

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS**

**QUALIFICAÇÃO DOS ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS
PARA ESTIMAR AS CARACTERÍSTICAS FÍSICO-
MECÂNICAS DA MADEIRA**

2012

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

ESCOLA DE ENGENHARIA

CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

Qualificação dos ensaios não destrutivos para estimar as características físico-mecânicas da madeira

Rejane Costa Alves

Projeto apresentado ao Curso de Mestrado da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de mestre em Engenharia de Estruturas.

Área de concentração: Sistema construtivo

Orientador: Edgar V. Mantilla Carrasco

Co-orientador: Max de Castro Magalhães

BELO HORIZONTE

Escola de Engenharia da UFMG

2012

“Ninguém é tão grande que não possa aprender,
nem tão pequeno que não possa ensinar”

(Píndaro, poeta romano)

AGRADECIMENTOS

A Deus, por tudo que tem acontecido em minha vida.

À Universidade Federal de Minas Gerais e ao Departamento de Engenharia de Estruturas, pela disponibilização de material e suporte para a realização deste trabalho.

Ao professor Edgar V. Mantilla Carrasco, pela amizade, disponibilidade e orientação.

Aos membros da Banca Examinadora, pelos comentários e sugestões.

Aos professores do Departamento de Engenharia de Estrutura, que contribuíram para minha formação.

Aos meus pais, avós, juntamente com toda família, por sempre me apoiarem em todas as decisões.

Ao meu namorado, Javan Pereira Motta, pelo carinho e ajuda incessante em todos os momentos.

Aos colegas de pós-graduação, de laboratório e a todos aqueles que de forma direta ou indireta colaboraram para a minha formação acadêmica e pessoal.

À FAPEMIG pela concessão de uma bolsa de estudos e pela disponibilidade dos recursos para realização da dissertação.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE TABELAS	viii
RESUMO	x
ABSTRACT	xii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos.....	3
1.1.1 Objetivo geral.....	3
1.1.2.Objetivos específicos	3
1.2 Justificativa.....	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1 Métodos não destrutivos locais.....	6
2.1.1 Resistência à penetração	6
2.1.2 Resistência à perfuração	7
2.2 Métodos não destrutivos globais	9
2.2.1 Propagação de onda	9
3. MATERIAL E MÉTODOS	14
3.1 Determinação da umidade e densidade aparente	16
3.2 Métodos de ensaio não destrutivos locais.....	17
3.2.1 Resistência à penetração	17
3.2.2 Resistência à perfuração	18
3.3 Métodos de ensaio não destrutivos globais	19
3.3.1 Propagação da onda	19
3.3.2 Determinação das características mecânicas através de ensaios destrutivos	22
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	24
4.1 Ensaios destrutivos	24

4.2 Ensaio não destrutivo local	32
4.2.1 Resistência à penetração	32
4.2.2 Resistência à perfuração	35
4.3 Ensaio não destrutivo global	38
4.3.1 Propagação de ondas ultrassônicas através do equipamento de ultrassom.....	38
4.3.2 Emissões acústicas	53
4.4 Comparação entre os métodos não destrutivos	56
5. CONCLUSÃO	64
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 3.1 – Esquema de retirada dos corpos de prova. (a) Viga de madeira; (b) Peças de 15x15x5cm e de cubo de 15 cm; (c) Corpos de prova de compressão nas direções tangencial, radial e longitudinal. (d) Corpos de prova de umidade e densidade. (e) Corpos de prova de cisalhamento, nas direções tangencial, radial e longitudinal.	15
FIGURA 3.2 – Manipulação do equipamento Pilodyn em laboratório.....	17
FIGURA 3.3 – Escala do aparelho Pilodyn.	18
FIGURA 3.4 – Utilização do aparelho resistógrafo em laboratório.	18
FIGURA 3.5 – Amplitude de penetração em relação ao comprimento do corpo de prova.	19
FIGURA 3.6 – Aparelho de emissões acústicas (AMSY-5).....	20
FIGURA 3.7 – Esquema do método direto de transmissão de sinal em madeiras por emissões acústicas.	20
FIGURA 3.8 – Esquema do teste de ultrassom por método direto de transmissão de sinal. ...	21
FIGURA 3.9 – Ensaio de compressão com utilização do “clip-gage”; a) longitudinal; b) tangencial; e c) radial.	23
FIGURA 3.10 – Ensaio de cisalhamento.....	23
FIGURA 3.11 – Ensaio de dureza Janka.....	23
FIGURA 4.1 – Densidade aparente a 12 % de umidade das madeiras utilizadas.....	25
FIGURA 4.2 – Resultados experimentais. (a) Dureza Janka; (b) Módulo de elasticidade estático (E estático).	25
FIGURA 4.3 – Rompimento de corpo de prova orientado na direção tangencial, em ensaio de cisalhamento.....	26
FIGURA 4.4 – Resultados dos ensaios de cisalhamento. (a) Relação entre tensão de cisalhamento e deslocamento horizontal. (b) Tensão de cisalhamento em função da densidade aparente a 12% de umidade.....	27
FIGURA 4.5 – Índice de penetração em função densidade aparente a 12% de umidade (a) e dureza Janka (b).	32
FIGURA 4.6 – Índice de penetração em função do módulo de elasticidade estático (a) e tensão de cisalhamento (b).	33
FIGURA 4.7 – Amplitude de penetração em função da densidade aparente a 12% de umidade (a) e dureza Janka (b).	35

FIGURA 4.8 – Amplitude de penetração em função do módulo de elasticidade estático (a) e da tensão de cisalhamento (b).	36
FIGURA 4.9 – Velocidade de propagação de onda com transdutor longitudinal de 54 KHz em função da tensão de cisalhamento (a); dureza Janka (b); densidade aparente (c) e do módulo de elasticidade estático (d).	39
FIGURA 4.10 – Velocidade de propagação de onda com transdutor longitudinal de 150 KHz em função da tensão de cisalhamento (a); dureza Janka (b); densidade aparente (c) e do módulo de elasticidade estático (d).	40
FIGURA 4.11 – Velocidade de propagação de onda com transdutor longitudinal de 180 KHz em função da tensão de cisalhamento (a); dureza Janka (b); densidade aparente (c) e do módulo de elasticidade estático (d).	41
FIGURA 4.12 – Módulo de elasticidade estático ($E_{estático}$) em função do módulo de elasticidade dinâmico ($E_{dinâmico}$). (a) transdutor longitudinal 50 KHz; (b) transdutor longitudinal 150 KHz e; (c) transdutor longitudinal 180 KHz.....	51
FIGURA 4.13 – Velocidade de propagação de onda em função da tensão de cisalhamento (a), dureza Janka (b), densidade aparente (c) e módulo de elasticidade estático (d).	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Valor de comprimento de onda e comprimento mínimo do corpo de prova, para o transdutor de 150 KHz	22
Tabela 4.1 – Valores médios das características das madeiras	30
Tabela 4.2 – Análise múltipla da densidade aparente e índices de penetração (mm)	34
Tabela 4.3 – Análise de regressão entre o índice de penetração e propriedades da madeira.....	35
Tabela 4.4 – Análise múltipla entre a densidade aparente e amplitude de penetração (%).....	37
Tabela 4.5 – Análise de regressão entre a amplitude de penetração (%) e propriedades da madeira	38
Tabela 4.6 – Análise múltipla das velocidades médias (m/s) de propagação de onda.....	45
Tabela 4.7 – Análise múltipla das velocidades de propagação de onda (m/s)	46
Tabela 4.8 – Análise múltipla entre a velocidade de propagação (m/s) da onda entre transdutores longitudinais	47
Tabela 4.9 – Análise múltipla do módulo de elasticidade estático e do módulo de elasticidade dinâmico com transdutores longitudinal de 54 KHz, 150 KHz e 180 KHz	49
Tabela 4.10 – Análise de regressão entre o módulo de elasticidade estático e o módulo de elasticidade dinâmico	53
Tabela 4.11 – Análise múltipla da densidade aparente e das velocidades médias de propagação de onda por meio de ensaio de emissões acústicas	54
Tabela 4.12 – Análise múltipla das velocidades de propagação de onda (m/s)	55
Tabela 4.13 – Análise de regressão entre o módulo de elasticidade dinâmico e o módulo de elasticidade estático	56
Tabela 4.14 – Equações de regressão, coeficientes de determinação (%) e p-valor das relações entre os métodos não destrutivos e características das madeiras	58
Tabela 4.15 – Análise entre a velocidade de propagação (m/s) da onda entre transdutores longitudinais utilizados com o aparelho de ultrassom e também de emissões acústicas.....	60
Tabela 4.16 – Estimativa do módulo de elasticidade normal às fibras, considerando a semelhança entre E tangencial e E radial.....	61
Tabela 4.17 – Valor médio de M para as madeiras analisadas.....	62
Tabela 4.18 – Módulo de elasticidade longitudinal estático por meio das equações de correção.....	62

Tabela 4.19 – Hipótese de diferença nula entre o E_L estimado e E_L estático com nível de significância de 99%.....	63
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

RESUMO

O presente trabalho trata da avaliação da madeira por métodos não destrutivos. Foram utilizados os métodos locais (resistência à penetração e resistência à perfuração) e globais (propagação de ondas). Para a validação dos ensaios não destrutivos foram realizados ensaios destrutivos de densidade aparente, compressão, cisalhamento e dureza Janka, nas três direções dos corpos-de-prova, longitudinal, tangencial e radial. Todos os ensaios destrutivos foram corrigidos para o teor de umidade de 12%. Para as correlações foram adotados para sete madeiras: angelim pedra (*Hymenolobium petraeum*), angelim vermelho (*Dinizia excelsa*), castanheira (*Bertholletia excelsa*), garapa (*Apuleia leiocarpa*), muiracatiara (*Astronium lecointei*), pequi (*Caryocar villosum*) e roxinho (*Peltogyne discolor*), no intervalo de densidade de 650 a 1150 kg.m⁻³. Para a estimativa da densidade aparente, dureza Janka e tensão de cisalhamento, o método não destrutivo mais indicado foi o método de resistência à perfuração. Já para a tensão de cisalhamento na direção paralela às fibras, o método que apresentou melhor aproximação estatisticamente foi o de penetração na madeira. Finalmente, para o módulo de elasticidade o ensaio com ondas ultrassônicas longitudinais por meio do aparelho de emissão acústica foi mais eficiente.

Palavras chave: Ensaios não destrutivos, madeira, propriedades físico-mecânicas.

ABSTRACT

This study deals with assessment of wood by non-destructive methods. Local testing methods (penetration resistance and puncture resistance) and global testing methods (wave propagation) were used. For validation of the non-destructive methods, destructive testing of apparent density, compression, shear strength and Janka hardness were performed in the three directions of the test specimens, longitudinal, tangential and radial. All the destructive tests were corrected for a moisture content of 12%. Seven types of wood were adopted for the correlations: angelim pedra (*Hymenolobium petraeum*), angelim vermelho (*Dinizia excelsa*), Brazil nut tree (*Bertholletia excelsa*), grapia (*Apuleia leiocarpa*), muiracatiara (*Astronium lecointei*), piquia (*Caryocar villosum*) and roxinho (*Peltogyne discolor*) in the density range of 650 to 1150 kg.m⁻³. For estimate of apparent density, Janka hardness and shear strength, the most recommended non-destructive method was the puncture resistance test. As for shear strength in the direction parallel to the grain, the method that showed best statistical approximation was that of penetration in the wood. Finally, for the elasticity modulus, longitudinal ultrasound wave testing by means of the acoustic emission device was most efficient.

Keywords: Non-destructive testing, wood, physico-mechanical properties

1

INTRODUÇÃO

A madeira é um material heterogêneo, anisotrópico, com grande resistência mecânica e baixa densidade, quando comparado a outros materiais. No entanto, com a devastação da floresta ocasionou a preocupação pela utilização de madeiras corretamente caracterizadas e desenvolvimento de métodos e análises mais rápidos, que gerassem menores perdas. Neste contexto, são introduzidos os métodos não destrutivos para avaliação do material.

A aplicação de técnicas não destrutivas (NDT) vem sendo difundida desde a década de 1960 (DEL MENEZZI et al., 2010). A utilização de métodos não destrutivos para caracterização das propriedades físicas e mecânicas da madeira está sendo utilizada de forma crescente com o intuito de eliminar a extração do corpo de prova em análise de campo e à rapidez em suas verificações.

O módulo de elasticidade (E) dos materiais pode ser determinado por vários métodos, estático ou dinâmico (BARRETT e HONG, 2010). Os ensaios não destrutivos para determinação do módulo de elasticidade dinâmico, utilizando diversos métodos de propagação de ondas foram empregados por Ross et al. (1994); Cai et al. (2000); Cunha e Matos (2010); Ross et al. (2000); Calil Júnior e Miná (2003); Ballarin e Nogueira (2005); Targa et al. (2005); Murphy (2000) e Stangerlin et al. (2010a). Os resultados obtidos por estes autores indicam que os métodos dinâmicos são adequados para a determinação de algumas características intrínsecas da madeira, em particular o módulo de elasticidade.

A densidade da madeira pode ser avaliada por métodos diretos e indiretos. É considerada por muitos autores a principal característica qualitativa da madeira (Louzada et al. (2005); Chimello (1980); Vital et al. (1984); Goulart et al. (2012)), por esta razão vem sendo avaliada por diversos métodos não destrutivos, como resistência à perfuração (Rinn et al. (1996); Isik e Li (2003); Gouvêa et al. (2011); Acuña et al. (2011); Johnstone et al. (2011)), resistência à penetração (Oliveira (2001); Watt et al. (1996); Gouvêa et al. (2011); Yamashita et al. (2007)), ultrassom (Miná et al. (2004); Calegari et al. (2007); Baltrusaitis et al. (2009); Ballarin e Nogueira (2005); Calegari (2006)), e também por emissões acústicas (ROSS, ET AL. (1994); WIELINGA ET AL. (2009)).

No Brasil, quando se refere a métodos não destrutivos para avaliação de madeira, geralmente se associa a técnicas de ultrassom (STANGERLIN et al. (2010b); BALLARIN e NOGUEIRA (2005); CARRASCO e AZEVEDO JÚNIOR (2003); GONÇALEZ et al. (2001); MINÁ et al. (2004); DEL MENEZZI et al. (2010); STANGERLIN et al. (2010a); CANDIAN e SALES (2009) e OLIVEIRA et al. (2006), LATORRACA et al. (2011)). No entanto, a preocupação por desenvolvimento de outras metodologias e técnicas não destrutivas está ganhando força. Pelo fato de não ser necessário a retirada de amostras de madeira da estrutura. Ensaio com os métodos de resistência à penetração e de perfuração vêm se destacando na literatura atualmente. Já o ensaio com o aparelho de emissão acústica é uma técnica que está começando a ser abordada recentemente para a madeira, e possui dificuldades de ser empregado em função da necessidade de altas frequências, e assim gerar grande atenuação.

Para diminuir os desperdícios, tanto de material como horas de serviço, e garantir a eficiência nas avaliações da madeira em campo e laboratório devem-se desenvolver métodos que facilitem a caracterização de suas propriedades, visando promover a correta caracterização da madeira para sua utilização adequada. Assim, os métodos não destrutivos apresentam-se como uma alternativa com elevado potencial, simples de utilizar e eficiente.

Todos os autores citados anteriormente utilizam algum método não destrutivo para caracterizar espécies de madeira. Neste trabalho foram utilizados três métodos não destrutivos (resistência à penetração, resistência à perfuração da madeira e propagação de ondas) em sete madeiras, sendo o angelim pedra (*Hymenolobium petraeum*), angelim vermelho (*Dinizia*

excelsa), castanheira (*Bertholletia excelsa*), garapa (*Apuleia leiocarpa*), muiracatiara (*Astronium lecointei*), pequi (*Caryocar villosum*) e roxinho (*Peltogyne discolor*), com densidade variando de 650 a 1150 Kg.m⁻³.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Determinar propriedades físicas e mecânicas em corpos de prova de madeira, por meio de ensaios não destrutivos (ENDs) locais e globais e comparar seus resultados com ensaios destrutivos.

1.1.2. Objetivos específicos

- Determinar as correlações entre os resultados dos ensaios não destrutivos com as propriedades de densidade aparente, módulo de elasticidade estático, tensão de cisalhamento e dureza Janka (nas três direções, longitudinal, tangencial e radial);
- Verificar qual tipo de ensaio não destrutivo é mais indicado para estimar cada propriedade da madeira;
- Determinar as relações entre os resultados de ensaio das propriedades mecânicas nas direções longitudinal, tangencial e radial.

1.2 Justificativa

Na literatura há poucos estudos que estimam as propriedades da madeira por meio de métodos não destrutivos, quando comparado a métodos destrutivos. Quando se trata da caracterização da madeira nas três direções (longitudinal, tangencial e radial), o número de trabalhos publicados torna-se menor, e ainda no que diz respeito à determinação de propriedades por meio de ENDs utilizando intervalo maior de densidade, este número reduz-se ainda mais. Portanto, o estudo aprofundado das propriedades da madeira por métodos não destrutivos possibilita determinar com eficiência e rapidez as propriedades das madeiras de folhosas

dicotiledôneas. A vantagem de utilizar métodos não destrutivos é permitir a conservação da madeira em seu estado original, evitando a sua extração para análises. Também a falta de abordagem do ensaio de emissão acústica (aparelho AMSY) para correlacionar com propriedades da madeira na literatura, mostra a necessidade de utilizá-lo como uma ferramenta eficiente.

2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Em 1880 o desenvolvimento da equação de Christoffel já utilizava como princípio a propagação de onda aplicável a materiais ortotrópicos (BUCUR, 1984). Segundo Stangerlin et al. (2010b) um século depois foram iniciados os estudos visando a caracterização da madeira. A avaliação da madeira por método de ensaios não destrutivos é definida como a determinação das propriedades do material sem que alterem sua forma permanente (ROSS et al., 1998). Diversos autores utilizaram esta técnica em seus estudos Bolza e Kloot (1963), Kennedy (1965), Bodig e Goodman (1972), Bucur (1984), e mais recentemente Stangerlin et al. (2010), Ballarin e Nogueira (2005), Aljets et al. (2010), Latorraca et al. (2011), Bucur (2006), Vale et al. (1995) e Gonçalves e Bartholomeu (2000).

Feio et al. (2004) relataram que diversos desenvolvimentos de técnicas e equipamentos de ensaio permitem diminuir a subjetividade e aumentar o rigor das análises estruturais. Os mesmos autores ainda afirmaram que entre muitos métodos e técnicas de ensaios, os métodos não destrutivos têm ganhado especial interesse, devido ao fato de apresentarem verdadeira solução quando se estuda a integridade e a segurança das estruturas em campo. Feio e Lourenço et al. (2007) ressaltaram que os ensaios não destrutivos podem ser divididos em dois grandes grupos: métodos globais de ensaio (GTM) e métodos locais de ensaio (LTM). Os primeiros incluem os métodos de propagação de ondas, tanto por meio do aparelho de emissões acústicas e de ultrassom. Os últimos podem ser exemplificados com o método de resistência à penetração na madeira e de resistência a perfuração na madeira, por exemplo.

Bucur (1984) citou em seu trabalho que, os principais tipos de ondas utilizados para caracterizar propriedades da madeira são as ondas de volume e de superfície. Stangerlin et al. (2008) por sua vez mencionaram que as ondas transversais e longitudinais se enquadram entre

as ondas de volume, ressaltando que as ondas transversais apresentam vibração das partículas na direção perpendicular à de propagação da onda, e nas ondas longitudinais, as partículas do meio se propagam na mesma direção de propagação da onda. Enquanto às ondas de superfície, estas podem ser Rayleigh, Love e Lamb, e apresentam movimento elíptico e ocorrem, exclusivamente, na superfície dos sólidos. Bucur (1995) afirmou que para certa frequência, quando uma onda longitudinal se propaga na mesma direção das fibras da madeira, a propagação ocorre no regime de dispersão estocástico. E para as direções radial e tangencial, estão no regime de dispersão de Rayleigh. Neste trabalho serão utilizadas as ondas ultrassônicas longitudinais por meio dos aparelhos de ultrassom e emissões acústicas AMSY 5, em que possuem princípios de funcionamentos semelhantes.

A propagação da onda ocorre com a velocidade do som, que é característica para o tipo de material e onda (LACKNER et al., 2006). Aljets et al. (2010) afirmaram que a velocidade da onda depende também da sua frequência, em meios finitos. A velocidade do som em madeira saudável é muito maior do que em espaços vazios ou em madeira em decomposição (LATORRACA et al., 2011) e tende a aumentar com a diminuição da umidade (BUCUR, 2006). De acordo com Bucur (1995) a velocidade de propagação do pulso diminui e a atenuação aumenta à medida que o conteúdo de umidade aumenta. Sendo assim o máximo valor de velocidade e o mínimo valor de atenuação são obtidos quando a madeira está seca.

2.1 Métodos não destrutivos locais

2.1.1 Resistência à penetração

Alguns aparelhos utilizando a técnica de esclerometria têm surgido com a finalidade de determinar a resistência à penetração de materiais. Dentre estes, o aparelho Pilodyn, foi desenvolvido na Suíça para avaliar o grau de podridão da madeira de postes de linhas de transmissão. Atualmente é muito utilizado para estimar densidade da madeira (VALE et al., 1995). Este aparelho estima a densidade, a partir do índice de penetração da agulha (IP) na madeira. É importante ressaltar que este equipamento fornece resultados locais, portanto, é necessário que as operações sejam repetidas para se tornarem os resultados mais precisos. Este aparelho consegue dar resultados rapidamente e com baixo custo (LAUNAY et al., 2002).

O funcionamento do aparelho Pilodyn consiste na penetração de um pino rígido, sob pressão constante, na madeira. Esta profundidade de penetração é inversamente proporcional à densidade da madeira (LOUZADA et al. (2005) e FEIO e LOURENÇO (2005)). Em que a profundidade penetrada na madeira é visualizada na escala do próprio aparelho. Muneri e Raymond (2000) ressaltaram ser a densidade da madeira a característica que mais afeta o IP. Entretanto, Louzada et al. (2005) afirmaram que o IP apenas consegue explicar cerca de 27% da variação da densidade básica. A conclusão de Louzada et al. (2005) foi correta quando as correlações entre o IP e a densidade foram feitas para apenas uma espécie de madeira. Quando são correlacionadas com intervalos maiores de densidades, poderão atingir índices mais altos, devido à variabilidade da amostra.

Gouvêa et al. (2011) utilizaram o ensaio de resistência à penetração para estimar a densidade básica da madeira de seis *Eucalyptus*, e encontraram valores de $R^2 = 57\%$. Wu et al. (2011) encontraram relação da mesma característica e da densidade básica para clones de *Eucalyptus* valor de $R^2 = 83\%$, o que indica que a densidade básica pode ser prevista por este método.

Callister e England (2010) verificaram diferentes resultados na correlação entre o índice de penetração do aparelho Pilodyn e a densidade básica da espécie *E. globulus*, produzidas em dois locais, sendo de alta produtividade (Albany) e de baixa produtividade (Esperance). Foram encontrados valores de R^2 iguais a 67% e 90% para Albany e Esperance, respectivamente. Lourenço et al. (2007) utilizaram o mesmo método para avaliar propriedades de compressão normal às fibras e densidade básica da madeira de castanheira (*Bertholletia excelsa*) e encontraram valores de determinação entre o IP e a densidade básica de $R^2 = 77\%$ a 79%. Já para módulo de elasticidade e resistência à compressão paralela às fibras não foram encontradas correlações.

