. Ainda segundo o autor, o conhecimento dessa propriedade física possibilita ajustar o beneficiamento, a tomada de decisão da aplicação da madeira, os cálculos de transporte e logística e a avaliação do sequestro de carbono das florestas (SILVA, 2019b).

Rocha (2018) afirma que a densidade da madeira é uma característica intimamente relacionada tanto com a caracterização de qualidade do material quanto com a demanda de matéria-prima para múltiplos produtos. Embora seja uma característica herdável, é preciso conhecer o comportamento quando submetidas aos diversos tratamentos silviculturais e condições ambientais (ROCHA, 2018).

A densidade da madeira varia de acordo com a espécie, com a idade e ao longo do fuste de um mesmo indivíduo. No interior do fuste, a densidade tende a ser máxima na base e nas regiões periféricas da casca, e a decrescer com a aproximação da copa e da medula (OLIVEIRA et al., 2005).

2.1.1 Variáveis que se relacionam com a densidade da madeira

A densidade básica é uma das características de maior relevância a ser estudada na madeira, porém esta tem uma natureza complexa por estar associada a várias variáveis (FOELKEL; BRASIL; BARRICHELO, 1971). A densidade resulta da integração das propriedades físicoquímicas e características anatômicas do lenho, sendo que esta reflete a composição química e o volume de matéria lenhosa por peso (JORGE; PEREIRA, 1998; BURGER; RICHTER, 1991).

As características anatômicas e a densidade do lenho podem variar entre gêneros, espécies de um mesmo gênero, entre árvores dentro de uma mesma espécie e entre diferentes partes das árvores, tanto no sentido longitudinal quanto no radial (SILVA et al., 2004). Segundo Kollmann e Côté (1968), as variações da densidade se devem às diferenças na estrutura anatômica do lenho presentes por unidade de volume em razão, principalmente, da idade da árvore, genótipo, índice de sítio, clima, localização geográfica e tratos silviculturais.

As variáveis anatômicas relacionadas a densidade são as dimensões das fibras, espessura da parede, volume dos vasos e parênquimas, proporção entre lenho primaveril e outonal, e arranjo destes elementos anatômicos (FOELKEL; BRASIL; BARRICHELO, 1971).

A densidade varia de acordo com a espécie, devido a composição anatômica da madeira (detalhes celulares, arranjo e percentagem dos diversos tecidos componentes do lenho) ser peculiar a cada uma. Na natureza, são encontradas madeiras com uma variação natural de densidade de 0,13 a 1,4 g/cm³. Correspondem a estes valores extremos a balsa e a piratinera, respectivamente (BURGER; RICHTER, 1991).

A variação natural de peso em madeira de iguais dimensões reflete a quantidade de matéria lenhosa por unidade de volume ou a quantidade de espaços vazios nelas existentes. Dessa forma, a massa específica também varia de acordo com vários fatores como o cerne, alborno, lenho inicial, lenho tardio e, sobretudo, com o teor de umidade (BURGER; RICHTER, 1991).

Outra variável importante para a determinação da densidade é a idade da árvore. O modelo mais comum relatado na literatura indica aumento da densidade do lenho com a idade das árvores, sendo o resultado das modificações das células cambiais, formando o lenho adulto (TOMAZELLO FILHO, 1987).

A densidade é relacionada ao teor de umidade. A madeira é um material altamente higroscópico e apresenta os fenômenos de retração e inchamento pela perda ou absorção de umidade. A entrada de água entre as moléculas de celulose da parede celular provoca o afastamento das mesmas e, como consequência, o inchamento da madeira. O processo contrário produz a aproximação das moléculas de celulose, resultando na contração da madeira (BURGER; RICHTER, 1991).

A umidade da madeira na árvore pode variar de 31 a 249% no cerne e de 40-213% no alburno (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 1987). Em *Corymbia maculata*, a variação encontrada no teor de umidade foi de 50-70%, no *Corymbia citriodora* de 46-80% e no *E. grandis* de 50-133% (CARMO, 1996). A densidade básica da madeira é medida com umidade acima do ponto de saturação da fibra e a densidade aparente é medida com umidade de 12-15%.

No gênero *Eucalyptus* o teor de umidade numa mesma árvore varia no sentido base-topo e no sentido medula-casca (FERREIRA, 1972; SOUZA et al., 1979). A variação base-topo da densidade básica da madeira de eucalipto possui vários tipos de tendência. Em algumas espécies, a densidade tende a ser decrescente da base para o topo, em outras tende a ser crescente a partir do nível do diâmetro a altura do peito (DAP), podendo, ainda, em outras espécies, apresentar valores alternados com a tendência decrescente e crescente (BARRICHELO et al., 1983).

A variação da densidade básica no sentido medula-casca, geralmente é crescente, isto é, aumenta gradativamente do cerne para o alburno (FOELKEL et al., 1983). Variações na densidade ao longo do tronco são menos consistentes do que aquelas na direção radial. A proporção de madeira juvenil na direção longitudinal do caule tende a aumentar. Como resultado imediato, a densidade diminui. Isso frequentemente ocorre em muitas espécies por causa da madeira juvenil (TRUGILHO et al., 1996).

A formação da madeira também pode ser influenciada por variações climáticas (temperatura, precipitação, umidade), edáficas e geográficas, genéticas e silviculturais. Estas variáveis associadas influenciam na densidade da madeira formada (SHIMOYAMA; BARRICHELO, 1989).

Uma consequência dessa variação climática é a formação de anéis de crescimento. Em regiões de clima temperado os anéis de crescimento representam o incremento anual da árvore, formado por lenho inicial e tardio (BURGER; RICHTER, 1991).

O lenho inicial corresponde ao crescimento da árvore no início do período vegetativo, normalmente primavera, quando as plantas despertam do período de dormência em que se encontravam, reassumindo suas atividades fisiológicas. As células da madeira formadas nesta ocasião caracterizam-se por suas paredes finas e lumes grandes que lhes conferem em conjunto com uma coloração clara. Com a aproximação do fim do período vegetativo, normalmente outono, as células vão diminuindo suas atividades fisiológicas. Em consequências desse fato, suas paredes vão tornando-se mais espessas e seus lumes menores, adquirindo uma cor mais escura. Esta alternância de cores evidencia os anéis de crescimento (BURGER; RICHTER, 1991).

A variação climática culmina na formação de anéis de crescimento, que têm reflexo na densidade, pois neste caso o lenho inicial é menos denso devido aos seus elementos de paredes finas e lumes grandes. Já o lenho tardio é mais denso, por conta das suas células de paredes espessas e lumes pequenos (BURGER; RICHTER, 1991).

