

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA FLORESTAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL**

SARAH OLLIVIA FRAGA BARBOSA

**ANÁLISE DA ATENUAÇÃO DA ONDA ULTRASSONORA EM
PEÇAS DE MADEIRA DE *Pinus taeda* L.**

**RECIFE-PE
2019**

SARAH OLLIVIA FRAGA BARBOSA

**ANÁLISE DA ATENUAÇÃO DA ONDA ULTRASSONORA EM
PEÇAS DE MADEIRA DE *Pinus taeda* L.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Departamento de Ciência Florestal da
Universidade Federal Rural de Pernambuco,
como parte das exigências para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Florestal.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Nogueira

**RECIFE-PE
2019**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Sistema Integrado de Bibliotecas
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- B238a Barbosa, Sarah Ollivia Fraga
 ANÁLISE DA ATENUAÇÃO DA ONDA ULTRASSONORA EM PEÇAS DE MADEIRA DE *Pinus taeda* L. / Sarah
 Ollivia Fraga Barbosa. - 2019.
 50 f. : il.
- Orientador: Marcelo Nogueira.
 Inclui referências.
- Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, , Recife, 2019.
1. Classificação de madeiras. 2. Classificação estrutural. 3. Ensaio não destrutivo. 4. Sanidade. 5. Ultrassom. I.
 Nogueira, Marcelo, orient. II. Título

CDD

SARAH OLLIVIA FRAGA BARBOSA

**ANÁLISE DA ATENUAÇÃO DA ONDA ULTRASSONORA EM
PEÇAS DE MADEIRA DE *Pinus taeda* L.**

Aprovado em 03 de dezembro de 2019

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Marcelo Nogueira
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Prof. Dr. Everaldo Marques de Lima Neto
Universidade Federal Rural de Pernambuco

MSc. Victor Marcelo Estolano de Lima
Universidade Federal de Pernambuco

**RECIFE-PE
2019**

“Se o séc. XVII foi caracterizado por trabalhos com pedras, o XVIII como o refinamento da alvenaria, o XIX como o auge da estrutura metálica e o XX como a era do concreto, isso deixa o XXI aberto para o próximo sucessor. Minha aposta é a madeira.”

Prof. Alex de Rijke

Dedico este trabalho a minha mãe, Marinalva Fraga.

MENÇÃO ESPECIAL

Ao meu orientador, Prof. Dr. Marcelo Nogueira, por ter acreditado na minha capacidade, por ter abraçado e lutado comigo durante todo este trabalho, pela dedicação e leveza durante nossas reuniões, sem ele, nada neste trabalho seria possível. Mais do que um orientador, foi pai, amigo e companheiro. Espero que, um dia, eu consiga ser apenas metade do que és.

Sarah

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a minha mãe, minha companheira, minha guerreira, exemplo de pessoa, mulher e mãe, que esteve comigo durante toda essa jornada, nos bons e maus momentos.

A minha família que acreditou nesse desejo, me apoiou em todas as horas (direta ou indiretamente), me forneceu carinho e aconchego e acreditou em mim (mais do que eu mesma), em especial ao meu tio Fernando que me ensinou a sempre buscar mais conhecimento, independente sobre o que seja, ler nunca é demais.

As minhas tias Leninha, Lucinha e Vera, que mostraram o que é ser uma mulher forte nessa Era.

Aos meus avós que, sempre me deram carinho, até quando já era suficiente.

Às Prof^{as}. Ana Paula Guedes, Marny Pessoa e Simone Mirtes que, no decorrer da vida acadêmica, me apoiaram, lutaram comigo, sempre me incentivaram e tornaram-se minhas amigas, e que essa amizade dure por toda a eternidade.

Aos amigos que fiz no decorrer da Universidade, não poderei citar todos, mas me recordo de Deyvid, João, Juan, Linda, Manu, Polly, entre outros.

Agradeço também aos que me auxiliaram durante a faculdade, seja no TCC ou em qualquer outra disciplina.

Agradeço as minhas companheiras de desespero, Ju e Anninha, ouvimos muito o choro umas da outras, mas sempre nos incentivávamos, independente da nossa condição mental/emocional. Só queria lhes dizer que tudo vai dar certo.

A minha psicóloga Mirian, que enlouqueceu junto comigo durante toda essa jornada. Obrigada por me acalmar e me ajudar nos direcionamentos.

Aos meus colegas de turma que fizeram o tempo na Academia ser mais leve.

Agradeço aos alunos de monitoria que, apesar de me privarem de algumas/várias horas de sono, fizeram apaixonar-me pelo lecionar.

Ao Prof. Antônio Acácio e ao MSc. Victor Estolano que, me permitiram o uso do ultrassom no Laboratório de Materiais e Estruturas, sem eles, esse TCC não seria possível.

Por fim, agradeço ao Departamento de Ciência Florestal da UFRPE que, por não apoiarem/incentivarem os sonhos dos discentes, tratarem os mesmos como máquinas de produção acadêmica e causarem transtornos psicológicos (não só em mim, mas em diversos alunos), me ensinou a correr atrás do que quero e não contar com terceiros, pois, além de nascermos sozinhos e irmos embora do mundo da mesma forma, vivemos uma vida onde existe uma gama de pessoas que está desejando o nosso insucesso.

RESUMO

A avaliação não-destrutiva da madeira é classificada como o uso de um ou mais métodos que quantifique as propriedades físico-mecânicas sem comprometer o uso final do material. Em parceria com o Laboratório de Tecnologia dos Aglomerantes (LabTag) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), o presente trabalho dispõe-se a estudar a aplicação do método do ultrassom em peças de madeira de *Pinus taeda* L. O material foi adquirido em madeireira na cidade do Recife – PE, de onde foram selecionados 12 barrotes, dos quais foram retirados 2 corpos de prova contíguos, medindo cerca de 5 cm X 5 cm X 15 cm, de cada peça. Os corpos de prova foram submetidos a ensaios de ultrassom através de transdutores piezoelétricos de faces planas e frequência de 54 kHz. Após as leituras, os corpos de prova foram selecionados e sujeitos a perfurações passantes no centro da direção longitudinal com o auxílio de brocas chatas de ½” e 1” e, mais uma vez, submetidos aos ensaios de ultrassom. Após a análise dos dados, foi obtido uma densidade média do material de 0,43 g/cm³, as leituras do ultrassom resultaram em ondas de velocidade média de 4450,71 m/s e constante dinâmica média de 8866,33 MPa, para a direção longitudinal dos corpos de prova íntegros. Para a condição de perfurado por broca de ½”, as leituras do ultrassom revelaram uma queda de 2,51% na velocidade média, em comparação com as leituras das peças íntegras, e queda de 5% na constante dinâmica. Já para os perfurados por broca de 1”, as leituras mostraram queda na velocidade média de propagação de 10,10% e declínio da constante dinâmica em 18,11%, quando comparados com as peças íntegras. Por fim, considerando o teste de comparação de médias através do teste de Tukey a 95% de probabilidade, é possível afirmar que o método de ondas de ultrassom possui sensibilidade para avaliar a perda de massa de peças de *Pinus taeda* L.

Palavras-Chaves: classificação de madeiras, classificação estrutural, ensaio não destrutivo, sanidade, ultrassom.

ABSTRACT

Non-destructive assessment of wood is classified as the use of one or more methods that quantify the physical-mechanical properties without compromising the end use of the material. In partnership with the Laboratory of Binder Technology of the Federal University of Pernambuco, the present work aims to study the application of the ultrasound method in *Pinus taeda* L. wood pieces. The material was purchased in wood shop in Recife - PE, from which 12 bars were selected, from which 2 contiguous specimens were taken, measuring about 5 cm X 5 cm X 15 cm, from each piece. The specimens were subjected to ultrasound tests using flat-faced piezoelectric transducers of 54 kHz frequency. After the readings, the specimens were selected and subjected to through-holes in the center of the longitudinal direction with the help of ½” and 1” flat drills and, once again, submitted to ultrasound tests. After data analysis, an average material density of 0.43 g/cm³ was obtained, ultrasound readings resulted in mean velocity waves of 4450.71 m/s and mean dynamic constant of 8866.33 MPa for the longitudinal direction, of intact specimens. For the ½” drill perforated condition, ultrasound readings revealed a 2.51% drop in mean velocity compared to the readings of intact parts and a 5% drop in constant dynamics. For the 1” drill bits, the readings showed a decrease in the average propagation speed of 10.10% and a constant dynamic decline of 18.11% when compared to the intact pieces. Finally, considering the means comparison test using the Tukey test at 95% probability, it is possible to state that the ultrasound wave method has sensitivity to evaluate the mass loss of *Pinus taeda* L. pieces.