2.1.2 Resistência à perfuração

O aparelho utilizado foi o resistógrafo, desenvolvido na Alemanha com a finalidade de executar análises em condições de campo do lenho de árvores, postes e estruturas de madeira (CRUZ, 2011). De acordo com Martins (2007) o resistógrafo vem sendo utilizado desde 1989 como complemento do método de avaliação visual de árvores.

Martins (2010) afirmaram que o objetivo do aparelho resistógrafo era permitir a quantificação da resistência apresentada pela madeira à perfuração de uma broca com velocidades de avanço e rotação constantes. Esta grandeza é conhecida como amplitude de penetração (AP) e pode ser correlacionada com a densidade básica da madeira (GOUVÊA et al., 2011).

Acuña et al. (2011) e Johnstone et al. (2011) utilizaram o método de resistência à perfuração para obter valores de densidade para diferentes espécies. Para o primeiro trabalho foram utilizadas 6 espécies distintas, enquanto que no outro foi utilizado apenas à espécie de *E. globulus*. Em ambos os trabalhos concluiu-se que o equipamento mostrou-se econômico e preciso para determinar a densidade da madeira. Cointe et al. (2007) encontraram valores de $R^2=81\%$ entre a AP e a densidade a 12% de umidade da madeira, em estruturas históricas. Vários outros trabalhos foram realizados com o mesmo objetivo de correlacionar a AP e a densidade aparente (KAHL et al., 2009; RINN, 1996).

Yoursy et al. (2011) afirmaram que o uso do índice de perfuração, para estimar o módulo de elasticidade e a densidade básica, é mais indicado em madeiras adultas do que em madeiras juvenis. Isik e Li (2003) verificaram em seu trabalho que este método pode ser usado de forma confiável e eficiente para avaliar a densidade da madeira de árvores vivas, auxiliando em programas de melhoramento genético, por ser muito mais barato do que o método volumétrico tradicional. Este método de perfuração se mostra sensível a variação de teor de umidade da árvore. Por este motivo, é necessário controlar as condições de ambientes em que serão realizados os ensaios, quando o objetivo é comparar características de árvores.

Ukrainetz e O'Neill (2010) trabalharam com análise de sensibilidades que contribuem para erro de medição no resistógrafo, abordando fatores experimentais como: flexão da broca, conteúdo de umidade no tronco da árvore e temperatura do ar. Verificou-se que para os fatores experimentais analisados não houve diferenças significantes, exceto para a flexão da broca. Calderoni et al. (2010) encontraram correlação de $R^2=58,1\%$ entre a tensão de compressão paralela às fibras e a resistência à perfuração do aparelho, em vigas antigas de castanheira (*Bertholletia excelsa*) empregadas na estrutura desde o ano de 1800.

O método de perfuração é amplamente utilizado para estimar densidade de madeira. No entanto é utilizado também para correlacionar propriedades da resistência à compressão e módulo de elasticidade paralelo às fibras.

2.2 Métodos não destrutivos globais

2.2.1 Propagação de onda

A introdução de fontes de emissão acústica tem se tornado ferramenta importante para os ensaios não destrutivos e aplicações de monitoramento em peças estruturais, em campo e em laboratório. Bogdanovich et al. (2008) afirmaram que o sinal acústico fraco é capturado por um sensor e pré-amplificado. Após o pré-amplificador o sinal pode ser filtrado ou ir diretamente para o conversor capaz de digitalizá-lo. Através do software são registrados os eventos de emissão acústica.

Aljets et al. (2010), Chen et al. (2006), Cyra e Tanaka (2000), Jakiela et al. (2008), Aicher et al. (2001), Raczkowski et al. (1999), Noguchi et al. (1986), Ando et al. (2006), Aguilera et al. (2007), Kuroda (2012), Skaar et al. (1980) e Yin et al. (2010) utilizaram emissões acústicas para estudar alguma propriedade da madeira. Já Pullin et al. (2008) afirmaram que o monitoramento com emissão acústica oferece alternativa real e prática para o conhecimento do comportamento interno de materiais, e que se encontra cada vez mais aceita. A localização da origem exata de uma onda de emissão acústica em uma estrutura pode ajudar a determinar o tipo de fonte dos defeitos, por exemplo, propagação de trincas a partir de um furo, danos causados por impactos ou mesmo apenas o atrito entre as diferentes partes da estrutura (ALJETS et al., 2010).

Kowalski e Smockkiewick (2004) utilizaram o método de AE para diminuir as tensões de secagem, e ainda conseguir propor condições ideais de secagem para a madeira de pinus (*Pinus* sp.). Ando et al. (2006) examinaram, através da técnica de emissão acústica, processos microscópicos de fratura devido a tensão de cisalhamento em madeira de pinheiro vermelho (*Pinus densiflora* Sieb. et Zucc.) em uma viga principal de um templo budista na província de Nagano, Japão, com idade de 270 anos. O método se mostrou eficiente para avaliar as referidas fraturas.

Cyra e Tanaka (2000) avaliaram o efeito da orientação das fibras da madeira de Álamo amarelo (*Liriodendron tulipifera* Linn), através de emissão acústica. O objetivo foi investigar as causas das mudanças nos sinais de emissão acústica (EA) correspondentes às mudanças na orientação de grã. Conseguiu-se perceber que os sinais de EA gerados estavam intimamente relacionados com as direções das fibras, bem como o acabamento da superfície. Além disso, houve correlação entre a EA e rugosidade da superfície. Assim, o método de emissão acústica tem se mostrado uma ferramenta para verificar a rugosidade da superfície do material. Já Kuroda (2012) realizou o monitoramento através de EA, para capturar imagens internas de árvores infectadas com “doença murcha” em pinheiros (*Bursaphelenchus xylophilus*).

De acordo com Bucur (2006) o desenvolvimento de técnicas de ultrassom para a determinação das constantes elásticas da madeira foi divulgado no Reino Unido na década de 1960. E a partir desta data houve a difusão destes ensaios em todo o mundo. Autores como Bodig e Goodman (1972), Bolza e Kloot (1963), Kennedy (1965), Atherton (1980), Curry e Tory (1976), Bucur (1984) e Warren (1979) contribuíram para percepção da importância da técnica de propagação de ondas acústicas para avaliação de madeira.

Levando em consideração a utilização de ondas acústicas com frequências maiores que 20 KHz são utilizados métodos de ultrassom, que utiliza um cristal de quartzo que converte corrente elétrica em ondas oscilatórias. Bucur e Bohnke (1994) afirmaram que a propagação da onda pode ser influenciada por diversos fatores, entre eles: as propriedades físicas do substrato, a geometria do corpo de prova, temperatura, umidade, carregamento mecânico, sensibilidade e resposta de frequência dos transdutores e o meio de acoplamento.

Há uma divergência opiniões quando se avalia o módulo de elasticidade da madeira por meio de propagação de ondas. Alguns autores como Ross et al. (1997), Steiger (1997), Lourenço et al. (2007), Gonçalves e Bartholomeu (2000), González et al. (2001) e Teles et al. (2011) utilizaram o E_{din} como resposta da relação entre a velocidade de propagação da onda e a densidade da madeira, fazendo uma aproximação sem levar em consideração as várias influências dos coeficientes de Poisson e dos módulos de elasticidade transversais. Outros autores como Bucur (1983), Sandoz (1990), Ballarin e Nogueira (2005), Gonçalves et al. (2011) e Bartholomeu et al. (2003) os chamaram de constante elástica, já que afirmaram que para ser considerada como E_{din} , é necessário ser levada em consideração uma série de outros

fatores, como por exemplo, os coeficientes de Poisson. Assim poderá ocorrer em alguns casos a comparação da constante de rigidez ou E_{din} com valores de E_{est} .

Ballarin e Nogueira (2005); Carrasco e Azevedo Júnior (2003); González et al. (2001); Stangerlin et al. (2010); Miná et al. (2004) e Oliveira et al. (2006) utilizaram o método propagação de ondas ultrassônicas em seus trabalhos. Nogueira e Ballarin (2003) utilizaram esta técnica para comparar com o módulo de elasticidade estático da madeira de *Pinus taeda* nas três direções da madeira. De acordo com os autores o método se mostrou eficiente para as direções longitudinal e radial, com valores de coeficiente de determinação das regressões lineares de $R^2= 97\%$ e 82% , respectivamente. Já para a direção tangencial este método não se mostrou eficiente para avaliar o módulo de elasticidade, uma vez que o R^2 foi igual a 42% .

Stangerlin et al. (2010a) avaliaram os tipos de ondas gerados por dois modelos de transdutores utilizados para a determinação das constantes elásticas por meio de ensaios com ultrassom e correlacioná-los ao módulo de elasticidade estático obtido por compressão paralela às fibras. Concluíram que as ondas longitudinais geradas pelos transdutores de faces planas são mais sensíveis às diferenças de região de medula a casca. A constante elástica dinâmica obtida pelo uso da onda longitudinal apresenta boa correlação com o módulo de elasticidade à compressão paralela e, ainda que apesar dos transdutores de pontos secos serem mais práticos, geram ondas de superfície que apresentam baixa velocidade de propagação e consequentemente baixa constante elástica dinâmica.

Oliveira et al. (2006) avaliaram o efeito do comprimento do corpo de prova na velocidade ultrassônica em madeiras de pinus caribaea (*Pinus caribaea* var. *caribaea*), eucalipto citriodora (*Eucalyptus citriodora*), eucalipto grandis (*Eucalyptus grandis*) e jatobá (*Hymenaea* sp). Assim como Bucur (1995), estes autores também concluíram que adequar a frequência do transdutor com o comprimento da peça é essencial para a determinação correta da velocidade ultrassônica em madeiras.

Stangerlin et al. (2010b) estimaram o módulo de elasticidade em painéis aglomerados madeira-bambu por meio de emissão de ondas ultrassônicas. Quando empregado o método direto de propagação, o uso do aparelho se mostrou uma ferramenta eficiente para inferência não destrutiva do módulo de elasticidade. Enquanto, por meio do método semidireto não

permitiu à obtenção de estimativas confiáveis do módulo de elasticidade a flexão estática. Com valores de $R^2= 58\%$ para o módulo de elasticidade estático em função do módulo de elasticidade dinâmico obtido pelo método direto. Valores de $R^2= 4\%$ foram encontrados para a estimativa do módulo de elasticidade estático em função do módulo de elasticidade dinâmico obtido pelo método semidireto.

Feio et al. (2004) determinaram os coeficientes de determinação do módulo de elasticidade e a resistência à compressão normal às fibras, por método ultrassônico, para as madeiras de *Castanea satina* Mill. Verificaram que a relação entre E_{din} e E_{est} , para as três direções, valores de $R^2= 86\%$ para as direções tangencial, radial e difusa. Para a direção paralela às fibras, esta correlação foi de $R^2= 74\%$.

Candian e Sales (2009) utilizaram o método de ondas de ultrassom para correlacionar o módulo de elasticidade da madeira de *Eucalyptus citridora*. Como resultado, conseguiram-se valores de $R^2= 76\%$, demonstrando ser uma ferramenta importante para avaliar o módulo de elasticidade.

Yang et al. (2008) investigaram a velocidade de transmissão da onda ultrassônica (V_o) e módulo de elasticidade dinâmico (E_{din}) para um total de 160 peças de Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*). Verificaram alta correlação entre E_{din} e módulo de elasticidade estático (E_{est}) de $R^2= 80\%$. Desta maneira, este método é uma alternativa confiável para determinar o módulo de elasticidade (E).

Miná et al. (2004) investigaram o uso da técnica de ultrassom para avaliar o módulo de elasticidade dinâmico (E_{din}), por meio da comparação com ensaio de flexão estática (MOE), em 50 postes de madeira de eucalipto. Os resultados deste estudo mostraram uma boa relação entre as propriedades determinadas por emissão ultrassônica e a flexão estática, com valores de coeficiente de determinação variando de 55% a 62% entre E_{din} e E_{est} , respectivamente.

Stangerlin et al. (2008) utilizaram o método de ultrassom para obter módulo de elasticidade em madeiras de Guajuvira (*Patagonula americana*) e Pinheiro-do-Paraná (*Araucaria angustifolia*). Para avaliar a sensibilidade do método ultrassônico, os corpos de prova foram ensaiados destrutivamente à compressão paralela às fibras, com determinação do módulo de

elasticidade estático. Os resultados mostraram um coeficiente de determinação de 84% e 88% entre E_{din} e E_{est} , para a madeira juvenil e adulta de Guajuvira, respectivamente. Para a madeira de Pinheiro-do-Paraná esses valores foram 91% e 95%, para madeiras juvenis e adultas, respectivamente.

Bartolomeu e Gonçalves (2007) determinaram o módulo de elasticidade à flexão em vigas de eucalipto saturadas e secas ao ar de *Eucalyptus citriodora* (50 peças) e *Eucalyptus grandis* (31 peças), utilizando a velocidade longitudinal de ultrassom. Resultados demonstraram a superioridade dos valores de correlação do módulo de elasticidade à flexão quando utilizada a velocidade na viga saturada quando comparada com a viga seca. Conseguiram-se correlações de velocidade e módulo de elasticidade à flexão nas vigas saturadas de $R^2= 83\%$, enquanto na viga seca não foi possível obter nenhuma correlação significativa.

Calegari et al. (2007) utilizaram ondas ultrassônicas como meio de controle do processo de secagem das espécies de *Pinus elliottii* Engelm e *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden, com transdutores de 50 kHz. Os resultados indicaram aumento da velocidade ultrassônica em função da redução do teor de umidade. Este método apresenta bom potencial para ser usado no controle do processo de secagem. Entretanto, são necessários estudos sobre a influência das diversas características das madeiras sobre a velocidade das ondas ultrassônicas, tais como: fatores anatômicos e químicos.

A propagação da onda em CPs de madeira, com as fibras orientadas na direção longitudinal, é parcialmente influenciada pelos elementos anatômicos situados perpendicularmente à direção das fibras, tais como os raios (BUCUR e BOHNKE, 1994). Bucur (1995) afirmou que a velocidade na direção longitudinal é a mais afetada pela variação da geometria do CP. Enquanto na direção normal às fibras (direções tangencial e radial) há uma maior influência da anatomia em suas propriedades de propagação da onda. De acordo com Bucur e Bohnke (1994) para ondas longitudinais, a atenuação é menor na direção longitudinal e mais elevada na direção tangencial. Logo se conclui, que os fatores anatômicos possuem maior influência no comportamento de propagação da onda, nas direções tangencial, radial e longitudinal, respectivamente.

3

MATERIAL E MÉTODOS

Os ensaios destrutivos e não destrutivos foram realizados no Centro de Pesquisa Avançado da Madeira e novos Materiais (CPAM³), da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). As madeiras ensaiadas foram angelim pedra (*Hymenolobium petraeum*), angelim vermelho (*Dinizia excelsa*), castanheira (*Bertholletia excelsa*), garapa (*Apuleia leiocarpa*), muiracatiara (*Astronium lecointei*), pequi (*Caryocar villosum*) e roxinho (*Peltogyne discolor*). De cada espécie confeccionaram-se sete corpos de prova para cada direção analisada (longitudinal, tangencial e radial).

Os CPs utilizados para os ensaios não destrutivos também foram utilizados para determinar o teor de umidade, densidade aparente, módulo de elasticidade à compressão, resistência ao cisalhamento e dureza Janka. Os procedimentos de ensaio para determinação de características mecânicas seguiram as prescrições da NBR 7190 da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (1997) e os padrões rigorosos dos requisitos e procedimentos do sistema de qualidade implantados nos laboratórios do Centro de Pesquisa Avançado da Madeira e novos Materiais (CPAM³).

Para cada uma das madeiras foram utilizadas sete vigas de 2,5 m de comprimento e seção transversal de 150x150 mm. As mesmas foram secadas ao ar e posteriormente desdobradas em peças menores. Em seguida foram armazenadas para estabilização da umidade, e posteriormente confeccionados corpos de prova (CPs) de acordo com a norma NBR 7190 (1997) da ABNT, para determinação do teor de umidade.

A partir de cada viga de madeira foram retirados cubos com dimensões de 150 mm, peças de 50x150x150 mm (largura, altura e comprimento) e o restante foi armazenado para confecção

de possível réplica do CP. Os CPs ensaiados à compressão, dureza Janka e cisalhamento, todos com total de 147 amostras, foram orientados nas direções radial, tangencial e longitudinal. Os ensaios de dureza Janka foram realizados nos CPs de compressão. De cada viga foram confeccionados dois CPs (uma sendo réplica) para determinação da umidade e da densidade aparente da madeira. Na FIG. 3.1 é mostrado o esquema de retirada dos CPs.

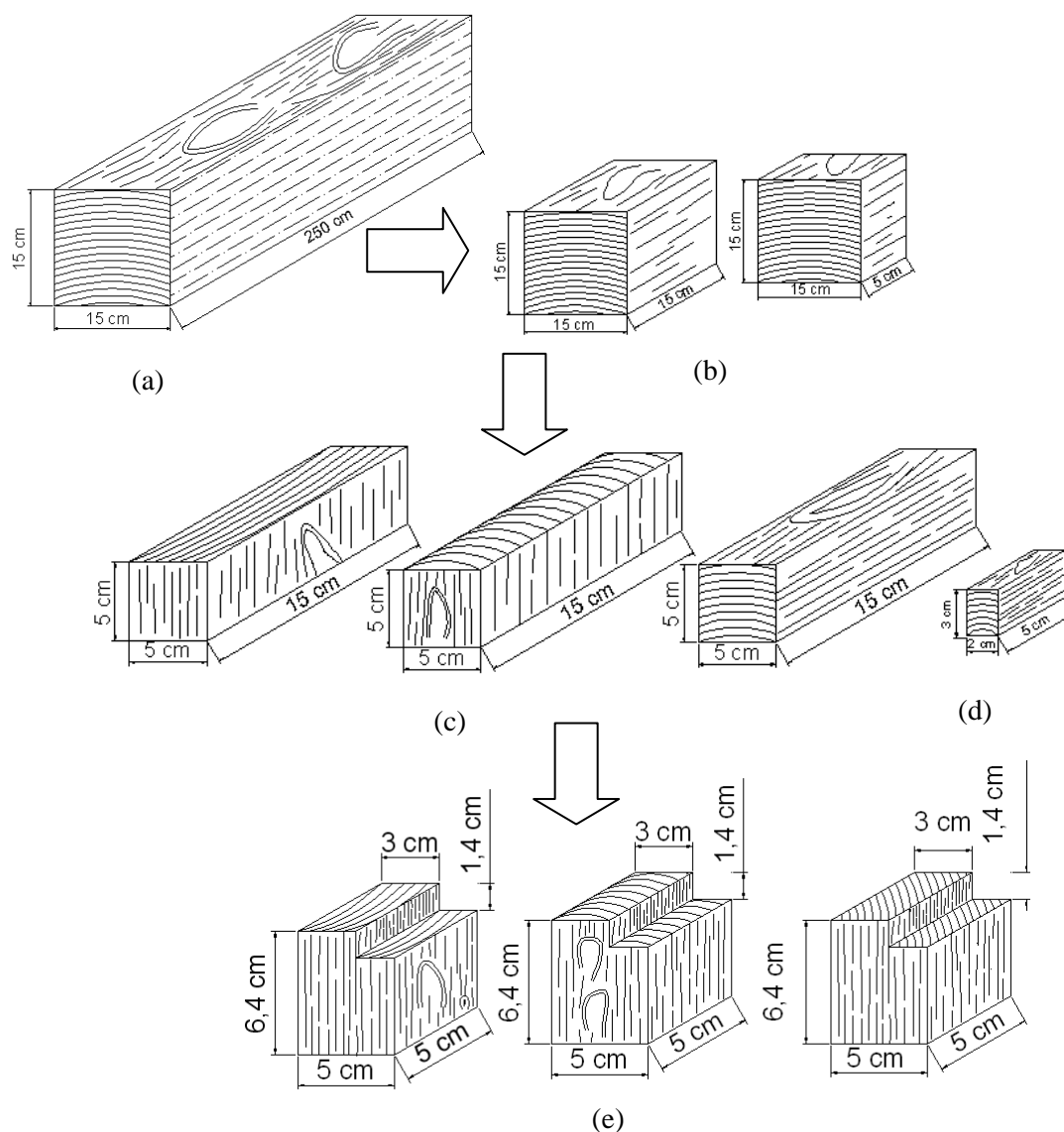


FIGURA 3.1 – Esquema de retirada dos corpos de prova. (a) Viga de madeira; (b) Peças de 15x15x5cm e de cubo de 15 cm; (c) Corpos de prova de compressão nas direções tangencial, radial e longitudinal. (d) Corpos de prova de umidade e densidade. (e) Corpos de prova de cisalhamento, nas direções tangencial, radial e longitudinal.

3.1 Determinação da umidade e densidade aparente

Os teores de umidade e de densidade aparente das madeiras foram determinados no Laboratório de Caracterização Física da Madeira (LACAF). Todos os aparelhos, dentre eles paquímetros, balanças e estufas foram calibrados por órgão competente segundo as recomendações do Instituto Nacional de Metrologia Qualidade e Tecnologia (INMETRO). Todo o sistema de medida era automatizado, sem qualquer interferência do operador.

Os cálculos de umidade e de densidade aparente foram determinados de acordo com a NBR 7190 da ABNT (1997), e suas correções foram realizadas utilizando a ASTM D 2395 (1998) e a ISO 3130 (1975). Para estimativa do teor de umidade dos CPs (U_{cp}) antes da realização dos ensaios foi utilizada a equação 3.1 deduzida da equação 3.2 da ASTM D 2395 (1998).

$$D_{ap,cp} = \frac{D_{ap,in}}{1 - D_{ap,in} \times 0,009 \times (U_{in} - U_{cp})} \quad (3.1)$$

$$U_{cp} = \frac{D_{ap,in} - D_{ap,cp}}{D_{ap,in} \times D_{ap,cp} \times 0,009} + U_{in} \quad (3.2)$$

em que:

$D_{ap,cp}$ = Densidade aparente do corpo de prova, kg/m³;

$D_{ap,in}$ = Densidade aparente inicial, com U% de umidade, kg/m³;

U_{in} = Teor de umidade calculado em estufa, %;

U_{cp} = Teor de umidade do corpo de prova, %.

Para a correção da densidade aparente calculada através da NBR 7190 (1997) para a densidade aparente com o teor de umidade de referência de 12%, foi utilizada a equação 3.3 da ISO 3130 (1975). Esta equação se mostra necessária, uma vez que na prática não é possível colocar os corpos de prova na estufa para secar antes da realização dos ensaios, pelo único intuito de preservar suas propriedades originais.

$$\rho_{12} = \rho_w \times \left[1 - \frac{(1-k) \times (w-12)}{100} \right] \quad (3.3)$$

em que:

K = Coeficiente volumétrico para mudança de 1% de umidade, e que seu valor é igual a $0,85 \times 10^3 \times \rho_w$;

ρ_w = Densidade Aparente a w% de teor de umidade, kg/ m³;

w = Teor de umidade em que se encontra o corpo de prova, %.

3.2 Métodos de ensaio não destrutivos locais

3.2.1 Resistência à penetração

Para a determinação da resistência à penetração foi utilizado o aparelho Pilodyn 6J, da marca PROCEQ S.A., em que tem como princípio à penetração de um pino de aço impulsionado por uma mola, que transforma a energia potencial elástica em energia de impacto.

A FIG. 3.2 mostra a utilização do aparelho Pilodyn em madeira.



FIGURA 3.2 – Utilização do equipamento pilodyn em laboratório.