2.1.2 Posição de amostragem e técnicas de determinação da densidade

Por conta da variabilidade da densidade num mesmo indivíduo, Maddern (1965) sugeriu determinar a densidade por meio de uma amostra extraída de um ponto fixo. Este ponto foi sugerido por Nylinder (1965) como sendo o DAP medido a 1,30 metro do solo, sendo as amostras conforme Spurr e Hsiung (1954), seções transversais do caule com 1 polegada de espessura. Dessa forma, convencionou-se que a determinação das seções transversais tomadas ao DAP podia representar uma estimativa da densidade básica média da árvore (BRASIL; FERREIA, 1972).

Nos estudos que visam a avaliar a variação longitudinal da densidade básica, é comum abater as árvores e medir sua altura comercial e após isso, retirar seis discos com aproximadamente 2,5 cm de espessura, correspondentes à base, DAP, 25, 50, 75 e 100% da altura comercial. De cada disco, retiraram-se cunhas, no sentido medula-casca, que constituem as sub-amostras para a determinação da densidade (SOUZA et al., 1986; OLIVEIRA et al., 2005). Por esta técnica de amostragem, também pode-se expressar o valor médio de densidade básica da árvore por meio de média simples ou ponderada (SOUZA et al., 1986). Na literatura, também são encontrados pesquisadores que utilizam pontos fixos ao longo do fuste, como a retirada de discos de 3 em 3 m no sentido base-topo (SETTE et al., 2012).

Para os trabalhos que visam a avaliar a variabilidade da densidade básica da árvore na direção radial, é comum retirar um disco de aproximadamente 2,5 a 5,0 cm de espessura no DAP e a partir dessa amostra retirar corpos de prova 2 x 2 x 3 cm em 5 diferentes posições, no sentido medula-casca (0, 25, 50, 75 e 100% do raio das amostras), método conhecido como de distância relativa (TOMAZELLO, 1985). Existe também o método de distância fixa, seja a cada 0,5, 1,0 ou 2,0 cm, no sentido medula-casca (CARNEIRO, 2017; BOBADILHA et al., 2018; CÂMARA et al., 2018). Pode haver o uso da segregação qualitativa das regiões, retirando as amostras nas posições denominadas como medula, intermediária e casca; ou pelas camadas de tecidos formados na árvore, cerne interno, cerne externo e alburno (WILKES, 1984).

Os métodos de amostragem para a determinação da variação longitudinal e radial da densidade também podem ser realizados juntos, quando o objetivo é estudar a variação da densidade na direção radial e longitudinal ao longo de toda a árvore (OLIVEIRA et al., 2005).

As técnicas de amostragem citadas consistem em análises destrutivas. Para a realização das mesmas, a árvore deve ser derrubada para obter discos, que são convertidos em corpos de prova para serem analisados em laboratório conforme a NBR 11941, ou utilizando a densitometria de Raios-X (SCOLFORO; THIERSCH, 2004). Na impossibilidade de derrubar a árvore, pode-se utilizar os métodos de análise não-destrutivos. Estes métodos englobam a coleta da amostra por meio do trado de incremento (Sonda Pressler) para posterior análise em laboratório ou o uso direto de uma ferramenta em campo para determinar a densidade, como por exemplo: pilodyn e resistógrafo (LOPES, 2018; RODRIGUES et al., 2008).

2.2 ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS

Um ensaio não destrutivo é aquele que identifica as propriedades físicas e mecânicas de um material sem alterar suas capacidades de uso final. Tais avaliações se baseiam em tecnologias de teste para fornecer informações precisas de acordo com as propriedades, desempenho ou condição do material em questão. Uma variedade de testes podem ser realizados em material ou produto, com a seleção dos critérios de teste pelo desempenho ou característica de qualidade específicos de interesse. (ROSS, 2015; GONÇALVES; BARTHOLOMEU, 2000).

Segundo Gouvêa et al. (2011a), os métodos não destrutivos vêm se tornando importantes alternativas para predições das características da madeira. A facilidade e

precisão das predições têm feito com que muitas empresas adotem estes novos métodos. A avaliação da qualidade da madeira por técnicas mais simples e rápidas é uma necessidade fundamental na qualificação de florestas comerciais. Estes métodos são vantajosos por proporcionarem agilidade na coleta de dados e possibilitam a avaliação de um amplo número de amostras, o que favorece a seleção de genótipos superiores, mesmo em condição de campo. (GOUVÊA et al., 2011a).

Os ensaios não destrutivos podem ser usados para a determinação da densidade básica da madeira, apresentando vantagens em relação aos métodos destrutivos, já que a determinação da densidade básica da madeira por métodos destrutivos pode demandar dias para alcançar os resultados, apresentando um custo mais elevado e limitação do número de amostras (SILVA, 2019b).

Para a medição da densidade, pode-se citar os seguintes métodos não destrutivos: (1) Resistógrafo, (2) Pilodyn, (3) Espectroscopia de Infravermelho Próximo-NIRS, (4) Densitometria de raios X (GOUVÊA et al., 2011a; BELINI et al., 2009; ARANTES et al., 2016; TOMAZELLO et al., 2008; RODRIGUES et al., 2008).

O resistógrafo (1) foi desenvolvido na Alemanha, com objetivo de avaliar de forma simples e segura, ainda em condições de campo, a sanidade de árvores, postes e estruturas de madeira. Com o passar dos anos, foi proposta a sua utilização para a predição da densidade, com o princípio que a maior densidade resulta em maior resistência a perfuração (SILVA, 2019b; GOUVÊA et al., 2011b).

As variações na resistência da haste ao perfurar são causadas pelas alterações da densidade da madeira dentro e entre os anéis de crescimento e com as mudanças das camadas de cerne e alborno. A resistência à perfuração é mensurada a cada 0,1 mm de avanço da haste no sentido diametral da árvore, o que permite representar detalhadamente o seu perfil, sendo possível verificar as diferenças de densidade entre o lenho inicial e tardio, defeitos internos e cavidades presentes na madeira (SILVA, 2019b).

O resistógrafo tem a vantagem de sua broca perfurar todo o diâmetro do tronco da árvore, porém limitado ao comprimento da broca (GOUVÊA et al., 2011b). Com isso, a predição da densidade da madeira em campo é favorecida quando comparada com o Pilodyn. Entre as desvantagens, pode-se citar o custo do equipamento, a necessidade de processamento de dados após a leitura da RP (Resistência a perfuração) e a interferência da umidade da madeira em seu resultado de estimação (GOUVÊA et al., 2011a; DIJK, 2014; RODRIGUES et al., 2008).

O Pilodyn® (2) é um equipamento de campo desenvolvido na Suíça e seu princípio de funcionamento é a resistência à penetração. O aparelho utiliza a profundidade de penetração de uma agulha de aço injetada com força constante em uma região da árvore para predizer a densidade da madeira. Quanto maior for a resistência à penetração, maior será a densidade da madeira (SILVA, 2019b).