Keywords: wood classification, structural classification, non-destructive testing, sanity, ultrasound.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Atenuação de ondas afetadas pela dispersão e absorção. Fonte: Garnier et al., 2009. _____	27
Figura 2 – Identificação, quantificação e classificação dos defeitos. _____	30
Figura 3 – Pesagem do corpo-de-prova a 12% de umidade. _____	32
Figura 4 – Equipamento de ultrassom Proceq Pundit Lab. a) vista frontal; b) vista lateral; c) calibração do equipamento. _____	33
Figura 5 – Leitura transversal no corpo de prova. _____	33
Figura 6 – Perfurações nos corpos de prova. a) Diferenciação entre perfurações; b) perfuração realizada por broca chata de ½”; c) perfuração realizada por broca chata de 1”. _____	34
Figura 7 – Brocas chatas utilizadas para realizar as perfurações, à esquerda, broca de 1" e, à direita, broca de ½". _____	34
Figura 8 – Regressão linear (reta intermediária, em vermelho), intervalo de confiança (retas em verde) e intervalo de predição (retas em roxo) da variável “tempo” dos corpos de prova perfurados por broca chata de ½” (à esquerda) e 1” (à direita). _____	42
Figura 9 – Regressão linear (reta intermediária, em vermelho), intervalo de confiança (retas em verde) e intervalo de predição (retas em roxo) da variável “velocidade” dos corpos de prova perfurados por broca chata de ½” (à esquerda) e 1” (à direita). _____	43
Figura 10 – Regressão linear (reta intermediária, em vermelho), intervalo de confiança (retas em verde) e intervalo de predição (retas em roxo) da variável "constante dinâmica" dos corpos de prova perfurados por broca chata de ½” (à esquerda) e 1” (à direita). _____	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados médios das propriedades físicas da madeira de Pinus taeda L. _____	36
Tabela 2 – Resultados das leituras na direção longitudinal nos corpos de prova de Pinus taeda L. _____	37
Tabela 3 – Resultados das leituras na direção transversal nos corpos de prova íntegros de Pinus taeda L. _____	38
Tabela 4 – Resultados das leituras na direção transversal nos corpos de prova após a perfuração de ½”. _____	39
Tabela 5 – Resultados das leituras na direção transversal nos corpos de prova após a perfuração de 1”. _____	39
Tabela 6 – Teste de comparação de médias para as variáveis analisadas nos corpos de prova íntegros e perfurados. _____	40
Tabela 7 – Resultados das correlações de Pearson entre as grandezas dos corpos de prova íntegros de Pinus taeda L. _____	41
Tabela 8 – Resultados das correlações de Pearson entre as grandezas dos corpos de prova perfurados por broca de ½” de Pinus taeda L. _____	41
Tabela 9 – Resultados das correlações de Pearson entre as grandezas dos corpos de prova perfurados por broca de 1” de Pinus taeda L. _____	41

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
2. OBJETIVOS	16
2.1 Geral.....	16
2.2 Específicos	16
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
3.1. <i>Pinus taeda</i> L.	17
3.2. Métodos de classificação estrutural da madeira.....	18
3.3. Classificação mecânica não destrutiva da madeira	18
3.3.1. Componentes da classificação mecânica.....	19
3.3.2. Defeitos que influenciam na classificação da madeira.....	19
3.3.2.1. Nós.....	19
3.3.2.2. Inclinação da grã.....	20
3.3.2.3. Medula	21
3.3.2.4. Rachaduras.....	21
3.3.2.5. Madeira juvenil e adulta	22
3.3.2.6. Cerne e alburno.....	23
3.3.3. Método da propagação de ondas de ultrassom.....	23
3.3.3.1. Fatores que interferem na propagação do ultrassom	25
A) Umidade.....	25
B) Dimensões da seção transversal e comprimento do corpo-de-prova	26
C) Frequência.....	26
D) Atenuação das ondas ultrassônicas	26
D.1.) Absorção	27
D.2.) Dispersão.....	28

D.3.) Distorção	29
D.4.) Difração	29
4. MATERIAL E MÉTODOS	30
4.1 Material	30
4.2 Métodos.....	31
4.2.1. Umidade dos corpos de prova	31
4.2.2. Densidade dos corpos de prova.....	31
4.2.3. Ensaio não-destrutivo nos corpos de prova.....	32
4.2.4. Perfurações nos corpos-de-prova	34
4.2.5. Análise dos resultados	35
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
5.1. Dados gerais dos corpos de prova.....	36
5.2. Avaliação da constante dinâmica longitudinal na madeira íntegra.....	36
5.3. Avaliação da constante dinâmica transversal na madeira íntegra.....	37
5.4. Avaliação da constante dinâmica transversal pós-perfuração	38
5.5. Associação entre as grandezas estudadas	40
5.6. Regressão linear entre as grandezas estudadas	42
6. CONCLUSÕES	45
7. REFERÊNCIAS	46

1. INTRODUÇÃO

Com o crescente uso da madeira como material estruturante de construções civis, aumenta também a necessidade em avaliar seu desempenho físico – mecânico. Porém, com a baixa oferta de material de qualidade, há a necessidade de caracterizá-la sem comprometer do seu destino final.

Em 1958, na Inglaterra, Austrália e América do Norte, iniciaram-se os estudos para a criação de um método industrial para a classificação mecânica de madeiras. Já em 1996, a América do Norte liderava as pesquisas na classificação por ondas de tensões, atingindo 30 milhões de m³ de madeira classificada. No final da década de 70, foi criado o primeiro sistema de classificação mecânica através de métodos não-destrutivos, o sistema E-rated, abrindo as portas para os demais sistemas.

Apesar da notável supremacia dos Estados Unidos no conhecimento e desenvolvimento de novos métodos de classificação mecânica não-destrutiva, observa-se o crescente interesse de nações como: Alemanha, Japão, França, Reino Unido, entre outras.

Dentre os usuais sistemas de classificação mecânica não-destrutiva de madeiras, o método do ultrassom se destaca pelo baixo custo do equipamento e a possibilidade de analisar a peça após a instalação (bastante utilizada em edificações históricas).

O método do ultrassom, em comparação com demais técnicas não-destrutivas, se configura como mais avançado, pois é possível controlar a frequência de emissão das fontes dos pulsos, além de facilitar o uso na indústria com resultados imediatos e diretos.

Portanto, o presente trabalho pretende demonstrar a eficiência do método do ultrassom para detectar a perda de massa em peças de madeira de *Pinus taeda* L., podendo assim, ser utilizado para avaliar a sanidade de peças na construção civil no decorrer do tempo, sem precisar removê-la e/ou danificá-la.

2. OBJETIVOS

2.1 Geral

Analisar a atenuação das ondas ultrassônicas nas peças de madeira íntegras e com redução de massa de *Pinus taeda* L.

2.2 Específicos

- Aferir as propriedades físicas (massa, umidade e densidade aparente) dos corpos de prova estudados;
- Determinar o tempo e a velocidade média de propagação da onda de ultrassom, além da constante dinâmica dos corpos de prova;
- Simular a degradação das peças, através de perfurações variadas;
- Comparar o comportamento das variáveis de ultrassom nos diferentes níveis de degradação das peças.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. *Pinus taeda* L.

Segundo Klock (2000), o *Pinus taeda* L. é um pinheiro característico do sul dos Estados Unidos e recebe o nome “taeda” porque tem referência ao termo utilizado por ancestrais para denominar os pinheiros resinosos.

As árvores desta espécie podem atingir de 25 a 30 m de altura, com tronco de casca marrom-avermelhado, acículas em número de 3 por fascículo, frutos decíduos e sementes aladas de cor marrom-escura (LORENZI et al., 2003).

A madeira apresenta grã reta e textura média; em alguns casos, apresenta dificuldades para colagem; sua trabalhabilidade com ferramentas manuais é difícil, além de possuir elevada resistência para a remoção de pregos; é considerada como uma madeira pesada e dura; possuindo uma resistência moderada ao choque; sua contração é relativamente alta, porém é estável em secagens de boa condução; o cerne possui resistência a degradação de moderada a baixa e, o alburno, apresenta uma impregnação fácil aos produtos preservantes (USDA, 2019).

Segundo Bortoletto Jr. (1993), a densidade básica do *Pinus taeda* L. se encontra no intervalo de 0,47 g/cm³ à 0,51 g/cm³, com isso sua madeira é bastante explorada pela indústria moveleira, em construções civis e na produção de compensados, laminados, chapas de fibras e partículas.

Segundo SBS (2008), 80% das florestas plantadas no sul do Brasil é constituída de *Pinus taeda* L., pois a espécie apresenta boas características na conversão mecânica em chapas e madeira serrada, além de conter menor teor de resina e qualidade excelente das fibras da madeira.

3.2. Métodos de classificação estrutural da madeira

São utilizados dois métodos para classificar peças de madeira de maneira estrutural: o mecânico e o visual. Tais métodos são utilizados de forma isolada ou complementando-se um ao outro.

A classificação mecânica é conduzida em máquinas do tipo MSR (Machine Stress Rated) e baseia-se em estimadores, como por exemplo a densidade e a rigidez à flexão, para analisar a resistência da madeira (NOGUEIRA, 2007). Ainda o mesmo autor define que, no método visual, o pesquisador avalia cada peça individualmente, aferindo, localizando e classificando os nós, trincas, rachaduras entre outros defeitos que podem afetar a resistência da peça. A classificação dar-se-á através de valores predeterminados em tabelas que foram concebidas mediante ensaios mecânicos em corpos-de-prova e/ou peças de tamanho estrutural.

Portanto, a madeira que possuir a melhor qualidade será a que apresentar menor quantidade de defeitos, sendo eles característicos da espécie ou consequentes do manejo no plantio ao destino final da madeira.

3.3. Classificação mecânica não destrutiva da madeira

Processo pelo qual a madeira é avaliada através de testes não-destrutivos, bem como perícia visual para as características que o equipamento não avaliou habilmente. Dentre os métodos de classificação mecânica, pode ser avaliado através da flexão dinâmica, com o uso de MSR (Machine Stress Rate – “Classificação mecânica por tensões”), MEL (Machine Evaluated Lumber – “Avaliação mecânica da madeira”) e *E-rated*, e, através da flexão estática, com o método da vibração transversal, método das ondas de tensão e método da propagação de ondas de ultrassom (NOGUEIRA, 2007).

3.3.1. Componentes da classificação mecânica

Segundo GREEN e KRETSCHMANN (1999), a classificação mecânica é dividida em três fases:

- a) Estimar a resistência por intermédio de ensaios não-destrutivos;
- b) Através da resistência estimada, determinar os valores de cálculo;
- c) Controle de qualidade.

3.3.2. Defeitos que influenciam na classificação da madeira

São anomalias da forma do tronco da árvore, da sua seção transversal, como também da estrutura e da cor do lenho que possam reduzir, restringir ou mesmo anular a utilização da madeira. Para peças de madeira de *Pinus* sp., os defeitos mais encontrados são os nós.