Os ensaios foram feitos nos CPs confeccionados para ensaio à compressão, orientados nas direções tangencial, radial e longitudinal. Este aparelho mostra através da escala numérica o valor do IP, como mostra a Fig. 3.3. Em cada CP foram realizadas duas medições, uma em cada seção transversal, e logo obtido o valor médio dos IPs.



FIGURA 3.3 – Escala do aparelho pilodyn.

3.2.2 Resistência à perfuração

Para determinar a resistência à perfuração foi utilizado o aparelho resistógrafo, modelo F400, da marca IML, FIG. 3.4. A medição da resistência, ou amplitude de perfuração é efetuada através da determinação da quantidade de energia necessária para realizar o furo. Em que se baseia na medida da energia necessária para manter a velocidade de perfuração constante. Esta energia necessária é a amplitude de perfuração da agulha (AP).

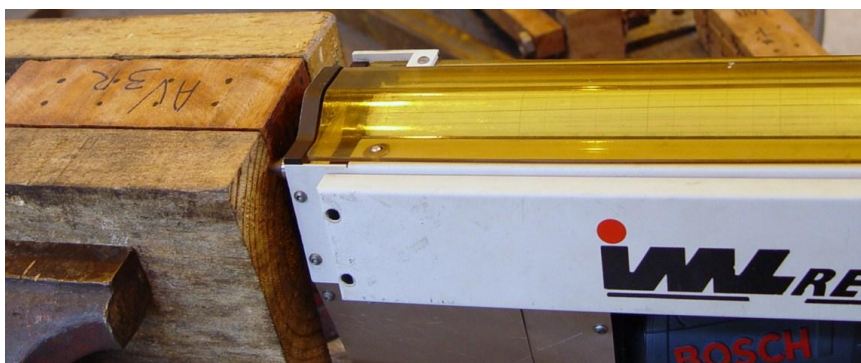


FIGURA 3.4 – Utilização do aparelho resistógrafo em laboratório.

Os ensaios foram realizados no centro dos CPs confeccionados para o ensaio de compressão, orientados nas direções tangencial, radial e longitudinal. Este aparelho mostra, através de um gráfico, a AP em relação entre o comprimento do CP, FIG. 3.5. Os valores médios característicos de AP para cada corpo de prova foi calculado adotando o intervalo de $1 \text{ cm} \leq x \leq 14 \text{ cm}$ de comprimento dos CPs. Este método de seleção de coleta das APs foi

desenvolvido simplesmente na tentativa de minimizar possíveis perturbações externas, como por exemplo, erro do operador.

Antes da realização dos ensaios, foram determinados de cada CP a sua umidade e densidade aparente, seguindo a metodologia apresentada no item 3.1. Em seguida estes valores foram corrigidos para umidade padrão de 12% de umidade.

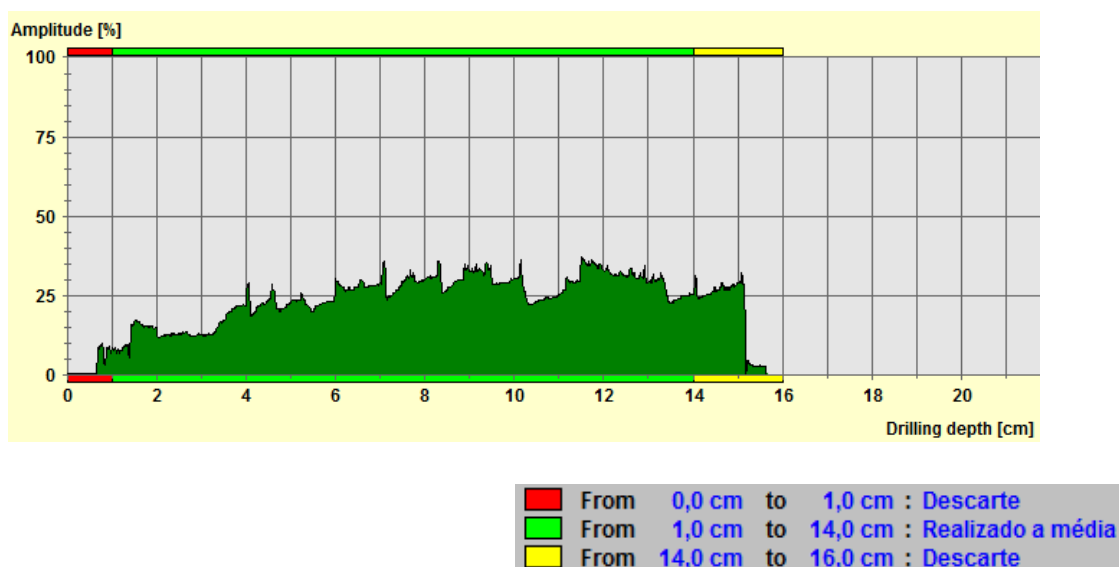


FIGURA 3.5– Amplitude de perfuração em relação ao comprimento do corpo de prova.

3.3 Métodos de ensaio não destrutivos globais

Neste item são descritos, o método e os aparelhos utilizados com o princípio de propagação de ondas ultrassônicas, para correlacionar ou estimar propriedades da madeira. Em que são utilizados os aparelhos de emissão acústica com a frequência de 2 MHz e o aparelho ultrassom com transdutores longitudinais de 54 kHz, 150 kHz e 180 kHz. Destaca-se que os dois tipos de aparelhos empregados foram utilizados o mesmo princípio de funcionamento, do qual utilizam o meio de propagação de ondas longitudinais em corpos de prova com 15 cm de comprimento.

3.3.1 Propagação da onda

Para o cálculo da velocidade de propagação de ondas foram utilizados dois aparelhos, um de emissão acústica da marca Vallen e modelo AMSY-5 (FIG. 3.6) e o outro o ultrassom James

V Mk II (FIG. 3.7). Estes aparelhos detectam o pulso acústico emitido por transdutores localizados em cada uma das seções transversais do CP, ou seja, transmitem pulsos elétricos para o cristal piezelétrico (transdutores), que os transformam em ondas ultrassônicas.

O aparelho de emissão acústica é composto por transdutores, pré-amplificadores, e processadores de sinal que permite detectar sons de maiores frequências e intensidades mais baixas. Já o aparelho James V Mk II é acoplado a um osciloscópio para captura da imagem da onda. Para o primeiro aparelho foi utilizado frequência de 2 MHz e transdutor com 10 mm de diâmetro e para o segundo aparelho foram utilizados transdutores longitudinais com frequências de 54 kHz, 150 kHz e 180 kHz e diâmetro de 50mm, 25mm e 50mm, respectivamente.

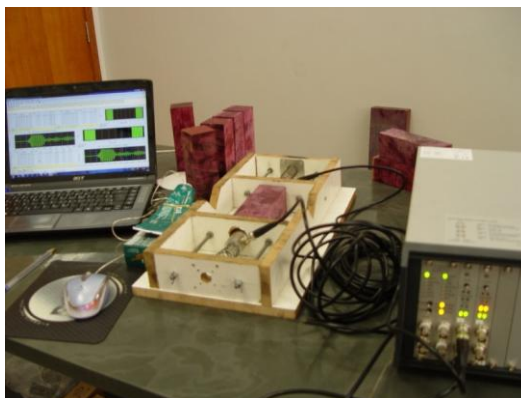


FIGURA 3.6 – Aparelho de emissões acústicas (AMSY-5).

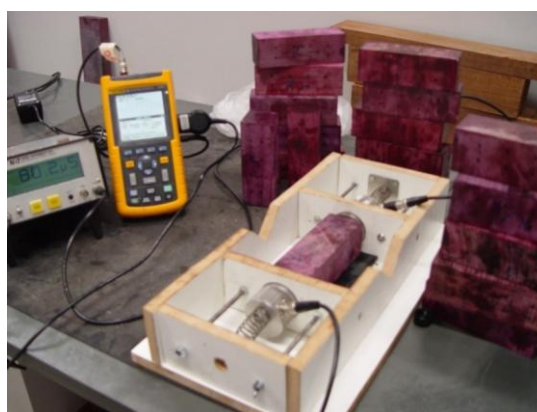


FIGURA 3.7 – Ensaio com equipamento de ultrassom.

Observa-se que os ensaios de propagação da onda foram realizados a partir de dois transdutores, que são acoplados nas seções transversais do CP com auxílio de um gel. O transdutor emite o sinal da onda, que é captado pelo outro transdutor (transdutor receptor).

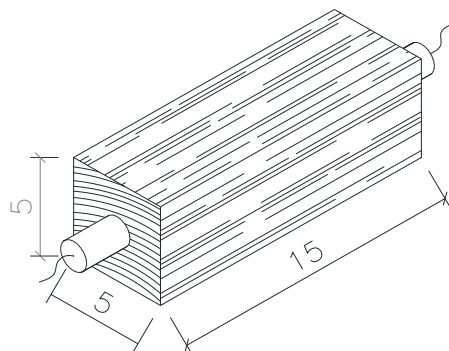


FIGURA 3. 8 –Esquema do teste de propagação de onda por método direto de transmissão de sinal.

Assim como muitos autores que consideram os valores de constante de rigidez (CR) aproximados aos valores de E_{din} . Neste trabalho serão determinadas as CRs nas três direções longitudinal, tangencial e radial. A partir da equação 3.4 adotada por diversos autores (Sandoz (1990), Nogueira e Ballarin (2005), Gonçalves e Bartholomeu (2000)), é possível calcular as CRs da madeira conhecendo-se os valores de velocidade de propagação da onda e de densidade aparente a 12% de umidade.

$$C.R = V_o^2 \times \rho \times 10^{-6}, \quad (3.4)$$

em que:

C.R = Constante de rigidez, MPa;

V_o = Velocidade de propagação da onda, m/s;

ρ = Densidade da madeira; kg/m³.

O comprimento do CP é determinado a partir do comprimento de onda (λ). Existem ainda divergências sobre o valor mínimo necessário para que a velocidade da onda seja constante, a NBR 58000 (2007) prescreve que o comprimento do CP deve ser de no mínimo 3λ , já Bucur (1995) estabeleceu que deve ser no mínimo 2λ . Na Tabela 3.1 é apresentado o λ para as sete madeiras e o comprimento mínimo dos CPs (L), de acordo as prescrições da NBR 58000 (2007). Segundo Bucur (2006) os valores de λ são superiores na direção longitudinal, seguido

das direções radial e tangencial. Os cálculos foram realizados para os transdutores de menor frequência (54 kHz e 150 kHz) em vista de que o λ é inversamente proporcional à frequência dos transdutores ($\lambda = V_{\text{onda}}/\text{frequência}$). Em CPs orientados na direção longitudinal, o valor médio da relação L/λ para as sete madeiras com a utilização do transdutor de 54 kHz e de 150 kHz foi de 1,6 e 4,6, respectivamente. Para os cálculos realizados com o transdutor de 54 kHz e CPs orientados nas direções tangencial e radial, a mesma relação foi de 4,4 e 3,9, respectivamente. Logo se constata que a relação de L/λ maior que 3 apenas não é conseguida na direção longitudinal com a utilização do transdutor de 54 KHz.

Bucur (2006) e Aljets et al. (2010) afirmaram que, em meios finitos, a velocidade da onda depende também da sua frequência. Verifica-se que a partir do transdutor de 150 kHz os valores dos comprimentos dos CPs estão de acordo com a norma, no entanto em meio finito, logo sofrerão uma pequena influência da frequência utilizada.

Tabela 3. 1 – Valor médio de comprimento de onda na direção longitudinal, e comprimento mínimo do corpo de prova, para os transdutores de 54 kHz e 150 kHz

Madeiras	54kHz		150kHz	
	Comp. onda (λ)	CP	Comp. onda (λ)	CP
Angelim pedra	10,3	31,0	3,5	11,0
Angelim vermelho	8,7	26,0	2,9	9,0
Castanheira	9,5	27,0	3,2	10,0
Garapa	9,6	29,0	3,3	10,0
Muiracatiara	9,5	29,0	3,1	10,0
Pequi	9,0	27,0	3,2	10,0
Roxinho	10,3	31,0	3,7	11,0

CP= comprimento mínimo de corpo de prova.

3.3.2 Determinação das características mecânicas através de ensaios destrutivos

Foram realizados os ensaios de: compressão, cisalhamento e dureza Janka, nas direções longitudinal, radial e tangencial, de acordo com as especificações da NBR 7190 (1997). Nas FIGs. 3.9 a 3.11 são mostrados estes ensaios.

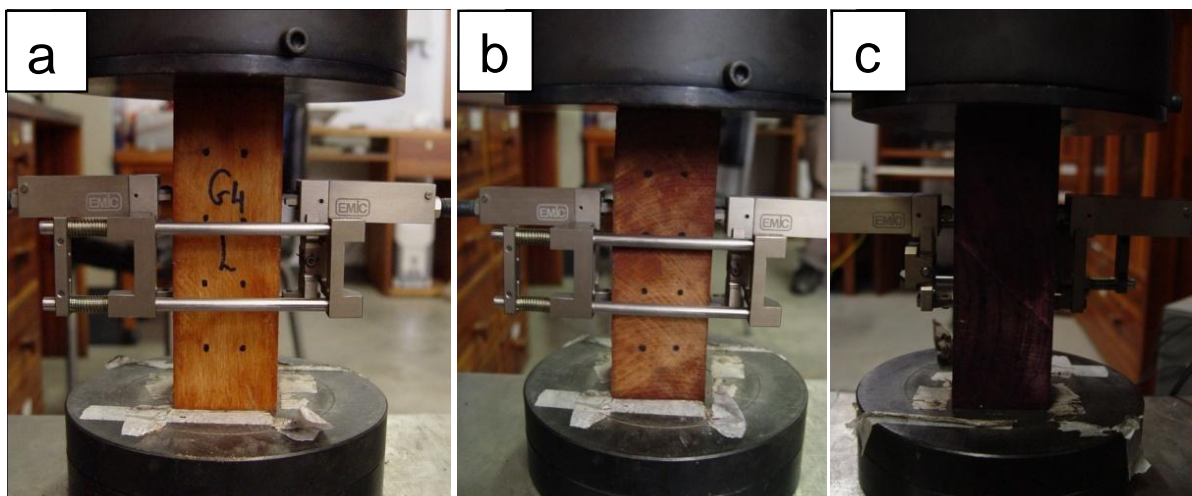


FIGURA 3.9 – Ensaio de compressão com utilização do “clip-gage”; a) longitudinal; b) radial; e c) tangencial.



FIGURA 3.10 – Ensaio de cisalhamento.

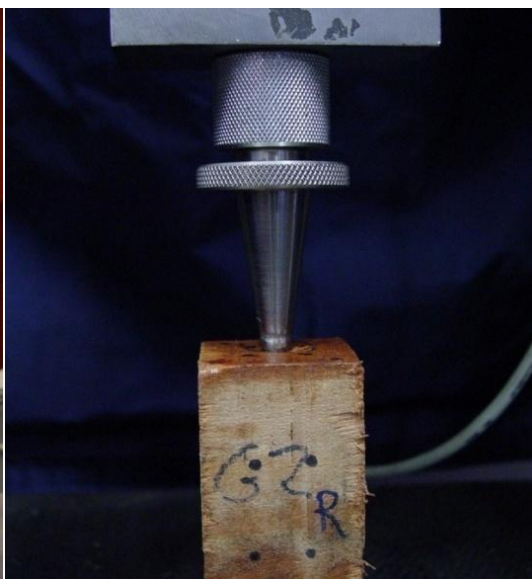


FIGURA 3.71 – Ensaio de dureza Janka.

4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão analisados os resultados dos ensaios realizados. No item 4.1 serão apresentados e discutidos os resultados dos ensaios destrutivos. No item 4.2 serão apresentados e discutidos os resultados dos ensaios não destrutivos. No item 4.3 será feita a comparação entre os métodos não destrutivos.

4.1 Ensaios destrutivos

Os resultados obtidos nos ensaios destrutivos foram corrigidos para o teor de umidade de 12% de acordo com NBR 7190 (1997).

Na FIG. 4.1 é apresentado um gráfico “boxplot” da densidade aparente a 12% de umidade para cada uma das madeiras utilizadas. Nesta figura verifica-se que os valores médios de densidade aparente das madeiras estão contidos no intervalo de 650 a 1150 kg.m³, portanto, classificadas como madeiras de média a alta densidade.

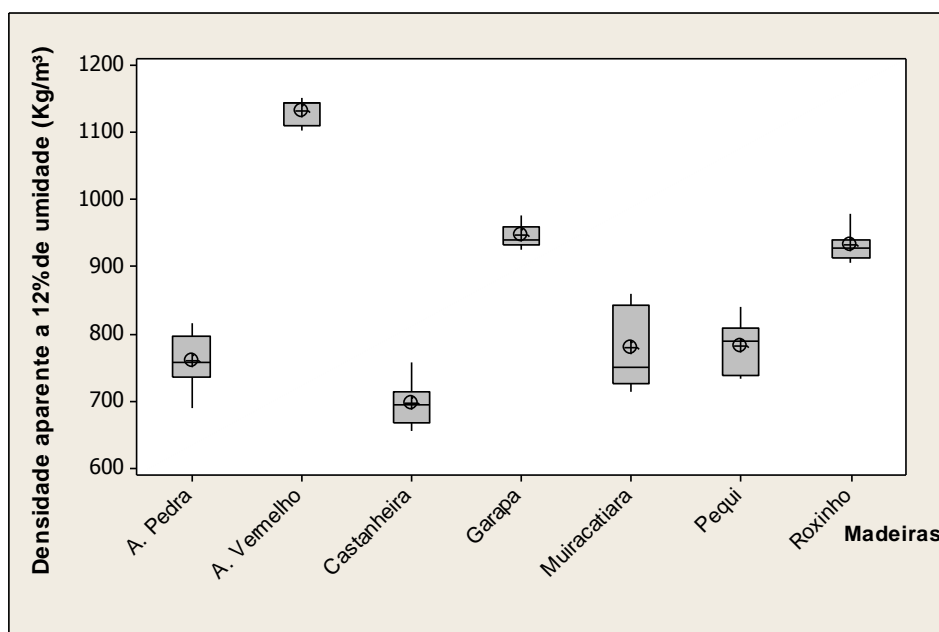


FIGURA 4.1 – Densidade aparente a 12 % de umidade das madeiras utilizadas.

Na FIG. 4.2 são mostrados os valores de dureza Janka e módulo de elasticidade estático em função da densidade aparente a 12% de umidade para todas as madeiras analisadas, com a finalidade de apenas explicar os resultados.

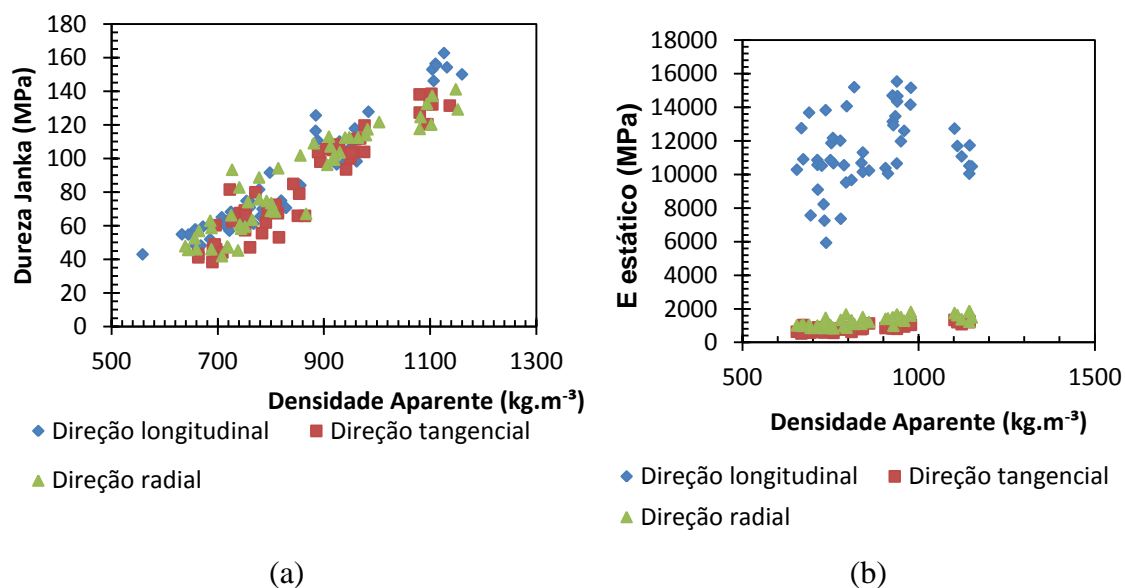


FIGURA 4.2 – Resultados experimentais. (a) Dureza Janka; (b) Módulo de elasticidade estático (E estático).

Os resultados dos ensaios de cisalhamento apresentaram problemas na determinação da tensão de ruptura, nas direções tangencial e radial. Não foi possível romper os CPs devido a excesso de deformação normal às fibras e em alguns casos o CP rompe por cisalhamento paralelo às fibras e não tangencial ou radial (FIG. 4.3). Assim foi adotada como tensão de ruptura, a tensão correspondente ao deslocamento no instante da ruptura do corpo de prova com as fibras longitudinais. Na FIG. 4.4 (a) é apresentado como exemplo o diagrama de tensão de cisalhamento *versus* deslocamento horizontal em ensaio longitudinal, ensaio tangencial e ensaio radial. As linhas horizontais que interceptam a curva de ruptura do CP longitudinal e a curva do CP tangencial ou radial determinam a tensão de ruptura de referência.

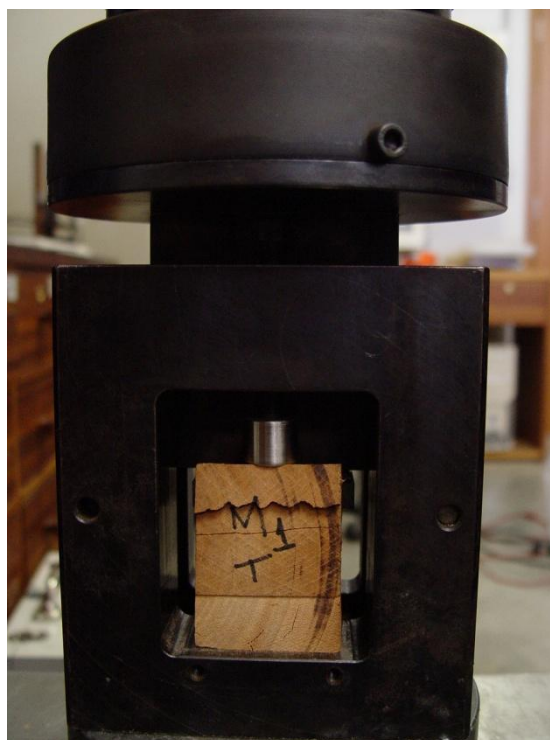


FIGURA 4.3 – Rompimento de corpo de prova orientado na direção tangencial, em ensaio de cisalhamento.

Na FIG. 4.4 encontram-se os resultados do ensaio de cisalhamento, orientados nas direções longitudinal, tangencial e radial.