Entre as vantagens do equipamento, destaca-se a praticidade, o uso direto em campo e baixo dano a árvore. Segundo Thiersch et al. (2006) a estimação da densidade de *Eucalyptus* com Pilodyn é precisa e exata, porém Gonçalves et al. (2007) concluíram em seus estudos que a utilização do Pilodyn não apresentou resultados satisfatórios, quando correlacionado com a densidade da madeira das árvores, independente da forma de manejo.

A Espectroscopia de Infravermelho Próximo-NIRS (3) e a Densitometria de raios X (4) são técnicas para a determinação de densidade básica da madeira usadas em laboratório. Dessa forma, não podem ser usadas em campo. A amostra para o NIRS é retirada no campo na altura do DAP das árvores, com furadeira manual dotada de broca. Assim, as amostras para esta técnica consistem de serragens. Já na densitometria de raios X, as amostras podem ser obtidas destrutivamente (corte das árvores) ou não destrutivamente (extração com trado de incremento) (TOMAZELLO, 2008; GOUVÊA et al., 2011a).

Gouvêa et al. (2011a) obtiveram baixo erro de predição com o modelo gerado pelo NIRS, com o coeficiente de determinação (R^2) igual a 84%, e concluíram que a técnica é viável para predizer a densidade básica da madeira de *Eucalyptus*. A desvantagem da técnica é o esforço experimental, uma vez que as amostras necessitam ser reduzidas à partículas de 0,05 mm. Além disso, é necessário construir uma curva de calibração com os espectros de cada amostra e depois construir o modelo para a predição da densidade (GOUVÊA et al., 2011a).

A Densitometria de raios X é uma técnica que consiste na obtenção de radiografias de uma fina seção transversal de madeira sobre um filme radiográfico. Esse filme é exposto à fonte de raios X e, pela passagem da radiação por meio da amostra de madeira, forma-se uma imagem da sua estrutura transversal. Com essa imagem digitalizada, são realizadas comparações entre a escala de cinza das amostras de madeira com a da curva-padrão, cujos valores de densidade são conhecidos, sendo determinados os valores de densidade (ARANTES et al., 2016; BELINI et al., 2009).

O método supracitado fornece o perfil da densidade aparente da madeira. Ela não é usada em campo. Apresenta a desvantagem de ser mais cara que as demais, e precisa de regulação por conta da radioatividade (ARANTES et al., 2016; BELINI et al., 2009).

2.2.1 Custos dos equipamentos para ensaios não-destrutivos da madeira

Os custos das análises contemplam mão-de-obra, energia elétrica, combustível, depreciação de máquina, manutenção, material de consumo, entre outros. Porém, será dada ênfase ao capital necessário para adquirir os equipamentos não-destrutivos (Quadro 1).

Quadro 1 - Preço dos equipamentos para obtenção da densidade da madeira

MÉTODO	EQUIPAMENTO	TOTAL DO INVESTIMENTO INICIAL (USD)
Resistografia	Resistógrafo, marca Rinntech modelo Resistograph Rinn-R650-SC*Importado da Alemanha	30.179,51* *Valor posto na cidade de Ibatiba-ES. Todos os impostos e taxas de importação incluídos.
Durômetro	Pilodyn 6J*Importado da Suíça	10.871,29* * Valor posto na cidade de São Paulo. Todos os impostos e taxas de importação incluídos.
Espectroscopia de Infravermelho Próximo -NIRS	Espectrômetro marca FOSS, modelo NirSystem DS 2500* com software para calibração e kit de análise de subprodutos vegetais.*Importado dos Estados Unidos	177.504,98* *Valor posto na cidade de Ibatiba-ES. Todos os impostos e taxas de importação incluídos.
Densitometria de Raios-X	Quintek Measurement Systems (QMS), modelo QTRS-01X*Importado dos Estados Unidos	63.000,00 * Sem considerar custos com frete, taxas e impostos de importação.

Fonte: Tecnal (2020); Importécnica (2020); Analítica (2020); Quintek Measurement Systems Inc (2020).

Dos métodos citados de ensaios não destrutivos para a medição da densidade da madeira, os mais utilizados são o Resistógrafo e o Pilodyn. As informações apresentadas no Quadro 1, demonstram que a estimativa da densidade da madeira

representa um alto custo inicial, visto que os equipamentos apresentam elevado custo de aquisição.

2.3 PROPAGAÇÃO DE ONDAS ULTRASSÔNICAS

As ondas mecânicas são as que causam perturbação e se propagam através de um meio material. Todas as ondas mecânicas necessitam de alguma fonte de perturbação, de um meio que possa ser perturbado e de algum mecanismo físico pelo qual os elementos do meio possam influenciar uns aos outros (SERWAY; JEWETT, 2014).

Uma onda caracteriza-se pelos seguintes parâmetros: (1) período (T) - intervalo de tempo por oscilação; (2) Comprimento de onda (λ) - O comprimento de uma onda é representado pela distância percorrida por ela no intervalo de tempo de um período; (3) Frequência (f) – representa o número de oscilações que a onda sofre por unidade de intervalo de tempo, medido em Hertz (Hz); (4) Intensidade – é a potência de uma onda sonora em dada área de propagação, (5) Amplitude (a) é a distância entre a crista e o vale da onda, ou seja, é a máxima distância que cada ponto do meio da onda apresenta em relação à sua posição de equilíbrio (SERWAY; JEWETT, 2014).

As ondas se propagam de duas formas: (1) Onda transversal em que os elementos do meio se movem em uma direção perpendicular a velocidade da onda; (2) Ondas longitudinais aquelas nas quais os elementos do meio se movem para a frente e para trás, paralelamente a direção da velocidade da onda (SERWAY; JEWETT, 2014; WANG, 2013).

Um exemplo de onda mecânica que se propaga longitudinalmente é o ultrassom, sendo este definido como qualquer onda sonora com frequência maior que 20 kHz (limite do audível). O ultrassom consiste fundamentalmente em transmissão de energia cinética, sem transmissão de matéria associada. É gerada pela aplicação de um sinal elétrico a um dispositivo transdutor com características piezoelétricas (SERWAY; JEWETT, 2014).

As ondas ultrassônicas podem se propagar através de qualquer meio material e sua velocidade depende das propriedades desse meio. Os principais fatores determinantes desta velocidade de propagação são a densidade e a rigidez do meio onde a onda se propaga (SERWAY; JEWETT, 2014).