3.3.2.1. Nós

Nó é uma fração do ramo de uma árvore que fica incorporado à peça da madeira, porém possui propriedades diferentes da madeira que circula-o.

Podem ser classificados como:

a) Nó firme: Em condições normais, fica retido firmemente na madeira seca. Equivale ao momento em que o ramo estava fisiologicamente ativo na árvore, ou seja, havia uma continuidade dos tecidos do ramo com os do tronco (BARACHO JR., 2012).

b) Nó solto: Não fica retido firmemente na madeira seca. Representa um galho que morreu e deixou de participar do desenvolvimento da árvore. Sua fixação depende da compressão exercida pelo crescimento diametral do tronco (BARACHO JR., 2012).

Os nós são mais densos, escuros e lignificados do que a madeira ao seu redor, portanto mais duros e quebradiços, com isso, reduz intensamente as propriedades da madeira, principalmente à tração e flexão (NOGUEIRA, 2003).

São considerados defeitos comuns que afetam principalmente as peças tracionadas, em relação às comprimidas. Dependendo da sua posição na peça, o nó pode afetar de forma diferenciada. Segundo Haygreen e Bower (1995), os nós localizados em uma posição central na peça, podem reduzir sua resistência em 24%, já para nós localizados na borda, a redução fica em torno de 43%.

3.3.2.2. Inclinação da grã

A inclinação da grã é representada pelo ângulo entre o sentido das fibras e o eixo central do tronco (ASTM D245-06). A grã pode ser classificada em:

- a) Grã reta: Quando as fibras estão paralelas ao eixo da peça.
- b) Grã irregular: Quando as fibras apresentam variações de inclinação em relação ao eixo da árvore, dependendo do grau de inclinação das fibras, pode afetar a resistência da peça.
- c) Grã espiral: Quando as fibras formam uma espiral ao longo do tronco, podendo ser para o lado direito, esquerdo e variando por toda a extensão da árvore. As peças apresentam limitações industriais, principalmente para a construção, pois têm a resistência reduzida, difícil trabalhabilidade e sérias deformações durante a secagem.
- d) Grã entrecruzada: As fibras são inclinadas de forma alternada para o lado direito e esquerdo. Por ser uma forma modificada da grã espiral, as peças apresentarão deformações na secagem e dificuldade em seu manejo, além de terem a elasticidade e a flexão estática afetadas, porém podem ser utilizadas como figuras decorativas.
- e) Grã ondulada: Os elementos anatômicos axiais formam linhas onduladas regulares por toda a árvore. As peças podem ser utilizadas como componente de decoração.

f) Grã inclinada: Quando os elementos axiais apresentam um desvio angular em relação ao eixo axial do tronco. Afeta a resistência mecânica da peça, além de ocorrerem deformações durante a secagem.

A inclinação da grã pode impactar diretamente nas propriedades da madeira, segundo a norma brasileira NBR 7190/97, porém inclinações de até 6° podem ser desconsideradas.

3.3.2.3. Medula

A medula é classificada como parênquima localizado no centro do tronco. Tem por função, armazenar nutrientes e é de suma importância em indivíduos jovens, pois pode participar do transporte ascendente de líquidos.

Em peças serradas que engloba a medula, ocorrerá redução na sua resistência mecânica, pois na sua região proximal, há fortes tensões que facilitarão o surgimento de rachaduras (PUCCINI, 2002).

3.3.2.4. Rachaduras

São sequelas da desproporção de retração nas direções tangencial e radial da madeira e de desequilíbrios nos níveis de umidade ao longo da peça, tais diferenças causam tensões que provocam a ruptura da peça, quando possuem resistência superior ao dos tecidos no lenho. As mesmas podem ser evitadas através de secagem lenta e uniforme da madeira. São divididas em:

a) Rachaduras de topo: Ocorrem nas extremidades da peça, devido a rapidez na secagem nessa região, em comparação ao restante. Em situações mais agravantes, podem se tornar fendas (BARACHO JR., 2012).

b) Rachaduras superficiais: Quando a umidade do ar alcança valores abaixo do esperado (<50%), na fase inicial da secagem, causam uma evaporação rápida. Devido à baixa umidade relativa que provocam a secagem rápida das camadas exteriores à níveis inferiores ao PSF (Ponto de Saturação das Fibras), ao mesmo tempo que as camadas

internas encontram-se acima do PSF, tais condições provocam a ruptura do tecido (BARACHO JR., 2012).

c) Rachaduras internas: Ocasionalmente por rachaduras superficiais fechadas ou por rupturas de tração no interior do exemplar. Na maioria dos casos, não é possível visualizar este defeito na superfície e/ou topo da peça, apenas após o processamento da mesma. Por não poderem ser eliminadas, a maior parte dos casos inutiliza a madeira (BARACHO JR., 2012).

3.3.2.5. Madeira juvenil e adulta

A madeira juvenil é considerada como a região no centro da árvore, possui forma cilíndrica e diâmetro quase uniforme, se estende do topo à base da árvore e pode participar da formação do alburno ou do cerne (quando já presente na árvore). Quando tem sua presença comparada entre coníferas e folhosas, observa-se uma fácil identificabilidade em espécies de coníferas (KRAHMER, 1986; ZOBEL e BUIJTENEN, 1989; COWN, 1992; EVANS et al., 2000).

Quando se compara a madeira juvenil com a adulta, observa-se que a madeira juvenil apresenta maiores ângulos microfibrilares da camada S_2 , diâmetro do lúmen, conteúdo de lignina, lenho de reação e a contração longitudinal, de outro modo, a madeira adulta apresenta maior densidade, comprimento de traqueídes, espessura da parede celular, conteúdo de celulose e resistência e rigidez (BENDTSEN, 1978; SENFT ET AL., 1985).

Segundo Zobel e Buijtenen (1989), é altamente difícil encontrar a localização exata do encontro entre a madeira juvenil e adulta, pois a mudança de uma para a outra não é processada da mesma forma para as diferentes características e propriedades da madeira.

Com o rápido crescimento das plantações nos tempos atuais, a ocorrência de madeira de qualidade inferior, devido à proporção de madeira juvenil elevada, vem aumentando, com isso, é observado problemas de qualidade nos produtos oriundos desta matéria-prima. Em se tratando de peças estruturais, aquelas que possuem certa quantidade de lenho juvenil, apresentam inferiores classes de resistência, pois afetam os módulos de elasticidade, as resistências à compressão paralela e normal, à flexão estática e à tração

paralela, assim como, os módulos de elasticidade e de ruptura, pois estão altamente ligados à densidade (BROWN e McWILLIAMS, 1990; McALISTER e CLARK, 1991; KRETSCHMANN e BENDTSEN, 1992; GEIMER et al., 1997; KRETSCHMANN, 1997; McALISTER et al, 1997; EVANS et al, 2000).

3.3.2.6. Cerne e alburno

Segundo Benjamin (2006), a principal função do lenho é transportar a seiva da raiz às folhas da árvore. Porém tal função não ocorre continuamente, pois, durante o crescimento da árvore, as células são bloqueadas por tiloses ou deposição de extrativos. A partir deste ponto, as células param de conduzir a seiva e passam a ser depósito de extrativos, com isso, a diferenciação de cerne e alburno está em: cerne é a porção do lenho com as células mortas e alburno é a porção que ainda transporta a seiva. Tal transformação (alburno para cerne) ocorre no decorrer da vida da árvore, ou seja, todos os anos as camadas de alburno são transformadas gradativamente em cerne e novos alburnos se formam nas camadas externas (próximas ao câmbio) da árvore.

A diferenciação de cerne para alburno, em algumas espécies, pode ser notada visualmente, por causa do escurecimento do lenho (apesar de tal fato não ser determinante para o surgimento do cerne) causado pela deposição dos extrativos que lhe darão, às vezes, maior resistência contra a deterioração (por fungos ou insetos) (NOGUEIRA, 2007).

Bodig e Jayne (1993) afirmam que os extrativos têm uma elevada influência sob a resistência à compressão paralela às fibras, baixo efeito na resistência à flexão e extremamente baixo na resistência ao choque.

3.3.3. Método da propagação de ondas de ultrassom

O uso de propagação de ondas, para determinar as propriedades mecânicas da madeira, baseia-se na relação entre a velocidade do som, a constante dinâmica e a densidade. O método pode ser utilizado na árvore e nos produtos finais da madeira (SANDOZ, 1989). Através da técnica de ultrassom, pode-se determinar a presença de

nós, de ataque de microrganismos ou insetos, direcionamento das fibras, decomposição, além de avaliar os elementos estruturais da madeira em uso e estimar parâmetros como os módulos de elasticidade e ruptura (GORNIAK e MATOS, 2000).

Como vantagens do método, pode-se citar o baixo custo de aquisição do equipamento (em comparação às máquinas de classificação automática) e a facilidade de treinamento da mão-de-obra. Segundo Terezo (2004), também são vantagens do método: a possibilidade da determinação de propriedades “*in situ*”; a redução de perdas de material (frequente em métodos destrutivos); a classificação de maneira quantitativa, da qualidade e da resistência das peças de madeira; a localização de defeitos internos; a detecção da umidade ao longo da peça; e a diminuição do tempo de perícia, bem como dos gastos com funcionários/hora em serviço.

As ondas sonoras são ondas mecânicas longitudinais e encontram-se em um intervalo audível (20 à 20000 Hz), podendo se propagar em sólidos, líquidos e gases. Abaixo do intervalo audível, as ondas são conhecidas como infrassom e, acima do mesmo, são denominadas de ultrassom.

