UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS
DEPARTAMENTO DE ESTRUTURAS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

RAUL CUTRIM SOARES GRANJA

ANÁLISE DE VIABILIDADE DE CLASSIFICAÇÃO DE ESPÉCIES DE MADEIRA POR MÉTODO DE ULTRASSOM

São Luís - MA
2016

RAUL CUTRIM SOARES GRANJA

ANÁLISE DE VIABILIDADE DE CLASSIFICAÇÃO DE ESPÉCIES DE MADEIRA POR MÉTODO DE ULTRASSOM

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Estadual do Maranhão como parte das exigências para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Aurélio Barros Aguiar

Co-orientador: Marcelo José Pedrosa Helal

São Luís - MA
2016

Granja, Raul Cutrim Soares.
Análise de viabilidade de classificação de espécies de madeira por método de ultrassom / Raul Cutrim Soares Granja. – São Luís, 2016.

66 f

Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual do Maranhão, 2016.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Aurélio Barros Aguiar.

1.Madeira. 2.Ultrassom. 3.Ensaio não-destrutivo. I.Título

CDU: 620.179-035.3

RAUL CUTRIM SOARES GRANJA

ANÁLISE DE VIABILIDADE DE CLASSIFICAÇÃO DE ESPÉCIES DE MADEIRA POR MÉTODO DE ULTRASSOM

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Estadual do Maranhão como parte das exigências para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovada em: 15/07/2016.

BANCA EXAMINADORA

Orientador: **Prof. Dr. Eduardo Aurélio Barros Aguiar**

Prof. Msc. Ivar Ribeiro Hortegal
Universidade Estadual do Maranhão

Prof. Msc. João Celso Martins Marques
Universidade Estadual do Maranhão

São Luís - MA
2016

A Deus; À minha família, por ser minha estrutura
e fonte de inspiração.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por abençoar a mim, à minha família e aos meus amigos, todos os dias, em sua infinita misericórdia;

À minha família – meu pai Francisco, minha mãe Hellen, meu irmão Victor e minha irmã Ingrid, minhas avós Marilde e Maria, minha tia Maria e meu padrinho Robert - que, initerruptamente, esteve ao meu lado em todos os momentos e decisões da minha vida e é responsável por ter construído o que me tornei;

Aos meus amigos, os quais tive a imensa sorte de encontrar no caminho. (Amigos de ninguém; Suricate; Bora; SM; GDP e Fofis);

Aos amigos Mateus Brandão, Amanda Sousa, Gustavo Beckman, Maurício Diniz, Vinicius Ribeiro e Pedro Igor, que participaram diretamente do desenvolvimento deste trabalho;

Ao professor e orientador Eduardo Barros, por ter proposto o desafio de desenvolver um tema importante e notável e ao co-orientador, o arquiteto Marcelo Helal, por ter disponibilizado todos os materiais usados para estudo;

Ao laboratorista Jurandir Amorim, por ter sido fundamental na realização dos ensaios realizados no laboratório.

“When I heard the learn’d astronomer,
When the proofs, the figures, were ranged in columns before me,
When I was shown the charts and diagrams, to add, divide, and measure them,
When I sitting heard the astronomer where he lectured with much applause in the lecture-room,
...
... rising and gliding out I wander’d off by myself,
In the mystical moist night-air, and from time to time,
Look’d up in perfect silence at the stars.”

Walt Whitman

RESUMO

Classificar madeiras é uma tarefa que ainda carece de muito estudo aprofundado. Isso porque, diante da extensa variabilidade de espécies existentes, faz-se difícil a concepção de padronização. Dessa forma, pesquisas estudam o comportamento das espécies na tentativa de encontrar correlações entre elas. Foi publicada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas, em 2007, norma para classificação de madeira dicotiledônea por método de ensaio não-destrutivo, a NBR 15521 (2007). A norma classifica vigas estruturais de madeiras tropicais, com média de idade de 45 anos, em faixas de velocidades de propagação de ondas ultrassônicas com teor de umidade acima do PSF (Ponto de saturação das fibras), e as associa com faixas de rigidez obtidas a partir da velocidade de propagação de ondas nas amostras e da massa específica aparente, nas condições de seca ao ar. No entanto, devido às características expostas, este estudo buscou analisar espécies de madeira dicotiledôneas, em corpos-de-prova de dimensões de 60x60x100mm e 60x60x200mm, buscando encontrar correlações entres elas, mediante suas particularidades. Para isso, cada amostra passou pelos mesmos processos e ensaios. Todos os procedimentos de ensaios de ultrassom obedeceram ao passo-a-passo indicado pela NBR 15521 (2007), na tentativa de adequar as peças às faixas de classificação sugeridas, ou, ainda, propor classificação em faixas dos parâmetros de maior relevância. As leituras de ultrassom foram realizadas tanto no sentido longitudinal da peça, quanto no sentido transversal, em dois teores de umidade diferentes. Devido à configuração anisotrópica das madeiras, que varia suas características e propriedades conforme a direção, os resultados mostraram-se bastante distintos comparando algumas correlações, como a influência da umidade nas velocidades se propagando nos dois sentidos das amostras. Em contrapartida, outros parâmetros apresentaram bons resultados como, por exemplo, a correlação entre as velocidades das ondas no sentido paralelo às fibras e outras variáveis como umidade e massa específica aparente.

Palavras-chave: Madeira; Ultrassom; Ensaio não-destrutivo.

ABSTRACT

Classifying wood is a task that still lacks specific study. This is due to the fact that, facing the extensive variability of existing species, it is hard to define a standard. Based on this context, researches study the species behavior trying find correlations between them. In 2007, a standard to classify dicotyledon wood through non destructive testing was published by ABNT, the standard NBR 15521 (2007). The standard classify structural beams made from tropical wood, with 45 years old average, based on the propagation velocities of ultrassonic waves, while having moisture content above the Point of Fiber Saturation (PSF), and relates them with stiffness levels obtained from the propagation velocities of ultrassonic waves on the samples and their bulk density, while under ambient humidity levels. However, due to the presented characteristics, this study aimed to analyse dicotyledon wooden species, as 60x60x100mm and 60x60x200mm specimen, seeking correlation between them based on their individual characteristics. To do so, every specimen was submited to the same processes and tests. Every ultrassonic testing procedure was performed as states the NBR 15521 (2007) standard, trying to adequate the specimens to the classification rank sugested or, if possible, to classify the samples based on parameters of greater relevance. The ultrassonic waves readings were performed in both longitudinal and transversal directions, on specimens with two different moisture content. Due to the anisotropic configuration of wood, which varies their characteristics and properties according to the analysed direction, the results were quite distinct while comparing humidity influence on the propagation velocity readings on both directions. However, analysing longitudinal propagation velocities, moisture content and bulk density simultaneously, good correlations were obtained.

Keywords: Timer samples; Ultrassound; Non-destructive test.

LISTA DE FIGURA

Figura 1 - Esquema de ortotropia da madeira 19
Figura 2 - Gráfico velocidade X umidade 25
Figura 3 - Influência da frequência na medição da velocidade de propagação de ondas de ultrassom para espécie Eucalyptus grandis. 29
Figura 4 - Influência da frequência na medição da velocidade de propagação de ondas de ultrassom para espécie Pinus elliottii 30
Figura 5 - Correlação entre velocidade do ultrassom e o módulo de elasticidade estático à flexão para vigas da espécie Fichte, a 12% de umidade. 31
Figura 6 - Corpos-de-prova do estudo 37
Figura 7 - Equipamento de ultrassom Pundit 38
Figura 8 - Leitura direta de ultrassom no corpo-de-prova 39
Figura 9 - Ensaio de ultrassom 39
Figura 10 - Monitoramento de dados 40
Figura 11 - corpos-de-prova em estufa para o ensaio de umidade 41
Figura 12 - amostras submersas em água para ensaio de reumidificação 41
Figura 13 - Umidade X Velocidade 47
Figura 14 - Umidade X Velocidade 48
Figura 15 - Umidade X Velocidade 48
Figura 16 - Umidade X Velocidade 49
Figura 17 - Umidade X Velocidade 49
Figura 18 - Umidade X Velocidade 49
Figura 19 - Umidade X Velocidade 50
Figura 20 - Umidade X Velocidade 50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classes de umidade da madeira 17
Tabela 2 - Valores médios, por idade da árvore, de Velocidade longitudinal (V_{LL}) obtidos nas vigas na condição saturada e densidade aparente (ρ), V_{LL}, coeficiente de rigidez (C_{LL}), módulo de elasticidade (E_M) e módulo de ruptura (f_m) obtidos em flexão, na condição seca ao ar (~12% de umidade)..... 27
Tabela 3 - Valores dos módulos de elasticidade médios para as classes de resistências da norma EN 338 à 12% de umidade 32
Tabela 4 - Faixas de velocidade para classificação de peças estruturais da espécie Fichte, com 12% de umidade, de acordo com a norma EN 338..... 32
Tabela 5 - Classes de rigidez de peças estruturais de madeira da espécie Cupiúba utilizando velocidade de propagação da onda de ultrassom 33
Tabela 6 - Classes de rigidez de peças estruturais de madeira da espécie Eucalipto Citriodora utilizando velocidade de propagação da onda de ultrassom 33
Tabela 7 - Classes de rigidez de peças estruturais de madeira da espécie Pinus elliottii utilizando velocidade de propagação da onda de ultrassom 33
Tabela 8 - Classificação por ultrassom da madeira dicotiledônea (UD) 34
Tabela 9 - Faixa de classificação por ultrassom da madeira de Eucalipto proveniente de árvores com idade superior a 25 anos (E. grandis de 34 anos, E. pellita de 26 anos e o E. globulus de 28 anos) 35
Tabela 11 - Valores médios de cada espécie para umidade (Ueq), densidade aparente (ρap), velocidade de propagação das ondas nas direções longitudinal (VLL) e transversal (VTT) e da constante de rigidez obtida no ensaio não destrutivo (CLL), obtidos de ensaios em corpos-de-prova na condição de equilíbrio. 44
Tabela 12 - Valores médios de cada espécie para umidade (Usat), densidade aparente (ρap), velocidade de propagação das ondas nas direções longitudinal (VLLsat) e transversal (VTTsat) e da constante de rigidez obtida no ensaio não destrutivo (CLLsat), obtidos de ensaios em corpos-de-prova após saturação. 45
Tabela 13 - Valores médios totais para umidade (Ueq), densidade aparente (ρap), velocidade de propagação das ondas nas direções longitudinal (VLL) e transversal (VTT) e da constante de rigidez obtida no ensaio não destrutivo (CLL), a partir de ensaios em corpos-de-prova na condição de equilíbrio. 45
Tabela 14 - Valores médios totais para umidade (Usat), densidade aparente (ρap), velocidade de propagação das ondas nas direções longitudinal (VLLsat) e transversal (VTTsat) e da constante de rigidez obtida no ensaio não destrutivo (CLLsat), a partir de ensaios em corpos-de-prova após saturação. 46
Tabela 15 - Análise de significância ANOVA entre os parâmetros de umidade e velocidade de propagação de ondas no sentido longitudinal às fibras. 47
Tabela 16 - Modelo de regressão múltipla para amostragem total com velocidade na condição saturada como variável dependente(VLLsat), e a densidade aparente(ρap), velocidade na condição de equilíbrio(VLL) e umidade(*U*) como variáveis independentes. 51
Tabela 17 - Valores médios da velocidade em U% e da velocidade corrigida para o PSF. 52
Tabela 18 - Modelo de regressão múltipla para amostragem total com velocidade na condição saturada, corrigida para o PSF, como variável dependente (VLL(PSF)), e a densidade aparente(ρap), velocidade na condição de equilíbrio(VLL) e umidade(*U*) como variáveis independentes..... 53

Tabela 19 - Modelos de regressões lineares para velocidade na direção tangencial e o teor de umidade.....54
Tabela 20 - Modelos de regressões lineares múltiplas com V_{LL} como variável dependente e V_{TT} e umidade U(%) como variáveis independentes.....55
Tabela 21 - Análise comparativa da rigidez obtida através do ultrassom e de módulo de elasticidade a compressão paralela às fibras.....57

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

SÍMBOLOS

C_{LL} - coeficiente de rigidez
$E_{C0,k}$, - módulo de elasticidade à compressão estática
E_M - módulo de elasticidade
$E_{M,k}$ - módulo de elasticidade longitudinal obtido no ensaio de compressão paralela às fibras
$f_{C0,k}$ – Resistência característica à compressão das fibras
f_m – módulo de ruptura
m_i – massa inicial
m_s – massa anidra
n - numero de amostras ensaiadas
U – umidade
UD – Classe de madeira dicotiledônea por ultrassom
U_{eq} – Umidade na condição de equilíbrio
U_{sat} - Umidade na condição saturada
V_{12} – Velocidade na condição seca ao ar
V_{LLsat} - Velocidade paralela às fibras na condição saturada
V_{TT} – Velocidade no sentido tangencial às fibras
V_{TTsat} – Velocidade no sentido tangencial às fibras na condição saturada
V_U – Velocidade na condição de umidade U
δ_V – Coeficiente de retratibilidade
λ – comprimento de onda
ρ - densidade aparente
$\rho_{12\%}$ - Densidade aparente na condição seca ao ar
ρ_U – Densidade aparente na condição de umidade U
σ - Tensão
ν - Coeficiente de Rigidez
ε - Deformação específica

SIGLAS

ABNT – associação brasileira de normas técnicas
ANOVA – *analisys of variance*
ASTM - *American Society of Testing Materials*
COPAN – *The Panamerican standards commission*
CV – Coeficiente de variação NBR – Norma Brasileira
EN – Eurocodes
IBAMA - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos renováveis
LPF - Laboratório de Produtos Florestais
MOE – módulo de elasticidade
NBR – Norma brasileira
OH – Hidroxila
PSF – ponto de saturação das fibras
UEMA – Universidade Estadual do Maranhão

UNIDADES DE MEDIDA

°C – graus Celsius
cm – centímetros
g – grama
Hz – Hertz
m – metro
m/s – metros por segundo
mm – milímetro
N – Newton
Pa – pascal

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 14

2 OBJETIVOS 15

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 16

3.1 Características físicas da madeira 16

3.1.1 Umidade 16

3.1.2 Retratibilidade 17

3.1.3 Massa específica 18

3.2 Elasticidade da madeira 18

3.3 Métodos não-destrutivos empregados na determinação de parâmetros de madeiras 20

3.4 Ensaio de ultrassom em madeiras 21

3.4.1 Principais características que influenciam no ensaio de ultrassom 23

3.4.1.1 Teor de umidade 23

3.4.1.2 Idade da árvore 26

3.4.1.3 Geometria do corpo-de-prova 27

3.4.1.4 Frequência dos transdutores 28

3.5 Classificação de madeiras pelo método de ultrassom 30

4 MATERIAIS E MÉTODOS 36

4.1 Considerações iniciais 36

4.2 Pesquisas Bibliográficas 36

4.3 Material 36

4.4 Equipamentos 37

4.5 Ensaio de ultrassom nos corpos-de-prova: 37

4.6 Umidade dos corpos-de-prova 40

4.7 Correção da umidade para determinação de V_{LLsat} 41

4.8 Determinação da Rigidez (C_{LL}) 42

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES 44

5.1 Análise Estatística das médias dos resultados obtidos nas amostras 46

5.2 Análise estatísticas dos parâmetros que influenciam a velocidade de propagação ultrassônica na direção tangencial às fibras 53

5.3 Análises estatísticas da Rigidez das peças de madeira com os demais parâmetros 55

6 CONCLUSÕES 59

7 BIBLIOGRAFIA 61

1 INTRODUÇÃO

Ao longo do tempo, a exploração madeireira ganhou notoriedade na construção civil. O Brasil carrega em sua história uma íntima relação entre o desenvolvimento socioeconômico do país e a utilização da madeira para os mais diversos fins (LORENZI, 2008). As madeiras hoje denominadas nobres, ou, ainda, “de lei”, receberam o adjetivo devido à sua intensa exploração nas florestas brasileiras ao decorrer dos séculos. Segundo Gonzaga (2006), têm melhor aspecto e, por serem mais estáveis, apresentam melhor resistência e estabilidade secadas e tratadas de maneira correta. Além disso, adquirem relevante durabilidade, um fator importante para o seu emprego em estruturas na construção civil.