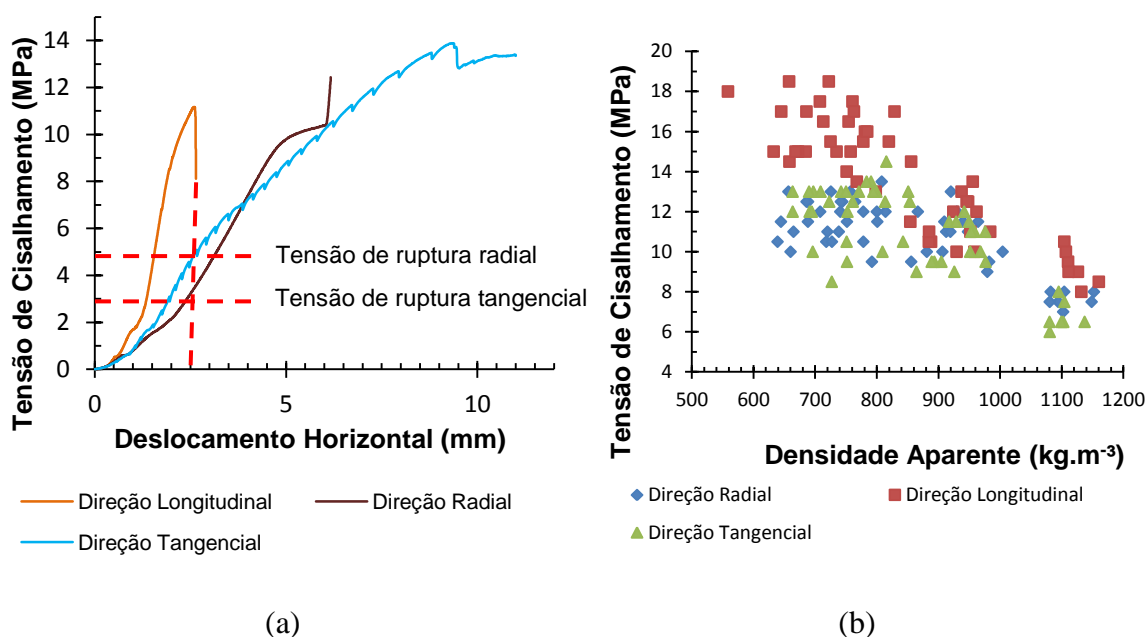


FIGURA 4.4 – Resultados dos ensaios de cisalhamento. (a) Relação entre tensão de cisalhamento e deslocamento horizontal. (b) Tensão de cisalhamento em função da densidade aparente a 12% de umidade.

Na TAB. 4.1 encontra-se a análise de densidade aparente a 12% de umidade, módulo de elasticidade, dureza Janka e da tensão de cisalhamento nas direções longitudinal, tangencial e radial. Os números em negrito são as médias, os números em parênteses o desvio padrão, e as letras são parâmetros atribuídos pelo teste de Tukey a 5% de significância. As médias seguidas pela mesma letra, na mesma linha, indicam que não diferem entre si. Foi realizada também a análise entre as direções longitudinal, tangencial e radial para verificar se as mesmas diferenciam entre si.

Para o módulo de elasticidade e a tensão de cisalhamento, mesmo conhecendo o comportamento diferente entre as direções radial e tangencial e conseqüentemente diferenças de comportamentos destas duas direções quanto a comportamentos físicos e mecânicos da madeira, estatisticamente os resultados na direção radial e tangencial, não se diferenciaram para estas duas propriedades. Enquanto para a dureza Janka, todas as direções são estatisticamente iguais. Contrariando os diferentes aspectos anatômicos, físicos e químicos entre estas três direções.

Observa-se na TAB. 4.1 que a madeira de angelim vermelho possui maior densidade aparente, diferenciando estatisticamente das demais, classificada como madeira de alta densidade. Já a madeira de castanheira obteve o menor valor em média, sendo classificada como de média densidade. As densidades aparentes da madeira de garapa e do roxinho foram estatisticamente iguais, pelo teste de Tukey a 5% de significância e foram classificadas como de alta densidade, como ocorreu também para as madeiras de pequi, muiracatiara e angelim pedra, que não se diferenciaram estatisticamente, mas classificadas como madeiras de densidade moderadamente alta. Assim os valores da densidade estão dentro do intervalo de média a alta densidade (0,65 a 1,1 g/cm³).

Com relação ao módulo de elasticidade na direção tangencial (E_t) observa-se que os maiores valores são para as madeiras de alta densidade. De acordo com o teste de Tukey, as madeiras de angelim vermelho e garapa não se diferenciaram estatisticamente, e têm os maiores E_t s. Também as madeiras de castanheira, angelim pedra, muiracatiara e pequi não se diferenciaram estatisticamente, e têm os menores valores de E_t . Para o módulo de elasticidade radial (E_r), verifica-se um comportamento semelhante ao descrito para o E_t , no qual os maiores valores de E_r são correspondentes as maiores densidades. As madeiras de angelim vermelho, garapa, roxinho e pequi, obtiveram o E_r estatisticamente iguais.

Nota-se na TAB. 4.1 que as relações entre os módulos de elasticidade longitudinal e tangencial e entre os módulos de elasticidade tangencial e radial as médias não se diferenciaram estatisticamente na maioria das vezes, pelo teste de Tukey. Contudo, para a relação entre os módulos de elasticidade longitudinal e radial, a madeira de angelim pedra obteve maior média, não se diferenciando estatisticamente pelo teste de Tukey, a 5% de significância, das madeiras de roxinho, garapa e castanheira. Já as madeiras de angelim vermelho e pequi obtiveram menores valores nesta mesma relação, sendo estatisticamente iguais pelo teste de Tukey.

O valor médio das relações entre o E_L e E_T foi de 14,33 variaram de 9,95 a 17,83. O maior valor médio foi de 17,8 para a madeira de angelim pedra e o menor valor médio de 9,95, encontrado para a madeira de pequi. Já o valor médio das relações entre E_L e E_R foi de 9,99, com o maior valor médio de 14,38 para a madeira angelim pedra e o menor valor médio de 6,97 para a madeira de angelim vermelho. Os valores das relações encontradas anteriormente

foram inferiores aos valores propostos pela NBR 7190 da ABNT (1997). Esta norma considera que a relação entre o módulo de cisalhamento paralelo e normal às fibras deve ser de 20, sem levar em consideração se é a direção tangencial ou radial. Fazendo a análise estatística de hipótese nula da diferença entre os pares de valores (p -valor = 0,002), foi verificado que os E_t e E_r não se diferenciam estatisticamente.

Observou-se que para as madeiras analisadas, os valores de E_T/E_L variaram de 9,95 a 17,83 para o intervalo de densidade aparente a 12% de 0,65 a 1,1 g/cm³. Kretschmann (2010) encontrou valores de 12,2 a 20 para a mesma relação, em madeiras com densidade aparente de 0,51 a 0,68 g/cm³. Já para a relação E_R/E_L foram encontradas no presente trabalho, as médias variando de 6,97 a 14,38. Enquanto o Kretschmann (2010) cita 6,3 a 12,8 para o intervalo de densidade de 0,51 a 0,68 g/cm³.

Para a dureza Janka, na TAB. 4.1, verifica-se que na direção longitudinal a madeira de angelim vermelho e roxinho apresentaram os maiores valores médios, não diferindo estatisticamente entre si pelo teste de Tukey. Destaque para a madeira de castanheira que obteve menor valor para esta propriedade mecânica. Nas direções tangencial e radial, novamente a madeira de angelim vermelho e castanheira se destacaram com a maior e menor resistência a dureza Janka, respectivamente, estatisticamente diferentes das demais madeiras pelo teste de Tukey. Já para às relações das durezas Janka entre as direções de análise, não houve diferenças estatísticas entre as médias das madeiras estudadas, na maioria das vezes.

Observa-se na TAB. 4.1 que as madeiras do roxinho e angelim vermelho apresentaram maiores valores de tensão de cisalhamento nas direções longitudinal, tangencial e radial, e estatisticamente iguais. Já na relação entre a tensão de cisalhamento longitudinal e tangencial (TAB. 4.1) destaque para as madeiras de castanheira e muiracatiara com os maiores valores em média, estatisticamente iguais às demais madeiras pelo teste de Tukey. Para a relação entre a tensão de cisalhamento longitudinal e radial verifica-se que estatisticamente não houve diferença entre as médias das madeiras. No entanto, para a relação entre a tensão de cisalhamento tangencial e radial, estatisticamente as madeiras de angelim pedra e vermelho se destacaram com os maiores valores em média, porém a madeira de angelim vermelho não se diferiu estatisticamente das demais madeiras.

Tabela 4.1 – Valores médios das características das madeiras (médias seguidas pela mesma letra na mesma linha, não diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade)

Propriedade	Madeira							
	Castanheira	A. pedra	Muiracatiara	Pequi	Roxinho	Garapa	A. vermelho	
Densidade aparente (kg.m ⁻³)	696 D (35)	761 C (42)*	780 C (63)	783 C (38)	933 B (23)	946 B (17)	1131 A (20)	
Módulo de elasticidade (MPa)	E _L	9007 CD (1173)	12077 AB (1174)	8729 CD (923)	7345 D (1553)	12024AB (1999)	12258A (1448)	9909 BC (808)
	E _T	678 D (169)	750 CD (94)	788 CD (267)	821 CD (84)	911 BC (85)	1048 AB (169)	1228 A (92)
	E _R	969 C (78)	1052 BC (226)	1055 BC (152)	911 BC (85)	1486 A (275)	1483 A (114)	1600 A (237)
	E _L /E _T	16,23 A (4,22)	17,83 A (2,13)	13,22 A (3,22)	9,95 A (3,51)	17,18 A (9)	14,54 A (6,3)	11,38 A (4,55)
	E _L /E _R	9,89 AB (2,3)	14,38 A (3,85)	9,68 AB (0,79)	6,99 B (2,36)	11,87 AB (4,66)	10,17 AB (4,01)	6,97 B (3,22)
	E _T /E _R	0,64 A (0,2)	0,80 A (0,23)	0,77 A (0,17)	0,74 A (0,21)	0,73 A (0,17)	0,71 A (0,05)	0,62 A (0,16)
Dureza Janka (MPa)	D _L	55,29E (4,21)	73,17D (10,99)	61,82DE (13,58)	70,58 D (7,54)	116,36 B (8,24)	101,47C (4,62)	154,06A (5,19)
	D _T	44,00 D (3,47)	61,50 C (10,62)	67,56 C (9,23)	71,47 C (6,49)	107,25 B (6,97)	103,52 B (5,59)	131,61 A (6,28)
	D _R	45,70 D (1,85)	70,64 C (11,38)	65,85 C (16,08)	70,55 C (11,67)	108,52 B (9,67)	109,09 B (4,68)	129,00 A (8,71)
	D _L /D _T	1,01B (0,08)	1,20A (0,11)	0,92B (0,19)	0,99AB (0,09)	1,09 B (0,09)	0,97 B (0,04)	0,98 B (0,06)
	D _L /D _R	0,97 A (0,10)	1,0 A (0,08)	0,95 A (0,15)	1,02 A (0,16)	1,08 A (0,1)	0,93 A (0,03)	1,0 A (0,08)
	D _T /D _R	0,96 A (0,1)	1,02 A (0,07)	1,06 A (0,19)	1,03 A (0,15)	0,99 A (0,08)	0,95 A (0,05)	1,02 A (0,07)

Tabela 4.1...continuação

Propriedade	Madeira							
	Castanheira	A. pedra	Muiracatiara	Pequi	Roxinho	Garapa	A. vermelho	
Tensão de cisalhamento (MPa)	τ_{CL}	13,45 C (1,1)	13,53 BC (2,22)	15,54 C (1,78)	13,79 C (1,72)	21,74 A (1,13)	17,71 BC (0,29)	19,35 AB (2,47)
	τ_{CT}	5,13 C (0,92)	7,51 C (3,13)	6,23 C (0,71)	6,13 C (1,16)	10,61 AB (1,92)	7,63 BC (1,43)	12,04 A (4,5)
	τ_{CR}	5,61 C (0,61)	6,09 C (2,34)	7,66 C (1,23)	7,63 C (1,83)	13,42 A (2,97)	8,68 BC (1,04)	11,85 AB (4,37)
	τ_{CL}/τ_{CT}	2,67 A (0,4)	1,96 AB (0,47)	2,60 A (0,46)	2,34 AB (0,61)	2,10 AB (0,38)	2,39 AB (0,42)	1,78 AB (0,55)
	τ_{CL}/τ_{CR}	2,41 A (0,18)	2,41 A (0,62)	2,1 A (0,4)	1,96 A (0,81)	1,69 A (0,39)	2,07 A (0,24)	1,84 A (0,69)
	τ_{CT}/τ_{CR}	0,92 B (0,18)	1,24 A (0,19)	0,82 B (0,13)	0,84 B (0,23)	0,81 B (0,16)	0,89 B (0,18)	1,04 AB (0,22)

A. vermelho= Angelim vermelho; A. pedra= Angelim pedra. E_L , E_T e E_R são módulos de elasticidade longitudinal, tangencial e radial, respectivamente. D_L , D_T e D_R são dureza Janka longitudinal, tangencial e radial, respectivamente. τ_{CL} , τ_{CT} e τ_{CR} são tensões de cisalhamento longitudinal, tangencial e radial, respectivamente. * Desvio padrão, em kg.m^{-3} ou MPa.

4.2 Ensaio não destrutivo locais

4.2.1 Resistência à penetração

A relação entre o Índice de penetração (IP) do pilodyn, densidade aparente a 12% de umidade e dureza Janka encontram-se na FIG. 4.5, com a finalidade de apenas expor os resultados.

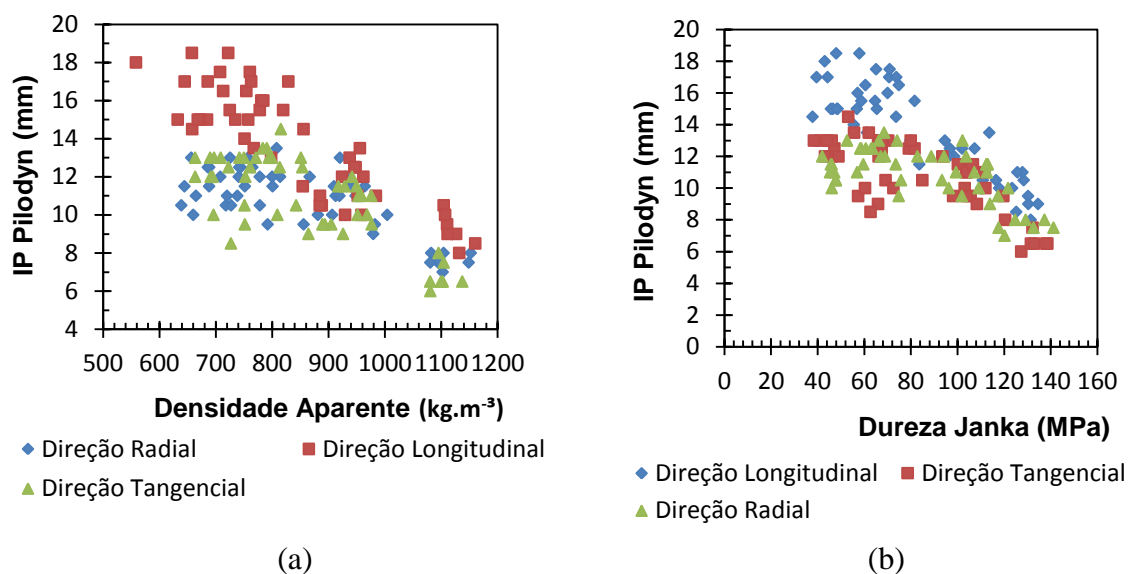


FIGURA 4.5 – Índice de penetração em função da densidade aparente a 12% de umidade (a) e dureza Janka (b).

As relações entre o IP do pilodyn, o módulo de elasticidade (E) e a tensão de cisalhamento encontram-se na FIG. 4.6, com a finalidade de apenas mostrar os resultados.

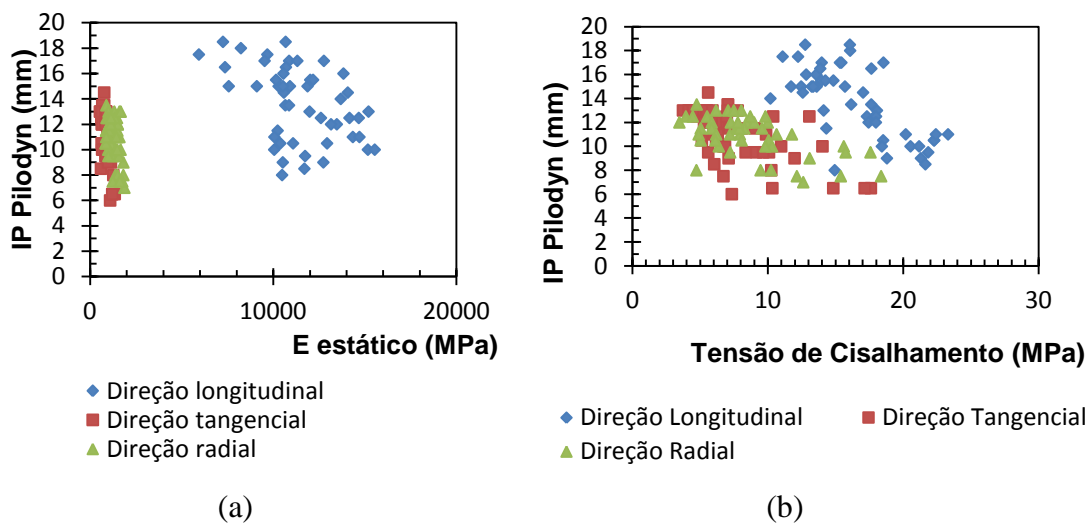


FIGURA 4.6 – Índice de penetração em função do módulo de elasticidade estático (a) e tensão de cisalhamento (b).

Na TAB. 4.2 encontra-se a análise múltipla entre os IPs para cada madeira e a direção de aplicação no CP. As médias seguidas pela mesma letra, na mesma coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância. Foi feito também a análise múltipla entre as direções longitudinal, tangencial e radial e verificou-se que as mesmas se diferenciaram entre si.

Para a direção longitudinal, de acordo com o teste de Tukey a 5% de significância, as madeiras de pequi, muiracatiara e castanheira não se diferenciaram estatisticamente, com os maiores valores de IP. E as madeiras de angelim vermelho e roxinho não se diferenciaram estatisticamente entre si, com os menores valores de IP. Já para a direção tangencial, verifica-se que as madeiras de angelim pedra, castanheira e pequi prevaleceram com maiores valores, estatisticamente iguais ao nível de 5% de significância pelo teste de Tukey. Enquanto a madeira de angelim vermelho tem menor valor de IP.

Em relação à direção radial, as madeiras de angelim pedra, garapa e pequi obtiveram maiores valores, e não se diferenciaram estatisticamente ao nível de 5% de significância pelo teste de Tukey, enquanto o menor valor foi encontrado para a madeira de angelim vermelho. Mesmo notando que o IP é inversamente proporcional à densidade aparente a 12% de umidade, pode-

se afirmar que a mesma não se mostrou a única característica responsável, mas também a espécie de madeira.

Tabela 4.2 – Análise da densidade aparente e resistência à penetração (mm)

Madeiras	ρ a 12% Kg/m ³	Direção		
		Longitudinal	Tangencial	Radial
Castanheira	696 D (35)*	16,0 AB (1,5)	12,6 A (0,53)	11,0 B (0,67)
Angelim pedra	761 C (42)	14,8 B (1,0)	13,1 A (0,75)	12,3 A (0,64)
Muiracatiara	780 C (63)	15,2 AB (2,2)	9,7 C (0,76)	10,9 BC (1,10)
Pequi	783 C (38)	16,9 A (1,0)	12,8 A (0,39)	12,5 A (0,41)
Roxinho	933 B (23)	10,6 CD (0,4)	9,6 C (0,35)	9,9 C (0,63)
Garapa	946 B (17)	12,6 C (0,53)	11,4 B (0,38)	11,6 AB (0,69)
Angelim vermelho	1131 A (20)	9,2 D (0,86)	6,8 D (0,70)	7,6 D (0,38)
Média	866 (143)	13,6 (2,22)	10,8 (2,94)	10,8 (1,70)

Médias seguidas pela mesma letra na vertical, não diferem estatisticamente entre si (Tukey; $p > 0,05$). *Desvio padrão em kg.m³ ou mm.

Na TAB. 4.3 são mostrados os coeficientes de determinação entre o IP e as propriedades da madeira. Verifica-se que para as madeiras analisadas, o método de penetração mostrou ser eficiente para inferir a densidade aparente, a dureza Janka e a tensão de cisalhamento. Destaca-se que para tensão de cisalhamento nas direções tangencial e radial, e para dureza Janka na direção radial, o método apresenta baixo coeficiente de determinação. Ressalta-se que o IP não se faz adequado para a determinação do Eest, já que seus coeficientes de determinação foram baixos.

Os coeficientes de determinação (R^2), na TAB 4.3, entre a densidade aparente e a resistência à penetração foram de 76%, 68% e 59% para as direções longitudinal, tangencial e radial, respectivamente. Resultados bem superiores ao obtido por Gonçalves (2006), que encontrou para 15 árvores do híbrido *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* valor de R^2 igual a 34,90%. Callister e England (2010), em contrapartida, encontraram valores mais altos de R^2 para a mesma característica, na madeira de *E. globulus*, com valores variando de 67% a 90%. Ambos os autores não se preocuparam com a direção em que estavam aplicando o teste.

Para dureza Janka e a resistência à penetração, os valores de R^2 foram de 82%, 72% e 42% para as direções longitudinal, tangencial e radial, respectivamente. Em relação à tensão de cisalhamento, assim como na dureza Janka e densidade aparente, houve uma relação alta na direção longitudinal ($R^2=79\%$), entretanto apresentou baixos coeficientes para as direções tangencial ($R^2=36\%$) e radial ($R^2=35\%$).

Tabela 4.3 – Análise de regressão entre o índice de penetração e propriedades da madeira

Propriedades	Direção								
	Longitudinal			Tangencial			Radial		
	R ² ajust (%)	R ² (%)	p-valor	R ² ajust (%)	R ² (%)	p-valor	R ² ajust (%)	R ² (%)	p-valor
ρ a 12%	75	76	0,000	68	68	0,000	58	59	0,000
D.J.	81	82	0,000	72	72	0,000	41	42	0,000
Eest	15	17	0,004	44	45	0,000	17	18	0,003
τ_c	79	79	0,000	35	36	0,000	34	35	0,000

ρ a 12%= densidade aparente a 12% de umidade. D.J.= dureza Janka. Eest= Módulo de elasticidade estático. τ_c = tensão de cisalhamento.

4.2.2 Resistência à perfuração

As relações entre a amplitude de perfuração (AP), a densidade aparente a 12% de umidade e dureza Janka, encontram-se na FIG 4.7, com a finalidade de apenas relatar os resultados.

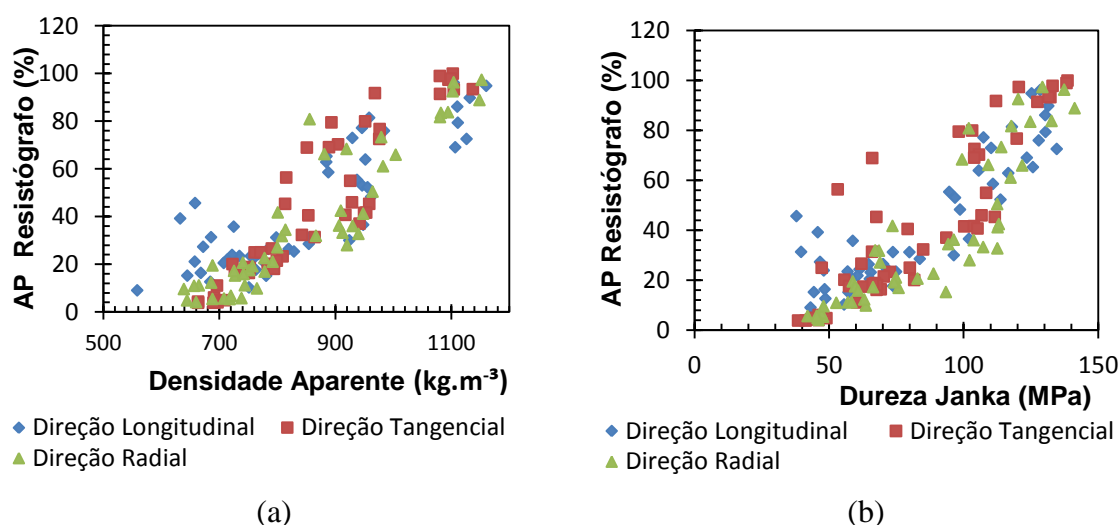


FIGURA 4.7 – Amplitude de perfuração em função da densidade aparente a 12% de umidade (a) e dureza Janka (b).