Segundo Carrasco e Azevedo Jr. (2003), o uso de ondas ultrassônicas possui diversas vantagens em relações às demais ondas para avaliar os materiais, como:

a) Quanto maior a frequência, menor o comprimento da onda, portanto há maior facilidade para se conseguir as condições necessárias à propagação de ondas em materiais, sendo de suma importância para pequenos corpos;

b) Como os coeficientes de absorção são mais altos, serão mais fáceis de mensurar em altas frequências;

c) São inaudíveis;

d) Por serem de alta frequência, são mais facilmente direcionadas.

Nas madeiras, o método é utilizado através da colocação de dois transdutores, onde um emitirá a onda e o outro receberá. Com isso, o equipamento registrará o tempo, em microssegundos, para a onda ir de um transdutor o outro. Através do tempo, é possível determinar a velocidade de propagação da onda ultrassônica e o C_D (equação 1).

$$C_D = \rho * v^2 * 10^{-6} \quad (\text{equação 1})$$

Sendo:

C_D – Constante dinâmica (MPa);

ρ – Densidade da madeira (kg/m³);

v – Velocidade da onda (m/s).

3.3.3.1. Fatores que interferem na propagação do ultrassom

A) Umidade

Na madeira, a água é encontrada de 3 maneiras:

I) Água livre ou capilar: presente de forma parcial ou completamente nos lúmens e cavidades. Denominada de livre por não ser química ou estar unida a estrutura da madeira. Fácil de ser removida, é a primeira a evaporar durante o processo de secagem.

II) Água de impregnação ou higroscópica: está contida na parede celular e associada aos polímeros da mesma através de pontes de hidrogênio. Durante o processo de secagem, é a última a evaporar, por se encontrar na região higroscópica, a nível molecular.

III) Vapor d'água: assim como a água livre, pode estar contido nos espaços vazios das cavidades celulares.

Em se tratando da propagação da onda ultrassônica, a velocidade decresce com o aumento do teor de umidade do corpo-de-prova. Segundo Tiemann (1906), apenas a água higroscópica afeta as propriedades mecânicas da madeira, pois a parede celular contribui diretamente na resistência da mesma.

No intervalo de 0% até o Ponto de Saturação das Fibras (PSF), a água higroscópica concede baixa atenuação às ondas, além de não prejudicar, de forma considerável, a propagação da onda ultrassônica, certificando uma condição de não-perturbada à velocidade da onda.

B) Dimensões da seção transversal e comprimento do corpo-de-prova

Comumente os estudos sobre propagação de ondas, trabalham as equações em uma condição ideal (onde o meio de propagação é infinito), onde o comprimento da onda é inferior às dimensões da seção transversal por onde a onda atravessa, porém, na prática, não existe uma situação ideal, pois são aplicados em madeiras de tamanho comercial, portanto faz-se uma aproximação da teoria.

Segundo Candian (2004), em estudo sobre a influência do comprimento de peças de madeira na propagação da onda ultrassônica, é possível determinar um valor para a relação entre o comprimento do corpo-de-prova e o comprimento da onda, a partir do princípio de que a propagação da onda é constante.

C) Frequência

A frequência da onda ultrassônica é dependente, acima de tudo, do tamanho dos corpos-de-prova, porém ainda são demonstrados resultados contraditórios entre alguns autores.

Quando uma onda longitudinal se propaga no sentido da direção das fibras da madeira, os comprimentos da onda e o comprimento das células serão de mesma ordem, portanto a propagação ocorre no regime de dispersão estocástica. De outro modo, no sentido radial e tangencial, os comprimentos de onda são maiores que as dimensões médias das células e, portanto, a propagação ocorrerá no regime de dispersão de Rayleigh, destarte as duas condições de propagação se mostraram diretamente ligadas à frequência da onda utilizada.

D) Atenuação das ondas ultrassônicas

A onda acústica, quando se propaga em um meio, sofre um declínio devido a diversos tipos de mecanismos físicos. Tais mecanismos podem ser divididos em duas classes: absorção e dispersão (Figura 1).

Quando o volume do meio de transmissão é grande, como por exemplo em transmissões no ar ou na água (medição de distâncias, detecção de obstáculos, etc.), a atenuação devido a mecanismos de absorção é mais importante. Em contrapartida, quando almeja-se estudar pequenos volumes (caracterização, detecção de defeitos, etc.), a atenuação devido a mecanismos de dispersão se destaca (SANTOS, 2004).

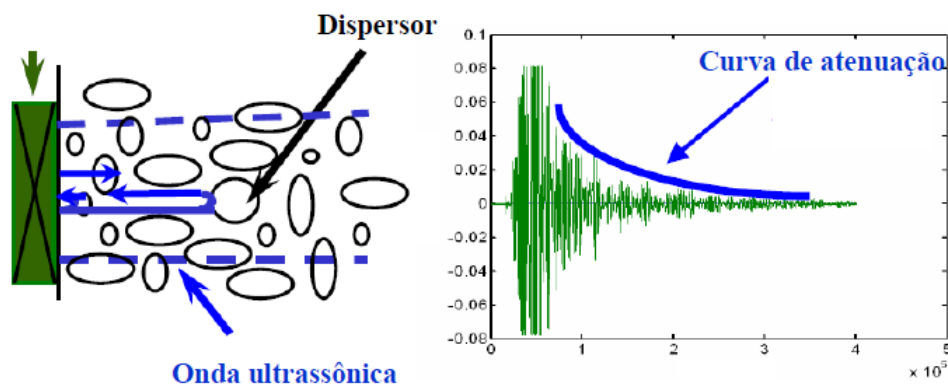


Figura 1 – Atenuação de ondas afetadas pela dispersão e absorção. Fonte: Garnier et al., 2009.

D.1.) Absorção

As perdas por absorção são classificadas em: condução térmica, histerese ou de origem viscosa.

Os dispêndios causados por condução térmica ocorrem quando a propagação da onda dá origem a deformações no meio e, por consequência, ocorre zonas onde há aumento de temperatura (compressão) e zonas de diminuição de temperatura (expansão). Tais perdas são proporcionais ao quadrado da frequência e ocorrerão em ondas longitudinais, pois as transversais não originam alterações dos volumes durante a propagação (SANTOS, 2004).

As perdas por histerese, também conhecida por perdas de trocas de estados, ocorrem, pois, alguns líquidos, vidros e polímeros possuem grandes cadeias moleculares que, sob influência de ondas acústicas, se reorganizam de forma irreversível, causando perdas proporcionais à frequência. (SANTOS, 2004).

Por fim, as perdas de origem viscosa, principal responsável pela atenuação por absorção em sólidos e líquidos, surge devido ao movimento de partículas vizinhas com velocidades diferentes.

D.2.) Dispersão

A atenuação por dispersão ocorre, pois, os materiais não são perfeitamente homogêneos. Tais variações são resultado de inclusões, poros ou a natureza do material (estrutura de grão em metais, a madeira, etc), porém, até mesmo materiais compostos por um único tipo de cristal podem apresentar o fenômeno da dispersão, porque, quando os seus grãos estão orientados de maneira que originará propriedades elásticas diferentes e velocidades de propagação em diversas direções, ocorrerá a anisotropia (SANTOS, 2004).

Imaginando um material que possui a estrutura de grão de dimensão similar ao comprimento de onda, entender-se-á como dispersão quando a onda atingir a fronteira do grão, a mesma dará origem a uma onda refletida e outra transmitida e, tal processo, será repetido nas próximas fronteiras.

Os efeitos da atenuação por dispersão podem ser divididos em três regiões: na primeira, o dispersor é muito pequeno em comparação ao comprimento de onda, resultando em baixa intensidade de atenuação; na segunda região, a dispersão é moderada e seu comportamento será conduzido por modelos matemáticos estocásticos com variáveis aleatórias; por fim, na terceira região, no regime de difusão, a frequência não influenciará na atenuação, porque o comprimento da onda é muito menor que o dispersor, ocasionando na alta intensidade de dispersão (HOFMANN, 2015).

Portanto, a atenuação por dispersão, na maioria das vezes, é irrelevante quando o tamanho do dispersor é menor que o comprimento de onda, todavia tornar-se-á importante quando o tamanho das partículas for de mesma ordem de grandeza que o comprimento de onda (HOFMANN, 2015).

D.3.) Distorção

Em materiais homogêneos onde não há dispersão, a propagação da onda sofrerá pouca ou nenhuma distorção, entretanto, em materiais heterogêneos, a dispersão lança a energia em variados percursos com comprimentos diferentes, o que provoca uma distorção visível na forma da onda. Apesar disso, parte da energia na dispersão sobreviverá e seguirá na direção original de propagação, com isso haverá um padrão de distorção comum para todos os formatos de ondas.

D.4.) Difração

As ondas planas tendem a percorrer caminhos de raios retos, em meios elásticos homogêneos e isotrópicos, com exceção se houver uma mudança nas propriedades do meio. As inconstâncias do meio redirecionarão a onda plana incidente na forma de reflexão ou refração.

O fenômeno da difração ocorrerá se um feixe de onda atingir um obstáculo ou abertura de mesma ordem de grandeza do comprimento da onda incidente, com isso as ondas contornarão os obstáculos e atingirão regiões que não receberiam diretamente a onda incidente.

Durante ensaios de ultrassom, sabe-se que, quando os pulsos ultrassônicos encontram espaços vazios no seu percurso, sofrem difração e produzem tempos de propagação maiores.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Material

Os corpos de prova para determinação das constantes dinâmicas (longitudinal e transversal) da madeira de *Pinus taeda* L. foram provenientes de barrotes adquiridos na Madeireira Esplendor Ltda, localizada na Avenida Joaquim Ribeiro, 320 – Caxangá, Recife – PE.

Foram selecionados, ao acaso, 12 barrotes de seção 5 cm X 5 cm e comprimento de 3 m. Os barrotes foram aparelhados e, de cada um, foram retirados 3 corpos de prova de 15 cm (Figura 2), portanto, o experimento foi realizado com 3 tratamentos (testemunha, perfurada por broca chata de ½” e perfurada por broca chata de 1”) e 12 repetições em cada.