De acordo com Bartholomeu (2001), um problema recorrente do uso da madeira não só na construção civil, mas também para diversas outras finalidades, é a falta de uma classificação que garanta ao comprador do material que o produto, de fato, tem boa qualidade e obedece suas propriedades mecânicas, evitando que apenas o empirismo seja o fator de identificação. Por este motivo, muitas vezes soluções com a madeira que poderiam ter grande vantagem na engenharia, são rapidamente substituídas pelo emprego de aço e concreto.

A falta de especialização de técnicas que se apliquem a madeira se deve ao fato que, até os dias de hoje, pouco se conhece sobre sua anatomia e propriedades mecânicas. Estudos buscam, através de novas tecnologias e estudos laboratoriais, decifrar o comportamento desta matéria-prima. Os resultados são positivos, porém parcialmente conclusivos.

A literatura referente aos ensaios não-destrutivos de ultrassom em madeiras revela que diversos fatores podem influenciar nos resultados das velocidades e de suas propriedades mecânicas: A idade da árvore; A região em que a árvore fora cortada; a posição em que a amostra se encontrava no interior da árvore; a estrutura interior da amostra (presença de nós, patologias, etc), visualmente invisível; o teor de umidade; etc.

Diante dos fatos, faz-se necessário alimentar estudos que respondam aos questionamentos emergidos, na tentativa de encontrar padrões e métodos que possam ser empregados na classificação de madeiras.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Analisar a presença ou não de correlações entre os parâmetros obtidos em ensaios para as espécies do estudo, além de investigar a viabilidade de se propor uma classificação para para as madeiras dicotiledôneas de Sucupira (*Bowdichiia nítida*), Pau-Roxo (*Peltogyne lecointei*), Fava-Amargosa (*Vataireopsis speciosa*), Jatobá (*Hymenaea courbaril*), Maçaranduba (*Manilkara bidentata*), Pau d'Arco (*Tabebuia serratifolia*) e Sapucaia (*Lecythis usitada*), a partir do método não destrutivo de ultrassom.

2.2 Objetivos Específicos

- Correlacionar as velocidades de propagação de onda, nos sentidos paralelo e normal às fibras, nas amostras de madeira pelo método de Ultrassom com os parâmetros de maior relevância;
- Criar regressões lineares entre as variáveis;
- Determinar a Rigidez das amostras a partir da velocidade de ultrassom nas madeiras na condição de equilíbrio;
- Investigar a viabilidade de classificação das espécies estudadas a partir dos resultados encontrados nos ensaios e nas regressões lineares;

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Características físicas da madeira

Nas madeiras são examinadas: umidade, retratibilidade, densidade, condutibilidade elétrica, térmica e fônica e a resistência ao fogo. Definem o comportamento do material e as alterações que sofre seu estado físico quando ocorrem variações de umidade, de temperatura, ou outras, em seu ambiente de emprego (BAUER, 2008).

3.1.1 Umidade

A madeira, como muitos materiais naturais, é higroscópica e absorve a umidade do ambiente ao seu redor. A umidade relativa e temperatura do ar, assim como a quantidade de água já existente no interior do material, condicionam a troca de umidade entre a madeira e o meio. Essa relação tem influência importante em suas propriedades e performance. Muitos dos desafios encontrados em seu emprego na construção civil devem-se ao teor de umidade ou abundância de água em sua estrutura (FOREST PRODUCTS LABORATORY, 2010).

Segundo Bauer (2008), a madeira apresenta o máximo de resistência mecânica quando completamente seca, o mínimo quando completamente saturada e valores intermediários para diferentes teores de umidade entre esses dois extremos. A água está presente na estrutura da madeira de três formas: água livre, água de impregnação e água de constituição.

Água livre caracteriza a madeira em seu estado de saturação máxima, preenchendo os vazios capilares entre as paredes celulares da estrutura do material. Não tem caráter significativo pois não afeta em seu comportamento. A saturação máxima das paredes celulares constitui o ponto de saturação das fibras (PSF) e dá-se na ordem de 30%. Quando submetida à secagem ao ar, a madeira perde, então, água de impregnação, sofrendo alterações em suas propriedades físicas e mecânicas (GONZAGA, 2006).

Para a realização de projetos de estruturas de madeira, a norma ABNT NBR 7190 (1997) atribuiu classes de umidade que têm por finalidade ajustar as propriedades de resistência e de rigidez da madeira em função das condições ambientais onde permanecerão as estruturas. Estas classes também podem ser utilizadas para a escolha de métodos de tratamentos preservativos das madeiras.

Tabela 1 - Classes de umidade da madeira

Classes de umidade	Umidade relativa do ambiente U_{amb}	Umidade de equilíbrio da madeira U_{eq}
1	≤ 65%	12%
2	65% < U_{amb} ≤ 75%	15%
3	75% < U_{amb} ≤ 85%	18%
4	U_{amb} >85% durante longos períodos	≥ 25%

Fonte: NBR 7190 (1997).

3.1.2 Retratibilidade

É a propriedade que as madeiras apresentam de sofrer alterações de volume e dimensões quando seu teor de umidade varia entre o ponto de saturação ao ar e a condição de seca em estufa. Também denominada contração das madeiras, manifesta-se a retratibilidade como uma consequência da absorção de água das paredes celulósicas das células do tecido lenhoso (BAUER, 2008).

Moreschi (2005) afirma que o aumento de volume (inchamento) se deve principalmente à inclusão de moléculas de água nos espaços microscópicos da parede celular, entre as micelas (feixes formados por moléculas de celulose) e nas suas regiões amorfas, afastando-as e, consequentemente, alterando as dimensões da madeira.

Ainda nesse sentido, a diminuição do volume (contração) deve-se à retirada das moléculas de água destes mesmos espaços microscópicos ocasionando a aproximação das micelas e das moléculas que as constituem e a consequente retração da madeira (MORESCHI, 2005).

O estudo da retratibilidade de uma espécie de madeira é definido pela norma NBR 7091(1997). De acordo com a norma, o corpo-de-prova deve conter umidade acima do ponto de saturação das fibras. Quando o teor de umidade for menor que o ponto de saturação, deve-se umidificar novamente o corpo-de-prova. Para isso, deve ser colocado em um ambiente saturado, com temperatura de 20°C ± 5°C, até que a variação dimensional se estabilize em torno

da diferença de 0,02 mm entre duas medidas sucessivas. A reumidificação do corpo-de-prova deve ser reportada no relatório técnico do ensaio.

Para o estudo do inchamento o corpo-de-prova deve estar seco. Normalmente se utiliza o mesmo tipo de corpo-de- prova empregado para o estudo da retratibilidade. Determinam-se, então, as distâncias entre os lados do corpo-de- prova durante os processos de secagem e de reumidificação, com precisão de 0,01 mm. As distâncias devem ser determinadas com pelo menos três medidas em cada lado do corpo-de-prova (NBR 7190, 1997).

3.1.3 Massa específica aparente

A massa específica aparente, ou densidade, é um índice de compacidade da madeira e expressa a concentração de tecido resistente por unidade de volume. O valor da massa específica é a expressão mais precisa da concentração desses tecidos e da distribuição de material resistente na sua estrutura. Portanto, pode-se afirmar que, as propriedades mecânicas do material estão intrinsecamente ligadas à esta característica. Conhecida a densidade de uma certa madeira, é possível determinar seus parâmetros de resistência (BAUER, 2008).

Os três fatores – massa específica, peso e volume – estão estritamente vinculados. Ou seja, não é possível definir a densidade da madeira senão em condições de umidade determinada. São normalmente referidas à umidade normal de 15% para efeito de comparação (PETRUCCI, 2008)

Segundo Bauer (2008), consideram-se densas as coníferas com massa específica superior a 0,7 kg/dm^3 e para dicotiledôneas, valores entre 0,8 e 1,00 e muito densas acima de 1,00 kg/dm^3.

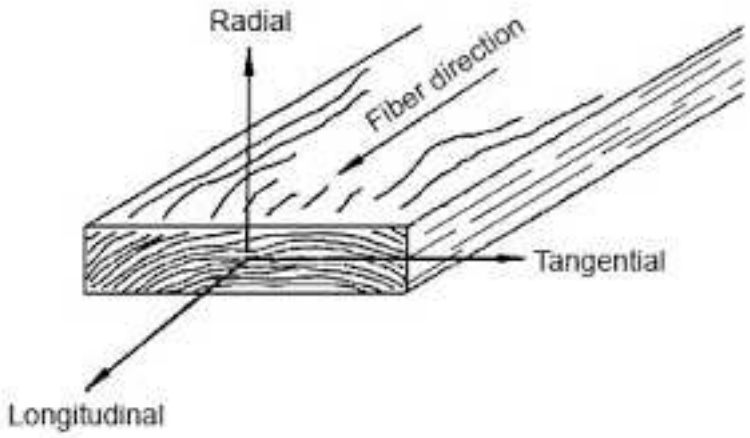
3.2 Elasticidade da madeira

Sendo a natureza o meio condicionante para o crescimento e desenvolvimento de uma árvore, a variação climática, a qualidade da terra, do ar e da água, são fatores que influenciam diretamente nos nutrientes produzidos e distribuídos por ela, tornando cada uma delas particular em suas características. Dessa forma, diz-se que a madeira é um material heterogêneo e anisotrópico, sua resistência e retratibilidade dependem da posição de suas fibras.

A anisotropia é uma característica pertencente às madeiras devido a orientação de suas células. No sentido axial, as células de todos os tecidos apresentam-se pelo comprimento,

exceto os raios. Nesse sentido longitudinal, a contração é desprezível. No sentido tangencial, ao diminuir a largura, inclusive os raios, todos os tecidos terão contração máxima. No sentido radial, os raios estão alinhados pelo comprimento das suas células e funcionam como barras inibidoras da contração dos tecidos, que será menor (GONZAGA, 2006).

Figura 1 - Esquema de ortotropia da madeira



Fonte: rznd-engenharia.blogspot.com.br/

O comportamento elástico da madeira é avaliado por meio de doze constantes: três módulos de Young, três módulos de elasticidade transversais e seis coeficientes de Poisson, sendo o módulo de Young o mais importante devido a quantidade de estudos científicos desenvolvidos a seu respeito (MINÁ et al., 2004).

Os termos da rigidez (C) podem ser determinados pelas medições com ultrassom e os termos da matriz de flexibilidade a partir de ensaios de flexão estática. A matriz de rigidez é formada por nove constantes independentes: seis constantes diagonais e três termos não diagonais (MINÁ et al., 2004).

Citada por Bartholomeu (2001), a Lei de Hooke que define as tensões de um corpo elástico a partir das deformações sofridas é dada por:

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \times \varepsilon_{kl} \qquad \text{equação 3.1}$$

Onde: σ_{ij} = Tensor de tensões;

C_{ijkl} = Matriz de rigidez;

ε_{kl} = Tensor de deformações específicas.

A partir das duas relações encontradas, é possível determinar a fórmula da Rigidez que é dada por:

$$C_{LL} = E_L [(1 - \nu_{RT} \times \nu_{TR}) / (1 - \nu_{LR} \nu_{RL} - \nu_{RT} \nu_{TR} - \nu_{LT} \nu_{TL} - 2 \nu_{RL} \nu_{RT} \nu_{LT})] \quad \text{equação 3.2}$$

Onde: C_{LL} = Constante de Rigidez (MPa);
E_L = Módulo de elasticidade longitudinal (MPa);
ν = Coeficientes de Poisson.

3.3 Métodos não-destrutivos empregados na determinação de parâmetros de madeiras

A inspeção visual é ainda a mais utilizada na identificação e diagnóstico de patologias em estruturas de madeiras e possíveis patologias. O exame consiste em uma análise presencial, onde verifica-se a presença de quaisquer elementos externos indicadores de defeitos, fungos, brocas, etc. Ross et al.(2006, apud ABREU, Luciana, 2010) sugerem que os primeiros sinais de deterioração sejam investigados durante uma inspeção: a presença de corpos frutíferos, que certamente indica problemas de deterioração, apesar de não indicar sua extensão; finas camadas de depressão em superfícies, que podem ser criadas por bolsas ou vazios de apodrecimento; manchas ou descolorações, além de ferrugem em ferragens conectoras, que indicam presença de umidade; buracos e pós, que caracterizam a atividade de insetos e o crescimento de plantas ou musgos em fendas, rachaduras ou no solo adjacente a uma estrutura, que indicam alto conteúdo de umidade, favorável à deterioração. Entretanto, a análise visual é um método de identificação apenas de agentes agindo nas faces da madeira, tornando-a inutilizável para avaliação e diagnóstico de defeitos internos.

As avaliações destrutivas são, em geral, os principais métodos utilizados para o conhecimento das propriedades físicas e mecânicas da madeira. A obtenção dos resultados a partir dessa metodologia é, por vezes onerosa, em razão do tempo consumido com a confecção dos corpos-de-prova e custo de material. Por sua vez, as avaliações não destrutivas permitem a obtenção de informações mais precisas e mais amplas, medindo-se um número maior de amostras, em função da rapidez dos testes (STANGERLIN et al., 2008).

Para Ross et al. (1994, apud PUCCINI, 2002), a avaliação não destrutiva é a ciência de identificação das propriedades físicas e mecânicas de uma peça de um determinado material, sem alterar suas capacidades de uso.

Jayne (1959) iniciou a hipótese fundamental para avaliação não destrutiva de madeira, propondo que a armazenagem de energia e as propriedades de dissipação da madeira, que podem ser medidas por meio não destrutivo, são controladas pelos mesmos mecanismos que determinam o comportamento deste material frente a solicitações estáticas. A nível microscópico, as propriedades de armazenamento de energia são controladas pela orientação das células e pela composição estrutural, fatores que contribuem para a definição das características de elasticidade da madeira nas solicitações estáticas. Tais propriedades são frequência de oscilação na vibração ou transmissão da velocidade de propagação da onda. Desse modo, as medidas das taxas de deterioração de vibrações livres ou atenuação de ondas acústicas são usadas para observar a propriedade de dissipação de energia na madeira.

De acordo com Ross (1999 apud STANGERLIN et al., 2008) diversas tecnologias, como raios-X, análise química, propriedades vibracionais e transmissão de ondas sonoras, vêm sendo empregados na avaliação não-destrutiva da madeira.

Observa-se, portanto, que os métodos não destrutivos apresentam grandes vantagens, como rapidez, simplicidade de execução, possibilidade de utilização do material posteriormente ao ensaio, e possibilidade de utilização direta no setor produtivo; pode, ainda, ser um método bastante econômico, beneficiando sobremaneira a indústria madeireira (GONÇALVES & BARTHOLOMEU, 2000).

3.4 Ensaio de ultrassom em madeiras

Com base nos princípios da propagação de ondas mecânicas, a avaliação não destrutiva de madeiras por meio da técnica de emissão de ondas de ultrassom, atualmente, aparece como sendo um dos métodos mais aplicados e promissores, em função da facilidade de operação e custo relativamente baixo na aquisição e operacionalização do equipamento, quando comparado aos equipamentos utilizados em ensaios destrutivos (STANGERLIN et al., 2010).

Bucur (1995) afirma que em materiais homogêneos e isotrópicos como aço, plástico e cerâmicas, a avaliação não destrutiva detecta falhas surgidas no processo de fabricação. Entretanto, essas irregularidades ocorrem naturalmente na madeira e a sua influência sobre as propriedades mecânicas pode ser avaliada através de métodos não destrutivos.

De acordo com Schafer (et al., 1998), a imagem de ultrassom funciona, pois, diversos materiais e fluidos tem pequenas diferenças em suas características estruturais, resultando no aparecimento de diferenças nas propriedades acústicas. Diferente do ultrassom usado no sistema de saúde, onde a informação desejada reflete ao transmissor das ondas, no sistema de avaliação de materiais por ultrassom, o interesse encontra-se na viagem da onda, do transmissor ao receptor. Quando a onda percorre pelo meio, uma porcentagem de energia sonora é atenuada por ambas: absorção (convertendo a energia de vibração mecânica da onda em calor) ou dissipação (reflexão do som para outras direções).

A energia restante é recebida e processada em um indicador das propriedades do material posicionado entre o transmissor e o receptor. O instrumento que converte energia elétrica em ondas ultrassônicas é chamado de transdutor. Duas propriedades do material que podem ser inferidas pelo aparelho são a velocidade de propagação de ondas e seu fator de atenuação (SCHAFER et al., 1998).