A relação entre o AP do resistógrafo, o módulo de elasticidade e a tensão de cisalhamento, encontram-se na FIG 4.8.

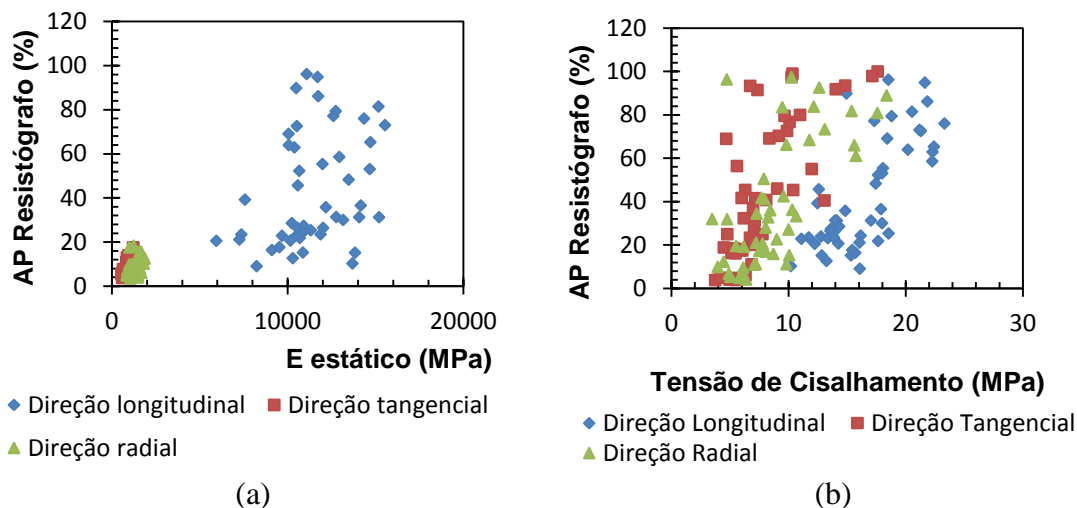


FIGURA 4.8 – Amplitude de perfuração em função do módulo de elasticidade estático (a) e da tensão de cisalhamento (b).

Na TAB. 4.4 encontra-se a análise múltipla entre as madeiras na mesma direção dos CPs. As médias seguidas pela mesma letra, na mesma coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância. Foi realizada também a análise entre as direções longitudinal, tangencial e radial, verificou-se que os valores para direção tangencial e radial não diferiram entre si.

Para a direção longitudinal (TAB. 4.4), de acordo com o teste de Tukey a 5% de significância, as madeiras de angelim vermelho e roxinho não se diferenciaram estatisticamente, com os maiores valores de AP. Já as madeiras de angelim pedra, castanheira, muiracatiara e pequi não se diferenciaram estaticamente, com os menores valores de AP. Para a direção tangencial, verifica-se que a madeira de angelim vermelho obteve maior valor. Enquanto a madeira de castanheira, muiracatiara e pequi não se diferenciaram entre si, e tiveram menores valores de AP ao nível de 5% de significância pelo teste de Tukey. Em relação à direção radial, a madeira de angelim pedra obteve maior valor, ao nível de 5% de significância pelo teste de Tukey, enquanto os menores valores foram encontrados para as madeiras de castanheira, muiracatiara e pequi, que não se diferenciaram entre si. Mesmo notando que as APs são proporcionais à densidade aparente a 12% de umidade, pode-se afirmar que a densidade

aparente não se mostrou a única característica responsável, os maiores valores de AP sempre foram para a madeira de maior densidade, entretanto, os menores valores de AP variam entre diversas madeiras, e não apenas apontando para a de menor densidade aparente.

Tabela 4.4 – Análise entre a densidade aparente e amplitude de perfuração (%)

Madeira	ρ a 12% (kg.m ⁻³)	Direção		
		Longitudinal	Tangencial	Radial
Castanheira	696 D (35)	27,9 C (12,0)*	4,6 E (0,9)	5,5 E (0,6)
Angelim pedra	761 C (42)	24,8 C (9,23)	40,5 C (3,13)	28,1 CD (2,3)
Muiracatiara	780 C (63)	21,3 C (6,54)	21,5 DE (0,7)	14,7 E (1,2)
Pequi	783 C (38)	21,9 C (2,76)	19,8 DE (1,2)	17,0 DE (1,8)
Roxinho	933 B (23)	68,8 A (8,21)	74,7 B (1,9)	64,6 B (3,0)
Garapa	946 B (17)	50,4 B (15,0)	46,5 C (1,43)	37,8 C (1,0)
Angelim vermelho	1131 A (20)	84,0 A (10,63)	96,0 A (4,5)	89,2 A (4,4)
Média	866 (143)	42,7 (25,53)	43,4 (31,73)	36,7 (29,17)

Médias seguidas pela mesma letra na vertical, não diferem estatisticamente entre si (Tukey; $p > 0,05$). *Desvio padrão em kg.m⁻³ ou %.

A TAB. 4.5 mostra o coeficiente de determinação entre a AP e as propriedades da madeira. Verifica-se que para as madeiras analisadas, o aparelho resistógrafo mostra ser um equipamento eficiente para a determinação da densidade aparente, dureza Janka e tensão de cisalhamento. Destacando que para tensão de cisalhamento o aparelho se mostrou moderadamente eficiente. Ressalta-se que o aparelho resistógrafo não se faz adequado para a determinação do Eest, já que seus coeficientes de determinação foram baixos.

Os coeficientes de determinação da AP do aparelho resistógrafo e a densidade da madeira (TAB 4.5) foram de 80%, 91% e 92% para as direções longitudinal, tangencial e radial, respectivamente. Este resultado foi semelhante ao obtido por Acuña et al. (2001), que obtiveram valores de R^2 ajustado de 81% a 90%, para seis madeiras de coníferas. Já para dureza Janka, os valores de R^2 foram de 90%, 89% e 85% para as mesmas direções. Valores moderados de correlações foram encontrados para a tensão de cisalhamento, com valores de 59%, 75% e 61% para as direções longitudinal, tangencial e radial, respectivamente. E valores baixos de correlações foram encontrados para Eest, mostrando que o aparelho não é capaz de determinar esta propriedade, seus valores de coeficiente de determinação foram de 11%, 45% e 61% para as direções longitudinal, tangencial e radial, respectivamente. Os baixos valores de determinação entre o Edin e a AP foram confirmados por Botelho Júnior (2006) e Feio et al. (2004), que encontraram valores de R^2 de 46,8% e 61% para as madeiras de *Pinus radiata* e *Castanea sativa*, respectivamente.

Tabela 4.5– Análise de regressão entre a amplitude de perfuração (%) e propriedades da madeira

Propriedades	Direção								
	Longitudinal			Tangencial			Radial		
	R ² ajust	R ²	p-valor	R ² ajust	R ²	p-valor	R ² ajust	R ²	p-valor
ρ a 12%	80	80	0,000	90	91	0,000	92	92	0,000
D.J.	90	90	0,000	89	89	0,000	85	85	0,000
Eest	9	11	0,021	44	45	0,000	60	61	0,000
τ_c	58	59	0,000	74	75	0,000	60	61	0,000

ρ a 12%= densidade aparente a 12% de teor de umidade. D.J.= dureza Janka. Eest= Módulo de elasticidade estático. τ_c= tensão de cisalhamento. R²= coeficiente de determinação(%). R²ajust = coeficiente de determinação ajustado (%).

4.3 Ensaios não destrutivos globais

4.3.1 Propagação de ondas ultrassônicas através do equipamento de ultrassom

Nas FIGs. 4.9 a 4.11 são apresentados os gráficos entre as propriedades físicas e mecânicas da madeira (tensão de cisalhamento, dureza Janka, módulo de elasticidade e densidade aparente)

e as velocidades das ondas ultrassônicas calculadas utilizando os transdutores longitudinais de 54 kHz, 150 kHz e 180 kHz com a finalidade apenas de expor os resultados.

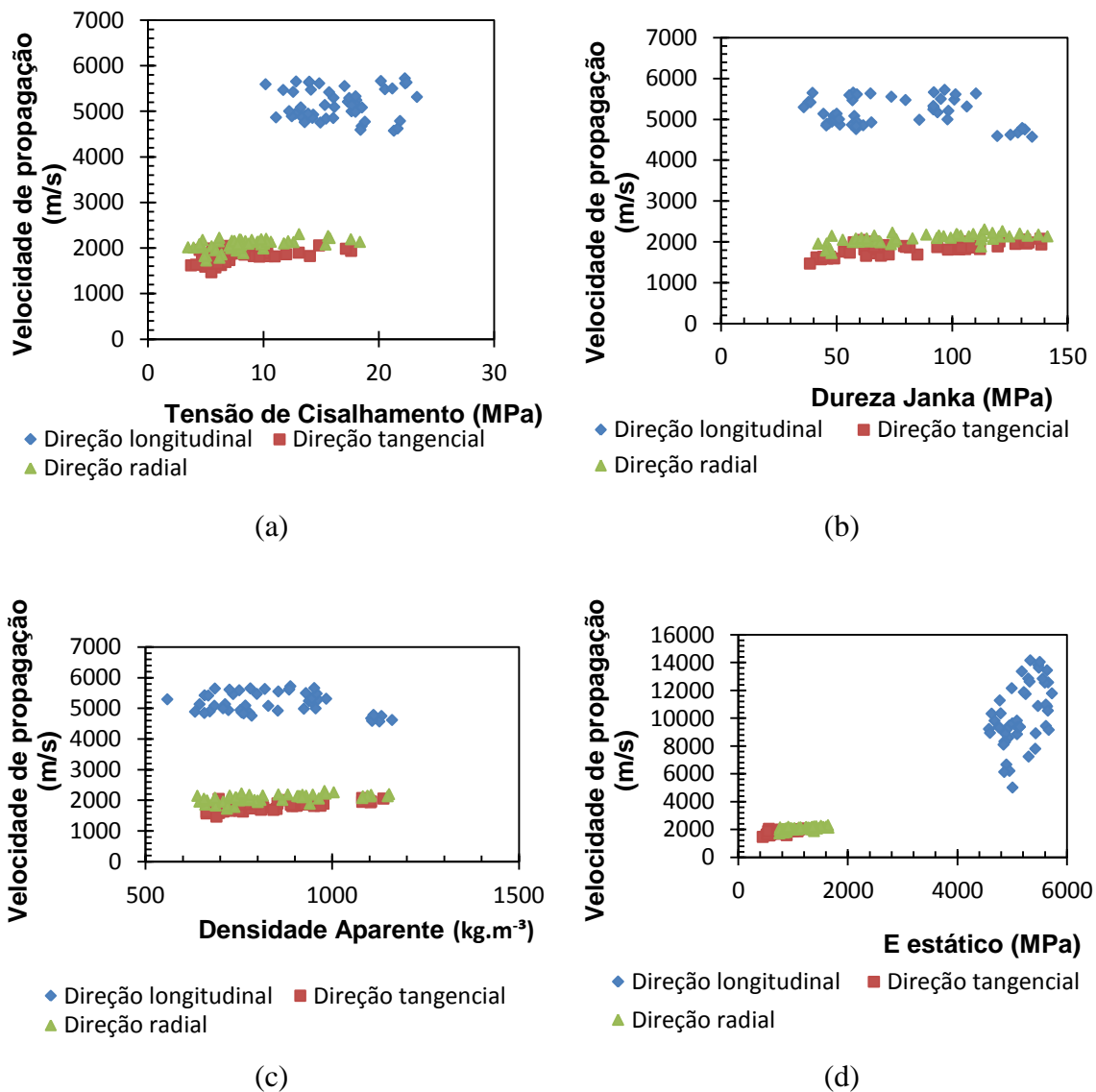


FIGURA 4.9 – Velocidade de propagação de onda com transdutor longitudinal de 54 kHz em função da tensão de cisalhamento (a); dureza Janka (b); densidade aparente (c) e do módulo de elasticidade estático (d).

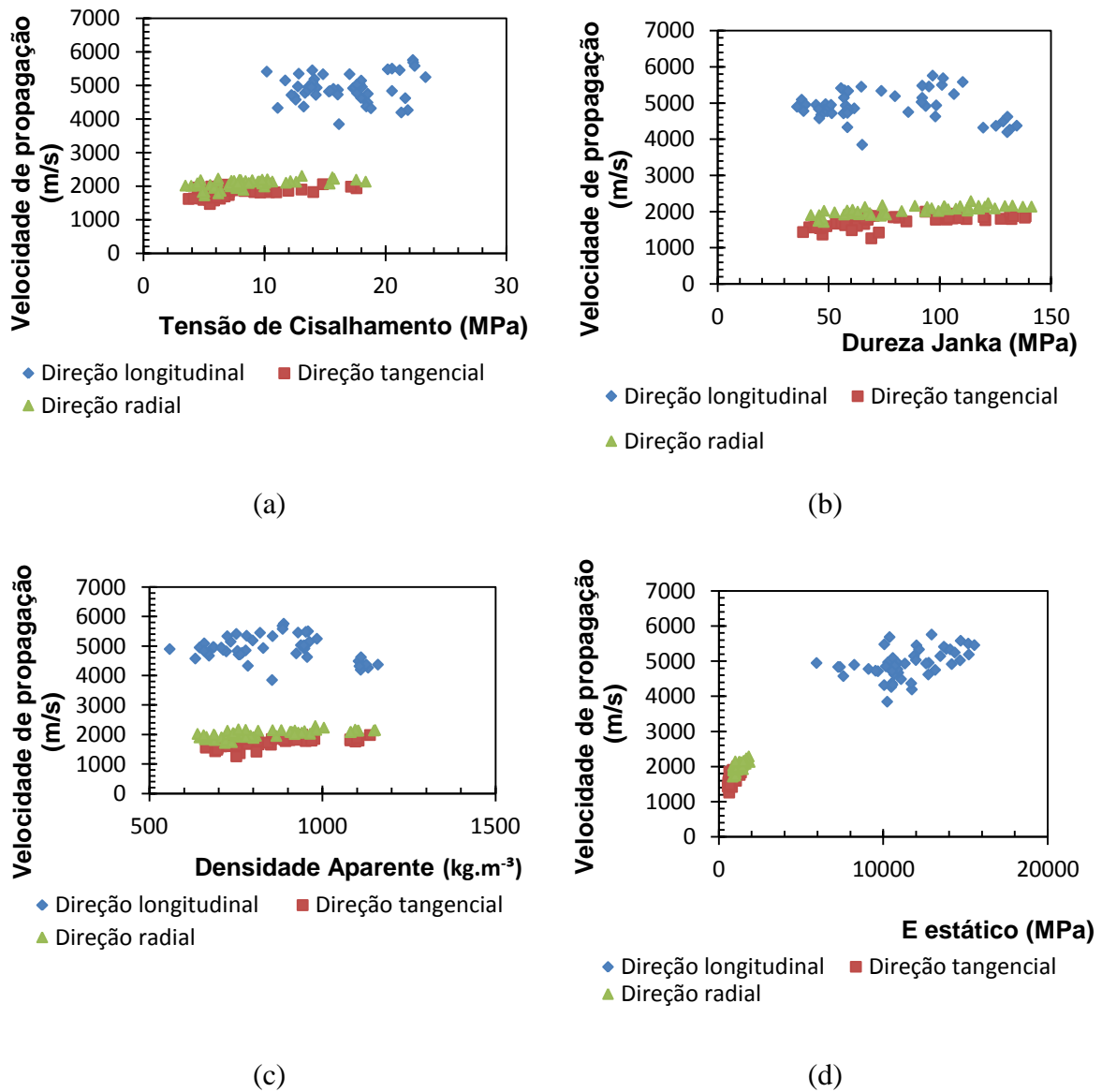


FIGURA 4.10 – Velocidade de propagação de onda com transdutor longitudinal de 150 kHz em função da tensão de cisalhamento (a); dureza Janka (b); densidade aparente (c) e do módulo de elasticidade estático (d).

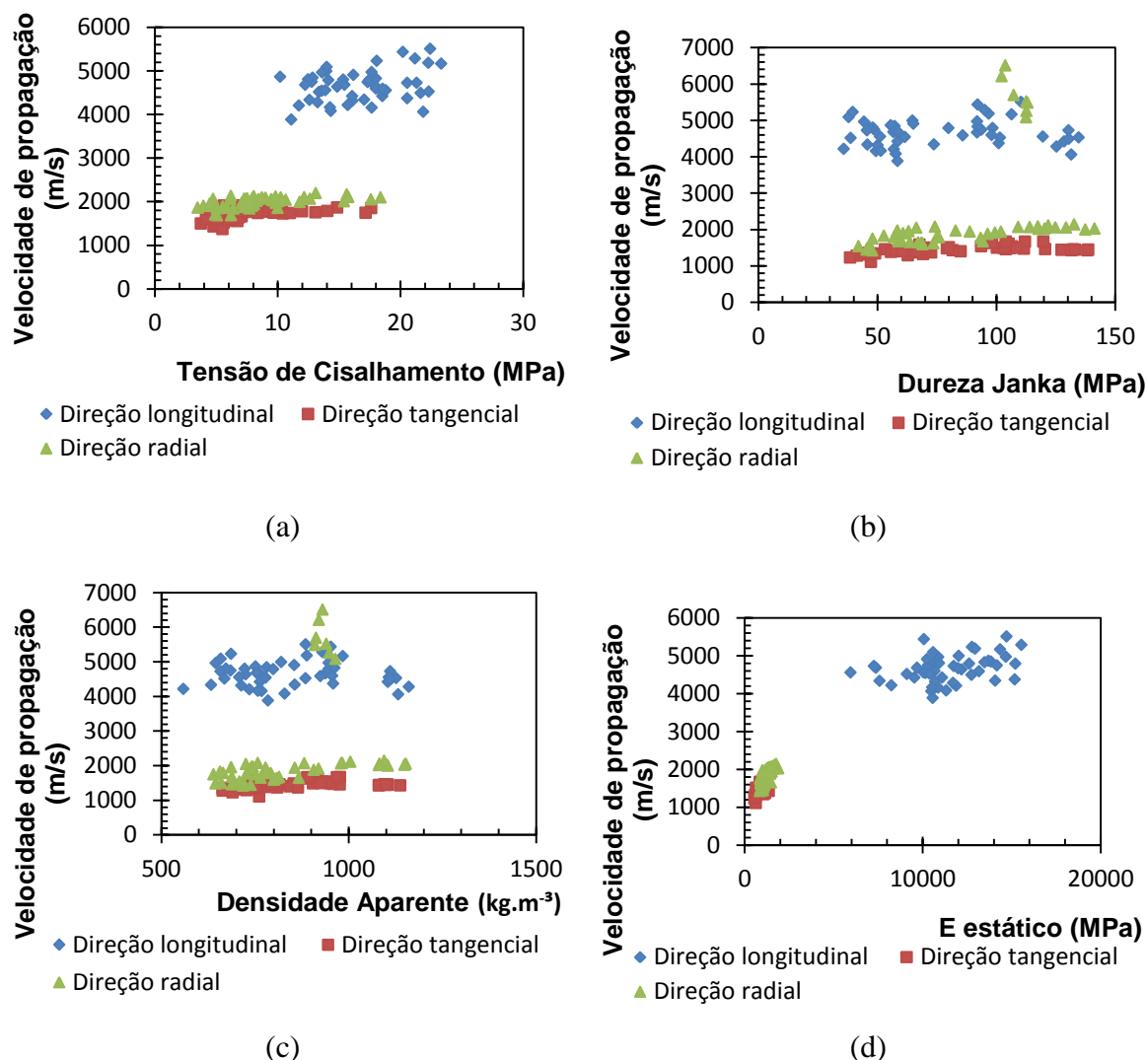


FIGURA 4.11 – Velocidade de propagação de onda com transdutor longitudinal de 180 kHz em função da tensão de cisalhamento (a); dureza Janka (b); densidade aparente (c) e do módulo de elasticidade estático (d).

Na TAB. 4.6 encontra-se a análise entre as velocidades de propagação da onda nas madeiras. As médias seguidas pela mesma letra, na mesma coluna, indicam que as velocidades não diferiram entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância. Quando se analisa as velocidades de propagação da onda nas direções longitudinal, tangencial e radial, verifica-se que as velocidades diferem entre si. Conforme já comprovado por Bucur (1995).

Para as direções longitudinal e tangencial, com transdutor de 54 kHz, de acordo com o teste de Tukey a 5% de significância, as madeiras de angelim pedra e roxinho não se diferenciaram

estatisticamente, com os maiores valores de velocidade de propagação. Na direção longitudinal as madeiras de pequi e angelim vermelho não se diferenciaram estaticamente, com os menores valores de velocidade. Na direção tangencial a madeira de castanheira foi a que apresentou menor valor. Em relação à direção radial, as madeiras de pequi, garapa, roxinho e angelim vermelho não se diferenciaram estatisticamente, com os maiores valores de velocidade de propagação. Enquanto a madeira de castanheira obteve o menor valor de velocidade de propagação de ondas de acordo com o teste.

Para a direção longitudinal, com transdutor de 150 kHz, de acordo com o teste de Tukey, as madeiras de angelim pedra e roxinho não se diferenciaram estatisticamente, com os maiores valores de velocidade de propagação. As madeiras de muiracatiara e angelim vermelho não se diferenciaram estaticamente, com os menores valores de velocidade. Já para a direção tangencial, verifica-se que as madeiras de garapa, pequi, angelim vermelho e roxinho prevaleceram com maiores valores, estatisticamente iguais ao nível de 5% de significância pelo mesmo teste. Enquanto as madeiras de castanheira, angelim pedra e muiracatiara obtiveram os menores valores de velocidade de propagação das ondas. Em relação à direção radial, as madeiras de pequi, garapa, roxinho e angelim vermelho não se diferenciaram estatisticamente, apresentando os maiores valores de velocidade de propagação. Enquanto a madeira de castanheira obteve o menor valor de velocidade de propagação das ondas de acordo com o mesmo teste.

Para a direção longitudinal, com transdutor de 180 kHz, de acordo com o teste de Tukey a 5% de significância, as madeiras de castanheira e roxinho não se diferenciaram estatisticamente, e apresentaram os maiores valores de velocidade de propagação. As madeiras de muiracatiara, pequi e angelim vermelho não se diferenciaram estaticamente, obtendo os menores valores de velocidade. Destaca-se que algumas madeiras obtiveram valores de velocidade de propagação estatisticamente iguais a todas as outras madeiras pelo teste de Tukey, são elas o angelim pedra e a garapa. Já para a direção tangencial, verifica-se que as madeiras de pequi, roxinho e garapa obtiveram os maiores valores de velocidade de propagação da onda, estatisticamente iguais ao nível de 5% de significância pelo teste de Tukey. Enquanto as madeiras de castanheira, angelim pedra e muiracatiara obtiveram os menores valores de velocidade de propagação das ondas. Para a direção radial, a madeira de garapa obteve maior valor médio de velocidade de propagação. Enquanto as madeiras de castanheira, angelim pedra e muiracatiara

obtiveram os menores valores de velocidade de propagação das ondas de acordo com o teste de Tukey ao nível de 5% de significância.