Figura 2 – Identificação, quantificação e classificação dos defeitos.

4.2 Métodos

4.2.1. Umidade dos corpos de prova

Baseando-se na NBR 7190: 1997 (ABNT), o teor de umidade é representado pela relação entre a massa da água contida no material e a massa do material seco, seguindo a equação 2.

$$U = \frac{m_i + m_s}{m_s} * 100 \quad (\text{equação 2})$$

Sendo:

U – Teor de Umidade (%);

m_i – Massa inicial da madeira (g);

m_s – Massa da madeira seca (g).

4.2.2. Densidade dos corpos de prova

Segundo a NBR 7190: 1997 (ABNT), “densidade aparente” é a massa específica convencional, obtida pelo quociente da massa pelo volume dos corpos de prova a 12% de teor de umidade, seguindo a equação 3 e retratada na Figura 3:

$$P_{ap} = \frac{M_{12}}{V_{12}} \quad (\text{equação 3})$$

Sendo:

P_{ap} – Densidade Aparente (Kg/m³);

M_{12} – Massa da madeira a 12% de umidade (Kg);

V_{12} – Volume da madeira a 12% de umidade (m³).



Figura 3 – Pesagem do corpo-de-prova a 12% de umidade.

4.2.3. Ensaio não-destrutivo nos corpos de prova

Após a classificação visual, cada corpo de prova foi submetido ao ensaio não-destrutivo pelo método de ultrassom, utilizando-se o equipamento da marca Proceq, modelo Pundit Lab (Figura 4), de fabricação suíça, transdutores de 54 kHz e sensibilidade de captação do tempo de propagação da onda ultrassônica de 0,1 μ s. O experimento foi conduzido no Laboratório de Materiais e Estruturas (LABME) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE).

No início de cada bateria de leituras, o equipamento foi calibrado segundo as especificações do manual de operações.

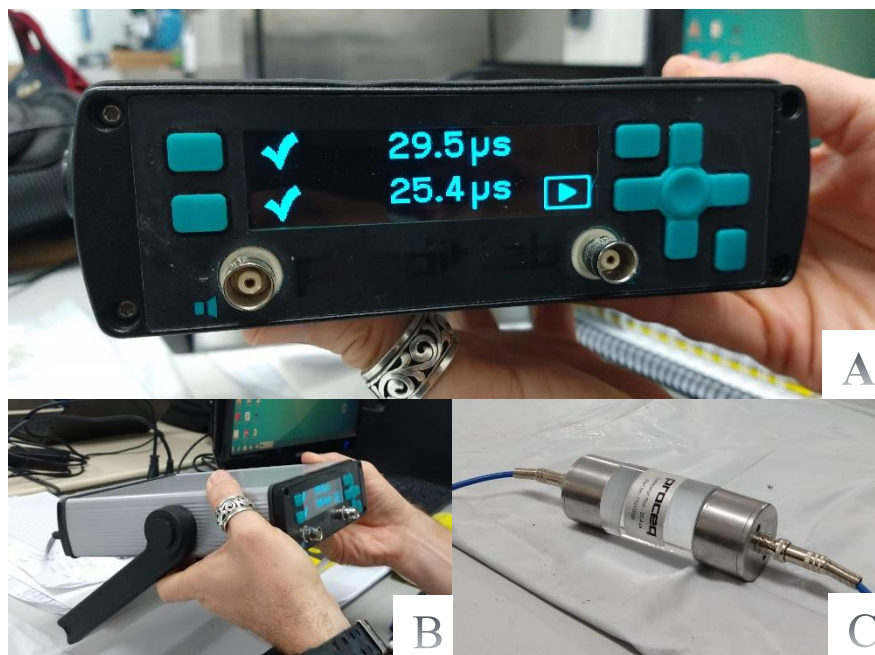


Figura 4 – Equipamento de ultrassom Proceq Pundit Lab. a) vista frontal; b) vista lateral; c) calibração do equipamento.

Após a calibração, foi aplicado uma fina camada de gel condutor incolor, próprio para o ultrassom, nas faces dos corpos de prova e dos transdutores, evitando assim o problema de leitura ocasionado na interface corpo de prova – transdutor. Com os transdutores em contato com as faces do corpo de prova (Figura 5), obteve-se o tempo (em μs) para que a onda ultrassonora percorresse o corpo de prova, sendo duas leituras no sentido transversal e uma leitura no sentido perpendicular às fibras, e posteriormente, calculou-se a velocidade de propagação da onda. De posse desses valores, obteve-se a constante dinâmica (C_D) de acordo com a equação 1.

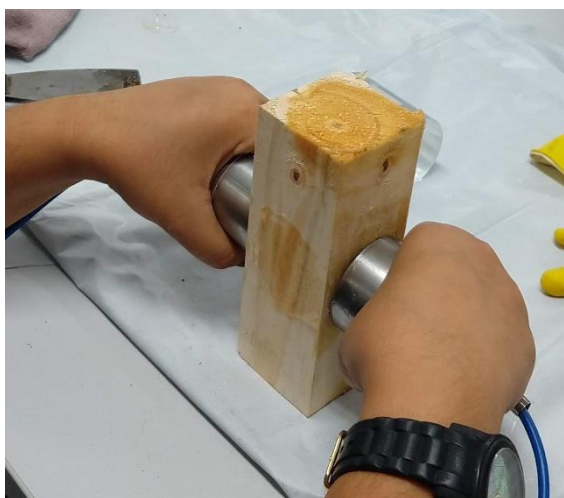


Figura 5 – Leitura transversal no corpo de prova.

4.2.4. Perfurações nos corpos-de-prova

Posterior às leituras no ultrassom dos corpos de prova íntegros, com o intuito de simular uma redução na resistência das peças, foram realizadas perfurações passantes a partir do centro da peça, com o auxílio de brocas chatas para madeira de $\frac{1}{2}$ " e 1" (Figura 6 e 7), para as comparações entre os tempos de propagação da onda ultrassonora da madeira sã e as que continham uma perda de massa, com o intuito de verificar a atenuação das ondas e conseqüentemente redução na velocidade de propagação e na resistência mecânica.

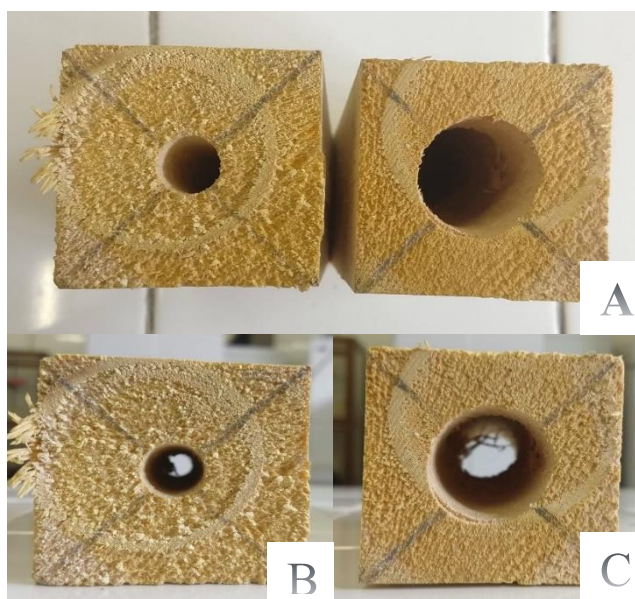


Figura 6 – Perfurações nos corpos de prova. a) Diferenciação entre perfurações; b) perfuração realizada por broca chata de $\frac{1}{2}$ "; c) perfuração realizada por broca chata de 1".



Figura 7 – Brocas chatas utilizadas para realizar as perfurações, à esquerda, broca de 1" e, à direita, broca de $\frac{1}{2}$ ".

As leituras dos tempos de propagação utilizando o ultrassom obedeceram a mesma metodologia do item 4.2.3.

4.2.5. Análise dos resultados

Os resultados obtidos da caracterização física e mecânica da madeira e dos ensaios não destrutivos utilizando o ultrassom foram tabelados em planilhas no Microsoft Excel 2013. As análises estatísticas foram realizadas nos softwares Past 3.26 e Minitab 19.1.

Os valores foram avaliados em todos os corpos de prova em três estados distintos:

- a) Madeira em equilíbrio higroscópico ao ar e íntegra;
- b) Madeira em equilíbrio higroscópico ao ar e perfurada com broca de ½”;
- c) Madeira em equilíbrio higroscópico ao ar e perfurada com broca de 1”.

Em todos os corpos de prova, sob as condições descritas acima, foram obtidos:

- Densidade aparente;
- Umidade;
- Tempo de propagação da onda ultrassônica;
- Velocidade de propagação da onda ultrassônica (V_{us});
- Constante dinâmica (C_D).

Para o teste de médias foi utilizado o Teste de Tukey adotando o nível de 95% de probabilidade.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Dados gerais dos corpos de prova

Na tabela 1 foi apresentado um resumo das dimensões, do volume, peso, umidade e densidade dos corpos de prova utilizados nos ensaios.

Tabela 1 – Dados médios das propriedades físicas da madeira de *Pinus taeda* L.

Dimensões dos corpos de prova							
	Largura (cm)	Altura (cm)	Comprimento (cm)	Massa (g)	Volume (cm³)	Umidade (%)	Densidade aparente (g/cm³)
Mínimo	5,30	5,36	15,50	161,53	447,80	12,66	0,35
Máximo	5,48	5,48	15,60	257,39	467,62	14,28	0,56
Média	5,41	5,42	15,56	196,95	456,47	13,18	0,43
Desvio padrão	0,04	0,04	0,05	28,83	5,20	0,46	0,06
Coefficiente de variação (%)	0,72	0,68	0,32	14,64	1,14	3,48	14,51

Pode-se observar que, de maneira geral, os corpos de prova apresentaram regularidade para tais grandezas. Constata-se também que, os coeficientes de variação apresentaram valores consistentes, abaixo dos 20%. A densidade aparente obteve uma variação de 0,35 g/cm³ a 0,56 g/cm³ e média de 0,43 g/cm³, inferior à média obtida por Nogueira (2003) que foi de 1,114 g/cm³, ao estudar a madeira de *Pinus taeda* L. com 39 anos de idade.