A velocidade e atenuação estão diretamente relacionados às propriedades do material. Em decorrência, são, esporadicamente, utilizadas para detectar defeitos na madeira. Fungos, rachaduras e vazios, por exemplo, são defeitos que podem degradar sua estrutura, reduzindo sua resistência e dureza. A presença de fungos diminui a velocidade e amplia a atenuação do sinal, pois as ondas viajando do emissor ao receptor encontrarão, ao longo do espécime, falhas decorrentes da patologia, aumentando, assim, o tempo de trajeto (SENALIK et al., 2014).

Bartholomeu (2001) avaliou o comportamento de três espécies de madeira - Capiúba (*Goupia glabra*), Eucalipto Citriodora (*Eucalyptus citriodora*) e Pinus elliottii (*pinus eliottii*), de comprimentos de 0,15m e 2,5m, e seções nominais distintas, frente o ensaio de ultrassom e propôs, para as espécies estudadas, classes de rigidez obtidas a partir das velocidades de onda ultrassônica.

Miná (et al., 2004) analisaram 50 postes de eucalipto com comprimento de 7,5m e 9,0m e compararam os resultados obtidos do ensaio de ultrassom, que avaliou o módulo de elasticidade dinâmica e do ensaio de flexão estática (MOE). Os resultados deste estudo mostraram uma boa relação entre as propriedades determinadas por emissão ultrassônica e flexão estática, indicando ser viável a aplicação da técnica de avaliação não destrutiva na obtenção do módulo de flexão estática de madeiras.

Estudos de Gonçalves & Bartholomeu (2000) também indicam resultados relevantes na relação do ensaio de flexão estática e o ensaio de ultrassom na madeira.

Para Stangerlin (et al., 2008) que realizaram, também, estudo de correlação entre o módulo de Elasticidade obtido por métodos destrutivo e não-destrutivo, o método ultrassonoro mostrou-se eficiente por avaliar, de forma rápida e eficaz, as diferenças relativas à qualidade da madeira nas regiões próximas à medula e à casca.

3.4.1 Principais características que influenciam no ensaio de ultrassom

Diversos fatores devem ser considerados ao se realizar o teste de ultrassom em madeiras, devido sua anisotropia e outras propriedades peculiares. Além da espécie da madeira, idade da árvore, densidade aparente, frequência dos transdutores, outros fatores importantes são: o teor de umidade e geometria do espécime, a presença ou não de patologias e a metodologia dos testes (SENALIK et al., 2014).

Vários autores estudaram a relação entre estes fatores e a propagação de ondas no meio. Dentre os parâmetros, destacam-se alguns de maior relevância:

3.4.1.1 Teor de umidade

Estudos relatam que a umidade influi não só nos resultados dos ensaios estáticos para avaliação de propriedades mecânicas, como afeta, também, diretamente nas propriedades mecânicas obtidas no ensaio não destrutivo. Senalik (et al., 2014) cita que no ultrassom, o comportamento das ondas no meio é determinado pelas propriedades física e mecânica da madeira, logo, se estas propriedades sofrem alteração, a propagação de ondas também é alterada.

A velocidade de propagação de ondas ultrassônicas decresce consideravelmente com o aumento do teor de umidade do corpo-de-prova, até o ponto de saturação das fibras. A partir deste valor, a velocidade tende a estabilizar-se e tornar-se praticamente constante (BARTHOLOMEU, 2001).

Calegari et al. (2007) avaliaram amostras de *Pinus elliotti* e *Eucalyptus grandis* de 25 cm de comprimento que foram submetidas a temperaturas diversas. Os resultados indicaram aumento da velocidade ultrassônica estimada em função da redução do teor de umidade. Notou-se que houve influência da massa específica aparente da madeira e da temperatura na velocidade de propagação de ondas ultrassônicas. O efeito da massa específica aparente foi diretamente proporcional para a madeira de pinus e inversamente proporcional para a madeira de eucalipto.

Já o efeito do aumento da temperatura de secagem foi de reduzir a velocidade para ambas as espécies.

Gonçalves & Costa (2002) avaliaram a possibilidade de utilização do ultrassom como ferramenta de análise do comportamento à secagem da madeira. Foram ensaiados 15 corpos-de-prova de Pinus elliottii (*Pinus elliottii*) de dimensões nominais 30mm x 60mm x 300mm, em 12 diferentes condições de umidade, abrangendo desde a condição saturada até a condição anidra. Durante o ensaio foram obtidas velocidades de propagação da onda de ultrassom nas peças, em cada condição de umidade e, ainda, nas direções da madeira (longitudinal, radial e tangencial). Os resultados apontaram que, conhecendo-se a velocidade de propagação da onda em função da umidade para uma determinada espécie, é viável acompanhar a secagem dos espécimes de um mesmo lote utilizando-se do método de ultrassom.

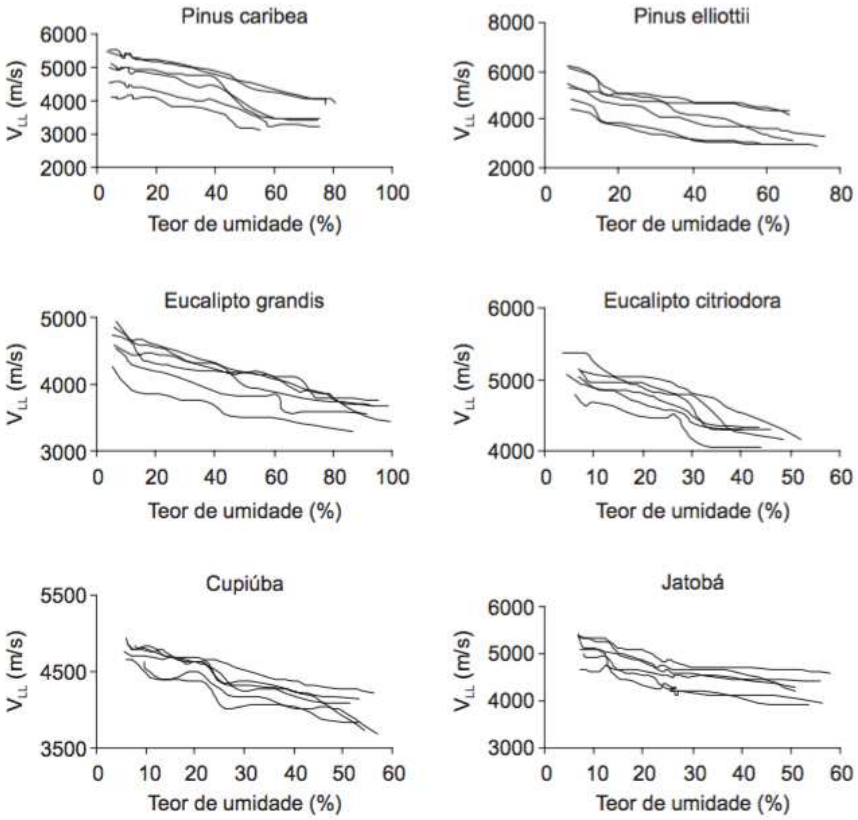
Gonçalves (2010), ensaiou três espécies diferentes: *Pinus elliottii*, *Eucalyptus citriodora* e *Ocotea porosa*. Obteve resultados semelhantes aos estudados anteriormente quanto a velocidade de propagação de ondas em condições de umidade diferentes. As propriedades da madeira mostraram-se mais afetadas até o PSF (ponto de saturação das fibras), onde há presença de água livre nos vazios celulares além de água de impregnação nas paredes. Desta forma a propagação ocorre tanto na parede celular quanto na água, reduzindo sua velocidade, portanto. Este fato estaria, então, ligado a características intrínsecas da espécie e da amostra.

De acordo com Galvão & Jankowsky (1985), isso se deve a estrutura anatômica interfere diretamente na velocidade de secagem pois, espécies ou amostras com vasos e traqueídes mais abertos e abundantes favorecem a circulação da umidade e, portanto, favorece a condição de secagem do material.

Abaixo do ponto de saturação das fibras, onde não mais há presença de água livre, a propagação de onda deu-se com maior velocidade devido ao fato de que as ondas percorreram apenas pelas paredes celulares, apontando, assim, características ligadas às propriedades estruturais da madeira.

Oliveira & Sales (2005) estudaram as espécies pinus caribea (*Pinus caribea var. caribea*), pinus elliottii (*Pinus elliottii var. elliottii*), eucalipto citriodora (*Eucalyptus citriodora*), eucalipto grandis (*Eucalyptus grandis*), cupiúba (*Goupia glabra*) e jatobá (*Hymenaea* sp.) em ensaios de ultrassom afim de analisar a influência da umidade e da densidade na velocidade de propagação de ondas de ultrassom e obtiveram conclusões semelhante à maioria dos autores. A velocidade aumentou a medida que o teor de umidade decresceu. Os resultados são mostrados nos gráficos a seguir:

Figura 2 - Gráfico velocidade X umidade



Fonte: Oliveira & Sales (2005)

Bucur (1995), citado por Oliveira & Sales (2005), explica que em um baixo valor de umidade (menor que 18%), quando a água existente na madeira está ligada às moléculas de celulose da parede celular, o pulso ultrassônico é espalhado pelos elementos anatômicos e pelos contornos destes elementos. Nestes contornos, analogamente ao que ocorre nos contornos de grãos de um sólido policristalino, há descontinuidade do módulo de elasticidade e, consequentemente, da impedância acústica. A pressão que atua nas partículas das moléculas de celulose, resultante da passagem da onda ultrassônica, reorienta a posição da hidroxila (OH) ou outro radical pertencente àquelas moléculas. Neste caso, o mecanismo de atenuação relacionado às características das paredes celulares constitui, provavelmente, o fato mais importante.

Há, ainda, de se considerar que o teor de umidade é relativo e que corpos-de-prova colhidos de uma mesma árvore, podem ter umidades distintas devido à posição do corte da qual foi retirada. Oliveira (et al., 2005) examinaram 7 espécies de Eucalipto e concluiu que há divergências entre o teor de umidade entre a região da base do tronco e o topo, onde é maior, e a região central, onde resultados apontaram valores menores. Notou-se ainda que, na maioria das espécies, houve queda do gradiente de umidade no sentido medula-casca.

3.4.1.2 Idade da árvore

Grabianowski (et al., 2006, apud MASSAK, 2010) estudaram o comportamento da velocidade de propagação de ondas e da rigidez em árvores de *Pinus radiata* na Nova Zelândia. Toras de comprimento de 2 e 3 metros foram retiradas de árvores com 26 anos de idade, e classificadas em diferentes faixas de idade: espécimes retiradas das partes central, como sendo de 8 anos, intermediárias como sendo de 16 anos e as mais externas, como sendo de 26 anos. Depois do processo de secagem, passaram pela leitura de ultrassom. Os resultados mostram que a idade influencia na velocidade de propagação de ondas pelos corpos de prova. A velocidade aferida nas peças de 26 anos foi 20% superior a velocidade nas peças da região de 16 anos e 42% superior nas peças da região de 8 anos. Concluíram, desta forma, que é crível declarar que as velocidades obtidas em árvores novas corresponde às velocidades que seriam obtidas na parte interna de árvores mais adultas.

Massak (2010) avaliou a influência da idade no ensaio de ultrassom para as espécies *Pinus elliottii* e *Eucalyptus grandis*. Da primeira, foram obtidas 12 árvores com 6 idades distintas (8,9,13,15,22 e 23 anos). Já para a espécie de Eucalipto foram obtidas amostras de 5 árvores da mesma idade – 34 anos. De forma geral, o estudo permitiu verificar que, para ambas as espécies, o ensaio mostrou-se sensível em detectar pequenas alterações e diferenças provindas da variação de idades nas amostras. O comportamento da *Pinus elliottii* foi semelhante em relação a variação, com a idade, da velocidade de propagação das ondas de ultrassom na direção paralela às fibras, do coeficiente de rigidez e do módulo de elasticidade, crescendo de forma mais acentuada até 15 anos. As correlações entre os parâmetros dos ensaios estático e de ultrassom foram estatisticamente significativas, com destaque para os coeficientes de correlação entre o módulo de elasticidade e coeficiente de rigidez e entre o módulo de elasticidade e a velocidade na condição saturada.

Já para o *Eucalyptus grandis*, Massak (2010) afirma que não foi possível correlacionar a posição longitudinal de retirada das vigas com a idade da madeira, devido interferência de outros parâmetros das propriedades da madeira. De forma avessa ao que se era esperado, as toras retiradas da parte superior das árvores apresentaram propriedades superiores em relação as toras retiradas da base, de origem mais antiga. Os valores médios, por idade da árvore, de Velocidade longitudinal (V_{LL}) obtidos nas vigas na condição saturada e densidade aparente (ρ), coeficiente de rigidez (C_{LL}), módulo de elasticidade (E_M) e módulo de ruptura (f_m) obtidos em flexão, na condição seca ao ar (12% de umidade), são apresentados na tabela a seguir:

Tabela 2 - Valores médios, por idade da árvore, de Velocidade longitudinal (V_{LL}) obtidos nas vigas na condição saturada e densidade aparente (ρ), V_{LL}, coeficiente de rigidez (C_{LL}), módulo de elasticidade (E_M) e módulo de ruptura (f_m) obtidos em flexão, na condição seca ao ar (~12% de umidade).

Idade	Condição Saturada	Condição de equilíbrio (12 % de umidade)					
	V_{LL} (m/s)	ρ Kg/m³ (12%)	V_{LL} (m/s)	C_{LL} (MPa)	E_M (MPa)	fm (MPa)	N
			Pinus Elliottii				
8	2153 (12,6)	419,5 (9,1)	3758 (11,8)	6681 (15,6)	4001 (16,7)	34,0 (19,3)	6
9	2355 (24,5)	442,6 (7,7)	3991 (9,3)	6377 (30,3)	3893 (52,6)	30,8 (34,9)	4
13	3094 (13,8)	448,4 (5,3)	4568 (10,8)	9387 (18,9)	6064 (16,3)	44,0 (15,5)	8
15	3287 (12,5)	419,4 (6,2)	4984 (10,5)	10581 (23,4)	6899 (20,7)	42,8 (26,0)	15
22	3388 (15,3)	458,7 (10)	4961 (12,1)	11587 (30,8)	7715 (23,8)	48,6 (29,7)	20
23	3187 (25,1)	453,9 (13)	4759 (15,1)	10814 (39,3)	6779 (37,5)	49,6 (41,5)	37
			Eucalyptus grandis				
34	4772 (7)	724,0 (17)	5896 (6)	25986 (16)	15394 (20)	73 (35)	254

*Valores entre parêntesis representam o coeficiente de variação (%)
N= nº de vigas ensaiadas

Fonte: Massak (2010, p.36)

3.4.1.3 Geometria do corpo-de-prova

Em virtude de a madeira constituir-se num material viscoelástico, o pulso ultrassônico que se propaga em seu interior é decomposto em componentes frenquenciais, que se propagam em velocidades que lhes são próprias (HERZIG, 1992 apud BARTHOLOMEU, 2001).

Quando a dimensão de uma peça de madeira a ser ensaiada, seguindo a direção de propagação, se aproxima do comprimento de onda (λ), o meio passa a se denominar finito e, nesse caso, os fenômenos de reflexão e refração das ondas começam a afetar a propagação e, portanto, a teoria elementar, dada para meios de propagação infinitos, não é mais aplicada diretamente, passando o meio a ser disperso. Além do comprimento da peça, a dimensão da seção transversal da peça em relação ao diâmetro do transdutor afeta a condição de meio infinito. Quando a dimensão da seção transversal da peça não é, algumas vezes, maior que o diâmetro do transdutor, ocorre o fenômeno de "efeito de parede". Se o transdutor envolve toda a seção da peça, o fenômeno da transmissão confina a onda ao corpo-de-prova como uma guia de onda (BUCUR, 2006).

Bucur (1984) utilizou amostras de *Abies alba* com seções diversas para analisar a variação da velocidade de propagação da onda ultrassônica em função da variação da seção transversal. Com seções de base fixa de 10cm e altura variando de 10cm à 0,7cm, observou-se uma diferença de 12% na velocidade entre a primeira e a última.