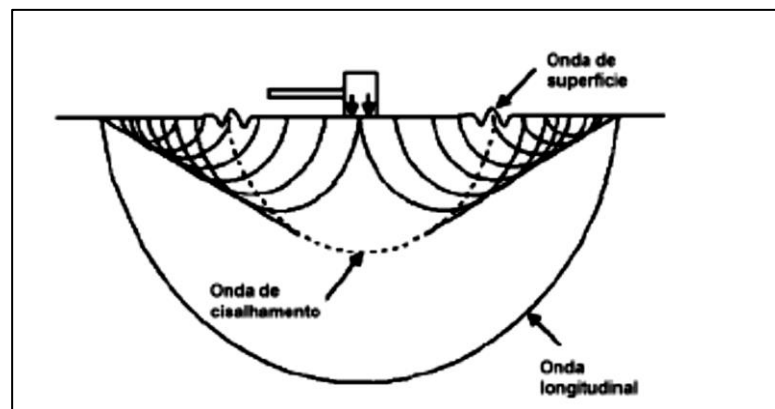
As propriedades periódicas do ultrassom têm sido usadas em diversas áreas desde a segunda guerra mundial, seja na identificação de objetos (sonar), em exames

clínicos (ultrassonografia 2D e 3D), no controle de qualidade de ligas metálicas e estruturas, no controle de qualidade de madeira e concreto, na medição de espessura de diversos materiais (WANG, 2013; DIKRALLAH et al., 2010; PEDROSO, 2011; ROSS, 2015; RUY et al., 2018).

2.3.1 Modelagem matemática da propagação de ondas

Segundo Wang (2013), a propagação de ondas na madeira é um processo dinâmico controlado pelas propriedades, orientação e microestrutura da fibra da madeira. Quando uma força é aplicada na superfície da madeira, a perturbação que é gerada viaja através da madeira como ondas de tensão. Em geral, três tipos de ondas são produzidas a partir da tensão na superfície (Figura 1): (1) onda longitudinal (onda de compressão); (2) onda de cisalhamento e (3) onda de superfície (WANG, 2013; WANG; ROSS; CARTER, 2007).

Figura 1 - Tipos de ondas gerados a partir de um impacto na superfície de um material elástico.



Fonte: Meyers (1994), adaptado.

Uma onda longitudinal corresponde à oscilação das partículas na direção da propagação da onda, sendo a polarização da partícula paralela à velocidade da onda. Na onda de cisalhamento, o movimento das partículas (polarização) é perpendicular à direção de propagação das ondas. Na onda superficial, a perturbação do material se restringe à região próxima à superfície, e as partículas se movem para cima e para baixo, para frente e para trás, traçando um movimento elíptico. Embora a maior parte da energia do impacto seja utilizada para transportar a onda de cisalhamento e de superfície, a onda longitudinal viaja mais rápido e é mais fácil de ser detectada em ensaios de campo. Conseqüentemente, a onda longitudinal é a mais

utilizada para a caracterização das propriedades da madeira (WANG; 2013; PEDROSO, 2014).

A modelagem matemática da propagação de ondas longitudinais pode ser realizada de forma unidimensional e tridimensional. Na forma unidimensional, considera-se a madeira um material longo, delgado e isotrópico. Para este caso, tensão e inércia não são considerados na direção transversal e é aceito que as ondas longitudinais se propagam em uma forma de onda plana (frente de onda). Nesse caso, a velocidade da onda é independente da razão de Poisson e é dada pela Equação 1 (BUCUR; LANCELEUR; ROGE, 2002; WANG, 2013):

$$C_0 = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad \text{Eq.(1)}$$

Em que C_0 é a velocidade da onda longitudinal, E é o módulo de elasticidade longitudinal e ρ é a densidade do material.

Para a forma de onda tridimensional, considera-se um meio elástico isotrópico infinito ou ilimitado e um estado triaxial de estresse. A frente da onda longitudinal que se propaga através de tal meio não é mais plana. A propagação de ondas é governada pela Equação 2, chamada de equação de onda tridimensional longitudinal (WANG, 2013):

$$C = \sqrt{\frac{(1-\nu) E}{(1+\nu) \cdot (1-2\nu) \rho}} \quad \text{Eq. (2)}$$

Em que C é a velocidade da onda longitudinal em meio ilimitado, ν é a razão de Poisson do material, E é o módulo de elasticidade longitudinal e ρ é a densidade do material.

Para diferenciar da velocidade da onda longitudinal em uma haste fina (unidimensional), o termo “onda tridimensional” é utilizado para o meio ilimitado (WANG, 2013). A velocidade da onda é dependente da densidade e de dois parâmetros elásticos, o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson (PEDROSO, 2014).

A modelagem matemática da propagação de ondas também pode ser realizada pela equação da impedância acústica. A impedância acústica, z , de um material é a razão entre a pressão acústica e a velocidade da partícula associada. Para ondas planas, a impedância, z é igual ao produto da densidade (ρ) e da velocidade do som no meio (C_0) (WEGST, 2006). Sendo dada pela Equação 3.

$$Z = C_0 \cdot \rho \quad \dots\dots\dots \quad \dots\dots\dots \quad \text{Eq. (3)}$$

A impedância acústica (Z) de um material é a resistência ou dificuldade que o material opõe à passagem do som. Não foram encontrados artigos utilizando esta modelagem para estimativa da densidade da madeira. Porém ela é utilizada pela geofísica para o estudo de reservatórios de petróleo em águas profundas (SANCEVERO et al., 2006).

2.3.2 Propagação de ondas na madeira

Segundo Bucur (2005), a medição das velocidades das ondas ultrassônicas na madeira é a base da avaliação não destrutiva de suas propriedades elásticas ou viscoelásticas. Dessa forma, no uso aplicado, a propagação de ondas de ultrassom apresenta muita versatilidade, tanto em árvores, toras e em peças estruturais. Conforme as Equações 1 e 2, pode-se determinar as propriedades mecânicas da madeira usando a velocidade de propagação do som. Conhecendo-se o módulo de elasticidade da madeira e a velocidade de propagação do som, pode-se obter a densidade do material, sendo esta a proposta desta pesquisa.

Muitos pesquisadores e empresas utilizam a propagação de ondas ultrassônicas como método não destrutivo para ensaios de propriedades mecânicas e controle de qualidade (SILVA, GONÇALVES, 2007; PEDROSO, 2014; ROSS, 2015). Os métodos que utilizam as ondas ultrassônicas são empregados, principalmente, para determinar as constantes elásticas da madeira, com destaque para a obtenção do módulo de elasticidade dinâmico (ESPINOSA et al., 2018a; ESPINOSA et al., 2018b; PEDROSO, 2011; BUCUR, 2005).

Existem métodos que utilizam o princípio do pulso-eco (Tomografia), possibilitando formar a imagens de anéis de crescimento da madeira e identificar osos no tronco (Controle de qualidade) (NICOLOTTI et al., 2003; ARCINIEGAS et al., 2014; SOCCO et al., 2004). Há métodos que empregam as ondas de tensão (*stress wave*),

com ondas emitidas a partir da batida de martelos num emissor e utiliza-se um receptor de sinais, este método obtém o tempo de propagação do som na madeira (VAZQUEZ et al., 2015). Outro método muito comum é a propagação do ultrassom, que utiliza um transdutor emissor e um receptor. Este método visa à estimação das constantes elásticas da madeira ou o controle de qualidade da integridade estrutural da madeira. No Quadro 2, são apresentados os nomes de alguns equipamentos comerciais empregados para a realização dos ensaios supra citados (BRASHAW et al., 2009; PEDROSO, 2011; ROSS, 2015).