5.2. Avaliação da constante dinâmica longitudinal na madeira íntegra

Na tabela 2 é exposto uma síntese dos resultados obtidos nos ensaios de ultrassom nos corpos de prova de *Pinus taeda* L. na direção longitudinal.

Tabela 2 – Resultados das leituras na direção longitudinal nos corpos de prova de *Pinus taeda* L.

	Tempo (μs)	Vus (m/s) ⁽¹⁾	C_D (MPa) ⁽²⁾
Mínimo	27,00	3414,00	4206,43
Máximo	45,70	5741,00	16964,04
Média	35,71	4450,71	8866,33
Desvio padrão	5,46	661,64	3413,39
Coefficiente de variação (%)	15,30	14,87	38,50

Obs.:

⁽¹⁾ A velocidade foi obtida com transdutores de 54 kHz;⁽²⁾ C_D – Constante dinâmica no sentido longitudinal.

Observa-se que a velocidade média da propagação do pulso ultrassônico foi de 4450,71 m/s, inferior ao intervalo comumente encontrado ($5000 \text{ m/s} < \text{Vus} < 6000 \text{ m/s}$). Pode-se verificar que, a velocidade foi 24,4% inferior ao obtido por Nogueira (2003) que, utilizando a frequência de 45 kHz, obteve 5535 m/s, e 20,6% abaixo do de Puccini (2002), que atingiu 5368 m/s, ambos utilizando peças de *Pinus taeda* L. isentas de defeitos. A redução na velocidade de propagação da onda deve-se basicamente ao grande número de peças do lote que continham uma porção significativa de lenho inicial e medula.

De maneira análoga, Bartholomeu (2001) ao estudar vigas estruturais de *Pinus elliottii*, obteve velocidade média de 4550 m/s (variando de 3631 m/s à 5280 m/s). Assim sendo, a velocidade média atingida no presente estudo, encontrou-se dentro do intervalo obtido por Bartholomeu (2001). Apesar do estudo ter sido realizado com espécie diferente do autor, o fato do dado encontrar-se dentro do intervalo, demonstra as similaridades das propriedades mecânicas dentro do gênero *Pinus*.

5.3. Avaliação da constante dinâmica transversal na madeira íntegra

Um resumo dos dados estatísticos do tempo de propagação, velocidade e constante dinâmica, para as leituras transversais, nos corpos de prova íntegros são apresentados na tabela 3.

Tabela 3 – Resultados das leituras na direção transversal nos corpos de prova íntegros de *Pinus taeda* L.

	Tempo (μs)	Vus (m/s) ⁽¹⁾	C_D (MPa) ⁽²⁾
Mínimo	24,20	1965,50	1458,00
Máximo	27,80	2232,75	2415,89
Média	25,90	2095,15	1906,92
Desvio padrão	1,07	80,79	268,67
Coefficiente de variação (%)	4,14	3,86	14,09

Obs.:

⁽¹⁾ A velocidade foi obtida com transdutores de 54 kHz;

⁽²⁾ C_D – Constante dinâmica no sentido transversal.

A velocidade de propagação das ondas ultrassônicas na direção transversal em coníferas varia de 2000 a 2400 m/s. Portanto os resultados obtidos neste estudo encontraram-se dentro da faixa esperada. É possível observar que a velocidade média foi bastante próxima a descrita por Bucur (1995) que, em ensaios com *Pinus* spp., obteve velocidade média de 2100 m/s e Nogueira (2003), que, ao ensaiar corpos de prova de *Pinus taeda* L., alcançou uma velocidade média de 2198 m/s.

Em se tratando da direção de propagação da onda, foi constatado que, para todos os corpos de prova, as maiores velocidades obtidas foram na direção longitudinal, quando comparadas às velocidades transversais. De maneira específica, a média das velocidades obtidas na direção longitudinal foi superior à obtida na direção transversal ($V_{LL} = 2,12 V_{TT}$). Nogueira (2003), obteve uma relação entre a velocidade de propagação da onda ultrassônica nas direções longitudinal e radial de 1,9 e de 1,5 entre as direções longitudinal e tangencial, o que se aproxima do referencial teórico apresentado por Bodig e Jayne (1993) e Bucur (1995).

5.4. Avaliação da constante dinâmica transversal pós-perfuração

Nas tabelas 4 e 5, é apresentada uma síntese dos dados obtidos nas leituras de ultrassom no sentido transversal após as perfurações de ½” e 1”, respectivamente.

Tabela 4 – Resultados das leituras na direção transversal nos corpos de prova após a perfuração de ½”.

	Densidade (g/cm ³)	Tempo (μs)	Vus (m/s) ⁽¹⁾	C_D (MPa) ⁽²⁾
Mínimo	0,35	25,00	1895,50	1386,89
Máximo	0,56	28,85	2161,00	2400,01
Média	0,43	26,57	2039,79	1813,96
Desvio padrão	0,07	1,25	77,69	267,57
Coefficiente de variação (%)	15,92	4,71	3,81	14,75

Obs.:

⁽¹⁾ A velocidade foi obtida com transdutores de 54 kHz;⁽²⁾ C_D – Constante dinâmica no sentido transversal.

Em comparação com as leituras antes da perfuração das peças, observa-se que a velocidade média de propagação da onda caiu 2,51%, o tempo médio para o pulso percorrer a peça aumentou 2,50% e a constante dinâmica caiu 5%.

Teles (2002), ao estudar a influência de cupins na velocidade da onda ultrassônica em corpos de prova de *Pinus* sp., obteve velocidade variando de 1820 m/s a 2168 m/s, o que corrobora a simulação realizada no presente estudo.

Tabela 5 – Resultados das leituras na direção transversal nos corpos de prova após a perfuração de 1”.

	Densidade (g/cm ³)	Tempo (μs)	Vus (m/s) ⁽¹⁾	C_D (MPa) ⁽²⁾
Mínimo	0,35	23,90	1609,00	1043,82
Máximo	0,54	33,25	2259,00	2340,03
Média	0,43	29,18	1884,58	1564,41
Desvio padrão	0,06	3,16	206,90	413,89
Coefficiente de variação (%)	13,63	10,82	10,98	26,46

Obs.:

⁽¹⁾ A velocidade foi obtida com transdutores de 54 kHz;⁽²⁾ C_D – Constante dinâmica no sentido transversal.

Comparando com as leituras antes da perfuração das peças, foi possível observar que a velocidade média de propagação da onda apresentou uma queda de 10,10%, o tempo médio para o pulso percorrer a peça apresentou um acréscimo de 12,82% e a constante dinâmica decresceu 18,11%.

Na tabela 6, é apresentado o teste de comparação de médias das variáveis tempo, velocidade e constante dinâmica na condição de corpo de prova íntegro, perfurado por broca chata de ½” e 1”.

Tabela 6 – Teste de comparação de médias para as variáveis analisadas nos corpos de prova íntegros e perfurados.

	Tempo (μs)	Vus (m/s)	C_D (MPa)
Madeira íntegra	25,904 a	2101,8 a	1968,6 a
Madeira perfurada por broca de ½”	26,571 a	2039,8 a	1814,0 ab
Madeira perfurada por broca de 1”	29,179 b	1884,6 b	1564,0 b

Obs.:

i) Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente ao nível de significância de 5% ($p > 0,05$).

Mediante o teste de comparação de médias, é possível observar que, a perfuração de ½” não possui diferença estatística significativa, em nenhuma das variáveis analisadas, da peça íntegra, ou seja, a perfuração de ½” não interfere na resistência mecânica do material.

Porém, para a perfuração de 1”, observa-se que existe diferença estatística significativa, em todas as variáveis analisadas, da peça íntegra, ou seja, a perfuração de 1” interfere significativamente na resistência mecânica do material, indicativo de que em condições de uso, há a necessidade de intervenções pontuais ou de substituição, dependendo localização e do comprometimento dessa perda de massa ao longo da peça.

Terezo (2004) estudando a influência de furos superficiais na madeira de Pinus, Angelim e Peroba, na velocidade de propagação da onda ultrassônica, não obteve diferenças estatisticamente significativas. No caso em questão, como os furos foram feitos no centro da peça, a localização foi condicionante para a atenuação das ondas e consequentemente, na redução da resistência mecânica da peça.

5.5. Associação entre as grandezas estudadas

Foram realizadas as correlações de Pearson entre as grandezas analisadas e os resultados estão apresentados nas tabelas 7, 8 e 9, para as leituras pré-perfuração, pós-perfuração de ½” e pós perfuração de 1”, respectivamente.

Tabela 7 – Resultados das correlações de Pearson entre as grandezas dos corpos de prova íntegros de *Pinus taeda* L.

Variável	Resultado do teste	Variável		
		Vus (m/s)	Tempo (μ s)	C _D (MPa)
Densidade (g/cm ³)	r	-0,376	0,367	0,870
	p-valor	0,229	0,241	0,000
Vus (m/s)	r		-0,929	0,116
	p-valor		0,000	0,718
Tempo (μ s)	r			-0,065
	p-valor			0,842

Tabela 8 – Resultados das correlações de Pearson entre as grandezas dos corpos de prova perfurados por broca de 1/2” de *Pinus taeda* L.