Conhecida a característica de anisotropia da madeira, é importante destacar que, além da dimensão da seção, outro fator que determina a velocidade de propagação de ondas na peça, é a direção em que elas se propagam. Pesquisadores como Bartholomeu (2001) e Puccini (2002) observaram que as leituras dos transdutores posicionados no sentido longitudinal do corpo-de-prova, apresentaram comportamento bem definido e melhor ajuste que as leituras feitas no sentido normal às fibras.

Costa & Gonçalves (2008) ensaiaram 15 amostras de *Araucaria agunstifolia* e 15 amostras de *Gouplia braba* e relacionou a velocidade de propagação de ondas ultrassônicas nas direções longitudinal, radial e tangencial nas peças com a variação no teor de umidade das mesmas. Concluiu que a variação da velocidade das ondas ultrassônicas foi mais significativa no sentido longitudinal das amostras, enquanto nos sentidos radial e tangencial, a variação deu-se diferente para as duas espécies. Da mesma forma, a magnitude do coeficiente de rigidez diferiu de acordo com a direção e espécie, tendo seu comportamento mais acentuado na direção das fibras.

Estudos de Trinca & Gonçalves (2009) também obtiveram conclusões semelhantes análogas. Para as duas espécies analisadas (*Pinus elliottii* e *Eucalyptus grandis*), os resultados mostram que a seção transversal exerceu influência direta na propagação da onda de ultrassom.

3.4.1.4 Frequência dos transdutores

Ondas de ultrassom operam em frequências a partir de 20 kHz. A resolução de ensaios de ultrassom depende da frequência utilizada pelos transdutores. Comprimento de ondas e frequência são grandezas inversamente proporcionais, o que nos permite afirmar que o crescimento de uma delas, influi na redução do outro. Na madeira, a atenuação aumenta quando a frequência é elevada. Analogamente, quando este fato ocorre, a perda de energia das ondas durante seu percurso em uma amostra, também se atenua. Desta forma, um balanço deve ser encontrado entre obter uma boa resolução do ensaio e manter o sinal das ondas em um nível adequado (SENALIK et al., 2014).

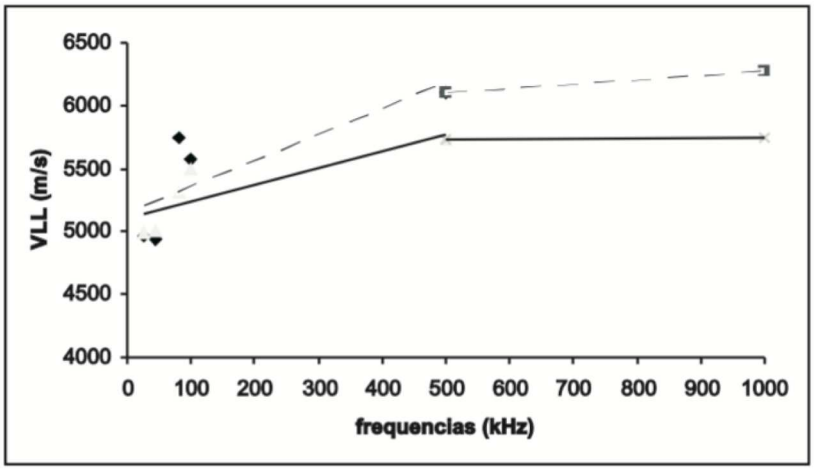
A influência da frequência na velocidade de propagação das ondas ultrassônicas não é um consenso geral entre os autores que a estudaram. Para Mishiro & Miwa (1994, apud

BARTHOLOMEU, 2001), que avaliaram espécimes de Spruce (Picea) e Katsura (*Cercidiphyllum japonicum*) numa faixa de frequências entre 50 kHz e 5 MHz, não puderam ser feitas relações entre a frequência e a velocidade de propagação de ondas, visto que esta última não sofreu variações. Sabe-se, no entanto, que essa influência também depende das dimensões do corpo-de-prova adotado para o ensaio (PUCCINI, 2002).

Buccur (1984 apud PUCCINI, 2002) estudou a variação da velocidade de propagação em peças de pequeno diâmetro (0,005 m), da espécie Hêtre (*Fagus sylvatica*), utilizando frequências de 80 kHz a 2 MHz. Os resultados obtidos pela autora mostraram que houve um aumento da velocidade longitudinal decorrente do aumento da frequência.

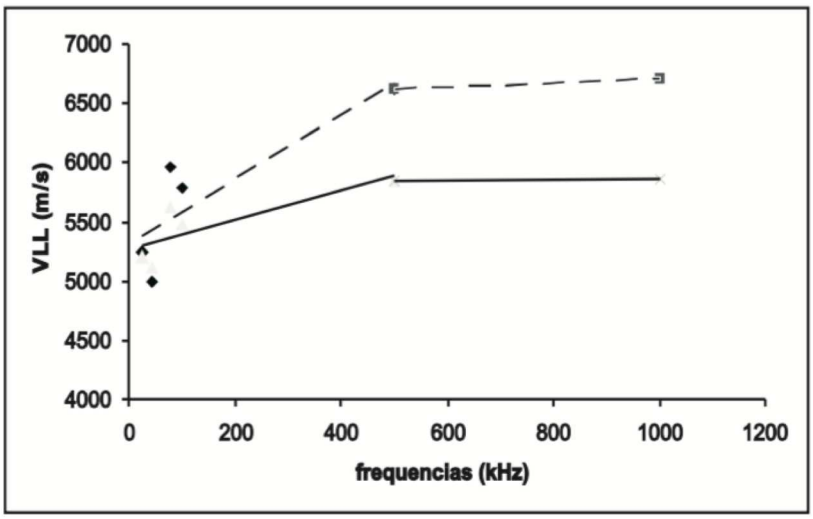
Trica & Gonçalves (2009) publicaram estudo realizado com 119 amostras de *Pinus elliottii* e 244 amostras de *Eucalyptus grandis* no qual o ensaio de ondas ultrassônicas utilizou os transdutores em 6 frequências distintas que foram posicionados no sentido longitudinal de cada um dos corpos-de-prova.

Figura 3 - Influência da frequência na medição da velocidade de propagação de ondas de ultrassom para espécie Eucalyptus grandis.



Fonte: TRINCA & GONÇALVES (2009)

Figura 4 - Influência da frequência na medição da velocidade de propagação de ondas de ultrassom para espécie Pinus elliottii



Fonte: TRINCA & GONÇALVES (2009)

Em ambas as figuras, a linha pontilhada representa os resultados dos corpos-de-prova de 30 x 30 mm; e a linha contínua, os resultados dos corpos-de-prova de 50 x 50 mm (TRINCA & GONÇALVES, 2009).

Os resultados apontam que a velocidade de propagação de ondas foi intimamente afetada pela frequência do transdutor para frequências abaixo de 500 kHz, onde o seu crescimento foi mais acentuado. Acima dessa frequência, a velocidade, para ambas as espécies, mostrou-se constante. A avaliação reforça a importância de se adotarem relações de comprimento do corpo-de-prova/comprimento de onda superiores a 3,0. Quando essa relação não é obedecida, os valores de velocidade de propagação das ondas obtidos podem estar afetados, podendo ser utilizados em análises de comparação, mas não na determinação da rigidez (TRINCA & GONÇALVES, 2009).

3.5 Classificação de madeiras pelo método de ultrassom

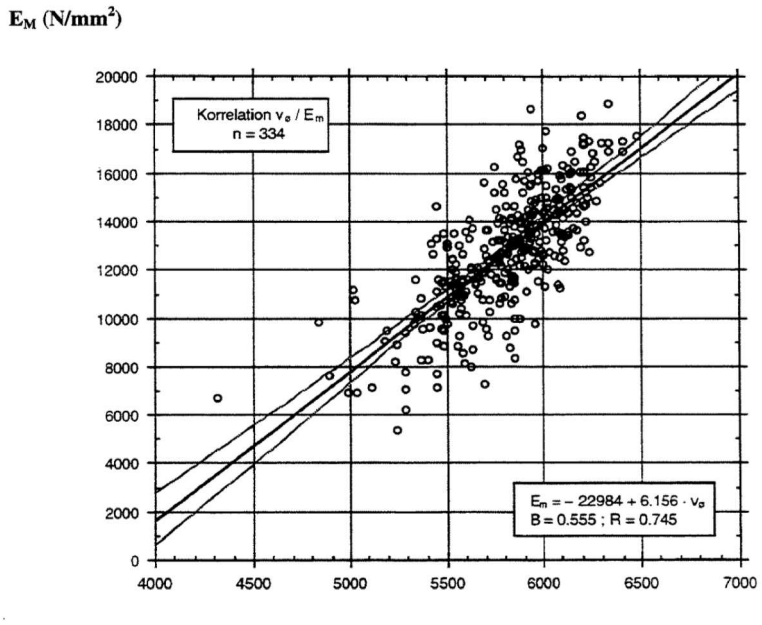
A classificação de madeiras pode ter alto valor de utilidade para os que fazem uso delas. Nas serrarias e madeireiras, teria o papel de evitar o desperdício e reeducar a cultura de menosprezo às madeiras de resistência inferior, uma vez que toda madeira tem demanda de aplicação para um determinado fim. A classificação, aplicada em projetos de dimensionamento de madeiras, apresenta amplas vantagens aos profissionais que atuam no meio, pois garantem

sobretudo confiabilidade ao projeto e emprego adequado das peças para atender aos esforços solicitantes.

Waubke (1988, apud BARTHOLOMEU, 2001) ensaiou 134 vigas de *Fichte* (Pinus), sendo 68 delas de dimensões de 140 mm x 160 mm x 4,5 m e 68 de dimensões de 100 mm x 120 mm x 4,5 m, com teores de umidade de 10% e 20%, à flexão estática por meio do ultrassom. Os resultados foram obtidos apenas para uma única espécie. Entretanto, demonstraram que a classificação de peças estruturais por ultrassom é, de fato, um método rápido e seguro, além de versátil, visto que foi possível correlacionar corpos-de-prova com teores de umidade diferentes e, ainda, os resultados dinâmicos com estáticos.

Citado por Golçalves & Bartholomeu (2000), Steiger (1996) ensaiou 809 peças de *Fichte* suíço, de bitolas diferentes, com teores de umidade de 12% e acima do PSF, à flexão estática, compressão e tração paralelas às fibras, utilizando o ultrassom e, também, o método visual.

Figura 5 - Correlação entre velocidade do ultrassom e o módulo de elasticidade estático à flexão para vigas da espécie Fichte, a 12% de umidade.



Fonte: (STEIGER, 1996 apud BARTHOLOMEU, 2001)

A partir dos resultados obtidos, propôs uma classificação que relaciona velocidade de propagação de ondas ultrassônicas e as classes de resistência do Eurocode-5.

A seguir, as classes de resistência quanto aos módulos de elasticidade à flexão estática obtidas da Eurocode-5 (EN 338):

Tabela 3 - Valores dos módulos de elasticidade médios para as classes de resistências da norma EN 338 à 12% de umidade

Classe	C18	C22	C27	C35	C40
$E_{M,médio}$(Mpa)	9000	10000	12000	13000	14000

Fonte: EN 338

O autor, ao correlacionar os parâmetros mencionados anteriormente, então, encontrou faixas de velocidade, utilizadas para classificação de peças estruturais de madeira da espécie trabalhada.

Tabela 4 - Faixas de velocidade para classificação de peças estruturais da espécie Fichte, com 12% de umidade, de acordo com a norma EN 338

Classe	Faixa de velocidade ($m.s^{-1}$)
HC (Hors Class)	VØ < 5100
C18	5100 ≤ VØ < 5250
C22	5250 ≤ VØ < 5500
C27	5500 ≤ VØ < 5750
C35	5750 ≤ VØ < 5900
C40	VØ ≥ 5900

Fonte: STEIGER (1996 apud BARTHOLOMEU, 2001)

Bartholomeu (2001) propôs um método de classificação para as madeiras Cupiúba, Eucalipto Citriodora e Pinus elliotti, baseado em classes de rigidez utilizando como parâmetro a velocidade de propagação de ondas ultrassônicas. Por apresentarem melhores resultados e correlação entre os ensaios estático e dinâmico, foram utilizadas apenas vigas estruturais para esta classificação. As classes propostas apresentam os valores de $E_{M,k}$, $E_{C0,k}$, $f_{C0,k}$ e a faixa de velocidade correspondente a cada classe.

De maneira isolada, para cada espécie dicotiledônea, as correlações obtidas para velocidades de propagação de ondas na condição saturada proporcionaram melhores resultados, e são expressas nas tabelas a seguir:

Para Cupiúba:

Tabela 5 - Classes de rigidez de peças estruturais de madeira da espécie Cupiúba utilizando velocidade de propagação da onda de ultrassom

Classe	$E_{M,k}$ (condição seca ao ar) ($kN.cm^{-2}$)	Faixa de velocidades (Madeira saturada) ($m.s^{-1}$)
7500	750	$2850 \leq V_{vsat} \leq 3600$
10000	1000	$3600 < V_{vsat} \leq 4100$
12500	1250	$V_{vsat} > 4100$

Fonte: BARTHOLOMEU, 2001

Para o Eucalipto Citriodora:

Tabela 6 - Classes de rigidez de peças estruturais de madeira da espécie Eucalipto Citriodora utilizando velocidade de propagação da onda de ultrassom

Classe	$E_{M,k}$ (condição seca ao ar) ($kN.cm^{-2}$)	Faixa de velocidades (Madeira saturada) ($m.s^{-1}$)
10000	1000	$3900 \leq V_{vsat} \leq 4150$
12500	1250	$4150 < V_{vsat} \leq 4350$
15000	1500	$4350 < V_{vsat} \leq 4510$
17500	1750	$V_{vsat} > 4100$

Fonte: BARTHOLOMEU, 2001

Para o Pinus elliotti:

Tabela 7 - Classes de rigidez de peças estruturais de madeira da espécie Pinus elliottii utilizando velocidade de propagação da onda de ultrassom

Classe	$E_{M,k}$ (condição seca ao ar) ($kN.cm^{-2}$)	$F_{C0,K}$ (condição seca ao ar) ($kN.cm^{-2}$)	Faixa de velocidades (Madeira saturada) ($m.s^{-1}$)
4000	400	1,50	$2700 \leq V_{vsat} \leq 3150$
5000	500	1,90	$3150 < V_{vsat} \leq 3500$
6000	600	2,20	$3500 < V_{vsat} \leq 3850$
7000	700	2,45	$V_{vsat} > 3850$

Fonte: BARTHOLOMEU, 2001

A norma brasileira que classifica madeiras por meio de método de ensaio de ultrassom é a ABNT NBR 15521 que foi publicada em 2007. Segundo a norma, a classificação mecânica da madeira consiste na obtenção de parâmetros que permitam separar o material em classes de rigidez ou de resistência, obtidos a partir da velocidade de propagação de ondas de ultrassom na condição de seco ao ar, permitindo sua utilização de acordo com tais características. Entretanto, a classificação da norma quanto a velocidade, fica restrita a condição saturada visto que, para este parâmetro, as dicotiledôneas apresentaram melhor comportamento com teor de umidade acima do PSF. Tendo em vista que as diferenças anatômicas da madeira exercem grande influência na propagação das ondas de ultrassom, a norma trata somente da madeira de dicotiledôneas.

As classes apresentadas nesta norma, foram estabelecidas com base em ensaios destrutivos e não destrutivos em peças serradas de dimensões de 60 mm x 120 mm x 2,5 m, provenientes de arvores com idade média de 45 anos. Por isso, é recomendação da norma que, para madeiras com idade inferior a 12 anos, se use a tabela com cautela.