Os parâmetros de propagação da onda ultrassônica em uma estrutura sólida podem ser influenciados por uma série de fatores, como as propriedades físicas do substrato, características geométricas da amostra em níveis micro e macroscópico, as condições do meio (temperatura, teor de umidade, carregamento mecânico) e das condições de medições (sensibilidade e resposta de frequência dos transdutores, o seu tamanho e localização, o meio de acoplamento e a dinâmica característica do equipamento eletrônico) (BUCUR, BOHNKE 1994; BUCUR, 2005).

Quadro 2 - Equipamentos para realização de ensaios não-destrutivos

Fabricante	Equipamento	Aplicação
Argus	Picus tree tomography	Tomografia acústica
Brookhuis Micro Electronics	TimberLumber Grader	Ressonância
James Instruments	V-Meter MK IV	Ultrassom
Fibre-Gen	Hitman ST300	Onda de tensão
Dynalyse AB	Dynagrade Precigrader	Ressonância
GreCon	UPU3000	Ultrassom
IML	Impuls hammer	Onda de tensão
Fakopp	UltraSonic Timer Microsecond Timer	Ultrassom Ondas de Tensão

Fonte: Brashaw et al., 2009, adptado.

2.4 VARIÁVEIS QUE INFLUENCIAM NA PROPAGAÇÃO DE ONDAS NA MADEIRA

2.4.1 Planos de simetria da madeira

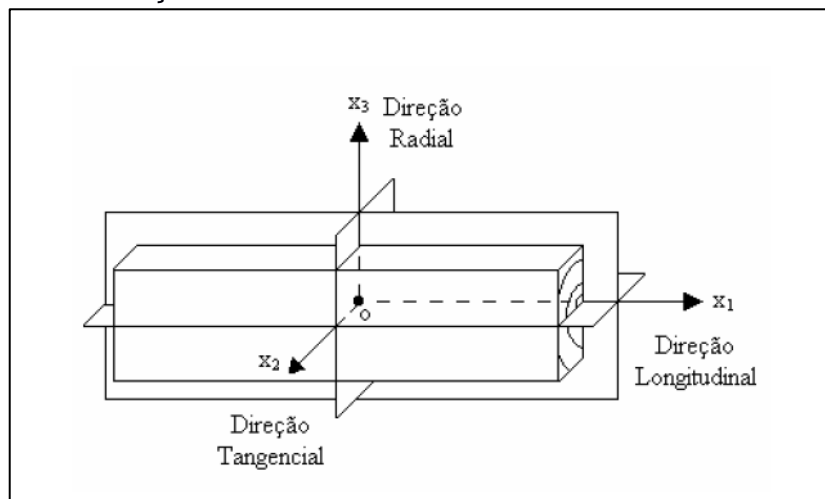
Um corpo é considerado homogêneo quando a matéria que o constitui, sempre que retirado o menor elemento, possui as propriedades físicas específicas desse

corpo. Um material é considerado isotrópico quando as suas propriedades elásticas são consideradas iguais em todas as direções (CALLISTER, 2008).

Quando as propriedades elásticas do material são diferentes em direções distintas, o material pode apresentar comportamento ortotrópico ou anisotrópico. Os materiais têm comportamento ortotrópico quando as propriedades num plano são iguais, mas distintas das que ocorrem numa direção ortogonal a esse plano. Terá comportamento anisotrópico quando as propriedades diferem com a direção considerada. Um exemplo de material elástico ortotrópico é a madeira (BUCUR, 2005).

A abordagem do estudo dos mecanismos de propagação de ondas ultrassônicas em madeira tem se fundamentado nas mesmas hipóteses consideradas na avaliação e estudo de suas características e propriedades mecânicas. Dessa forma a madeira é considerada um sólido ortotrópico. Desprezando-se a não homogeneidade e a curvatura das camadas de crescimento anual, é possível distinguir, em uma peça de madeira, três planos de simetria elástica, conforme ilustrado na Figura 2 (CARRASCO, AZEVEDO, 2003; BUCUR, 2005).

Figura 2 - Planos e direções de simetria da madeira



Fonte: Carrasco e Azevedo (2003).

O primeiro plano, denotado por x_2Ox_3 , cujo vetor normal unitário é paralelo ao eixo x_1 , é perpendicular à direção das fibras da madeira. O segundo plano, também denominado plano tangencial, definido por x_1Ox_2 e cujo vetor normal unitário está na direção do eixo x_3 , é paralelo às camadas de crescimento anual. O terceiro plano, conhecido como plano radial, denotado por x_1Ox_3 , é mutuamente perpendicular aos outros dois planos e seu vetor normal unitário é paralelo à direção do eixo x_1 . As direções dos eixos de simetria x_1, x_2 e x_3 são especialmente denominadas direção

longitudinal L, tangencial T e radial R, respectivamente (CARRASCO, AZEVEDO, 2003).

2.4.2 Módulo de elasticidade da madeira

O módulo de elasticidade é a razão entre a tensão e a deformação na direção da carga aplicada, sendo a máxima tensão que o material suporta sem sofrer deformação permanente. A elasticidade implica que deformações produzidas por baixa tensão são completamente recuperáveis após a remoção das cargas. Quando carregado para níveis de tensão mais altos, deformação ou falha plástica ocorre. A madeira, por ser considerada um material ortotrópico, ou seja, as propriedades mecânicas são únicas e independentes nas três direções mutuamente perpendiculares (longitudinal, radial e tangencial), exibe três módulos de elasticidade, denotados por EL, ER e ET, que são, respectivamente, os módulos elásticos ao longo dos eixos longitudinal, radial e tangencial da madeira. Estes módulos são geralmente obtidos a partir de testes de compressão; contudo, os dados para ER e ET não são extensos (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 2010).

As relações elásticas e as constantes elásticas variam entre espécies, com o teor de umidade e com a massa específica. Acima do ponto de saturação da fibra, o módulo de elasticidade tende a ser constante e por isso ele é geralmente definido a 12% de umidade (Teor de umidade de equilíbrio da madeira) e com a madeira verde (Teor de umidade acima do ponto de saturação da fibra). O módulo de elasticidade, determinado a partir da flexão, EL, e não a partir de um teste axial, pode ser o único módulo de elasticidade disponível para uma espécie. Geralmente, estes dados são apresentados em valores médios por espécie já adulta. O módulo de elasticidade dentro de uma espécie sofre influência da idade do indivíduo e tende a apresentar uma taxa de crescimento acentuada até a árvore formar o lenho adulto (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 2010).