Variável	Resultado do teste	Variável		
		Vus (m/s)	Tempo (μ s)	C _D (MPa)
Densidade (g/cm ³)	r	-0,393	0,364	0,876
	p-valor	0,206	0,244	0,000
Vus (m/s)	r		-0,971	0,087
	p-valor		0,000	0,787
Tempo (μ s)	r			-0,098
	p-valor			0,762

Tabela 9 – Resultados das correlações de Pearson entre as grandezas dos corpos de prova perfurados por broca de 1” de *Pinus taeda* L.

Variável	Resultado do teste	Variável		
		Vus (m/s)	Tempo (μ s)	C _D (MPa)
Densidade (g/cm ³)	r	0,100	-0,064	0,603
	p-valor	0,756	0,844	0,038
Vus (m/s)	r		-0,990	0,848
	p-valor		0,000	0,000
Tempo (μ s)	r			-0,819
	p-valor			0,001

Mediante a correlação de Pearson, para a situação de peça íntegra e perfurada por broca de $\frac{1}{2}$ ", observa-se que a correlação densidade/velocidade é fraca, assim como a densidade/tempo; a correlação tempo/constante dinâmica e velocidade/constante dinâmica são nulas; a correlação densidade/constante dinâmica é forte; e a correlação velocidade/tempo é extremamente forte, porém, para as peças perfuradas por broca de 1", nota-se que a correlação densidade/velocidade é nula, assim como a densidade/tempo; a correlação tempo/constante dinâmica e velocidade/constante dinâmica são fortes; a correlação densidade/constante dinâmica é substancial; e a correlação velocidade/tempo é extremamente forte.

5.6. Regressão linear entre as grandezas estudadas

Nas figuras 8, 9 e 10 são apresentadas as regressões lineares, os intervalos de confiança (IC) e os intervalos de predição (IP) de 95% entre o tempo, velocidade e constante dinâmica nas perfurações de $\frac{1}{2}$ " e 1".

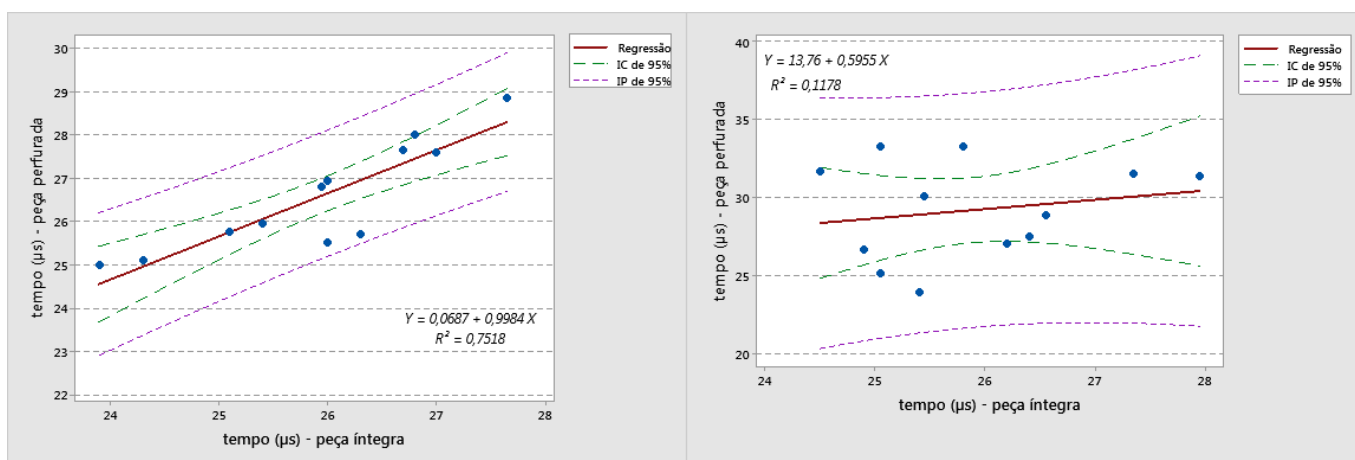


Figura 8 – Regressão linear (reta intermediária, em vermelho), intervalo de confiança (retas em verde) e intervalo de predição (retas em roxo) da variável “tempo” dos corpos de prova perfurados por broca chata de $\frac{1}{2}$ " (à esquerda) e 1" (à direita).

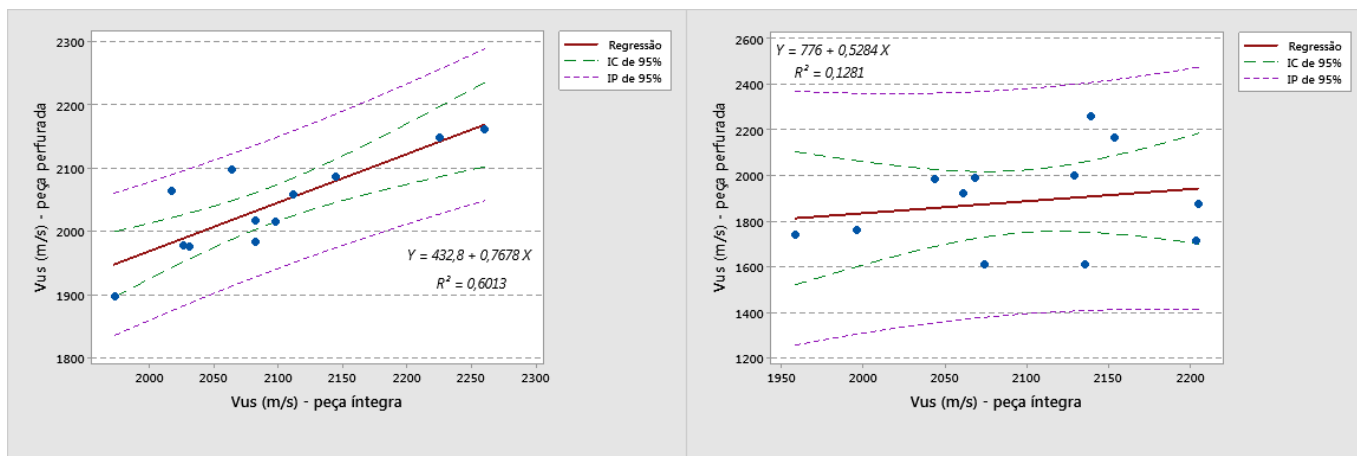


Figura 9 – Regressão linear (reta intermediária, em vermelho), intervalo de confiança (retas em verde) e intervalo de predição (retas em roxo) da variável “velocidade” dos corpos de prova perfurados por broca chata de ½” (à esquerda) e 1” (à direita).

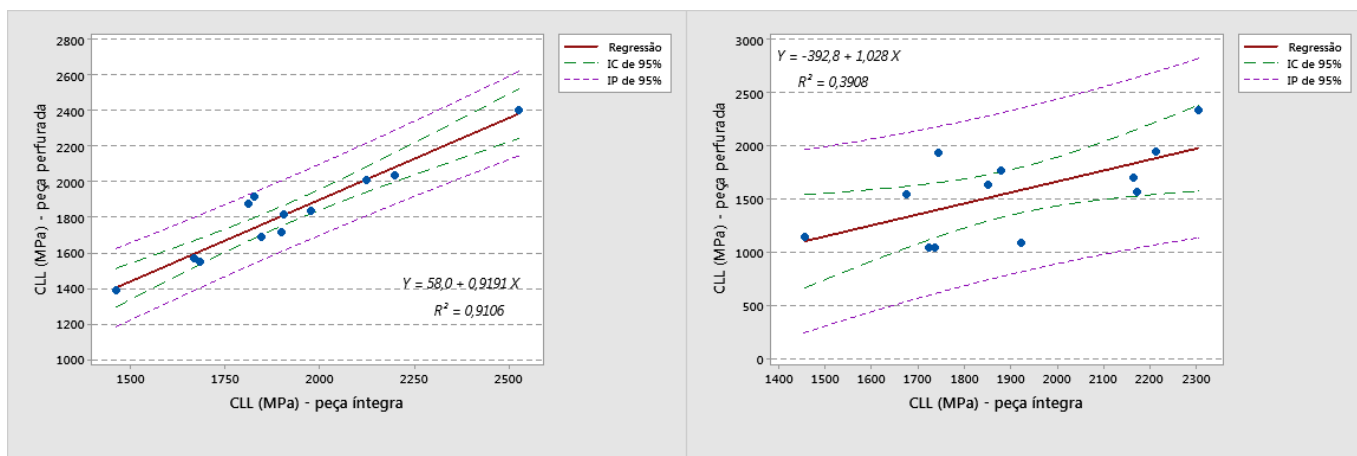


Figura 10 – Regressão linear (reta intermediária, em vermelho), intervalo de confiança (retas em verde) e intervalo de predição (retas em roxo) da variável "constante dinâmica" dos corpos de prova perfurados por broca chata de ½” (à esquerda) e 1” (à direita).

Observando as regressões lineares, nota-se uma pequena dispersão dos valores, para as peças furadas por broca de ½” e uma grande dispersão para as peças furadas por broca de 1”. O coeficiente de determinação linear nos corpos de prova de furo menor foi igual a 75,18% para o tempo, 60,13% para a velocidade e 91,06% para a constante dinâmica, já para os corpos de prova de furo maior, o coeficiente foi de 11,78%, 12,81% 39,08%, para as mesmas grandezas.

A ideia do presente estudo foi prever em que momento as peças de madeira de Pinus deveriam sofrer intervenção no sentido de garantir a sanidade e a segurança das edificações em madeira por meio de ensaios rápidos, pontuais e de fácil interpretação, através da análise da atenuação da onda ultrassônica, utilizando o tempo e/ou a velocidade de propagação como parâmetro principal. De posse dos dados, verificou-se

que quando a velocidade de propagação atingiu um decréscimo de 2,5% o que correspondeu ao furo de ½”, o equipamento não detectou diferenças significativas, o que na prática pode significar que um provável ataque por agentes xilófagos a esse nível de degradação não seria indicativo de substituição ou reparo da peça. A mesma análise, conduzida agora com os furos maiores (1”), em uma situação de uso, o equipamento já consegue detectar uma perda da velocidade de propagação que comprometeria a utilização da madeira, em função da atenuação das ondas no material degradado, dependendo da localização e da distribuição das áreas comprometidas.