Tabela 8 - Classificação por ultrassom da madeira dicotiledônea (UD)

Classe	V_{LLsat} m/s	$C_{LL}12\%$ MPa	$E_M12\%$ MPa	$f_{c0,k}12\%$ Mpa	$E_{c0,m}12\%$ MPa
UD – 20	< 3040	<10620	<6750	20	8000
UD – 25	3040 – 3690	10620 – 13000	6750 – 10420	25	12000
UD – 30	3690 – 3950	13000 – 15400	10420 – 13020	30	14000
UD – 35	3950 – 4140	15400 – 17800	13020 – 14920	35	15000
UD – 40	4140 – 4300	17800 – 20150	14920 – 16520	40	16500
UD – 45	4300 – 4390	20150 – 22500	16520 – 17420	45	18500
UD – 50	4390 – 4490	22500 – 24900	17420 – 18420	50	19500
UD – 55	4490 – 4600	24900 – 27300	18420 – 19120	55	20500
UD – 60	> 4600	> 27300	> 19120	60	21200

Fonte: NBR 15521/2007

Lorensani (2013) fez um estudo de viabilidade de classificação de espécies de madeira de acordo com a norma 15521 (2007). Para tanto, utilizou árvores de espécies e idades diferentes, dentre elas: *Eucalyptus grandis* (8 anos); *Eucalyptus grandis* (34 anos); *Eucalyptus citriodora* (10 anos); *Eucalyptus pellita* (26 anos); *Eucalyptus globulus* (28 anos).

Os resultados obtidos pelo autor mostram que as velocidades saturadas e dos coeficientes de rigidez encontrados, não foram satisfatórios para enquadrar as espécies ensaiadas dentro das classes propostas pela norma. Dessa forma, foram estabelecidos coeficientes de correção afim de reduzir os valores das velocidades (nas condições seca ao ar e saturada) e, então, recalculados os demais parâmetros de classificação. Para as espécies de maior idade (26, 28 e 34 anos), os novos resultados apresentaram um montante de vigas com valores de módulo de elasticidade superestimado inferior a 5%, tanto com o uso da velocidade saturada quanto com o uso do coeficiente de rigidez como parâmetros de entrada nas faixas de classificação. Para as espécies de menor idade (8 e 10 anos) a porcentagem de valores superestimados permaneceu superior a 5% do montante total, inviabilizando o uso das mesmas na classificação.

Tabela 9 - Faixa de classificação por ultrassom da madeira de Eucalipto proveniente de árvores com idade superior a 25 anos (E. grandis de 34 anos, E. pellita de 26 anos e o E. globulus de 28 anos)

Classe	Faixa de velocidades V_{LLsat} ($m.s^{-1}$)	E_M (condição seca ao ar) (MPa)	C_{LL} (condição seca ao ar) (MPa)
1	≤ 3600	<11600	<3267
2	3600-3900	11600-15100	3267-8407
3	3900-4200	15100-17600	8407-11418
4	4200-4500	17600-20000	11418-13776
5	4500-4800	20000-22700	13776-15775
6	>4800	>22700	>15775

Fonte: Lorensani (2013)

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Considerações iniciais

Neste capítulo serão apresentados os materiais utilizados e métodos realizados neste trabalho. Também serão descritos os ensaios realizados em laboratório e a metodologia empregada.

Todas as etapas de ensaio foram realizadas no Laboratório de Estruturas da Universidade Estadual do Maranhão (UEMA).

4.2 Pesquisas Bibliográficas

Esta etapa consistiu em levantar dados relevantes para a eficiência das demais etapas desta pesquisa. O levantamento foi realizado a partir de acervos da Universidade Estadual do Maranhão (UEMA), teses, dissertações, revistas e normas da ABNT, e abrangeu assuntos de naturezas diversas como: a madeira e suas propriedades físicas e mecânicas; Ensaios não destrutivos para determinação de velocidade de onda ultrassônica e propriedades mecânicas da madeira; Classificações de espécies de madeiras quanto velocidade, rigidez e módulo de elasticidade, obtidos pelo método de ensaio de ultrassom, etc.

4.3 Material

Para o desenvolvimento deste trabalho, foram utilizadas um total de 38 amostras de árvores de Sucupira (*Bowdichiia nítida*), Pau-Roxo (*Peltogyne lecointei*), Fava-Amargosa (*Vataireopsis speciosa*), Jatobá (*Hymenaea courbaril*), Maçaranduba (*Manilkara bidentata*), Pau d'Arco (*Tabebuia serratifolia*) e Sapucaia (*Lecythis usitada*), todas angiospermas do grupo dicotiledônea, abundantes no estado do Maranhão. Com exceção da maçaranduba (*Manilkara bidentata*), que foi obtida a partir de duas toras de árvores distintas, todas as amostras deste trabalho foram retiradas de uma mesma tora, para todas as espécies.

A escolha das espécies adotadas se deu em função da vasta demanda e aplicação das mesmas em projetos de estruturas locais. Todas as amostras foram disponibilizadas pelo arquiteto Marcelo Helal, provenientes de uma obra de restauração da antiga fábrica Santa Amélia no Centro Histórico da cidade de São Luís, para futura locação de Unidade de Ensino

dos cursos de Hotelaria e Turismo da Universidade Federal do Maranhão (UFMA). Foram utilizados corpos-de-prova de dimensões nominais de 60 x 60 x 200 mm e 60 x 60 x 100 mm, subtraídas de vigas estruturais mantidas em local coberto e arejado.

Figura 6 - Corpos-de-prova do estudo

Fonte: Autor, 2016

4.4 Equipamentos

Para a realização dos ensaios foram utilizados, neste trabalho, os equipamentos descritos a seguir:

- Equipamento de teste ultrassônico Pundit Lab, fabricado pela PROCEC, composto de dois transdutores com frequência de transmissão de 54 kHz;
- Balança eletrônica da marca Marte com precisão de 0,01g;
- Estufa para determinação do teor de umidade.

4.5 Ensaio de ultrassom nos corpos-de-prova:

Os ensaios de ultrassom foram realizados conforme sugerido pela norma NBR 15521 (2007). O tempo (microssegundos) e a velocidade (m/s) de propagação de ondas são

estabelecidos pelo aparelho de ultrassom Pundit Lab. As configurações do aparelho foram seguidas de acordo com o manual de instruções, fornecido pelo fabricante.

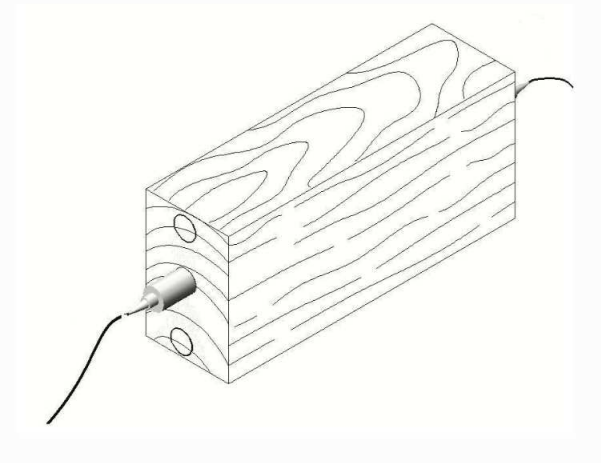
Figura 7 - Equipamento de ultrassom Pundit

Fonte: www.proceq.com

Os transdutores foram, antes, calibrados, conforme sugerido pelo manual de instruções. Em seguida, as amostras foram organizadas e pesadas em balança com sensibilidade de 0,01g. Estes dados foram obtidos apenas para uso posterior, na determinação da umidade (U%) e massa específica aparente (ρ_{ap}), mas fez-se necessário fazê-lo antes do ensaio de ultrassom para evitar que o acoplante afetasse na precisão das massas.

Foram feitas, então, aferições das medidas em todas as direções de cada peça de madeira. A utilização de um paquímetro calibrado foi essencial para precisão das medidas, uma vez que a velocidade traduzida pelo aparelho de ultrassom é uma função da dimensão da peça ensaiada. Imediatamente antes do ensaio, foi aplicado material de acoplamento – gel incolor comum - em ambas as faces dos transdutores, de modo que criasse uma fina película entre os transdutores e as seções dos corpos-de-prova.

Figura 8 - Leitura direta de ultrassom no corpo-de-prova



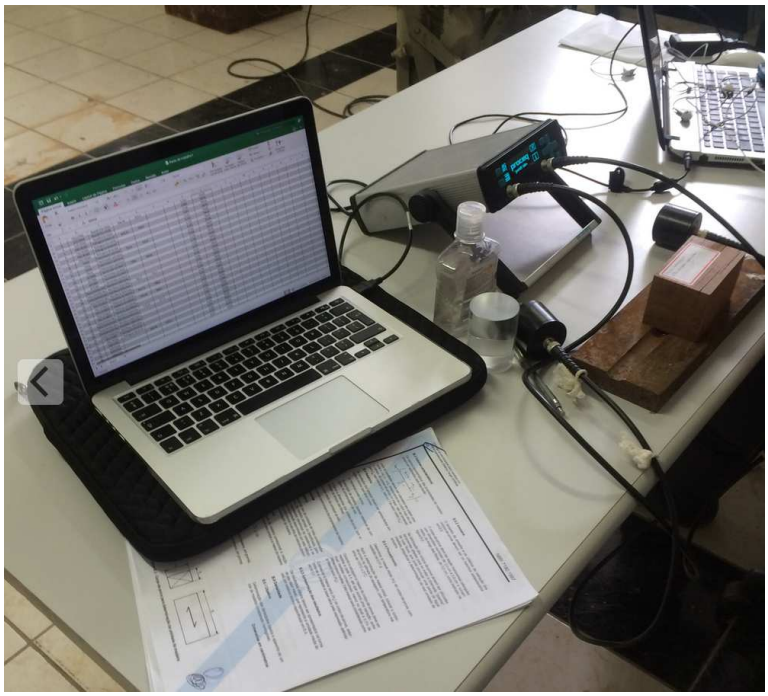
Fonte: NBR 15521

Em seguida, posicionaram-se os transdutores nas extremidades de cada amostra, pressionando-os levemente, e o aparelho realizou a leitura das velocidades (m/s) em que as ondas ultrassônicas viajaram do transdutor emissor ao transdutor receptor. Cada peça de madeira foi ensaiada nos sentidos paralelo e normal às fibras, e para ambos os sentidos, três leituras foram realizadas. O valor de velocidade utilizado foi o intermediário, descartando-se os mínimos e máximos. Em casos de repetição de valores, o valor repetido foi o adotado. Todos os dados obtidos nas leituras foram extraídos pelo software Pundit Link, e salvos para melhor análise comparativa.

Figura 9 - Ensaio de ultrassom

Fonte: Autor, 2016

Figura 10 - Monitoramento de dados



Fonte: Autor, 2016

4.6 Umidade dos corpos-de-prova

As peças de madeira utilizadas neste trabalho foram retiradas de vigas desdobradas há algum tempo, mantidas em local coberto e arejado, já tendo atingido condição de equilíbrio ao ar. Para determinação do teor de umidade, alguns corpos-de-prova foram ensaiados de acordo com método proposto pela NBR 7190 (1997).

Conhecidas as massas dos espécimes, na condição de equilíbrio, com exatidão de 0,01g, os corpos-de-prova foram submetidos a secagem em estufa a temperatura máxima de 103 °C ± 2°C. Foram realizadas pesagens diárias, até que a variação de duas medidas consecutivas fosse inferior 0,5%, ou seja, quando há apenas água de constituição residindo na madeira. A fórmula de umidade é dada por:

$$U(\%) = \frac{m_i - m_s}{m_s} \text{ X } 100 \qquad \text{equação 4.1}$$

Onde: m_i = massa inicial da amostra (g)

m_s = massa da amostra anidra (g)

U = umidade da madeira (%)

Figura 11 - corpos-de-prova em estufa para o ensaio de umidade

Fonte: Autor, 2016

4.7 Correção da umidade para determinação de V_{LLsat}

Diante do fato de que as amostras já se encontravam em condição de equilíbrio quando foram adquiridas para ensaio, foi realizado um processo de reumidificação das madeiras afim de que um novo ensaio de ultrassom fosse feito para determinação da velocidade de ultrassom na condição saturada (V_{LLsat}). Os corpos-de-prova ficaram submersos em água por um período de 6 dias. Pesagens diárias foram efetuadas para acompanhar o aumento de umidade até o ponto de saturação das fibras.

Figura 12 - amostras submersas em água para ensaio de reumidificação

Fonte: Autor, 2016

Entretanto, devido a existência de propriedades físicas distintas entre as espécies, além da presença de fissuras em algumas amostras, nem todos os corpos-de-prova atingiram umidade próxima ou equivalente ao PSF, adotado como 25%. Seria necessário um período mais longo de submersão para que toda amostragem atingisse a condição de saturação. Para a correção das velocidades nas peças com umidade inferior ao ponto de saturação, foi utilizada equação proposta pela NBR 15521 (2007) de entrada nas classes de classificação, como a seguir:

$$V_{LLsat} = -1745 + 1{,}00 * V_{LL} + 16 * U + 1{,}00 * \rho \qquad \text{equação 4.2}$$

Onde: V_{LL} = velocidade de propagação de ondas com teor de umidade inferior ao PSF;

U = teor de umidade (%) da peça;

ρ = densidade aparente na umidade U (%).

4.8 Determinação da Rigidez (C_{LL})

A NBR 15521 (2007) define a rigidez em função da velocidade de propagação ultrassônica na condição seca (12%) e da densidade aparente também a 12%. A dada pela equação:

$$C_{LL} = \rho_{12\%} \times V_{LL}^2 \times 10^{-6} \qquad \text{Equação 4.3}$$

Onde: $\rho_{12\%}$= densidade aparente da com umidade entre 11 e 13%;

V_{LL} = velocidade de propagação de onda ultrassônica com umidade entre 11 e 13% expresso em $m.s^{-1}$.

Tendo em vista que nem todos os corpos de prova encontravam-se no intervalo de umidade entre 11 e 13%, foi realizada uma correção de V_{LL} para a condição de equilíbrio de entrada nas classes da NBR 15521 (2007), com base na equação corretiva proposta por Sandoz (2006):

$$V_{12} = V_U + 33\,(U - 12)$$ Equação 4.4

Onde: V_U = velocidade obtida em peças com umidade (U) abaixo do PSF.

Para a correção da densidade aparente, também instrumento de entrada na equação da rigidez, utilizou-se equação definida por Logsdon (1992):

$$\rho_{12\%} = \rho_{U\%} + \rho_{U\%}\left(\frac{(1-\delta_V)(12-U)}{100}\right)$$ Equação 4.5

Onde: $\rho_{12\%}$ = densidade a 12% de umidade;

$\rho_{U\%}$ = densidade com U% de umidade;

δ_V = coeficiente de retratibilidade volumétrica da espécie.

O coeficiente de retratibilidade volumétrica expressa a variação dimensional (%) para cada 1% de variação de umidade (BATISTA et al., 2010). Os coeficientes utilizados para cada espécie, nesta pesquisa, foram expressos por Mainieri & Chimelo (1989).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com base na metodologia adotada, detalhada no capítulo anterior, foram obtidos os resultados médios gerais nos ensaios dos corpos-de-prova para umidade (U_{eq}), densidade aparente (ρ_{ap}), velocidade de propagação da onda nas direções longitudinal (V_{LL}) e transversal (V_{TT}) e da constante de rigidez obtida no ensaio não destrutivo (C_{LL}).

Tabela 10 - Valores médios de cada espécie para umidade (U_{eq}), densidade aparente (ρ_{ap}), velocidade de propagação das ondas nas direções longitudinal (V_{LL}) e transversal (V_{TT}) e da constante de rigidez obtida no ensaio não destrutivo (C_{LL}), obtidos de ensaios em corpos-de-prova na condição de equilíbrio.

Espécie	**n**	$U_{eq}(\%)$	ρ_{ap} $(kg.m^{-3})$	V_{LL} $(m.s^{-1})$	V_{TT} $(m.s^{-1})$	$C_{LL}(MPa)$
Bowdichiia nitida	4	12.43	1007,08	5691,25	2068,00	32615,48
			(1,43)	(0,68)	(1,87)	(2,54)
Peltogyne lecointei	6	12.80	916,44	5040,33	2161,33	23341,56
			(2,94)	(4,26)	(7,28)	(10,61)
Vataireopsis speciosa	4	12.95	1056,82	5323,25	1722,00	29980,71
			(3,99)	(2,07)	(9,41)	(7,40)
Hymenaea courbaril	4	11.90	1100,96	4614,25	2376,50	23482,97
			(5,07)	(10,63)	(7,45)	(17,05)
Manilkara bidentata	4	9.19	1117,83	5601,25	2035,25	35071,34
			(1,32)	(0,75)	(1,82)	(1,84)
Manilkara bidentata'	5	15.10	1025,82	5127,40	2101,00	27004,71
			(4,38)	(2,31)	(7,99)	(7,98)
Tabebuia serratifolia	5	12.85	1061,98	5205,00	2152,00	28753,77
			(5,92)	(3,61)	(2,19)	(6,70)
Lecythis usitada	6	18.11	962,46	4953,00	2015,17	23611,72
			(1,16)	(1,02)	(1,92)	(1,94)

*valores entre parêntesis são coeficientes de variação (CV).