2.4.3 Coeficiente de Poisson

Quando submetido a uma força de tração axial, um corpo deformável não apenas se alonga, mas também se contrai lateralmente. Da mesma forma, uma força de compressão que age sobre um corpo provoca contração na direção da força e, no entanto, seus lados se expandem lateralmente. No início do século XIX, o cientista

francês S. D. Poisson percebeu que, dentro da faixa elástica, a razão entre essas deformações é uma constante. Essa constante é denominada coeficiente de Poisson, ν , e seu valor numérico é único para um determinado material homogêneo e isotrópico (HIBBELER, 2010). Em termos matemáticos (Eq. 4):

$$\nu = - \frac{\varepsilon_{lat}}{\varepsilon_{long}} \dots\dots\dots \text{Eq. (4)}$$

Em que ε_{lat} é a deformação lateral e ε_{long} é a deformação longitudinal.

Essa expressão tem sinal negativo porque o alongamento longitudinal (deformação positiva) provoca contração lateral (deformação negativa) e vice versa. O coeficiente de Poisson é adimensional e, para a maioria dos sólidos não-porosos, seu valor encontra-se, em geral, entre 1/4 e 1/3. O valor máximo possível para o coeficiente de Poisson é 0,5. Portanto, $0 \leq \nu \leq 0,5$ (HIBBELER, 2010).

Como a madeira é considerada, de forma simplificada, um sólido ortotrópico. Isso significa que suas propriedades são influenciadas por três planos mutuamente perpendiculares de simetria elástica, fazendo com que haja 6 coeficientes de Poisson diferentes (radial-longitudinal/RL, longitudinal-radial/LR, radial-tangencial/RT, tangencial-radial/TR, longitudinal-tangencial/LT e tangencial-longitudinal/TL) (PEDROSO, 2014). A primeira letra da sigla refere-se à direção da tensão aplicada e a segunda letra na direção da deformação lateral. Por exemplo, LR é a razão de Poisson para deformação ao longo do eixo radial causada por tensão ao longo o eixo longitudinal (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 2010).

Os coeficientes de Poisson da madeira apresentam grandes variações entre espécies. No entanto, em função da dificuldade de serem obtidos, Bodig e Jayne (1982) sugerem valores médios gerais para coníferas e folhosas. Wang (2013) apresenta resultados de Bodig e Goodman (1973) no qual sugere um valor médio de 0,37 para o coeficiente de Poisson ν LR, tanto para coníferas como para folhosas. Considerando que o carregamento na árvore está aplicado na direção longitudinal (L), o coeficiente ν LR é o que tem maior interesse para o estudo da velocidade da onda ultrassônica obtida em árvores (PEDROSO, 2014).

Por não ser possível determinar a razão de Poisson de madeira verde na forma de troncos de árvores, Wang et al. (2007) derivou o valor ν LR com base em dados empíricos sob a suposição de que a onda viaja dentro de um tronco como uma onda

de dilatação. Os valores da razão de Poisson obtidos ficaram no intervalo de 0,222-0,378, com um valor médio de 0,322. Os autores concluíram que o ajuste da velocidade de propagação da onda na árvore baseada em razões de Poisson dependentes da espécie foi considerado eficaz. O estudo de Wang et al. (2007) demonstra que é possível obter a razão de Poisson de uma espécie específica por meio de métodos numéricos utilizando dados experimentais e a Equação 2.

2.4.4 Teor de umidade

O teor de umidade das árvores vivas varia entre espécies e tem forte correlação com a densidade da madeira. As madeiras leves (menor densidade), por serem mais porosas, apresentam maior quantidade de água que as madeiras mais densas. Da mesma forma, o alburno, por ser formado por células cuja função principal é a condução da água, apresenta um conteúdo de umidade maior que o cerne (OLIVEIRA et al., 2005).

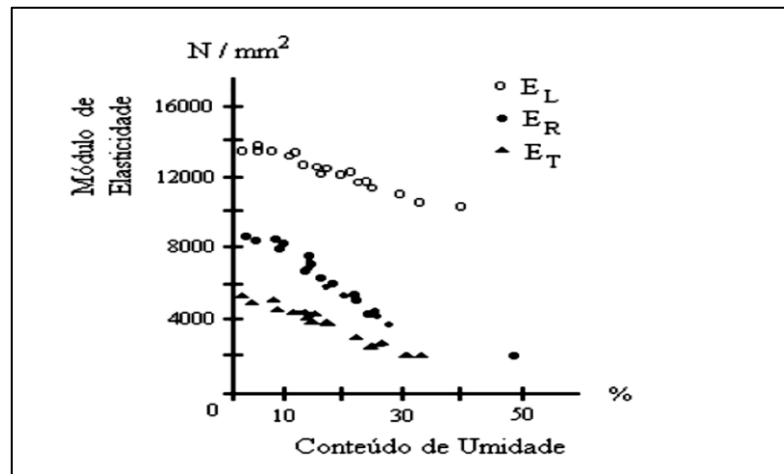
A umidade da madeira na árvore pode variar de 31 a 249% no cerne e de 40-213% no alburno (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 1987). Oliveira et al. (2005), estudando sete espécies do gênero *Eucalyptus*, encontrou teores de umidade variando de 62 a 102%. Neste mesmo estudo, os pesquisadores observaram que, para as espécies com teores de umidade mais baixos, foram encontrados os maiores valores de densidade. Os extremos foram o *Corymbia citriodora*, com 62% de umidade, para o qual se obteve densidade básica igual a $0,73 \text{ g/cm}^3$, e o *Eucalyptus grandis*, com 102% de umidade, cuja densidade básica foi igual a $0,49 \text{ g/cm}^3$.

A propagação de ondas ultrassônicas na madeira é sensivelmente afetada pelo teor de umidade. Portanto, o estudo da influência da umidade nas propriedades acústicas da madeira constitui o primeiro passo para se compreender a relação entre as constantes de propagação e o teor de umidade da madeira (BUCUR, 2005).

Como a velocidade de propagação de ondas na madeira é função de sua densidade e de suas constantes elásticas (Equação 1 e 2), é importante conhecer o comportamento destas constantes em função do gradiente de umidade. Sabe-se que há redução da resistência e do módulo de elasticidade com o aumento do conteúdo de umidade, até o ponto de saturação. Este comportamento é mostrado na Figura 3. Nesta figura, as letras EL, ER e ET representam os módulos de elasticidade nas direções longitudinal, radial e tangencial, respectivamente. O aumento do conteúdo

de umidade, acima do ponto de saturação, não influencia significativamente estes três parâmetros mecânicos (BUCUR, 2005).

Figura 3 - Influência do conteúdo de umidade nos módulos de elasticidade de Abeto.