Observa-se que para as madeiras analisadas na direção longitudinal (TAB. 4.6), os valores de velocidade de propagação de ondas variaram de 4683 m/s a 5571 m/s com a utilização do transdutor de 54 kHz. Já para o transdutor de 150 kHz, esta variação foi de 4378 m/s a 5531 m/s. Enquanto com o transdutor de 180 kHz, variaram de 4341 m/s a 5071 m/s, no intervalo de 0,7g/cm³ a 1,1 g/cm³. Gonzalez et al. (2001) encontraram valores de velocidades de propagação de ondas longitudinais, com a utilização do transdutor de 80 kHz, variando de 5146 m/s a 5319 m/s, com intervalo de densidades de 0,67 g/cm³ a 0,78 g/cm³. Stangerlin et al. (2010) encontraram valores médios de 5180 a 5269 m/s para a madeira de *Eucalyptus grandis*, e valores médios de 3534 m/s a 5063 m/s para madeiras de *Pinus elliottii*.

Na direção tangencial (TAB. 4.6), os valores de velocidade de propagação de ondas variaram de 1588 m/s a 1988 m/s, 1555 m/s a 1915 m/s e 1319 m/s a 1591 m/s, com a utilização dos transdutores de 54 kHz, 150 kHz, e de 180 kHz, respectivamente, no intervalo de 0,7g/cm³ a 1,1 g/cm³. Valores maiores de velocidade de propagação da onda foram encontrados por Lourenço et al. (2007), que determinaram valores de 4527,2 m/s e 4834,7 m/s obtidos por meio de transdutores de 150 kHz e pelo método indireto de medição, para a madeira de castanheira provenientes do norte de Portugal, variando de 0,57 a 0,6 g/cm³, respectivamente.

Para a direção radial (TAB. 4.6), os valores de velocidade de propagação das ondas variaram de 1850 m/s a 2203 m/s, 1819 m/s a 2156 m/s e 1483 m/s a 2050 m/s, com a utilização dos transdutores de 54 kHz, 150 kHz, e de 180 kHz, respectivamente, no intervalo de 0,7g/cm³ a 1,1 g/cm³. Lourenço et al. (2007) encontraram valores inferiores para a mesma direção, de 4481,5 m/s e 4619,9 m/s para as densidades de 0,57 g/cm³ e 0,6 g/cm³, respectivamente. No entanto utilizaram o método indireto de ensaio, em que os dois transdutores são colocados na mesma face.

O valor médio da velocidade de propagação de onda ultrassônica em CPs orientados na direção longitudinal da madeira de angelim pedra foi de 5571 m/s, 5318 m/s e 4671 m/s para os valores da relação entre L (comprimento do CP) e λ (comprimento de onda) de 1,6, 4,6 e 6,0 respectivamente para os transdutores de 54 kHz, 150 kHz e de 180 kHz. Terezo (2004)

encontrou valores de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas de 4845,9 m/s, 5067,7 m/s e 5018,2 m/s para o aparelho Sylvatest (30 kHz), e Pundit com a utilização de transdutores de 200 kHz e 54 kHz, em que as relações de L e λ foram de 9,59 e 16, respectivamente. Assim, nota-se que mesmo os valores médios encontrados no presente trabalho serem próximos aos valores encontrados por Terezo (2004), a comparação não é adequada para a utilização dos transdutores de 54 kHz, uma vez que não foi atendido o valor mínimo da relação de 3 entre L e λ , e com isto a propagação da onda se encontra inadequada (TAB. 3.1) e sofrerá influência da geometria do CP.

Tabela 4.6 – Análise das velocidades médias (m/s) de propagação de onda

Madeiras	ρ a 12% (kg.m ⁻³)	54 KHz			150 KHz			180 KHz		
		Longitudinal	Tangencial	Radial	Longitudinal	Tangencial	Radial	Longitudinal	Tangencial	Radial
Castanheira	696 D (35)*	5150 B* (288,7)	1588 D (56,4)	1850 D (85,2)	4863 B (182,6)	1555 C (56,2)	1819 C (72,0)	4857 AB (287,5)	1319 D (44,9)	1483 C (38,7)
A. pedra	761 C (42)	5571 A (74,9)	1771 C (85,1)	2026 C (65,4)	5318 A (110,5)	1681 BC (154,3)	1962 B (79,9)	4671 ABC (292,1)	1403 BCD (131,4)	1649 C (29,7)
Muiracatiara	780 C (63)	5120 BC (192,5)	1822 BC (182,4)	2054 BC (55,4)	4689 BC (378,5)	1572 C (202,4)	1967 B (40,6)	4341 C (288,9)	1373 CD (46,8)	1784 BC (28,7)
Pequi	783 C (38)	4876 CD (78,5)	1894 ABC (33,6)	2130 ABC (57,2)	4751 B (201)	1858 A (31,4)	2080 A (73,3)	4503 BC (291,0)	1476 ABC (67,6)	1985 B (62,1)
Roxinho	933 B (23)	5563 A (138,5)	1841 BC (29,4)	2203 A (69,1)	5531 A (167)	1810 AB (27,6)	2156 A (88,5)	5071 A (442,8)	1591 A (88,9)	2014 B (94,9)
Garapa	946 B (17)	5178 B (134)	1919 AB (49,0)	2107 ABC (104,6)	4920 B (177)	1915 A (49,4)	2084 A (36,4)	4744 ABC (136,8)	1522 AB (50,6)	5685 A** (510,9)
A. vermelho	1131 A (20)	4683 D (88,8)	1998 A (53,5)	2145 AB (40,0)	4378 C (142)	1847 AB (72,6)	2129 A (31,1)	4442 BC (214,4)	1448 BC (11,8)	2050 B (46,8)

Médias seguidas pela mesma letra na vertical, não diferem estatisticamente entre si (Tukey; $p > 0,05$). *Desvio padrão em Kg/m³ e m/s. ** Valor errado.

A TAB. 4.7 mostra a análise múltipla entre as velocidades médias de propagação da onda nas três direções. As médias seguidas na mesma linha não diferem entre si pelo teste de Tukey. Ainda para todos os transdutores utilizados durante o ensaio ultrassônico, verifica-se que os maiores valores de velocidade de propagação da onda nas madeiras foram obtidos nas direções longitudinais, seguidas das direções radial e tangencial, conforme descrito por Bucur (1995).

Tabela 4.7 – Análise múltipla das velocidades de propagação de onda (m/s)

Transdutor	Frequência (KHz)	Direção		
		Longitudinal	Tangencial	Radial
Longitudinal	54	5163 A (340) ¹	1833 C (146)	2074 B (126)
	150	4921 A (414)	1748 C (168)	2028 B (126)
	180	4661 A (363)	1448 C (110)	1827 B* (217)

Médias seguidas pela mesma letra na horizontal, não diferem estatisticamente entre si (Tukey; $p > 0,05$). ¹Desvio padrão em m/s. * Não leva em consideração a madeira de garapa.

Na TAB. 4.8 é apresentada a análise múltipla das médias das velocidades de propagação das ondas, entre os três diferentes transdutores. As médias seguidas pela mesma letra, na mesma linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey. Para a direção longitudinal e tangencial, as médias da velocidade de propagação das ondas se mostraram diferentes entre si e com os maiores valores para os transdutores de 54 kHz, 150 kHz e 180 kHz, respectivamente. Entretanto, não foi o que ocorreu na direção radial, em que as médias calculadas com a utilização dos transdutores de 54 kHz e 150 kHz não diferenciaram entre si.

De acordo com Bucur (2006) quando se determina que o comprimento de onda é correspondente às dimensões de camadas ou de células, a velocidade é dependente da frequência. Verifica-se na TAB. 4.8 que os valores médios de propagação da onda sofreram influência das frequências dos transdutores utilizados, sendo os maiores valores de velocidade de propagação da onda encontrados para os transdutores de 54 kHz e os menores valores para o de 180 kHz. E de acordo com Bucur e Bohnke (1994), Bucur (2006), Trinca e Gonçalves (2009), Bartholomeu et al. (2003), Puccini et al. (2001), Aljets et al. (2010) isto ocorre porque a velocidade da onda depende da frequência utilizada, em meios finitos.

Tabela 4.8 – Análise múltipla entre a velocidade de propagação (m/s) da onda entre transdutores longitudinais

Direção	Transdutor Longitudinal		
	54 kHz	150 kHz	180 kHz
Longitudinal	5163 A (340) ¹	4921 B (414)	4661 C (363)
Tangencial	1833 A (146)	1748 B (168)	1448 C (110)
Radial	2074 A (126)	2028 A (126)	1828B* (217)

Médias seguidas pela mesma letra na horizontal, não diferem estatisticamente entre si (Tukey; $p > 0,05$). ¹Desvio padrão em m/s. * Não levou em consideração a madeira de garapa.

Na TAB. 4.9 visualiza-se o módulo de elasticidade estático (Eest) e a constante de rigidez (C.R), calculados através de ondas ultrassônicas, por meio dos transdutores longitudinais de 54 kHz, 150 kHz, e 180 kHz. As médias seguidas pela mesma letra, na mesma linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância.

Observa-se na TAB. 4.9 que o Edin calculado com as velocidades determinadas com o transdutor longitudinal de 54 kHz, na direção longitudinal foi maior para a madeira de roxinho, se diferenciando das demais pelo teste de Tukey. Nas direções tangencial e radial, a madeira de angelim vermelho obteve maior Edin, bem como em ambas direções, a madeira de castanheira foi a que registrou menor valor, diferenciando-se estatisticamente pelo teste de Tukey das demais.

Na TAB. 4.9 para o Edin obtido com a velocidade calculada com a utilização do transdutor longitudinal de 150 kHz na direção longitudinal, a madeira do roxinho foi a que apresentou maior valor, sendo estatisticamente diferente das demais. Diferenciam-se também com menores médias as madeiras de pequi, muiracatiara e castanheira. Na direção tangencial e radial, a madeira de angelim vermelho obteve maior valor médio, diferenciando estatisticamente das demais pelo teste de Tukey, apresentando forte relação com sua alta densidade aparente.

Nota-se na que os valores das constantes de rigidez calculados com as velocidades determinadas com transdutor longitudinal de 180 kHz na direção longitudinal, relacionaram-se com a densidade das madeiras analisadas. Neste caso, madeiras de elevada densidade como o angelim vermelho e roxinho apresentaram maiores valores, sendo estatisticamente iguais a

madeira de garapa, pelo teste estatístico. Esta semelhança foi observada na direção tangencial, onde as mesmas madeiras obtiveram resultados superiores, considerados estatisticamente diferentes das demais pelo teste de Tukey. Já na direção radial, destaque para as madeiras de angelim vermelho e castanheira com o maior e menor valor, respectivamente, diferenciando-se pelo teste de Tukey.

Para a constante de rigidez na direção tangencial, os valores variaram de 1734 a 4330 MPa, 1685 a 3864 MPa e 1196 a 2362 MPa para o método de ultrassom com a utilização do transdutor de 54 kHz, 150 kHz e de 180 kHz, respectivamente. Já na direção radial, estes valores variaram de 2384 a 5106 MPa, 2069 a 5029 MPa, 1533 a 4662 MPa para o método de ultrassom que utilizou transdutor de 54 kHz, 150 kHz e de 180 kHz, respectivamente. E os maiores valores foram para constante de rigidez na direção longitudinal, em que variam de 18486 a 28868 MPa, 16481 a 28544 MPa e 15078 a 23958 MPa para o método de ultrassom que utilizou transdutor de 54 kHz, 150 kHz e de 180 kHz, respectivamente. González et al. (2001) encontraram valores de Edin variando de 19770 a 20650 MPa para madeiras no intervalo de 0,67 a 0,78 g/cm³. Outros autores também calcularam a mesma característica, como Stangerlin et al. (2008), com valores variando de 15698 MPa a 19884 MPa para madeiras de *Eucalyptus grandis*, cuja densidade foi de 0,72 g/cm³ e 4600 MPa a 5613 MPa para madeiras de *Pinus elliottii*, cuja densidade foi de 0,67 g/cm³.

As relações entre Eest e constantes de rigidez por meio de ensaio de ultrassom, com os três diferentes transdutores, são mostrados na FIG. 4.12.

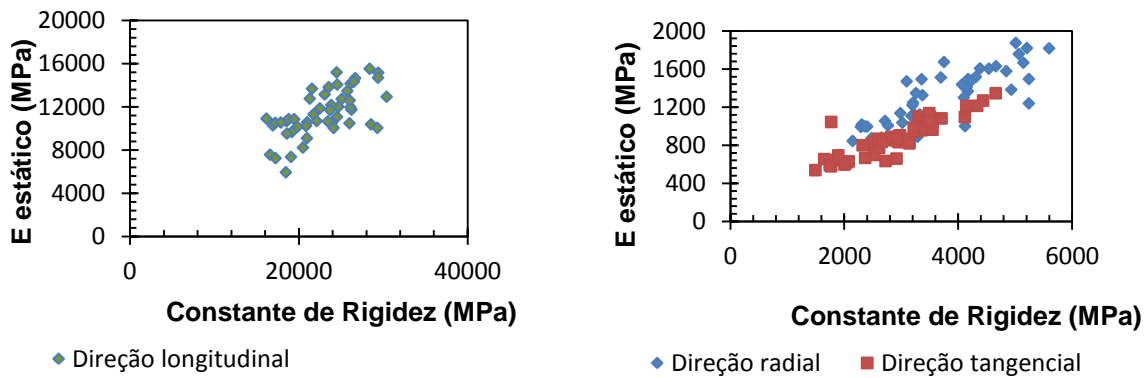
Tabela 4.9 – Análise do módulo de elasticidade estático e das constantes de rigidez calculadas a partir de transdutores longitudinais de 54 kHz, 150 kHz e 180 kHz

Propriedade	Madeira							
	Castanheira	Angelim pedra	Muiracatiara	Pequi	Roxinho	Garapa	Angelim vermelho	
Densidade aparente (kg.m⁻³)	696 D (35)	761 C (42)*	780 C (63)	783 C (38)	933 B (23)	946 B (17)	1131 A (20)	
Eest (MPa)	Eest _L	9007 CD (1173)	12077 AB (1174)	8729 CD (923)	7345 D (1553)	12024 AB (1999)	12258 A (1448)	9909 BC (808)
	Eest _T	678 D (169)	750 CD (94)	788 CD (267)	821 CD (84)	911 BC (85)	1048 AB (169)	1228 A (92)
	Eest _R	969 C (78)	1052 BC (226)	1055 BC (152)	911 BC (85)	1486 A (275)	1483 A (114)	1600 A (237)
Constante de rigidez (MPa) 54 kHz	C _{LL}	18486 C (2070)	23608 B (1179)	20417 C (1653)	18620 C (862)	28868 A (1218)	25331 B (1438)	24816 B (1006)
	C _{TT}	1734 E (132)	2549 D (318)	2598 D (545)	2735 CD (155)	3155 BC (183)	3485 B (134)	4330 A (263,2)
	C _{RR}	2384 D (178)	3252 C (316)	3016 C (244)	3357 C (275)	4538 B (507)	4145 B (379)	5106 A (293)
Constante de rigidez (MPa) 150 kHz	C _{LL}	16481 C (1495)	21512 B (1193)	17163 C (2583)	17689 C (1518)	28544 A (1610)	22883 B (1664)	21679 B (1123)
	C _{TT}	1685 E (150)	2183 DE (477)	1971 E (609)	2706 CD (172)	3059 BC (151)	3465 AB (197)	3864 A (319)
	C _{RR}	2069 D (621)	3055 C (349)	2765 C (219)	3206 C (320)	4352 B (556)	4046 B (123)	5029 A (248)

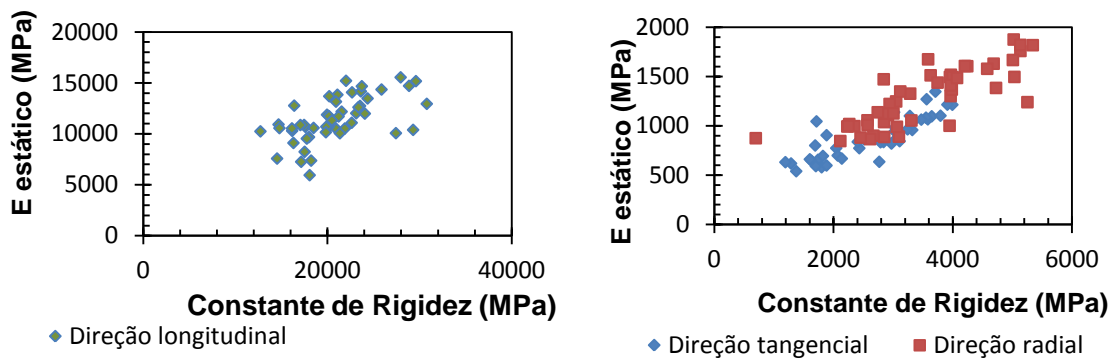
Tabela 4.9...continuação

Constante de rigidez (MPa) 180 kHz	C_{LL}	15906 C (2106)	17104 BC (2404)	13969 C (3213)	15078 C (1658)	23958 A (4104)	21304AB (1363)	22155 A (1916)
	C_{TT}	1196 C (88,2)	1612 B (315)	1469 BC (165)	1663 B (170)	2362 A (293)	2192 A (105)	2308 A (49,9)
	C_{RR}	1533 E (93)	2152 D (144)	2278 D (200)	2913 C (220)	3801 B (535)	—**	4662 A (234)

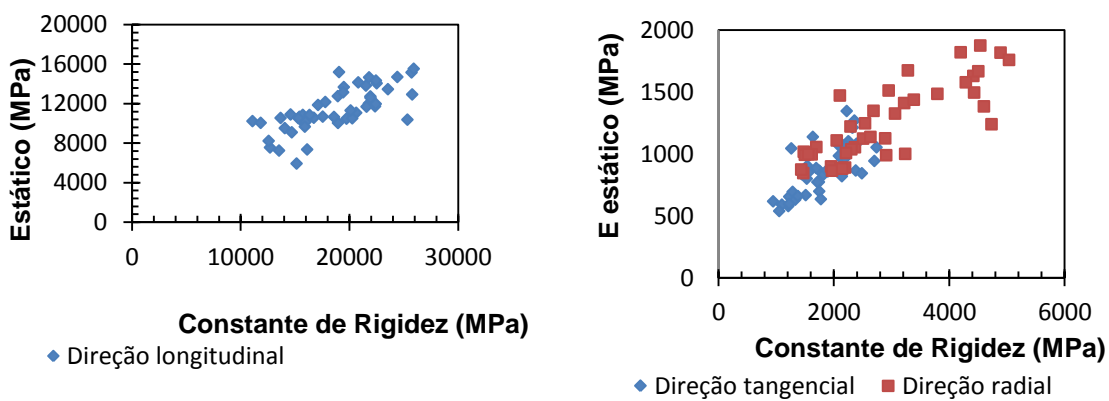
Médias seguidas pela mesma letra na horizontal, não diferem estatisticamente entre si (Tukey; $p > 0,05$). *Desvio padrão em Kg.m^{-3} ou em MPa. Eest é módulo de elasticidade estático. C_{LL} , C_{TT} e C_{RR} são as constantes de rigidez longitudinal, tangencial e radial, respectivamente. Eest_L, Eest_T e Eest_R são módulos de elasticidade estático longitudinal, tangencial e radial, respectivamente. ** Valores não calculados de C_{RR} , já que os valores de velocidade estão incoerentes.



(a)



(b)



(c)

FIGURA 4.12 – Módulo de elasticidade estático (E estático) em função das constantes de rigidez. (a) transdutor longitudinal 54 kHz; (b) transdutor longitudinal 150 kHz e; (c) transdutor longitudinal de 180 kHz.

A TAB. 4.10 apresenta o coeficiente de determinação e o p-valor entre o Eest e a constante de rigidez por meio de ondas ultrassônicas.

A correlação entre Eest e as constantes de rigidez é sempre significativa a 5% de significância para as três direções de corpos de prova estudadas. Os coeficientes de determinação (R^2) para as madeiras são, respectivamente, 55%, 94% e 88% para as direções longitudinal, tangencial e radial, calculados com a velocidade determinada com o transdutor longitudinal de 54 kHz. E 55%, 91% e 88% para as direções longitudinal, tangencial e radial, respectivamente, calculados com a velocidade determinada com o transdutor longitudinal de 150 kHz. Enquanto para a velocidade determinada com o transdutor longitudinal de 180 kHz foram de 52%, 76% e 80% nas direções longitudinal, tangencial e radial, respectivamente. Nogueira e Ballarin (2003) encontraram valores de 97%, 42% e 82% para a madeira de *Pinus taeda*, nas direções longitudinal, tangencial e radial, respectivamente. De acordo com Feio et al. (2004) os valores de R^2 para a madeira de castanheira foram de 74% na direção longitudinal e 86% para as direções tangencial e radial. Já Stangerlin et al. (2008) obtiveram valores de R^2 variando de 84,45 a 87,95% para madeira de *Patagonula americana*, cuja densidade é 0,74 g/cm³ e de 91,08 a 95% para a madeira de *Araucaria angustifolia*, cuja densidade foi de 0,52 g/cm³, por meio de compressão paralela às fibras.

Ressalta-se que dentre os transdutores utilizados para calcular as velocidades de propagação de ondas ultrassônicas, o que melhor respondeu às características do E nas direções longitudinal, tangencial e radial foi o transdutor longitudinal de 54 kHz. Enquanto que o transdutor longitudinal de 180 kHz obteve resultado insatisfatório. Vale destacar também que, apesar de se mostrar com os menores valores de R^2 , este transdutor se mostrou adequado para ser utilizado, já que seus valores para direção normal (tangencial e radial) foram de 76% e 80%. Ressalta-se ainda, que de acordo com a NBR 58000 (2007), o transdutor de 54 kHz não deveria ser utilizado para CPs menores que 20 cm de comprimento, e no presente trabalho foi realizado em CPs de 15cm. Apesar de contrariar a norma, este transdutor se mostrou eficiente para o cálculo de Edin nas direções tangencial e radial.

Tabela 4.10 – Análise de regressão entre o módulo de elasticidade estático e a constante de rigidez em cada direção analisada

Transdutor longitudinal									
Direção	54 kHz			150 kHz			180 kHz		
	R ² ajust	R ²	p-valor	R ² ajust	R ²	p-valor	R ² ajust	R ²	p-valor
Longitudinal	55	54	0,000	55	54,7	0,000	52	50,7	0,000
Tangencial	93,6	93,4	0,000	91	91	0,000	76,4	75,7	0,000
Radial	87,7	87,4	0,000	88	87,6	0,000	80,2	79,7	0,000

R²ajust = coeficiente de determinação ajustado, R² = coeficiente de determinação.

4.3.2 Emissões acústicas

Na TAB. 4.11 encontra-se a análise entre as velocidades de propagação da onda nas madeiras, por meio de ensaio de propagação ultrassônica com o aparelho de emissões acústicas. As médias seguidas pela mesma letra, na mesma coluna, indicam que as velocidades não diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de significância. Quando se analisa as velocidades de propagação da onda nas direções longitudinal, tangencial e radial, verifica-se que as mesmas diferem entre si.