*': grupo da mesma espécie, obtido de árvore distinta.

Fonte: Autor, 2016

Tabela 11 - Valores médios de cada espécie para umidade (U_{sat}), densidade aparente (ρ_{ap}), velocidade de propagação das ondas nas direções longitudinal (V_{LLsat}) e transversal (V_{TTsat}) e da constante de rigidez obtida no ensaio não destrutivo (C_{LLsat}), obtidos de ensaios em corpos-de-prova após saturação.

Espécie	**n**	U_{sat}(%)	ρ_{ap} $(kg.m^{-3})$	V_{LLsat} $(m.s^{-1})$	V_{TTsat} $(m.s^{-1})$	$C_{LLsat}(MPa)$
Bowdichiia nitida	4	19,38	1069,46	5544,25	2058,75	32867,58
			(2,28)	(0,46)	(1,24)	(2,19)
Peltogyne lecointei	6	25,89	1023,16	4717,50	2075,00	22801,74
			(4,73)	(3,83)	(8,15)	(9,55)
Vataireopsis speciosa	4	22,03	1156,91	5086,75	1688,50	29974,13
			(4,60)	(2,71)	(9,10)	(8,37)
Hymenaea courbaril	4	16,32	1144,98	4410,50	2323,00	22284,23
			(5,15)	(10,09)	(4,74)	(15,67)
Manilkara bidentata	4	18,00	1201,73	5340,25	1973,75	34286,36
			(1,58)	(1,54)	(3,04)	(4,36)
Manilkara bidentata'	5	25,19	1084,53	4817,40	2024,60	24382,33
			(2,83)	(4,72)	(8,29)	(8,58)
Tabebuia serratifolia	5	21,76	1178,42	4895,20	2074,80	28249,92
			(7,15)	(4,26)	(3,24)	(9,67)
Lecythis usitada	6	23,78	1008,63	4837,17	1961,33	22704,26
			(0,98)	(0,99)	(0,93)	(3,77)

*valores entre parêntesis são coeficientes de variação (CV).

*': grupo da mesma espécie, obtido de árvore distinta.

Fonte: Autor, 2016

Tabela 12 - Valores médios totais para umidade (U_{eq}), densidade aparente (ρ_{ap}), velocidade de propagação das ondas nas direções longitudinal (V_{LL}) e transversal (V_{TT}) e da constante de rigidez obtida no ensaio não destrutivo (C_{LL}), a partir de ensaios em corpos-de-prova na condição de equilíbrio.

	U_{eq}(%)	ρ_{ap} $(kg.m^{-3})$	V_{LL} $(m.s^{-1})$	V_{TT} $(m.s^{-1})$	$C_{LL}(MPa)$
n = 38	13,45	1022,19	5172,16	2082,39	27503,00
DV	2,52	74,92	360,20	194,53	4526,18
	(18,76)	(7,33)	(6,96)	(9,34)	(16,46)

*valores entre parêntesis indicam coeficiente de variação

Fonte: Autor, 2016

Tabela 13 - Valores médios totais para umidade (U_{sat}), densidade aparente (ρ_{ap}), velocidade de propagação das ondas nas direções longitudinal (V_{LLsat}) e transversal (V_{TTsat}) e da constante de rigidez obtida no ensaio não destrutivo (C_{LLsat}), a partir de ensaios em corpos-de-prova após saturação.

	$U_{sat}(\%)$	ρ_{ap} $(kg.m^{-3})$	V_{LLsat} $(m.s^{-1})$	V_{TTsat} $(m.s^{-1})$	$C_{LLsat}(MPa)$
n = 38	21,99	1099,93	4932,05	2023,45	26704,11
DV	3,87	82,17	367,29	185,28	4680,17
	(17,59)	(7,47)	(7,45)	(9,16)	(17,38)

*valores entre parêntesis indicam coeficiente de variação

Fonte: Autor, 2016

5.1 Análise Estatística das médias dos resultados obtidos nas amostras

Após reunir os resultados, foi dado procedimento às análises de correlação entre os parâmetros mais importantes. *A priori* a abordagem deu-se na influência da umidade e densidade aparente na velocidade de propagação das ondas ultrassônica nas peças de madeira. Como apresentado nas tabelas 10 e 11, verifica-se que, para todas as espécies, houve coerência nos coeficientes variação da densidade aparente para ambas as condições, saturada e de equilíbrio, em todas as espécies. Analisados separadamente, os dois grupos de amostras de *Manilkara bidentata* tiveram baixos índices de variação. Entretanto, quando examinados em um só conjunto para a espécie, esse valor aumentou para CV = 5,50%. Apesar do aumento, este valor continuou a apresentar um coeficiente aceitável, estando abaixo, ainda, da variação apresentada pela *Tabebuia serratifolia*.

Nas tabelas 12 e 13, verifica-se que o resultado do coeficiente de variação da massa específica para toda amostragem também se mostra coerente, apontando a relação de semelhança na densidade das espécies que foram ensaiadas. Analogamente, é possível notar um fator de correlação entre os valores médios de umidade e de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas. Como todas as espécies estudadas neste trabalho são dicotiledôneas, houve pouca variação de velocidade no sentido longitudinal às fibras. Mesmo com índices de umidade diferentes para algumas destas espécies, a média da velocidade para a amostragem total obteve baixa variação, em ambas as condições de saturação. Para verificar a relação entre a umidade e a velocidade de propagação de ondas ultrassônicas, foi realizada, anterior ao tratamento estatístico, uma análise de significância entre estes parâmetros, onde as velocidades foram divididas em grupos de umidade.

Tabela 14 - Análise de significância ANOVA entre os parâmetros de umidade e velocidade de propagação de ondas no sentido longitudinal às fibras.

ANOVA

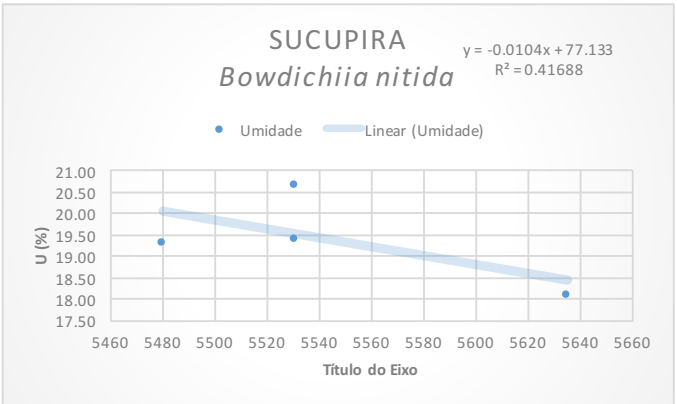
Fonte de variação	*SQ*	*gl*	*MQ*	*F*	*valor P*	*F crítico*
Entre grupos	1470415.891	2	735207.9455	6.039780	0.003803	3.127675
Dentro de grupos	8520931.780	70	121727.5969			
Total	9991347.671	72				

Fonte: Autor, 2016

A análise apresenta valor para F = 6,03, superior ao valor crítico F = 3,12, além de valor de P < α = 0,05, evidenciando estatisticamente a existência de dependência linear entre a média da amostragem total com a umidade. Tendo em vista que esses resultados ilustram uma relação entre as peças ensaiadas em dois teores de umidade diferentes, cada espécie também foi analisada separadamente. Apenas para *Lecythis usitada* foi obtido *valor P* < 0,05 (*valor P*= 0,0081). Para os demais, o *valor P* foi levemente superior a α, e pode ser explicado pela quantidade modesta de objetos ensaiados para cada espécie.

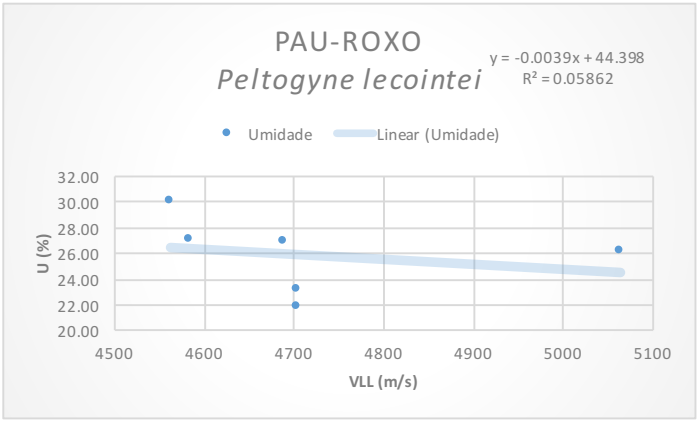
Diversos autores como Bertholomeu (2001), Calegari (et al., 2007), Gonçalves & Costa (2002), verificaram que há influência da umidade na velocidade de propagação no ensaio de ultrassom. Quanto mais se aproxima da umidade de equilíbrio de 12%, a madeira apresenta-se como um meio mais receptivo a passagem das ondas, obtendo maiores velocidades. Para examinar a correlação entre os fatores velocidade e umidade, foram gerados modelos de regressão linear para cada espécie e, também de maneira geral, conforme gráficos a seguir

Figura 13 - Umidade X Velocidade



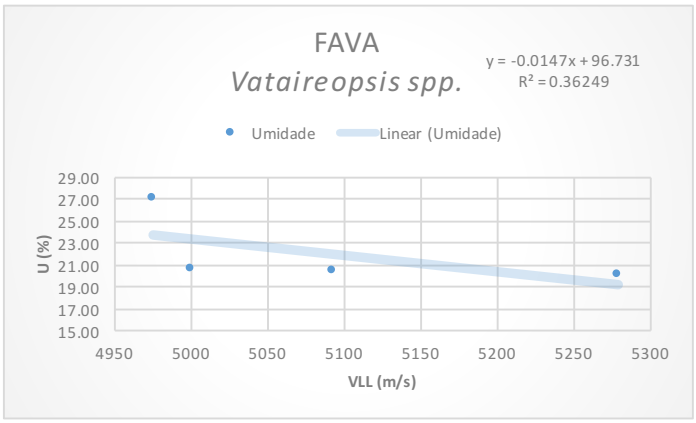
Fonte: Autor, 2016

Figura 14 -Umidade X Velocidade



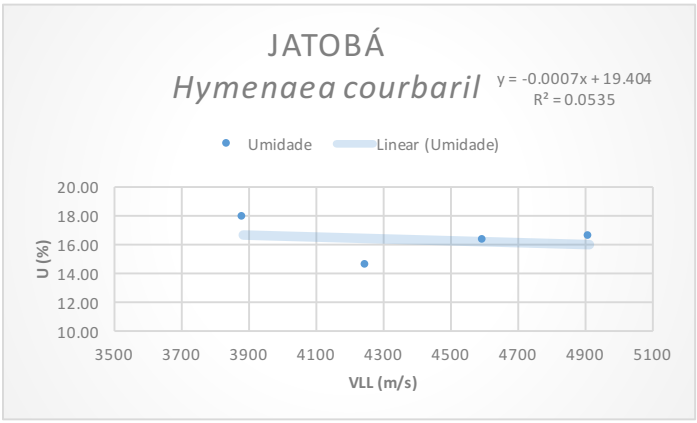
Fonte: Autor, 2016

Figura 15 - Umidade X Velocidade



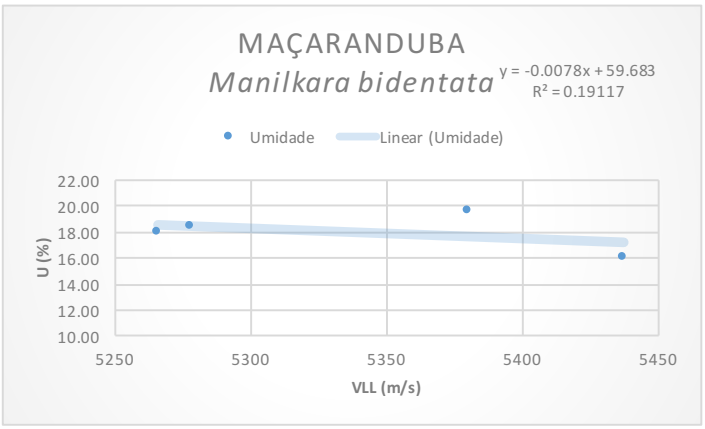
Fonte: Autor, 2016

Figura 16 - Umidade X Velocidade



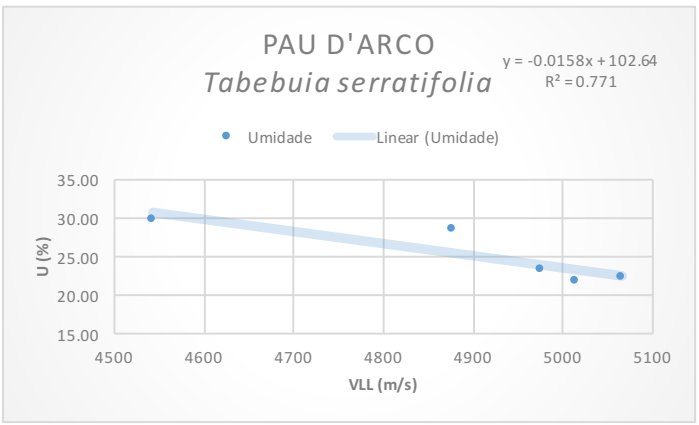
Fonte: Autor, 2016

Figura 17 - Umidade X Velocidade



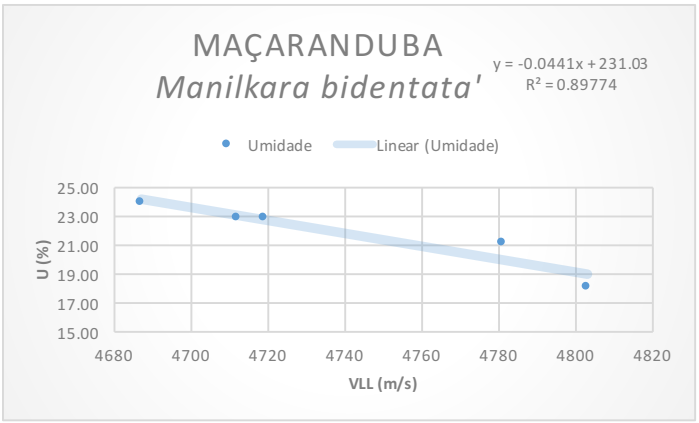
Fonte: Autor, 2016

Figura 18 - Umidade X Velocidade



Fonte: Autor, 2016

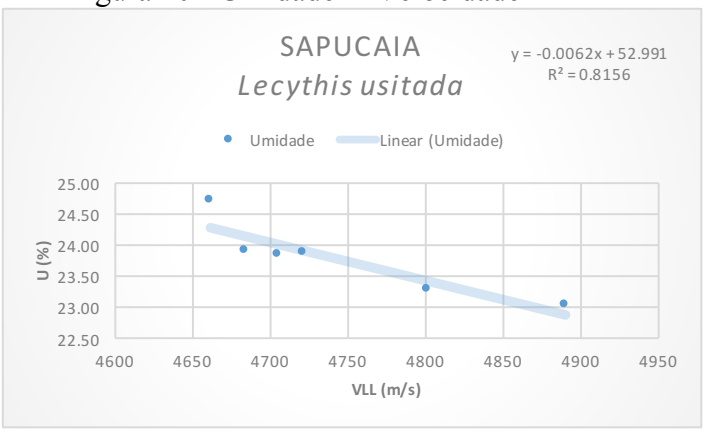
Figura 19 - Umidade X Velocidade



Fonte: Autor, 2016

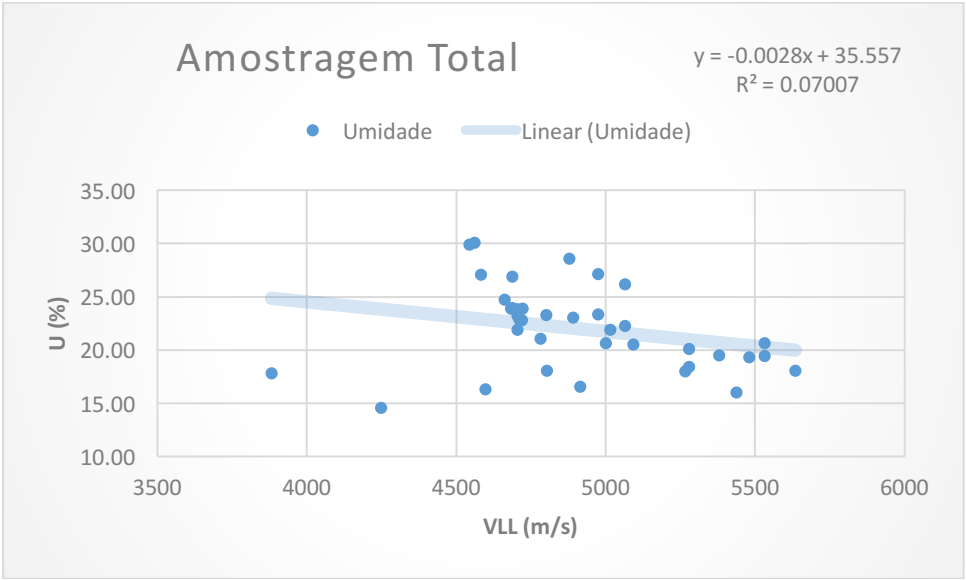
': Maçaranduba com umidade diferente do outro grupo da mesma espécie