6. CONCLUSÕES

Baseado nos resultados obtidos nos ensaios realizados no presente trabalho e considerando os objetivos do mesmo, foi possível concluir que:

- Os ensaios não-destrutivos de ondas de ultrassom foram capazes de avaliar a sanidade da madeira de *Pinus taeda* L. somente quando avaliadas sob as condições de atenuação da onda nas peças com furo de 1”.
- Em uma situação de perda de massa de até 5,06% da peça estrutural, é possível afirmar que não haveriam influências na resistência da mesma, de outro modo, se a perda ultrapassasse 20,26%, recomenda-se a substituição da peça danificada.
- O valor baixo na velocidade média dos corpos de prova íntegros, na direção longitudinal, se deu principalmente pelo material de estudo apresentar uma porção significativa de lenho inicial e medula.
- Para as peças perfuradas por broca chata de ½”, houve uma queda na velocidade média de propagação da onda de 2,51% e um aumento de 2,50% no tempo médio, já para as peças perfuradas por broca chata de 1”, houve uma queda, na velocidade média de propagação da onda, de 10,10% e o tempo médio apresentou um acréscimo de 12,82%, demonstrando a sensibilidade do método do ultrassom na avaliação da madeira de *Pinus taeda* L.

7. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190: Projeto de estruturas de madeira**. Rio de Janeiro, p. 107. 1997.

BARACHO JR., E. **Anatomia da Madeira**. Curso de Engenharia Florestal. Data completa 2012. Notas de Aula. Universidade Federal Rural de Pernambuco.

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

BENDTSEN B.A. **Properties of wood from improved and intensively managed trees**. *Forest Products Journal* 1978; 28(10):61-71.

BENJAMIN, C.A. **Estudo da estrutura anatômica e das propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Corymbia (Eucalyptus) citriodora* e *Eucalyptus grandis***. Botucatu, UNESP, 2006, 158 p. Tese (Doutorado em Agronomia – Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, 2006.

BODIG, J.; JAYNE, B.A. **Mechanics of wood and wood composites**. Malabar: Krieger, 712p. 1993.

BORTOLETTO JR, G. **Indicações para a utilização da madeira de seis espécies e variedades de Pinus na construção civil**. São Carlos, USP, 1993, 119p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil/Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1993.

BROWN, M.J; McWILLIAMS, W.H. **Pine Stands Across the South - Trends and Projections**. In: SOUTHERN PLANTATION WOOD QUALITY WORKSHOP, 1989, Athens. *Proceedings...* Asheville: Southeastern Forest Experiment Station, United States Department of Agriculture. p.1-15, 1990.

BUCUR, V. **Acoustics of Wood**. CRC Press, Inc. 1995. 284p.

CANDIAN, M. **Estudo da propagação de ondas ultra-sônicas em madeira de dicotiledôneas: influência da geometria**. Relatório de iniciação científica. Universidade Federal de São Carlos. Agência financiadora: Fapesp. São Carlos, 2004.

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

COWN, D.J. **Corewood (Juvenile wood) in *Pinus radiata* –should we be concerned?**. *New Zealand Journal of Forestry Science*, v.22, n.1, p.87-95. 1992.

EVANS II, J.W.; SENFT, J. F.; GREEN, D. W. **Juvenile wood effect in red alder: analysis of physical and mechanical data to delineate juvenile and mature wood zones**. *Forest Prod. J*, v.50, n.7/8, p.75-87. 2000.

GARNIER, V. et al., 2009. **Caractérisation non destructive des bétons par propagation d'ondes ultrasonores**. *Mécanique e Industries*, 10 3-4), pp.299–303.

GEIMER, R.L.; HERIAN, V.L.; XU, D. **Influence of juvenile wood on dimensional stability and tensile properties of flakeboard**. *Wood and Fiber Science*, v.29, n.2, p.103-120. 1997.

GORNIK, E.; DE MATOS, J. L. M. **Métodos não destrutivos para determinação e avaliação de propriedades da madeira**. In: VII ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRA E EM ESTRUTURA DE MADEIRA, 2000, São Carlos. **Anais...** São Carlos: USP, 2000. 1 CD-ROM.

GREEN, D.W.; KRETSCHMANN, D.E. **Wood handbook. Wood as an engineering material – Chapter 6 – Lumber Stress Grades and Design Properties**. Was, D.C. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 1999.

HAYGREEN, J. G.; BOWYER, J. L. **Forest Products and wood science: An Introduction**. 2ed. Iowa State University Press, Ames, Iowa, 500p, 1995.

HOFMANN, Mateus de Assunção. **Atenuação da energia do sinal ultrassônico na detecção de danos por fissuração no concreto**. Orientador: Prof. Dr. Ivo José Padaratz. 136 p. Dissertação (Mestrado em engenharia civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis - SC, 2015.

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

KRAHMER, R. **Fundamental Anatomy of Juvenile and Mature Wood**. In: A TECHNICAL WORKSHOP: JUVENILE WOOD-WHAT DOES IT MEAN TO FOREST MANAGEMENT AND FOREST PRODUCTS, 1985, Washington. *Proceedings...*Madison: Forest Products Research Society. p.12-16. 1986.

KRETSCHMANN, D.E. **Effect of juvenile wood on shear parallel and compression perpendicular-to-grain strength for loblolly pine**. In: CTIA/IUFRO INTERNATIONAL WOOD QUALITY WORKSHOP, 1997, Quebec. *Proceedings...*Quebec: Forintek Canada. p.23-30. 1997.

KRETSCHMANN, D.E.; BENDTSEN, B.A. **Ultimate tensile stress and modulus of elasticity of fast-grown plantation loblolly pine lumber**. *Wood and Fiber Sci*, v.24, n. 2, p.189-203. 1992.

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

McALISTER, R.; CLARK, A. **Effect of geographic location and seed source on the bending properties of juvenile and mature loblolly pine**. *Forest Prod. J.*, Madison, v. 41, n.9, p.39-41. 1991.

McALISTER, R.; CLARK, A.; SAUCIER, J. **Effect of initial spacing on mechanical properties of lumber sawn from unthinned slash pine at age 40.** *Forest Prod. J.*, Madison, v. 47, n. 7/8, p.107-109. 1997.

NOGUEIRA, M. **Classificação de peças de madeira serrada de dimensões estruturais de *Eucalyptus* sp. com uso de ensaios não-destrutivos.** 168 p. Tese (Doutorado em agronomia) - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu - SP, 2007.

NOGUEIRA, M. **Determinação de módulos de elasticidade à compressão da madeira de *Pinus taeda* L. com o uso de ultra-som.** 165 p. Dissertação (Mestrado em agronomia) - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu - SP, 2003.

PUCCINI, C.T. **Avaliação de aspectos de qualidade da madeira utilizando o ultra-som.** 72p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola – Construções Rurais e Ambiente). Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade de Campinas, Campinas. 2002.

SANDOZ, J.L. **Grading of Construction timber by ultrasound.** *Wood Science and Technology*, 23(2), 95-108, 1989.

SANTOS, M., FERREIRA, A. E PERDIGÃO, J., **“Practical considerations on ultrasonic guided wave propagation: immersion and contact methods”**, *Materials Evaluation*, 62, (4), 443-449, 2004.

SANTOS, M. **Ondas ultra-sonoras guiadas na caracterização e controlo não destrutivo de materiais.** Orientador: Prof. Dr. João Manuel Domingues Perdigão. 230 p. Tese (Doutorado em engenharia eletrotécnica) - Universidade de Coimbra, Coimbra – Portugal, 2004.

SENFT J.F., BENDTSEN B.A., GALLIGAN WL. **Weak wood.** *Journal of forestry* 1985; (83):476-485.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE SILVICULTURA. **Fatos e Números do Brasil Florestal**. São Paulo: [s. n.], dez 2008. 93 p. Disponível em: <<http://www.sbs.org.br/FatoseNumerosdoBrasilFlorestal.pdf>> Acesso em: 19 jul. 2019.

STANDARD PRACTICE FOR ESTABLISHING STRUCTURAL GRADES AND RELATED ALLOWABLE PROPERTIES FOR VISUALLY GRADED LUMBER. **ASTM : D245 – 06**. This standard is issued under the fixed designation D245; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ε) indicates an editorial change since the last revision or reapproval. [S. l.], 2019.

TELES, Carlos Dion de Melo. **Estruturas de madeira: proposta de metodologia de inspeção e correlação da velocidade ultra-sônica com o dano por cupins**. Orientador: Profª Drª Ângela do Valle. 132 p. Dissertação (Mestrado em engenharia civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, [S. l.], 2002.

TEREZO, Rodrigo. **Propriedades mecânicas de madeiras utilizadas em estruturas históricas e contemporâneas estimadas por meio de ultra-som**. Orientador: Profª. Dra. Ângela do Valle. 134 p. Dissertação (Mestrado em engenharia civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, [S. l.], 2004.

TIEMANN, H.D. **Effect of moisture upon the strenght and stiffness of wood**. **Forest Serv Bull.** 70. Washington, DC: Government Printing Office, 1906. 144p.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE (FAO). Disponível em: <<https://www.fs.fed.us/database/feis/plants/tree/pintaee/all.html>>. Acesso em: 12/08/2019.

ZOBEL, B. J.; BUIJTENEN, J. P. VAN. **Wood variation: its causes and control**. Springer- Verlag, Berlin. 361p. 1989.