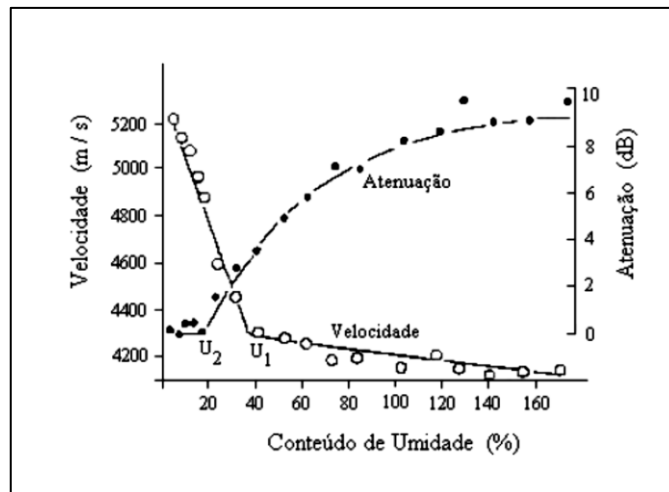


Fonte: Adaptado de Bucur (2005).

Conhecendo-se a influência da umidade nas propriedades elásticas, passa-se ao estudo da relação existente entre a velocidade de propagação da onda, a correspondente atenuação e o teor de umidade (Figura 4).

A velocidade diminui à medida que o teor de umidade aumenta, ao passo que a atenuação aumenta conforme cresce o conteúdo de umidade. O máximo valor de velocidade e o mínimo valor de atenuação são obtidos quando a madeira se encontra seca.

Figura 4 - Velocidade do pulso ultrassônico ao longo da direção longitudinal e a correspondente atenuação como funções do conteúdo de umidade para metasequóias.



Fonte: Adaptado de Bucur (2005).

Nota-se que a variação da velocidade em função do teor de umidade possui um ponto crítico, U_1 , correspondente ao ponto de saturação das fibras, enquanto a variação da atenuação em função do teor de umidade possui um ponto crítico U_2 , diferente de U_1 e abaixo deste. Segundo Bucur (2005), a análise desse gráfico permite concluir que:

- A velocidade de propagação decresce rapidamente à medida que o conteúdo de umidade aumenta, até o ponto de saturação U_1 . A partir deste ponto, a variação é muito pequena;
- A atenuação é praticamente constante para baixos valores de umidade, mas aumenta sensivelmente a partir do ponto crítico U_2 ;
- A velocidade de propagação do pulso é consideravelmente influenciada pela existência de água de adesão, enquanto a atenuação é sensivelmente influenciada pela presença de água livre;
- O ponto crítico U_1 corresponde ao ponto de saturação das fibras e o ponto crítico U_2 corresponde ao valor de umidade a partir do qual os elementos anatômicos começam a reter água livre.

Como as árvores vivas estão com umidade acima do ponto de saturação das fibras, a propagação de ondas de ultrassom pode ser uma técnica promissora para ser utilizada em árvores no campo (WANG, 2013). Uma vez que a velocidade de propagação da onda ultrassônica na faixa de umidade acima do ponto de saturação das fibras é mais estável, sofrendo menos influência da umidade.

2.4.5 Frequência da onda ultrassônica

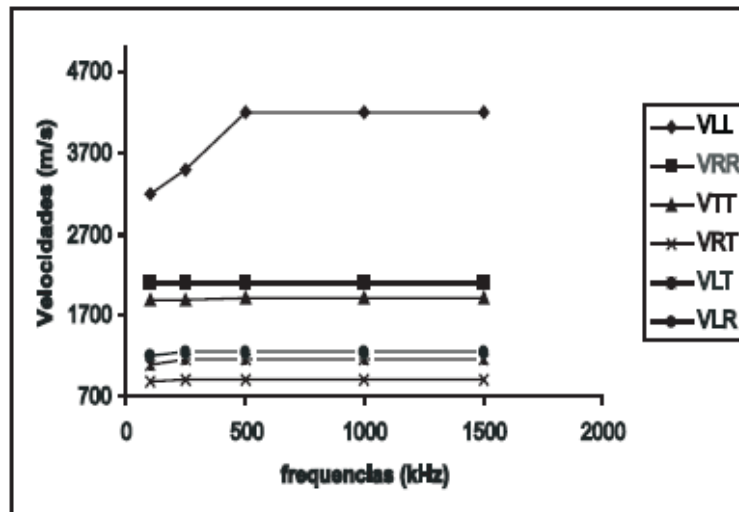
Bucur e Feeney (1992), citados por Bucur (2005), estudaram a influência da frequência nas velocidades das ondas ultrassônicas propagando em madeira. As frequências utilizadas foram de 100, 250, 500, 1.000 e 1.500 kHz. Ondas no sentido longitudinal e ondas no sentido transversal foram utilizadas. Comprimentos de pulso de quatro ciclos foram empregados, produzindo assim uma onda ultrassônica de banda estreita na frequência acionada. Os resultados dos autores podem ser vistos na Figura 5.

A V_{LL} (Velocidade da onda no sentido longitudinal) é fortemente influenciada pela frequência, com um grande aumento na velocidade de 100 a 500 kHz, após este intervalo fica praticamente constante de 0,5 a 1,5 MHz. O valor relativamente pequeno de velocidade em 100 kHz foi provavelmente induzido por dispersão geométrica (BUCUR, 2005).

A V_{RR} (Velocidade da onda no sentido radial), V_{TT} (Velocidade da onda no sentido tangencial), V_{RT} (Velocidade da onda no sentido radial-tangencial), V_{LT} (Velocidade da onda no sentido longitudinal-tangencial) e V_{LR} (Velocidade da onda no sentido longitudinal-radial) são insensíveis à variação da frequência para valores superiores a 250 kHz (BUCUR, 2005).

A escolha do campo de frequência mais interessante da investigação deve ser relacionada a um comprimento de onda comparável às dimensões anatômicas dos elementos que constituem a madeira, pois estes são os que vibram como ressonadores elementares. Somente o componente de frequência que corresponde à frequência natural desses ressonadores pode fornecer uma resposta detalhada ao sistema de interação madeira-onda (BUCUR, 2005).

Figura 5 - Influência da frequência na velocidade de propagação da onda ultrassônica na madeira



Fonte: Trinca e Gonçalves (2009).

2.5 COMPONENTES BÁSICOS DE UM ULTRASSOM

2.5.1 Transdutor Piezoelétrico

O efeito piezoelétrico foi descoberto em 1880 por Pierre e Jacques Curie, durante seus sistemáticos estudos do efeito da pressão na geração de carga elétrica pelos cristais de quartzo, esfarelita (ZnS) e turmalina (PIETTE; LENOIR; REYCHLER, 1990). O efeito consiste basicamente na conversão de energia mecânica em elétrica. Posteriormente, em 1881, por análise termodinâmica, Lippman previu a existência do “efeito piezoelétrico inverso”, que consiste no aparecimento de uma deformação do material quando submetido a um campo elétrico (PIETTE; LENOIR; REYCHLER, 1990).