Figura 20 - Umidade X Velocidade



Fonte: Autor, 2016

Figura 21 - Umidade X Velocidade



Fonte: Autor, 2016

Os modelos apontaram boa correlação para as espécies Pau d'Arco, Maçaranduba' e sapucaia, apresentando valores superiores a 0,60. As amostras de Sucupira e Fava obtiveram valores inferiores, entretanto indicam que há correlação entre as variáveis, ainda que de forma mais fraca. Já para o Pau-roxo, Jatobá e a Maçaranduba, a correlação foi fraca ou inexistente, com valores de 5% de significância para os dois primeiros. Dentre os fatores que podem ter influenciado o desempenho do coeficiente de correlação, podemos citar o baixo número de corpos-de-prova amostrados, além da variabilidade nas dimensões das amostras. Para o Jatobá e o Pau-roxo, foram extraídas peças de 10cm e 20 cm ao longo das fibras. Segundo a literatura, a dimensão da peça é um fator de importância na propagação de ondas, uma vez que peças

pequenas necessitam de transdutores atuando em frequência mais alta. O aparelho de ultrassom utilizado neste trabalho possui transdutores de 54 kHz, não sendo ideais para ensaios com corpos-de-prova, visto que baixas frequências influenciam diretamente no comprimento das ondas de propagação, resultando uma análise menos detalhada. Por outro lado, percebe-se que, de maneira geral, para as espécies analisadas separadamente, ouve uma queda relativa nas velocidades à medida em que as umidades ascenderam.

Já para a amostragem total, apesar do conjunto ter apresentado elevada significância no teste ANOVA da velocidade em função das duas condições de umidade, a correlação dos parâmetros apenas para uma condição de umidade deu-se fora do valor mínimo. É possível relacionar tal resultado com o fato de que as espécies, apesar de terem apresentado baixa variação das densidades entre si, têm propriedades físicas distintas e reagem de formas diferentes aos fenômenos naturais e processos artificiais, como o da imersão em água para reumidificação dos corpos-de-prova.

Foram realizados, em seguida, modelos de regressão linear múltipla na intenção de observar os resultados para correlação entre variáveis discutidas anteriormente. Para isso foi-se utilizado como modelo, a equação proposta pela NBR 15521 (2007), a qual tem como variável dependente a velocidade na condição saturada obtida no ensaio de ultrassom, e como variáveis independentes, a velocidade de propagação de ondas na condição de equilíbrio, a umidade (%) e a massa específica aparente.

A norma sugere que essa equação de múltiplas variáveis, seja empregada como medida de correção de umidades (entre 13 – 30%) para a umidade do ponto de saturação das fibras em vigas estruturais de madeira, por terem obtido resultados mais satisfatórios pelos autores. Entretanto, neste trabalho, serão realizadas as comparações com a norma, uma vez que este trabalho estuda a viabilidade do emprego da classificação de madeiras por meio do ultrassom. Desta forma, amostras com dimensões pequenas teriam mais facilidade de aplicação no mercado.

Tabela 15 - Modelo de regressão múltipla para amostragem total com velocidade na condição saturada como variável dependente(V_{LLsat}), e a densidade aparente(ρ_{ap}), velocidade na condição de equilíbrio(V_{LL}) e umidade(U) como variáveis independentes.

n	Modelo	R (%)	R^2 (%)	P valor
38	V_{LLsat} = 254,17 + 0,95*V_{LL}-0,018*ρ_{ap} - 11,46*U	0,95	0,90	0,0000

n = número de amostras

Fonte: Autor, 2016

O modelo de regressão apresentou alta correlação entre as variáveis, mostrando ser responsáveis por 86% da variabilidade da velocidade na condição de saturação. Entretanto, tendo em vista que devido a estrutura atômica variável de espécie para espécie, o ensaio de reumidificação das peças de madeira por imersão em água, foi insuficiente para que algumas amostras chegassem a um nível de saturação próximo ou equivalente ao ponto de saturação das fibras, como sugere o modelo da norma. Para este trabalho, foi adotado PSF de 25% - uma vez que seria necessário um estudo aprofundado para determinação do PSF real da amostragem. Na tentativa de aprimorar os resultados, foram realizadas as correções de velocidade na condição saturada, paras as amostras que obtiveram teor de umidade inferior ao PSF, e em seguida, a regressão múltipla das variáveis expostas na tabela 15.

Tabela 16 - Valores médios da velocidade em U% e da velocidade corrigida para o PSF.

	n	V_{LL} $(m.s^{-1})$	$V_{LL(PSF)}$ $(m.s^{-1})$
SUCUPIRA	4	5544,25	5178,64
		(0,46)	(1,02)
PAU ROXO	6	4717,50	4577,88
		(3,83)	(6,33)
FAVA	4	5086,75	4894,80
		(2,71)	(3,06)
JATOBÁ	4	4410,50	4101,73
		(10,09)	(9,86)
MAÇARANDUBA	4	5340,25	5084,97
		(1,54)	(1,82)
MAÇARANDUBA'	5	4740,40	4428,07
		(1,04)	(1,04)
PAU DARCO	5	4895,20	4750,31
		(4,26)	(2,74)
SAPUCAIA	6	4743,83	4387,92
		(1,81)	(1,78)

*': grupo da mesma espécie, obtido de árvore distinta.

n: número de corpos-de-prova

*: valores entre parêntesis são coeficientes de variação (CV).

Fonte: Autor, 2016

Tabela 17 - Modelo de regressão múltipla para amostragem total com velocidade na condição saturada, corrigida para o PSF, como variável dependente ($V_{LL(PSF)}$), e a densidade aparente(ρ_{ap}), velocidade na condição de equilíbrio(V_{LL}) e umidade(U) como variáveis independentes.

n	Modelo	R (%)	R^2 (%)	P valor
38	V_{LLsat} = (-1664) + 0,95*V_{LL}+ 0,94*ρ_{ap} + 5,41*U	0,95	0,90	0,0000

n = número de amostras

Fonte: Autor, 2016

Por meio da Tabela 17, verifica-se que a equação múltipla também se ajusta adequadamente aos dados, com P-valor < 0,05. Com a correção, houve aproximação dos coeficientes de regressão aos coeficientes da NBR 15521 (2007). Esta correlação também foi alcançada por Lorensani (2013) de forma positiva, para madeiras de Eucalipto de dimensões estruturais. Apesar da alta correlação entre as variáveis, é recomendado que outros estudos sejam feitos com a utilização de corpos-de-prova de madeiras tropicais, visto que a norma utilizou, como objeto de estudo, materiais diferentes aos estudados aqui.

5.2 Análise estatísticas dos parâmetros que influenciam a velocidade de propagação ultrassônica na direção tangencial às fibras

Neste tópico, abordam-se as análises referentes ao ensaio de ultrassom realizado no sentido transversal às fibras. Primeiramente fez-se, assim como para os valores obtidos no sentido longitudinal, uma análise de significância das variáveis velocidade tangencial e teor de umidade. Para isso, foram criados intervalos de umidade para determinar se esta é um fator de determinação da velocidade.

Tabela 18 - Análise de significância ANOVA, para a amostragem total, entre os parâmetros de umidade e velocidade de propagação de ondas no sentido tangencial às fibras.

ANOVA						
Fonte de variação	*SQ*	*gl*	*MQ*	*F*	*valor P*	*F crítico*
Entre grupos	86431,84819	2	43215,92409	1,190523	0,3098956	3,1221029
Dentro de grupos	2649895,678	73	36299,9408			
Total	2736327,526	75				

Fonte: Autor, 2016

A análise mostrou resultados fora dos limites aceitáveis de significância, com valor crítico de F (F crítico = 3,1221) superior ao valor de F (F = 1,1905) e o Valor P excedendo a 0,05 (valor P = 0,3098). Esta relação foi obtida dos parâmetros analisados de maneira geral, não distinguindo valores específicos para cada espécie. Para isto, foram feitos, para cada amostra, modelos de regressão linear utilizando-se das mesmas variáveis, como mostrado a seguir:

Tabela 18 - Modelos de regressões lineares para velocidade na direção tangencial e o teor de umidade

	n	Modelo de regressão	R^2
SUCUPIRA	4	V_{TT}= -3,4807*U(%) + 2126,2	0,02058
PAU ROXO	6	V_{TT}= -6,3505*U(%) + 2239,4	0,01211
FAVA	4	V_{TT}= -29,561*U(%) + 2339,7	0,42893
JATOBÁ	4	V_{TT}= -10,085*U(%) + 2499,8	0,06401
MAÇARANDUBA	4	V_{TT} = -3,355*U(%) + 2034,1	0,00673
PAU D'ARCO	5	V_{TT} = -6,555*U(%) + 2239,9	0,13453
MAÇARANDUBA'	5	V_{TT} = -26,99*U(%) + 2611,9	0,13597
SAPUCAIA	6	V_{TT} = -26,12*(U%) + 2582,5	0,70953

Fonte: Autor, 2016

Os modelos de regressão apresentam correlações inferiores para maioria das espécies. Apenas para a Fava e Jatobá, o coeficiente foi levemente superior para leituras no sentido tangencial. Fato este que pode estar relacionado a presença de fissuras ou defeitos na estrutura interna das peças, afetando em sua relação com as variações de umidade a que são submetidas. De maneira geral, este resultado já era previsto, tendo em vista que diversos autores relataram que obtiveram valores mais satisfatório para ensaios realizados no sentido longitudinal das peças. Costa & Gonçalves (2008) alcançaram coeficientes satisfatórios para os resultados de velocidade em todos os sentidos de vigas de *Araucaria angustifolia* e *Gouplia glabra* para umidades diferentes. Entretanto, os valores para os sentidos transversais às fibras (radial e tangencial), foram inferiores aos valores observados no sentido paralelo às fibras.

Fez-se relevante ainda, examinar se existe alguma relação entre as velocidades nos dois sentidos, transversais entre si. O objetivo seria buscar um modelo para a velocidade longitudinal como variável dependente da velocidade tangencial e de outros parâmetros. Desta forma, o sucesso dessa análise poderia trazer formas razoavelmente simples de estimativa da variável mais confiável – a velocidade no sentido longitudinal às fibras.

Serão apresentados a seguir os modelos de regressão que apresentaram melhores resultados:

Tabela 19 - Modelos de regressões lineares múltiplas com V_{LL} como variável dependente e V_{TT} e umidade U(%) como variáveis independentes

	MODELOS DE REGRESSÃO MÚLTIPLA	R^2	P VALOR
Tabebuia serratifolia	V_{LL} = 7503,46 - 0,6164* V_{TT} - 52,77*U	0,80	0,19
Manilkara bidentata	V_{LL} = 5445,28 - 0,100* V_{TT} - 23,04*U	0,99	0,0008
Lecythis usitada	V_{LL} = 6629,50 + 0,49* V_{TT} - 199,66*U	0,82	0,077
TOTAL	V_{LL} = 7499,72 - 0,84*V_{TT} - 39,79*U	0,26	0,005

Fonte: Autor, 2016

Foram apresentados apenas os modelos cujos resultados, melhor atendaram às expectativas. É possível observar que houve uma possível correlação entre as variáveis. A espécie que mostrou melhor coeficiente de correlação foi a *Manilkara bidentata,* além de um melhor valor de significância para o P valor. Além disso, foi a espécie que concebeu valor mais elevados para F. Por outro lado, as espécies *Tabebuia serratifolia* e *Lecythis usitada*, apesar de terem apresentado coeficiente de correlação relativamente altos, obtiveram valores pouco significativos para P valor, ultrapassando a constante $\alpha = 0,05$. Na amostragem geral, o P valor obedeceu a este limite e mostrou ser significativo, apesar do baixíssimo valor de correlação.

Mesmo com a obtenção de tais resultados, não é aconselhável que se faça utilização de quaisquer dos modelos. Devido ao tamanho da amostragem utilizada neste trabalho, faz-se necessária maior quantidade de corpos de prova para que essa relação tenha maior relevância.

5.3 Análises estatísticas da Rigidez das peças de madeira com os demais parâmetros

O valor da rigidez das espécies pode ser adquirido pelo ensaio de ondas ultrassônicas, de acordo com a equação 3.3, como sugere a norma NBR 15521 (2007). A literatura aconselha que seja feito, paralelamente aos ensaios de ultrassom, o ensaio destrutivo de flexão estática, feito na máquina universal de ensaios mecânicos, onde se é obtido o módulo de elasticidade à flexão estática para corpos-de-prova. O ensaio é descrito pela NBR 7190 (1997), e o valor obtido a partir dele, serve como parâmetro de comparação entre os resultados dos ensaios das mesmas amostras sob o mesmo teor de umidade.

Como o ensaio destrutivo não foi realizado, em razão da insuficiência de instrumentos que viabilizassem o sucesso do desempenho, os valores da rigidez alcançados

neste trabalho em razão das velocidades de propagação de ondas ultrassônicas, foram comparados com outros parâmetros afim de possibilitar uma classificação simples para os objetos de estudo. Ainda, foram comparados estes valores de rigidez aos módulos de elasticidade médios, obtidos no ensaio de compressão paralela às fibras, publicados pela NBR 7190 (1997), nas condições de umidade a 12% para diversas espécies de árvores brasileiras. Apenas para o Pau-roxo, a Fava-amargosa e a Sapucaia, estes módulos foram adquiridos a partir de boletim com 4 publicações do Laboratório de Produtos Florestais/Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos renováveis (LPF/IBAMA) (IBAMA,1997; INSTITUTO, 1988; INSTITUTO, 1981; SOUZA et al., 1997) com base nas normas da COPANT - semelhantes as normas ASTM (1988).

Para análise de comparação, foi necessária correção da velocidade obtidas em amostras que, inicialmente, apresentaram umidade de equilíbrio superior ou inferior ao intervalo recomendado pela NBR 15521 (2007), para condição de seca ao ar (11 – 13%). A correção é realizada tendo em vista que os valores médios apresentados pela NBR 7190 (1997) e pelo LPF/IBAMA, foram obtidos na condição de equilíbrio a 12% de umidade. A equação geral de correção da velocidade longitudinal às fibras, foi proposta por Sandoz (2006) e apresentada neste trabalho no capítulo anterior, pela equação 3.4.

Tendo em vista que as amostras utilizadas foram geradas de toras que já se encontravam em equilíbrio, tendo passado pelo processo de secagem natural à sombra, sem controle algum de umidade, algumas delas apresentaram umidade superior e inferior ao intervalo recomendado pela norma para velocidade de ondas de ultrassom. Dessa forma, buscando melhor correlação entre os parâmetros analisados, realizou-se a correção da rigidez obtida a partir das velocidades de propagação das ondas ultrassônicas.

De maneira análoga, para obtenção da constante de rigidez (C_{LL}), faz necessário ainda, ajuste da densidade aparente para a umidade de 12%, para as amostras que estão fora do intervalo. A equação de correção foi dada por Logsdon (1992) e está exposta na equação 3.5 do capítulo anterior.