Para a direção longitudinal, de acordo com o teste de Tukey, as madeiras de angelim pedra, muiracatiara, roxinho e garapa não se diferenciaram estatisticamente, apresentando os maiores valores de velocidade de propagação. E a madeira de castanheira obteve o menor valor médio, no entanto não se diferenciou estatisticamente das demais madeiras. Já na direção tangencial, verifica-se que a madeira de garapa obteve maior valor de velocidade de propagação da onda, mas não se diferenciou estatisticamente das madeiras de angelim vermelho, pequi, roxinho e garapa. Enquanto a madeira de castanheira obteve o menor valor médio, e estatisticamente não se diferenciou da madeira de angelim pedra. Para a direção radial, a madeira de roxinho obteve maior valor de velocidade de propagação da onda, no entanto, estatisticamente não se diferenciou das madeiras de garapa, pequi e angelim vermelho. Enquanto a madeira de castanheira obteve o menor valor de velocidade de propagação das ondas de acordo com o teste de Tukey ao nível de 5% de significância.

Tabela 4.11 – Análise da densidade aparente e das velocidades médias de propagação de onda por meio de ensaio de propagação ultrassônica com o aparelho de emissões acústicas

Madeira	ρ a 12% (kg.m ⁻³)	Propagação da onda (m/s)		
		Longitudinal	Tangencial	Radial
Castanheira	696 D (35)*	4823 BC (273,7)	1528,5 D (81,4)	1788,3 D (84,9)
Angelim pedra	761 C (42)	5032,5 ABC (153,3)	1641,5 CD (127)	1907,7 C (76,9)
Muiracatiara	780 C (63)	4567,4 ABC (458,2)	1692,6 BC (154,6)	1964 BC (62,3)
Pequi	783 C (38)	4437,2 BC (157,4)	1786,8 ABC (36,8)	2046,9 AB (72,7)
Roxinho	933 B (23)	4972,7 ABC (610,2)	1772,6 ABC (32,3)	2099,9 A (72,3)
Garapa	946 B (17)	4733,2 ABC (185,8)	1863,2 A (59,5)	2050,0 AB (50,4)
Angelim vermelho	1131 A (20)	4305,1 C (134)	1824,2 AB (52,7)	2074,3 AB (33,8)
Média	866 (143)	4696 (399)	1730 (137)	1990 (121)

Médias seguidas pela mesma letra na vertical, não diferem estatisticamente entre si (Tukey; $p > 0,05$). *Desvio padrão em Kg.m⁻³ e m/s. ρ a 12% = densidade aparente a 12% de umidade.

Na TAB. 4.12 visualiza-se a análise múltipla da velocidade de propagação das ondas, entre as três direções. As médias seguidas na mesma linha não diferem entre si pelo teste de Tukey. Ressalta-se que os maiores valores de velocidade de propagação da onda foram encontrados na direção longitudinal, seguida das direções radial e tangencial, respectivamente.

A TAB. 4.12 mostra a análise múltipla das médias das velocidades de propagação das ondas, nas três direções por meio de ensaios de emissões acústicas. As médias seguidas pela mesma letra na mesma linha, não diferem entre si pelo teste (Tukey; $p > 0,05$). Verifica-se, que este método de ensaio é o mesmo para ondas ultrassônicas, nas direções dos CPs analisados, no entanto, os valores de velocidade de propagação, por meio do aparelho de emissões acústicas, diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade nas três direções. Os maiores

valores de propagação da onda foram obtidos na direção longitudinal, seguida das direções radial e tangencial, conforme mostrado na TAB. 4.7.

Tabela 4.12 – Análise das velocidades de propagação de onda (m/s)

Direção		
Longitudinal	Tangencial	Radial
4696 A	1730 C	1990 B
(399)*	(137)	(121)

Médias seguidas na horizontal diferem estatisticamente entre si (Tukey; $p > 0,05$). *Desvio padrão em m/s.

As relações entre a velocidade de propagação da onda por meio de ensaio de emissão acústica, e as propriedades de tensão de cisalhamento, dureza Janka, densidade aparente a 12% de umidade e módulo de elasticidade estático, encontram-se na FIG. 4.13.

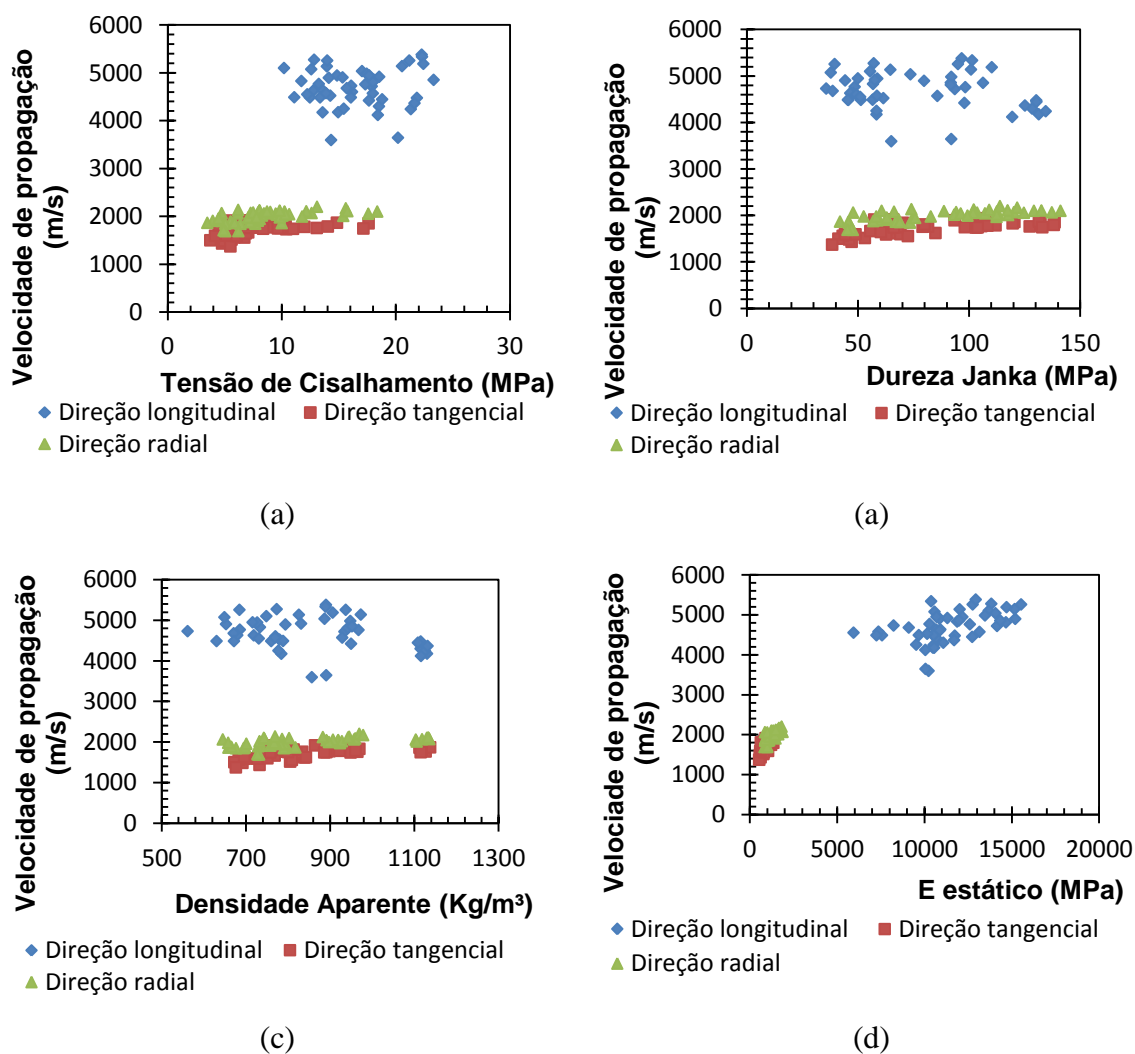


FIGURA 4.13 – Velocidade de propagação de onda em função da tensão de cisalhamento (a), dureza Janka (b), densidade aparente (c) e módulo de elasticidade estático (d).

Na TAB. 4.13 são apresentados os valores de coeficiente de determinação entre Eest e Edin, determinados por meio do ensaio de emissões acústicas.

A análise de regressão entre os Edin e Eest na direção longitudinal (TAB. 4.13), indicou moderada correlação, determinado pelo coeficiente de determinação (R^2) de 53%. Este resultado é justificado pela heterogeneidade estrutural do lenho na direção longitudinal. No entanto, nas direções tangencial e radial, se observou maior correlação entre os módulos e as constantes de rigidez, de acordo com os valores do R^2 obtidos de 94% e 92% para as direções tangencial e radial, respectivamente.

Tabela 4.13 – Análise de regressão entre o módulo de elasticidade estático e a constante de rigidez em cada direção analisada

Direção	R² ajustado	R²	p-valor
Longitudinal	53,2	52,2	0,000
Tangencial	94,4	94,2	0,000
Radial	92,0	91,8	0,000

R² - coeficiente de determinação, em %.

4.4 Comparação entre os métodos não destrutivos

Na TAB. 4.14 são mostradas as equações de regressão, o coeficiente de determinação e o p-valor das relações entre parâmetros determinados através dos métodos não destrutivos e as características das madeiras.

Observa-se na TAB. 4.14, que o índice de penetração do Pilodyn e a amplitude de perfuração do resistógrafo são os que possuem maior correlação com a densidade aparente das madeiras. Nota-se que as equações ajustadas em ambos os métodos não destrutivos possuem forte correlação na direção longitudinal de ensaio para esta característica. Nas direções tangencial e radial, verifica-se que o ajuste da equação de regressão foi mais forte para o resistógrafo, que obteve coeficientes de determinação acima de 90%. Destaca-se ainda que, em todos os transdutores utilizados para determinar velocidade de propagação da onda ultrassônica e também o método de emissões acústicas não foram significativos na análise de regressão na direção longitudinal, revelaram ainda fraca correlação nas direções tangencial e radial.

Relativo ao ajuste das equações de regressão entre o Eest na direção longitudinal e suas dispersões com os resultados dos métodos não destrutivos, visualiza-se na TAB. 4.14, fraca correlação com os parâmetros resultantes dos métodos, determinada pelos baixos coeficientes de determinação calculados. Na direção tangencial, os métodos que utilizaram ultrassom e emissões acústicas obtiveram boa correlação com o módulo de elasticidade estático, com R^2 acima de 75%. Destaque para o aparelho de emissões acústicas com $R^2= 94,4\%$. No entanto na direção radial, os resultados obtidos com o transdutor longitudinal de 180 kHz, e com a resistência à penetração demonstraram fraca correlação com o módulo de elasticidade estático, com R^2 inferiores a 20%. E os demais métodos demonstraram coeficientes de determinação acima de 60%.

Verifica-se na TAB. 4.14 que a análise de regressão entre a dureza Janka e os resultados dos métodos não destrutivos na direção longitudinal, somente foi significativa para a resistência à penetração e a resistência à perfuração, demonstrando forte correlação, com R^2 acima de 80%. Na direção tangencial, observa-se que a resistência à perfuração e resistência à penetração, também obtiveram forte correlação com a dureza Janka, seguidos também pelo método de ultrassom com o transdutor de 54 kHz. Já os resultados dos demais ultrassons demonstraram fraca correlação com a mesma característica, com R^2 abaixo de 50%. A forte correlação dos resultados do resistógrafo com a dureza Janka no estudo da regressão, novamente foi detectada na direção radial, que apresentou R^2 igual a 85%. Sendo que o ensaio que utilizou emissões acústicas obteve R^2 igual a 72%, demonstrando boa correlação entre os resultados deste método não destrutivo e a dureza Janka na direção radial para as madeiras analisadas.

A análise de regressão entre a tensão de cisalhamento e os resultados obtidos pelos métodos não destrutivos de ultrassom com os transdutores longitudinais (54 kHz, 150 kHz e 180 kHz) para a direção longitudinal apresentado na TAB. 4.14, não foram significativos. Resultados do índice de penetração do pilodyn obtiveram altas correlações com esta propriedade, com R^2 igual a 79%. Nas direções tangencial e radial, os resultados da amplitude de perfuração do resistógrafo foram os que melhor se correlacionaram com a tensão de cisalhamento pela análise de regressão, com R^2 igual a 74% e 60%, respectivamente. Destacam-se as baixas correlações entre os métodos de ultrassom e emissões acústicas com a tensão de cisalhamento. E também as baixas correlações determinadas para o método de penetração nas direções tangencial e radial.

Tabela 4.14 – Equações de regressão, coeficientes de determinação (%) e p-valor das relações entre os métodos não destrutivos e características das madeiras

Método não destrutivo	Densidade aparente a 12% de umidade (kg.m ⁻³)											
	Longitudinal				Tangencial				Radial			
	Equação	R ² ajust	R ²	p-valor	Equação	R ² ajust	R ²	p-valor	Equação	R ² ajust	R ²	p-valor
Resistência à penetração	DA= 1469,79 - 45,8IP	75	76	0,000	DA= 1411,43 - 49,7IP	68	68	0,000	DA= 1583,65 - 67,55IP	58	59	0,000
Resistência à perfuração	DA= 631,3 + 5,23AP	80	80	0,000	DA= 684,28 + 4,14AP	90	91	0,000	DA= 663,723 + 5AP	92	92	0,000
Ultrassom 180 kHz	DA= 853,5 - 0,00156V	-2	0	0,98*	DA= -111,56 + 0,6606V	26	30	0,000	DA= 84,36 + 0,402V	37	39	0,000
Ultrassom 54 kHz	DA= 1530,57 - 0,13253V	7	9	0,043	DA= -253,5 + 0,6067V	42	43	0,000	DA= -542,6 + 0,66V	25	26	0,000
Ultrassom 150 kHz	DA= 1321,24 - 0,09611V	4	6	0,104*	DA= -171,831 + 0,58V	42	43	0,000	DA= -904,1 + 0,859V	41	42	0,000
Emissões acústicas	DA= 1454,38 - 0,1281V	6	8	0,059*	DA= -358,4 + 0,7017V	49	50	0,000	DA= -916,5 + 0,88V	40	41	0,000
Módulo de elasticidade estático (MPa)												
Resistência à penetração	E= 15516,7 - 293,584IP	15	17	0,004	E= 1635,73 - 67,695IP	44	45	0,000	E=2087,7 - 76,117IP	17	18	0,003
Resistência à perfuração	E= 10321,5 + 26,35AP	9	11	0,021	E= 650,958 + 5,1087AP	44	45	0,000	E= 1007,15 + 8,121AP	60	61	0,000
Ultrassom 180 kHz	E= 6180 + 0,294ρ(V) ²	52	51	0,000	E= 250 + 0,334ρ(V) ²	76,4	76	0,000	E= 485 + 0,266ρ(V) ²	80,2	80	0,000
Ultrassom 54 kHz	E= 2264 + 0,408ρ(V) ²	55	54	0,000	E= 174 + 0,241ρ(V) ²	93,6	93	0,000	E= 173 + 0,306ρ(V) ²	87,7	87	0,000
Ultrassom 150 kHz	E= 3994 + 0,376ρ(V) ²	55	55	0,000	E= 242 + 0,23ρ(V) ²	91	91	0,000	E= 259 + 0,295ρ(V) ²	88	88	0,000
Emissões acústicas	E= 3843 + 0,406ρ(V) ²	53,2	52	0,000	E= 190 + 0,259ρ(V) ²	94,4	94	0,000	E= 154 + 0,338ρ(V) ²	92	92	0,000
Dureza Janka (MPa)												
Resistência à penetração	DJ= 227,69 - 10,03IP	81	82	0,000	DJ= 216,247 - 11,83IP	72	72	0,000	DJ=213,82 - 11,7019IP	41	42	0,000
Resistência à perfuração	DJ= 41,88 + 1,17AP	90	90	0,000	DJ= 48,12 + 0,852AP	89	89	0,000	DJ= 49,12 + 0,94AP	85	85	0,000
Ultrassom 180 kHz	DJ= 87,37 + 0,00016V	-2	0	0,734*	DJ= -173 + 0,1738V	46	47	0,000	DJ= 54,18 + 0,0128V	22	24	0,001
Ultrassom 54 kHz	DJ= 241,3 - 0,03V	7	9	0,142*	DJ= -255,56 + 0,188V	71	71	0,000	DJ= -468,114 + 0,2655V	56	57	0,000
Ultrassom 150 kHz	DJ= 184,176 - 0,0189V	2	5	0,506*	DJ= -204,49 + 0,16288V	43	44	0,000	DJ= -147,268 + 0,132V	41	42	0,000
Emissões acústicas	DJ= 219,8 - 0,03V	5	7	0,097*	DJ= -217,4 + 0,17V	59	60	0,000	DJ= -303,005 + 0,19492V	72	72	0,000

Tabela 4.14...continuação

		Tensão de cisalhamento (MPa)										
Resistência à penetração	$\tau_c = 30,41 - 1,03IP$	79	79	0,000	$\tau_c = 17,3939 - 0,875581IP$	35	36	0,000	$\tau_c = 20,342 - 1,0978IP$	34	35	0,000
Resistência à perfuração	$\tau_c = 12,087 + 0,1067AP$	58	59	0,000	$\tau_c = 4,664 + 0,075AP$	74	75	0,000	$\tau_c = 5,59 + 0,09AP$	60	61	0,000
Ultrassom 180 kHz	$\tau_c = 16,845 - 0,0001078V$	-2	0	0,945*	$\tau_c = -10,49 + 0,01235V$	34	35	0,000	$\tau_c = -8,18 + 0,00022V$	-1	1	0,000
Ultrassom 54 kHz	$\tau_c = 13,759 - 0,00053V$	-2	0	0,717*	$\tau_c = -7,766 + 0,0083V$	24	25	0,000	$\tau_c = -21,787 + 0,0144V$	30	32	0,000
Ultrassom 150 kHz	$\tau_c = -2,77192 - 0,00384372V$	17	19	0,005	$\tau_c = -5,89 + 0,00758V$	19	21	0,002	$\tau_c = -23,3 + 0,0156V$	44	45	0,000
Emissões acústicas	$\tau_c = 8,551 + 0,0017V$	1	3	0,253*	$\tau_c = -8,01 + 0,0089V$	18	20	0,002	$\tau_c = -23,86 + 0,01636V$	30	32	0,000

*regressão não significativa. R²= Coeficiente de Determinação. DA= Densidade aparente a 12% de umidade. E= Módulo de Elasticidade estático. DJ= Dureza Janka. Tc= Tensão de cisalhamento. IP= Índice de penetração do Pilodyn. AP= Amplitude de perfuração do resistógrafo. V= Velocidade de propagação da onda, em m/s.

Tabela 4.15 – Análise entre a velocidade de propagação (m/s) da onda entre transdutores longitudinais utilizados com o aparelho de ultrassom e também de emissões acústicas

Direção	Transdutor Longitudinal			
	54 kHz	150 kHz	180 kHz	2 MHz
Longitudinal	5163 A (340) ¹	4921 B (414)	4661 C (363)	4696 C (399)
Tangencial	1833 A (146)	1748 B (168)	1448 C (110)	1730 B (137)
Radial	2074 A (126)	2028 AB (126)	1827 C* (217)	1990 B (121)

Médias seguidas pela mesma letra na horizontal, não diferem estatisticamente entre si (Tukey; $p > 0,05$). ¹Desvio padrão em m/s. * Não levou em consideração a madeira de garapa.

Com a utilização do transdutor de 54 kHz foi obtido maior valor médio de velocidade de propagação da onda, enquanto o menor valor estatístico foi encontrado com a utilização do transdutor de 180 kHz. Vários autores como Bucur (1995), Trinca e Gonçalves (2009), Bucur e Bohnke (1994), Bucur (2006), Bartholomeu et al. (2003), Puccini et al. (2001), Aljets et al. (2010) afirmaram que a velocidade de propagação da onda ultrassônica é influenciada pela frequência em meios finitos. Isto foi confirmado neste trabalho como mostra a TAB. 4.8, em que estatisticamente os valores variaram de acordo com a frequência do transdutor utilizado.

Para CPs orientados na direção longitudinal, os valores médios das relações entre L e λ foram de 1,6, 4,6, 6 e 64 para os transdutores de 54 kHz, 150 kHz, 180 kHz e 2 MHz, respectivamente. Com isto, nota-se que as especificações da NBR 58000 (2007) foram atendidas, com exceção do transdutor de 54 kHz. Para os CPs orientados na direção tangencial os valores da mesma relação foram de 4, 13, 19 e 173, respectivamente. E finalmente na direção radial, os valores foram de 4, 11, 15 e 151 com a utilização dos transdutores de 54 kHz, 150 kHz, 180 kHz e 2 MHz, respectivamente. Bucur (2006) afirma que, para as velocidades de propagação da onda nas direções tangencial e radial não serem influenciadas pelos tamanhos das amostras, a relação L/λ tem que ser de no mínimo 2. No presente trabalho esta relação para a direção tangencial e radial foi de 4 para ambos os casos.

Na TAB. 4.14 foi mostrado que para a direção longitudinal, as correlações entre o módulo de elasticidade estático e os valores determinados com a utilização dos aparelhos de ultrassom e de emissão acústica, mostraram correlações variando de 52 a 55%. O que não é suficiente para que os mesmos sejam considerados eficientes, uma vez que estatisticamente estes valores

variam de 0 a 100%. Estes baixos valores de coeficientes de determinação (R^2), na direção longitudinal, podem ser oriundos das menores variações dos valores de módulo de elasticidade estático, quando comparados às direções tangencial e radial. Com a finalidade de aumentar estes coeficientes de determinação foi realizada a estimativa de valores, que levou em consideração a semelhança estatística entre os E tangencial e E radial, chamado a partir de então de E normal às fibras estimado (E_{Nest}), mesmo sabendo que na prática esta diferença é existente e comprovada por vários aspectos, dentre eles os anatômicos.

Tabela 4.16 – Estimativa do módulo de elasticidade normal às fibras, considerando a semelhança entre E tangencial e E radial

		Equações	R² (%)	p-valor
	54 kHz	$E_{Nest} = 52,7 + 0,306 * C_{normal}$	67,7	0,000
Ultrassom	150 kHz	$E_{Nest} = 137 + 0,3 * C_{normal}$	57,9	0,000
	180 kHz	$E_{Nest} = 347 + 0,302 * C_{normal}$	63,7	0,000
Emissão acústica 2MHz		$E_{Nest} = 42,657 + 0,34456 * C_{normal}$	73,5	0,000

E_{Nest} = Módulo de elasticidade normal às fibras estimado. C_{normal} = Constante de rigidez na direção normal às fibras.

O cálculo de E longitudinal estimado (E_{Lest}) foi realizado com base no conhecimento prévio de E normal às fibras (E_{Nest}), calculado conforme mostrado na TAB. 4.16, e também da ciência do valor tabelado da constante M (TAB. 4.17). M é o valor médio da relação entre E_N e E_L , calculado a partir do ensaio de compressão. A determinação de E_{Lest} (Eq. 4.1) é importante para caso em que é necessário estimar o valor do módulo de elasticidade na direção paralela às fibras, e que só é possível a verificação da propagação de onda na direção normal às fibras, direção que geralmente é disponível e mais fácil de analisar em estruturas expostas em campo.

$$E_{Lest} = \frac{E_{N.est}}{M} \quad (4.1)$$

em que:

E_{Lest} = Módulo de elasticidade longitudinal às fibras estimado, MPa;

$E_{N.est}$ = Módulo de elasticidade normal às fibras, MPa;

M= Relação média entre E normal às fibras (tangencial e radial) e E paralelo às fibras (E_N/E_L).