O transdutor de ultrassom utiliza cristais piezoelétricos que operam na frequência acima de 20 kHz. Dessa forma, este dispositivo gera energia mecânica (ondas ultrassônicas) a partir da excitação elétrica. Atuando como receptor, ele recebe a energia mecânica. Após interação com o meio de propagação, esta energia é convertida em energia elétrica, de forma que se pode processar este sinal em um microcontrolador (PEIXOTO et al., 2010).

A frequência de ressonância é uma propriedade natural do cristal piezoelétrico usado. Quanto menor a espessura do cristal, maior será sua frequência de vibração. A escolha do transdutor passa pela definição da frequência a ser utilizada nos ensaios/exames de ultrassom (PEIXOTO et al, 2010).

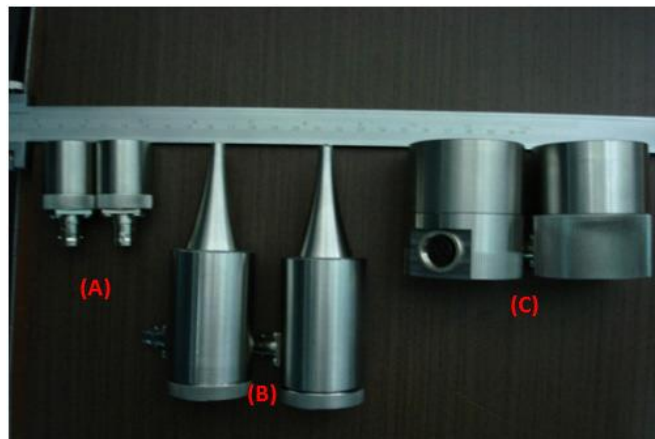
Segundo Trinca e Gonçalves (2009), devido à estrutura interna da madeira, composta de elementos relativamente grandes quando comparados, por exemplo, à

estrutura cristalina dos metais, as aplicações de ultrassom na madeira, no concreto e em materiais compósitos exigem o uso de transdutores de baixa frequência (20 a 1.000 kHz) heterogêneos, com diferentes tipos de elementos constituintes.

Na madeira, em frequências entre 1,0 e 1,5 MHz, o comprimento de onda é aproximadamente igual à dimensão de seus elementos anatômicos, de forma que seriam as máximas frequências indicadas para a avaliação desse material (BUCUR, 2005).

Outro ponto importante é o tipo do transdutor, pois existem várias classificações para os transdutores. Entre elas, pode-se citar cinco tipos usuais: (1) Planos ou retos; (2) Angular; (3) Duplo-cristal; (4) Phased Array; (5) Multielementos lineares e (6) Exponenciais (Figura 6) (OLIVEIRA, 2015).

Figura 6 - Transdutores - (A) Transdutores Planos de 150 kHz, (B) Transdutores Exponenciais, (C) Transdutores Planos 54 kHz.



Fonte: Gimenez (2012).

Os transdutores planos ou retos (1) apresentam cabeçotes cilíndricos com um monocristal gerador de ondas longitudinais perpendiculares a superfície de acoplamento. O transdutor emite um pulso ultrassônico que atravessa o material inspecionado e é recebido pelo transdutor receptor, que converte a onda mecânica no sinal elétrico correspondente. Os angulares (2) diferem dos transdutores retos pelo fato do cristal formar um determinado ângulo com a superfície do material (OLIVEIRA, 2015).

Os Transdutores duplo-cristal (3), utilizam dois cristais, sendo que cada um dos cristais funciona somente como emissor ou somente como receptor, separados por um material acústico isolante, possibilitando uma resposta clara. Os Phased Array (4) apresentam, num mesmo transdutor, dezenas de pequenos cristais, cada um ligado a

circuitos independentes capazes de controlar o tempo de excitação de cada um destes cristais. O resultado é a modificação do comportamento do feixe sônico emitido pelo conjunto de cristais ou pelo transdutor (OLIVEIRA, 2015).

Os transdutores Multielementos lineares (5) apresentam vários cristais e sua base acoplante é produzida com material polimérico capaz de se adequar a superfície irregular do material em teste (OLIVEIRA, 2015).

Os Exponenciais (6) apresentam superfícies de contato pontuais, com áreas muito reduzidas, sendo recomendados para utilização em leituras sobre superfície de altas irregularidades e curvas (GIMENEZ, 2012). Dentre os transdutores citados no texto, os mais usados para ensaios não destrutivos em madeira são os planos e os exponenciais.

2.5.2 Filtros

Um filtro é capaz de atenuar determinadas frequências do espectro do sinal de entrada e permitir a passagem dos demais. Nos aparelhos de ultrassom, são usados filtros eletrônicos que são circuitos que executam as funções de processamento do sinal recebido eliminando ruídos. Os ruídos são sinais em frequência não desejada (MAIA et al., 2009).

Os filtros eletrônicos podem ser classificados em passivos ou ativos, analógicos ou digitais. Eles também podem ser classificados quanto ao tipo de sinal recebido como passa-alta, passa-baixa, passa-faixa, rejeita-faixa ou passa-tudo (MAIA et al., 2009).

2.5.3 Amplificador de sinal

O amplificador é um componente eletrônico capaz de amplificar sinais e realizar operações com eles, que podem ser somas, subtrações, multiplicações e divisões, sendo amplamente utilizado em circuitos eletrônicos para diversas operações lógicas (GALVÃO et al., 2001).

2.5.4 Microcontrolador

Os microcontroladores são dispositivos constituídos de uma unidade central de processamento, memória (armazenagem de dados e programas) e periféricos. Este dispositivo eletrônico possui tamanho reduzido. Em uma única pastilha de silício, são inseridos milhões de componentes por meio da técnica de circuitos integrados. Estes microcontroladores estão presentes em vários equipamentos digitais, entre eles os ultrassons (MIYADAIRA, 2013; MAIA et al., 2009).

No Ultrassom desenvolvido por Herrera (2018), o microprocessador é responsável pelo gerenciamento de todas as tarefas e rotinas do equipamento, coordenando todo o fluxo de processo do equipamento. Este processo consiste em: excitação do transdutor emissor de ultrassom; recepção do sinal por meio do transdutor receptor; amplificação do sinal recebido; filtragem; manipulação do sinal para cálculo da velocidade de propagação; geração dos resultados do diagnóstico e exibição no display.

2.5.5 Software

O *software* é um complemento do *hardware*. Este tem a função de gerenciar e controlar as tarefas realizadas pelo microcontrolador e permitir a interação com o usuário, mostrando os resultados no *display* e recebendo comandos pré-programados. O *software* pode ser desenvolvido em diferentes linguagens de programação, como, por exemplo, as linguagens C e C++, ou utilizando as bibliotecas disponíveis dos microcontroladores comerciais, como o Arduino (MOURA et al., 2020).