Tabela 20 - Análise comparativa da rigidez obtida através do ultrassom e de módulo de elasticidade a compressão paralela às fibras

	C_{LL} (MPa)	E_{c0} (MPa)	C_{LL}/E_{c0}
SUCUPIRA	32615,48	21724	1,50
PAU ROXO	23341,56	17946	1,30
FAVA	29980,71	15004	1,99
JATOBÁ	31063,46	23607	1,31
MAÇARANDUBA	31063,46	22733	1,36
MAÇARANDUBA'	27822,11	22733	1,22
PAU D'ARCO	28753,77	18011	1,59
SAPUCAIA	25182,52	14808	1,70

Fonte: Autor, 2016

5.4 Análise de viabilidade de classificação dos corpos de prova:

Considerando os valores obtidos pela tabela 20, observa-se que, de maneira geral, o ensaio de ultrassom obteve resultados muito superiores aos valores de rigidez tabelados. Vários autores afirmaram, anteriormente, que os valores do módulo de elasticidade dinâmico são, de fato, superiores, em relação aos obtidos a flexão estática. Segundo Simpson & Wang (2001, apud MINÁ et al., 2004), isso pode ser explicado considerando-se a madeira um material viscoelástico e altamente amortecedor e, quando a força é aplicada com curta direção, o material se comporta como sólido elástico, enquanto para uma longa duração (Flexão estática), o material se comporta como um líquido viscoso. Dessa forma, pode-se afirmar que os módulos de elasticidade determinados em ensaios não destrutivos são usualmente maiores que os obtidos no ensaio destrutivo. Entretanto, ainda assim, os valores obtidos neste trabalho apresentaram-se fora dos limites aceitáveis. Para a Fava, por exemplo, este valor foi equivalente ao dobro do módulo de elasticidade estático publicado pelo LPF/IBAMA, apresentando rigidez de 29980 MPa contra 15000 MPa do valor característico.

Diversos são os fatores que podem ter contribuído para desarmonia dos resultados. A madeira é um material cujas características variam de espécie para espécie. Ainda, dentro das características para uma mesma espécie ou mesmo estreitando-se para análise de uma só árvore, pode haver grande variabilidade, a qual pode ser explicada, entre outras razões, pela posição geográfica, onde regiões com umidades diferentes podem afetar no desenvolvimento das árvores; a idade da árvore - madeiras de reflorestamento geralmente são cortadas antes do tempo de amadurecimento e apresentam resistência inferior às nativas; a proximidade do corte das

toras com a casca ou medula da árvore; a presença ou não de defeitos ou patologias; etc. As dimensões adotadas nesta pesquisa, também podem ter influenciado nos resultados da rigidez. Autores como Kretschmann & Hernandez (2006, apud LORENSANI, 2013), não atingiram sucesso ao tentar classificação mecânica baseada em valores obtidos de amostras pequenas, e afirmam ser falha. Esta afirmação pode, também, ser relacionada a este trabalho. As espécies escolhidas para estudo têm, de maneira geral, elevada densidade e compacidade, apresentando massa especifica aparente próxima ou superior a 1000 $kg.m^{-3}$. Tendo em vista que corpos-de-prova apresentam maior constância em sua estrutura, pela falta de defeitos, a distribuição de frequência de ultrassom se dá de forma mais simétrica, diferente das vigas, que apresentam assimetria nesta distribuição.

Diante dos fatos apresentados, portanto, faz-se inviável, para este estudo, a classificação das madeiras em faixas de resistência, uma vez que o ensaio destrutivo não foi realizado para os corpos-de-prova, distanciando a correlação da rigidez obtida a partir do ensaio de ultrassom e o módulo de elasticidade em valor característico.

6 CONCLUSÕES

O estudo realizado permitiu boas análises de aspectos evidenciados nos módulos da revisão bibliográfica, as quais foram utilizadas para o desdobramento dos resultados e conclusões para este trabalho. Algumas delas eram esperadas, de acordo com a literatura usada como referência. Foi possível analisar a influência das propriedades físicas das madeiras na propagação de ondas ultrassônicas. Alguns parâmetros mostraram boas correlações, porém, esta pesquisa confirma a necessidade de novos estudos que busquem aprofundar o ensaio de ultrassom em madeiras.

Permitiu-se observar que, de modo geral, as espécies analisadas individualmente, tiveram a velocidade de propagação de ondas afetadas pelo teor de umidade. As velocidades diminuíram à medida em que a umidade se aproximava do PSF. Já para a amostragem total, as correlações foram fracas, apesar da análise de significância ter apontado um valor $P < 0,05$. É possível concluir que tais efeitos se devem ao fato de que as espécies reagiram de maneira particular a absorção de umidade, denotando descontinuidade na regressão do modelo geral.

Entretanto, foi apresentada regressão múltipla para predição da variável dependente (velocidade na condição saturada) em função da umidade, densidade aparente e velocidade na condição de equilíbrio. Os resultados mostraram haver boa correlação entre os parâmetros, com coeficiente de correlação de 0,95 e valor P inferior a 0,05. Em seguida, foram feitas correções para as umidades de equilíbrio que se encontravam foram da faixa proposta pela NBR 15521 (2007), e para as que não haviam atingido o PSF (25% - adotado) após o ensaio de reumidificação dos corpos-de-prova. Porém, as correções e equação gerada a partir da regressão, seguiu métodos propostos pela NBR 15521 (2007) para vigas estruturais de madeira de 45 anos. Recomenda-se, portanto, aprofundamento de estudo na relação dos parâmetros expostos na expressão, fazendo utilização de uma amostragem maior para todas as espécies.

Foi proposta, também, correlação entre as velocidades nos dois sentidos adotados para leitura, ao mesmo teor de umidade. Alguns modelos, como o da espécie *Manilkara tabebuia*, apontaram alto grau de significância ($R = 0,99$; P valor = 0,0008) para predição da velocidade no sentido longitudinal em função das variáveis independentes (V_{TT} e U(%)).

De modo geral, os resultados mostraram haver influência direta da dimensão e geometria das peças usadas em análise, com as velocidades que se propagam no sentido longitudinal às fibras da madeira, conforme apontam os estudos. A utilização de corpos-de-prova estreitou as variações apresentadas dos parâmetros de relevância com a velocidade, para todas as espécies. As leituras de ultrassom foram relativamente altas para as velocidades e

obedeceram uma linda padrão. A utilização de baixa frequência pelos transdutores (54 kHz), pode ter influenciado negativamente, também, na construção de variação nas características das madeiras.

Desta forma, a homogeneidade presente nas amostras ensaiadas, potencializou desproporcionalidade dos resultados encontrados para rigidez, comparados aos valores característicos de cada espécie, fragilizando a viabilidade de uma proposta de classificação. A *Manilkara bidentata,* sob condição de equilíbrio a 18% de umidade, foi a única a apresentar uma relação dentro dos limites aceitáveis, tendo tido resultados de rigidez dinâmica 22% maior que o módulo de elasticidade $E_{C,0}$.

É recomendado que, para melhor análise dos resultados e construção de faixas de classificação, este ensaio seja realizado em conjunto ao ensaio destrutivo de flexão estática, fazendo-se uso de amostragem mais significativa, afim da obtenção do módulo de elasticidade estático para comparação com os parâmetros estudos.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, Luciana Barbosa de. **Ensaios não destrutivos para avaliação da integridade de elementos estruturais de madeiras em construções históricas**. Dissertação de Doutorado. Lavras: UFLA, p.134, 2010

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7190/97- **Projeto de Estruturas de Madeira**. Rio de Janeiro (RJ), p.107, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILIERA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15521- **Ensaios não destrutivos — Ultrassom — Classificação mecânica de madeira Serrada de dicotiledôneas**. Rio de Janeiro, p.8, 2007.

BARTHOLOMEU, A. **Classificação de peças estruturais de madeira através do ultra- som**. 2001. 105f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

BATISTA, Djeison Cesar; KLITZKE, Ricardo Jorge; SANTOS, Carlos Vinícius Taborda. **Densidade básica e retratibilidade da madeira de clones de três espécies de Eucalyptus**. Ciência Florestal, v. 20, n. 4, p. 665-674, 2010.

BUCUR, Voichita. **Acoustics of wood**. Boca Raton, Florida, USA: CRC Press,lnc., 1995.

BUCUR, Voichita. **Ondes ultrasonores dans le bois. Caracterisation mecanique et qualite de certaines essences de bois**. l88p. These (Doctorat en Genie Mecanique)- lnstitut Superieur des Materiaux et de la Construction Mecanique, Saint-Ouen, France, 1984.

Calegari, L. *et al.,* **Monitoramento do teor de umidade de madeiras de pinus elliottii engelm. E eucalyptus grandis w. Hill ex maiden, sob diferentes temperaturas de secagem, através do ultrassom**. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 17, n. 4, p. 399-408, 2007.

CEN. Norm EN 338: **Structural Timber- Strength Classes- Final Draft**. March 1994.

FOREST PRODUCT LABORATORY. **Wood handbook—Wood as an engineering material**. General Technical Report FPL-GTR-190. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, p.508, 2010.

GALVÃO, A. P. M.; JANKOWSKY, I. P.. **Secagem Racional da Madeira**. São Paulo: Livraria Nobel S.a., p.111, 1985.

GONÇALVES, R.; COSTA, O. L. **Influence of Moisture Content on Longitudinal, Radial and Tangential Ultrasonic Velociy for two Brazilian wood Species**. Wood and Fiber Science, 40 (4), pp.580-586, 2008.

GONÇALVES, Raquel; BARTHOLOMEU, Andre. **Avaliação do desempenho de ensaio niio destrutivo em vigas de madeira de *Eucalyptus citriodora* e *Pinus elliottii***. Revista Brasileira de Engenharia Agricola e Ambiental, Campina Grande (PB), v.4, n.2, p.269-274, 2000.

GONÇALVES, R.; COSTA, O.A.L. **Acompanhamento da secagem da madeira de pinus, eucalipto e embuia utilizando ultra-som**. In: CONGRESSO IBERO-AMERICANO DE

PESQUISA E DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS FLORESTAIS, 2., 2002, Curitiba. Anais... Curitiba: UFPR. p. 1-10, 2002.

GONZAGA, ARMANDO L. **Madeira: Uso e conservação**. Brasília, DF: IPHAN/MONUMENTA, 2006. 246 p.

GRABIANOWSKI M, Manley B, Walker JCF. **Acoustic measurements on standing trees, logs and green lumber**. Wood Sci. Technol. (2006) 40:205–216.

HERZIG, L. **Evaluation du module d'Young de bois d'epinette par methode ultrasonore sur carottes de sondage**. 290p., M.Sc. Thesis (Genie Forestiere), Faculte de Foresterie et de Geornatique, Departernent des sciences du bois et de Ia fori:t, Universite Laval, Quebec, Canada, 1992.

JAYNE, B.A. **Vibrationals properties of wood as indices of quality**. Forest products jornal, v.9, n.11, p.413-416, 1959

JOÃO CARLOS MORESCHI. **Propriedades da madeira**: UFPR. 2005. UFPR.

KRETSCHMANN, D.; HERNANDEZ, R. **Grading timber and glued structural members. Primary wood processing: principles and practice**. Dordrecht, Springer, 2006. Pages 339-390.

L.A FALCÃO BAUER (Minas Gerais) (Org.). **Materiais de construção 2**. 5. ed. Uberlândia: Ltc, p.960, 2008.

LOGSDON, N. B. (1992). **Estudo comparativo sobre a maneira de obter a densidade aparente a 12% de umidade**. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS EESTRUTURAS DE MADEIRA, 4, São Carlos, SP. 1992. Anais. São Carlos, LaMEM/EESC/USP. v. 4, p. 31-42, 1992.

LORENSANI, RAFAEL G. M. **Classificação mecânica de peças estruturais de eucalipto utilizando ultrassom**. Dissertação de Mestrado. Unicamp. Campinas, 2013.

LORENZI, HARRI. Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo do Brasil. V.1, 4.ed. Nova Odessa, SP: Instituto Platarium, 2008.

MAINIERI, C.; CHIMELO, J.P. **Fichas de características das madeiras brasileiras**. São Paulo:IPT, p.418, 1989.

MASSAK, Marcus Vinicius. **Influência da idade da árvore na velocidade de propagação de ondas de ultrassom em peças estruturais de madeira**. 2010. 75 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.

MINÁ, A. J. S.; OLIVEIRA, F. G. R.; CALIL JÚNIOR, C.; DIAS, A. A.; SALES, A. **Avaliação não destrutiva de postes de madeira por meio de ultrasom**. Scientia Forestalis, Piracicaba, v. 1, n. 65, p. 188-189, 2004.

MISHIRO, Akiyoshi; MIWA, Yushiro. **Some factors influencing on ultrasonic velocity in wood**. Research Bulletin of the Niigata University Forests, Niigata, Japan, v.27, p.49-56, 1994.

OLIVEIRA, F. G.R; Sales, A. **Efeito da densidade e do teor de umidade na velocidade ultra-sônica da madeira**. *Minerva* 2(1): p.25-31, 2005.

PETRUCCI, Eládio G. R. **Materiais de Construção**. Porto Alegre: Globo, 1973.

PUCCINI, Carlos Teixeira. **Avaliação de Aspectos de Qualidade da Madeira utilizando Ultrassom**. 2002. 74 p. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

ROSS, R. J.; BRASHWA, B. K.; PELLERIN, R. F. - **Nondestructive evaluation of wood**. Forest Products Journal, vol.48, n.1, p.14-19. 1994.

Ross, R.J. **Using sound to evaluate standing timber**. International Forestry Review. v.1, n.1, p.43-44, 1999.

ROSS, R.J.; BRASHAW, B.K.; WANG, X. **Structural condition assessment of in service wood**. Forest Products Journal, Madison, v.56, n.6, p.4-8, 2006.

SANDOZ, J.L.; BENOIT, Y. **Acousto-ultrasonic nondestructive evaluation of historical wooden structures**. In: Seminário sobre a Aplicação de Ensaios Não Destrutivos na Madeira e Materiais a Base de Madeira. Itatiba, 2006.

SCHAFER, M.E.; ROSS, R.J.; BRANSHAW, B.K.; ADAM, R.D. **Ultrasonic inspection and analysis techniques in green and dried lumber**. In: Proceedings, Eleventh International Symposium on Nondestructive Testing of Wood. Madison, Wisconsin. p.95–102, 1998.

SENALIK, Adam C.; SCHUENEMAN, Greg; Ross, Robert J. 2014. **Ultrasonic-Based Nondestructive Evaluation Methods for Wood: A Primer and Historical Review**. USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, General Technical Report, FPL-GTR-235, p.36, 2014.

SIMPSON, W. T., and WANG, X. P. **Relationship between longitudinal stress wave transit time and moisture content of lumber during kiln-drying.** Forest Products Journal 51(10), p.51-54, 2001.

STANGERLIN, D. M.; CALEGARI, L.; SANTINI, E. J.; DOMINGUES, J. M. X.; GATTO, D. A.; MELO, R. R. **Determinação do módulo de elasticidade em madeiras por meio de métodos destrutivo e não destrutivo**. Revista Brasileira de Ciências Agrárias, v.3, n.2 p. 145-150, 2008.

STANGERLIN, Diego Martins; MELO, Rafael Rodolfo de; GATTO, Darci Alberto. **Propriedades de flexão estática da madeira de *Carya illinoinensis* em duas condições de umidade**. Ciência da Madeira,Pelotas, v. 1, n. 2, p.70-79, 2010.

STEIGER, René. Mechanische Eigenschaften von Schweizer Fichten – Bauholz bei Biege-, Zug-, Druck- und Kombinierten M/N Beanspruchung. 168p. **Doktorarbeit in Technischen Wissenschaften** – Eid genössischen Technischen Hochschule Zürich, Zürich, Schweiz, 1996.

TRINCA, A. J.; GONÇALVES, R. **Efeito das dimensões da seção transversal e da frequência do transdutor na velocidade de propagação de ondas de ultra-som na madeira.** Revista Árvore, Viçosa, MG, v. 33, n. 1, p. 177-184, 2009.

WAUBKE, Nils Valerian. **Einsatz der Ultraschall-Impulslaufzeitmessung fiir die Sortierung von Bauholzem**. Holzbauforschung, Deutschland, p.l52-154, 1988.