Tabela 4.17 – Valor médio de M para as madeiras analisadas

Madeiras	M (E_N/E_L)
Angelim pedra	0,067
Angelim vermelho	0,128
Castanheira	0,079
Garapa	0,098
Muiracatiara	0,091
Pequi	0,127
Roxinho	0,092

O valor médio de E_L estático e E_L estimado para cada madeira é mostrado na TAB 4.18. A partir das equações anteriores foi possível aumentar os valores do coeficiente de determinação inicial (TAB 4.14) de 55%, 55%, 52% e 53,2% para 64%, 68%, 58% e 74% com a utilização dos transdutores de 54 kHz, 150 kHz, 180 kHz e 2 MHz, respectivamente.

Tabela 4.18 – Módulo de elasticidade longitudinal estático por meio das equações de correção

Madeiras	E_L estático (MPa)	Ultrassom			Emissão acústica
		54 kHz $E_{L.estim}$ (MPa)	150 kHz $E_{L.estim}$ (MPa)	180 kHz $E_{L.estim}$ (MPa)	$E_{L.estim}$ (MPa)
Angelim pedra	13263 (9,5)*	14034 (6,6)	13770 (8,8)	13663 (4,5)	13488 (9,4)
Angelim vermelho	11187 (8,3)	11765 (4,0)	11492 (4,0)	10933 (2,3)	11860 (4,3)
Castanheira	10522 (14,6)	8642 (5,2)	8863 (13,6)	9608 (3,0)	8960 (7,3)
Garapa	12955 (10,5)	12451 (4,8)	12895 (3,2)	10296 (3,1)	13112 (5,5)
Muiracatiara	10138 (10,7)	10019 (9,3)	9313 (13,0)	10030 (5,6)	9982 (10,9)
Pequi	8639 (20,4)	7755 (4,6)	8061 (6,8)	8174 (4,8)	8048 (6,3)
Roxinho	13305 (17,0)	13366 (8,0)	13572 (7,7)	13888 (8,6)	13567 (8,0)

* Coeficiente de variação em %.

Na TAB 4.19 observa-se que a hipótese de diferença nula entre o E_L estimado e E_L estático, com nível de significância de 99%, permite concluir a possibilidade de igualdade entre as mesmas. O que deixa claro a veracidade da equação de correção acima citada.

Tabela 4.19 – Hipótese de diferença nula entre o E_L estimado e E_L estático, com nível de significância de 99%

Métodos Não Destrutivos		Intervalo de confiança	t-valor	p-valor
Ultrassom	54 kHz	(-891; 326)	-1,24	0,219
	150 kHz	(-865; 281)	-1,37	0,178
	180 kHz	(-1095; 119)	-2,15	0,036
Emissão acústica		(-750; 467)	-0,62	0,535

5

CONCLUSÃO

O presente trabalho permitiu concluir com base em 147 CPs e utilização de 3 técnicas não destrutivas, que:

- Para CPs orientados na direção longitudinal, a utilização de transdutor longitudinal de 54 kHz é inadequada, e aceitável para os demais transdutores de 150 kHz, 180 kHz e 2 MHz;
- Para CPs orientados nas direções tangencial e radial, todos os transdutores utilizados estão adequados, embora os valores de velocidade de propagação de onda sejam diferentes estatisticamente;
- Há uma relação entre a densidade aparente da madeira e a velocidade de propagação da onda em meios finitos;
- Para determinar a densidade aparente, em ordem de significância, os métodos que melhor estimaram foram: o de resistência à penetração e resistência à perfuração na madeira. Os aparelhos não destrutivos globais não tiveram uma boa significância estatística;
- Para estimar o E estático através dos métodos de propagação de ondas ultrassônicas, em ordem de significância, os transdutores que melhor responderam foram: de 2 MHz, de 54 kHz, de 150 kHz e o de 180 kHz. Os aparelhos não destrutivos locais não se mostraram como boa ferramenta para determinar esta propriedade;

- Para avaliar a dureza Janka, em ordem de significância, os métodos que melhor responderam estatisticamente foram: resistência à perfuração e resistência à penetração. Os aparelhos não destrutivos globais não se mostraram uma ferramenta eficiente para estimar esta propriedade;
- Para estimativa da tensão de cisalhamento, os métodos que melhor responderam estatisticamente, em ordem de significância, para a direção longitudinal foram à resistência à penetração seguido da resistência à perfuração. Já para a direção tangencial e radial apenas o método de resistência à penetração. Os métodos globais não se mostraram uma ferramenta eficiente para estimar esta propriedade;
- A estimativa do E_L através de ondas ultrassônicas pode ser feita a partir da determinação do E normal às fibras. A hipótese de diferença nula entre o E_L estimado e E_L estático com nível de significância de 99% permite concluir pela possibilidade de igualdade entre elas.

6

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACUÑA, L. et al. Aplicacion del resistografo a la obtencion de la densidad y la diferenciacion de especies de madera. **Materiales de Construccion**. v. 61, p. 451-464, jul.-set. 2011.

AGUILERA, A.; VEJA, M.; MEAUSOONE, P. J. Effects of grain angle on the amplitudes of acoustic emission and surface roughness in wood machining. **Wood Sci Technol**, v. 41, p. 373–381. 2007.

AICHER, S.; HOFFLIN, L.; DILL-LANGER, G. Damage evolution and acoustic emission of wood at tension perpendicular to fiber. **HolzRoh – Werkst**, v. 59, p. 104-116. 2001.

ALJETS, D.; CHONG, A.; WILCOX, S. **Acoustic emission source location in plate-like structures using a closely arranged triangular sensor array**. In: EUROPEAN WORKING GROUP ON ACOUSTIC EMISSION – EWGAE. Viena, Áustria. 9p. 2010.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **Standard test method of for specific gravity of wood based materials**. ASTM designation D 2395, 1998.

ANDO, K. et al. Microscopic processes of shearing fracture of old wood, examined using the acoustic emission technique. **Journal Wood Science**. v. 52, p. 483-489. 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Ensaio não destrutivo – Ultrassom: classificação mecânica de madeira serrada de dicotiledôneas** (Projeto NBR 58 000 10001). Rio de Janeiro: ABNT, 2007, 8p.

_____. **NBR 7190: Projeto de estruturas de madeira**. Rio de Janeiro, 1997.

ATHERTON, G. H. Preliminary study of proportional limit as a predictor of ultimate strength in bending. **Oregon. Forest. Prod. J.** v. 30, n. 1, p. 47-53. 1980.

BALLARIN, A. W.; NOGUEIRA, M. Determinação do módulo de elasticidade da madeira juvenil e adulta de *Pinus taeda* por ultrassom. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 25, n. 1, p. 19-28, 2005.

BALTRUSAITIS, A. et al. Acoustic and Elastic Properties of Modified Oak Wood. **Materials Science**, v. 15, n. 4, p. 316-320, 2009.

BARRETT, J. D.; HONG, J. Moisture content adjustments for dynamic modulus of elasticity of wood members. **Wood Sci. Technol.**, v. 44, n. 3, p. 485-495, 2010.

BARTHOLOMEU, A.; GONÇALVES, R.; BUCUR, V. Dispersão de ondas de ultra-som em peças de madeira serrada de *Eucalyptus* em função da geometria. **Scientia Forestalis**, n. 63, p. 235-240, jun. 2003.

BARTHOLOMEU, A.; GONÇALVES, R. **Predição do módulo de elasticidade à flexão em vigas de eucalipto saturadas e secas ao ar utilizando a velocidade longitudinal de ultra-som**. IV Conferencia Panamericana de END, Buenos Aires, 2007.

BODIG, J.; GODMANN, J. R. Prediction of elastic parameters for wood. **Wood Sci.** v. 5, p. 249-264. 1972.

BOGDANOVICH, A. E. et al. **A comparative study of mechanical properties of 3D woven single-layer and 2D woven multi-layer E-glass composites**. Katholieke Universiteit Leuven. 2008. 6p.

BOLZA, E.; KLOOT, N. M. **The mechanical properties of 174 Australian timbers**. Div. For. Prod. CSIRO Melbourne Tech. Paper. n. 25. 1963.

BOTELHO JÚNIOR, J. A. **Avaliação não destrutiva da capacidade resistente de estruturas de madeira de edifícios antigos**. 2006. 206 p. Dissertação (Reabilitação do Patrimônio Edificado) – Escola de Engenharia civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 2006.

BUCUR, V. **Acoustics of wood**. New York: CRC Press, 1995.

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

BUCUR, V.; BOHNKE, I. Factors affecting ultrasonic measurements in solid wood. **Ultrasonics**, v. 32, n. 5, p. 385-390, 1994.

BUCUR, V. Elastic constants for wood by an ultrasonic method. **Wood Sci. Technol.** v. 18, p. 255-265. 1984.

BUCUR, V. Theory of and experimental methods for acoustic characterization of wood. **In: Acoustics of wood**. Berlin: Springer-Verlag. 2 ed, p. 39-104, 2006.

CAI, Z. et al. Static and vibration moduli of elasticity of salvaged and new joists. **Forest Products Journal**, Madison, v. 50, n. 2, p. 35-40, 2000.

CALDERONI, C. et al. Experimental correlations between destructive and non-destructive tests on ancient timber elements. **Engineering Structures**, n. 32, p. 442-448, 2010.

CALEGARI, L. et al. Monitoramento do teor de umidade de madeiras de *Pinus elliottii* Engelm. e *Eucalyptus grandis* W. Hill exMaiden, sob diferentes temperaturas de secagem, através do ultra-som. **Ciência Florestal**, v. 17, n. 4, p. 399-408, 2007.

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

CALLISTER, A. N.; ENGLAND, N. F. How dense is my blue gum? prediction of whole-tree basic density of *Eucalyptus globulus*. **New Forests**, v. 40, p. 153-164. 2010.

CANDIAN, M.; SALES, A. Aplicação das técnicas não-destrutivas de ultra-som, vibração transversal e ondas de tensão para avaliação de madeira. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 9, n. 4, p. 83-98, out.-dez. 2009.

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

CHEN, Z.; GABBITAS, B.; HUNT, D. Monitoring the fracture of wood in torsion using acoustic emission. **Journal Materials Science**, v. 41, p. 3645-3655. 2006.

CHIMELO, J. **Anotações sobre anatomia e identificações de madeiras**. São Paulo, IPT. 1980.

COINTE, A. et al. Diagnosis and monitoring of timber buildings of cultural heritage. **Structural Safety**, v. 29, p. 337-348, 2007.

CRUZ, H. **Inspeção, avaliação e conservação de estruturais na madeira**. In: Jornada de Materiais de Construção, 1. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa. Portugal. 2011.

CUNHA, A. B.; MATOS, J. L. M. Determinação do módulo de elasticidade em madeira laminada colada por meio de ensaio não destrutivo (“stress wave timer”). **Revista Árvore**, Viçosa, v. 34, n. 2, p. 345-354, 2010.

CURRY, W. T.; TORY, J. R. **The relation between the modulus of rupture and modulus of plasticity of timber**. Aylesbury, Bucks Building Research Establishment, Princess Risborough Laboratory, Current paper. n. 30. 1976.

CYRA, G.; TANAKA, C. The effects of wood-fiber directions on acoustic emission in routing. **Wood science and technology**, v. 34. p. 237-252. 2000.

DEL MENEZZI, C. H. S.; SILVEIRA, R. R.; SOUZA, M. R. Estimativa das propriedades de flexão estática de seis espécies de madeiras amazônicas por meio da técnica não-destrutiva de ondas de tensão. **Acta Amazônica**. Manaus, v. 40 n. 2, 2010.

FEIO, A. O.; LOURENÇO, P. B. **Possibilidades e aplicações de ensaios não destrutivos**. 2005. In: Encontro sobre a madeira e suas aplicações nobres. Bem Utilizar a Madeira. 2005.

FEIO, A. O.; MACHADO, J. S.; LOURENÇO, P. B. **Caracterização de propriedades da madeira de castanheira na direção perpendicular ao fio – recurso a técnicas destrutivas e não destrutivas de ensaio**. 2004.

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

GONÇALVES, F. G. **Avaliação da qualidade da madeira de híbrido clonal de *Eucalyptus urophylla* x *grandis* para produtos sólidos**. 2002. 196 p. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal), Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre, 2006.

GONÇALVES, R.; BARTHOLOMEU, A. Avaliação do desempenho de ensaio não destrutivo em vigas de madeira de *Eucalyptus citriodora* e *Pinus elliottii*. Construções rurais e ambiência. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 4, n. 2, p. 269-274, 2000.

GONÇALVES, R.; TRINCA, A. J.; CERRI, D. G. . Comparison of elastic constants of wood determined by ultrasonic wave propagation and static compression test. **Wood and Fiber Science**, v. 43, p. 64-75, 2011.

GOULART, S. L. et al. Análises químicas e densidade básica da madeira de raiz, fuste e galho de barbatimão (*Stryphnodendron adstringens* Coville) de bioma cerrado. **Cerne**, Lavras, v. 18, n. 1, p. 59-66, jan.-mar. 2012.

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

ISIK, F.; LI, B. Rapid assessment of wood density of live trees using the Resistograph for selection in tree improvement programs **Canadian Journal of Forest Research**. v. 33, n. 12, p. 2426-2435. 2003.

ISO 3130. **Wood determination of moisture content for physical and mechanical tests**. International Organization for Standardization, Switzerland. 1975.

JAKIELA, S.; BRATASZ, L.; KOZŁOWSKI, R. Numerical modelling of moisture movement and related stress field in lime wood subjected to changing climate conditions. **Wood Sci Technol**, v. 42, p. 21-37. 2008.

JOHNSTONE, D. et al. Using an IML-Resi drill to assess wood density in *Eucalyptus globulus* subsp. *pseudoglobulus*. **Australian Forestry**, v. 74, n. 3, p. 190-196, 2011.

KAHL, T. et al. Using drill resistance to quantify the density in coarse woody debris of Norway spruce. **Eur J Forest Res.** v. 128, p. 467-473. 2009.

KENNEDY, E. I. **Strength and related properties of wood grown in Canada**. Dept. of Forestry Publications. n. 1104, Ottawa. 1965.

KOWALSKI, S. J.; SMOCKIEWICZ, A. Identification of wood destruction during drying. Maderas. **Ciencia y tecnología**, v. 6, n. 2, p. 133-143, 2004.

KRETSCHMANN D, E. **Mechanical properties of Wood. In: Forest Products Laboratory. Wood handbook: wood as an engineering material**. Wisconsin: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2010. Cap. 5, p. 1-44.

KURODA, K. Monitoring of xylem embolism and dysfunction by the acoustic emission technique in *Pinus thunbergii* inoculated with the pine wood nematode *Bursaphelenchus xylophilus*. **Journal For Res**, v. 17, p. 58-64. 2012.

LACKNER, G.; SCHAURITSCH, G.; TSCHELIESNIG, P. **Acoustic emission: a modern and common ndt method to estimate industrial facilities**. In: EUROPEAN CONFERENCE ON NON-DESTRUCTIVE TESTING – ECNDT. Viena, Áustria. 8p, 2006.

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

LAUNAY, J. et al. Rapid measurement of trunk MOE on standing trees using RIGIDIMETER. **Forest Science**, p. 465-469. 2002.

LOURENÇO, P. B.; FEIO, A. O.; MACHADO, J. S. Chestnut wood in compression perpendicular to the grain: Non-destructive correlations for test results in new and old wood. **Construction and Building Materials**, v. 21. 1617-1627. 2007.

LOUZADA, J. L. L.; GASPAR, M. J.; BENTO, E. M. **Uso do pilodyn para a estimativa da densidade da madeira de Eucalyptus nitens**. In: Congresso florestal nacional, 5.

Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Departamento Florestal, Vila Real, Portugal. 6p. 2005.

MARTINS, L. M. F. P. **Instalação, condução e cirurgia de árvores ornamentais.** Universidade de Trás- os Montes e Alto Douro. UTAD, 2007.

MARTINS, L. M. F. P. **Workshop Gestão e Cirurgia de Árvores.** Departamento de Ciências Florestais e Arquitectura Paisagista, Vila Real, Portugal, 2010, p. 20-22.

MINÁ, A. J. S. et al. Avaliação não-destrutiva de postes de madeira por meio de ultra-som. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 65, p. 188-196, jun. 2004.

MUNERI, A.; RAYMOND, C. A. Genetic parameters and genotype-by-environment interactions for basic density, pilodyn penetration and stem diameter in *Eucalyptus globulus*. **Forest Genetics**, v. 7. n. 4, p. 317-328. 2000.

MURPHY, J. F. **Commentary on factors affecting transverse vibration using an idealized theoretical equation.** Madison: Forest Products Laboratory, 4p. 2000.

NOGUCHI, M. et al. Detection of very early stages of decay in Western Hemlock wood using acoustic emission. **Forest Prod. Journal**. v. 36, n. 4, p. 35-36. 1986.

NOGUEIRA, M.; BALLARIN, A. W. **Sensibilidade dos ensaios de ultra-som à ortotropia elástica da madeira.** Pan- American Conference for Nondestructive Testing. 2003.

OLIVEIRA, F. G. R. et al. Efeito do comprimento do corpo-de-prova na velocidade ultrassônica em madeiras. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 30, n. 1, p. 141-145, 2006.

OLIVEIRA, L. J. R. **Uso do Pilodyn para a estimativa da densidade básica e propriedades mecânicas da madeira de eucalipto.** 2001. 62f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

PUCCINI, C. T.; BALLARIN, A. W.; GONÇALVES, R. **Dispersão de ondas de ultra-som em peças de madeira serrada de pinho do Paraná em função do comprimento.** In: CONGRESSO NACIONAL DE ENSAIOS NÃO-DESTRUTIVOS, 20. São Paulo. 2001. *Anais...* São Paulo: 2001.

PULLIN, R. et al. Acoustic emission monitoring of bridge structures in the field and laboratory. **Journal Acoustic Emission**. n. 26, 2008, p. 172-181.

RACZKOWSKI, J. et al. Detection of early stages of wood decay by acoustic emission technique. **Wood Science and Technology**, v. 33. 1999.

RAYMOND, C. A. **Tree breeding issues for solid wood production**. The future of *Eucalyptus* for wood products. Proceedings of an IUFRO Conference, 2000, Launceston, Tasmania, Australia: p. 265-270. 2000.

RINN, F. **Resistographic visualization of tree-ring density variations**. In: Dean J. S, Meko D. M, Swetnam T. W. Tree rings, environment, and humanity, radiocarbon. Department of Geosciences, The University of Arizona, Tucson, p. 871-878. 1996.

RINN, F.; SCWEINGRUBER, F. H.; SCHAR, E. Resistograph and X-ray density charts of wood. Comparative evaluation of drill resistance profiles and X- ray density charts of different wood species. **Holzforschung**, v. 50, p. 303-311. 1996.

ROSS, R.J.; BRASHAW, B. K.; PELLERIN, R. F. Nondestructive evaluation of wood. **Forest Products Journal**, Madison, US, v. 48, n. 1, p. 14-19, 1998.

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

ROSS, R. J.; RITTER, M. A.; SCHAD, K. C. **Determining in-place modulus of elasticity of stress-laminated timber decks using NDE**. In: National Conference on Wood Transportation Structures, Madison: Forest Products Laboratory, p. 277-281. 1994.

ROSS, R. J. et al. **Comparison of several nondestructive evaluation techniques for assessing stiffness and MOE of small-diameter logs**. In: International Symposium on Nondestructive Testing of Wood, 12, 2000. Sopron: University of Western Hungary, p. 155-163. 2000.

SANDOZ, J. L. **Triage et fiabilité de bois de construction**. 186p. Tese (Doutorado em Sciences Techniques) – Departamento de Génie Civil, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Lausanne, Suisse. 1990.

SKAAR, C. H.; SIMPSON, W. T.; HONEYCUTT, R. M. Use of acoustic emission to identify high levels of stress during oak lumber drying. **For. Prod. J.** v. 30, n. 2, p. 21-22. 1980.

STANGERLIN, D. M. et al. Avaliação de tipos de ondas geradas por dois modelos de transdutores para determinação do módulo de elasticidade dinâmico. **Floresta**, Curitiba, v. 40, n. 4, p. 691-700, out.-dez. 2010a.

STANGERLIN, D. M. et al. Estimativa do módulo de elasticidade em painéis aglomerados por meio de emissão de ondas ultra-sonoras. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v. 53, p. 17-22. 2010b.

STANGERLIN, D. M. et al. 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.

STEIGER, R. Sortierung von Rund-und Schnittholz mittels Ultraschall. **Holzforschung und Holzverwertung**, v. 49, n. 2, p. 28-35, 1997.

TARGA, L. A.; BALLARIN, A. W.; BIAGGIONI, M. A. M. Avaliação do módulo de elasticidade da madeira com uso de método não-destrutivo de vibração transversal. **Engenharia Agrícola**, v. 25, n. 2, p. 291-299, 2005.

TELES, R. F. et al. Nondestructive evaluation of a tropical hardwood: interrelationship between methods and physical-acoustical variables. **Ciência da Madeira**, Pelotas, v. 2, n. 1, p. 1-14, 2011.

TEREZO, R. F. **Propriedades mecânicas de madeiras utilizadas em estruturas Históricas e contemporâneas estimadas por meio de ultra-som**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

TRINCA, A. J.; GONÇALVES, R. Effect of the transversal section dimensions and transducer frequency on ultrasound wave propagation velocity in wood. **Revista Árvore**. v. 33, ed. 1, p. 177-184. 2009.

UKRAINETZ, N. K.; O'NEILL, G. A. An analysis of sensitivities contributing measurement error to Resistograph values. **Can. J. For. Res.** v. 40, p. 806-811. 2010.

VALE, A. T. et al. Densidade básica média, em função da profundidade de penetração do pino do “Pilodyn” e da classe diamétrica, e variação axial da densidade básica em *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 19, n. 1, p. 80-91.1995.

VITAL, B. R et al. **Efeito da idade da árvore na densidade da madeira de *Eucalyptus grandis* cultivado da região do cerrado de Minas Gerais**. Brasília, IBDF, p. 41-52. 1984.

YAMASHITA, K.; OKADA, N.; FUJIWARA, T. Use of the Pilodyn for estimating basic density and its applicability to density-based classifying of *Cryptomeria japonica* green logs. **Mokuzai Gakkaishi**,v. 53, p. 72-81. 2007.

YANG, T. et al. Evaluation of the mechanical properties of Douglas-fir and Japanese cedar lumber and its structural glulam by nondestructive techniques. **Construction and Building Materials**, v. 22, p. 487-493. 2008.

YIN, Y. F. et al. Mechanical properties assessment of *Cunninghamia lanceolata* plantation wood with three acoustic-based nondestructive methods. **Journal Wood Sci.** v. 56, p. 33-40. 2010.

YOURSY A. et al. In situ wood quality assessment in Douglas-fir. **Tree Genetics e Genomes**, v. 7, p. 553-561, 2011.

WARREN, W. G. **A critical examination of the statistical techniques available for estimating exclusion limits from in-grade tests**. Technical Rapport, Western Forest Prod. Lab., Vancouver, B. C. 1979.

WATT, M. S.; GARNETT, B. T.; WALKER, J. C. F. The use of the pilodyn for assessing outerwood density in New Zealand radiata pine. **For Prod J.** v. 46, p. 101-106. 1996.

WIELINGA, B. et al. Genetic parameters and genotype by environment interactions for green and basic density and stiffness of *Pinus radiata* D. Don Estimated using acoustics. **Silvae Genetica**, v. 58, p.112-122. 2009.

WU, S. J. et al. Estimation of basic density and modulus of elasticity of eucalypt clones in southern China using nondestructive methods. **Journal of Tropical Forest Science**, v. 23, n. 1, p. 51-56, 2011.