



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

INGRID ZACHARIAS MARTINS

DUREZA JANKA DE MADEIRAS FOLHOSAS ESTIMADA POR
ESCLEROMETRIA

CAMPINAS

2019

INGRID ZACHARIAS MARTINS

**DUREZA JANKA DE MADEIRAS FOLHOSAS ESTIMADA POR
ESCLEROMETRIA**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestra em Engenharia Agrícola, na área de Métodos Não Destrutivos Aplicados a Materiais, Estruturas e Árvores.

Orientador: Prof. Dr. Julio Soriano

ESTE TRABALHO CORRESPONDE À
VERSÃO FINAL DISSERTAÇÃO
DEFENDIDA PELA ALUNA INGRID
ZACHARIAS MARTINS, E ORIENTADA
PELO PROF. DR JULIO SORIANO.

CAMPINAS

2019

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

M366d Martins, Ingrid Zacharias, 1990-
Dureza Janka de madeiras folhosas estimada por esclerometria / Ingrid Zacharias Martins. – Campinas, SP : [s.n.], 2019.

Orientador: Julio Soriano.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Testes não-destrutivos. 2. Madeira - Propriedades mecânicas. 3. Ensaios de materiais. 4. Propriedades mecânicas. 5. Ultrassonografia. I. Soriano, Julio, 1967-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Agrícola. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Janka hardness of hardwood species estimated by sclerometer test

Palavras-chave em inglês:

Non-destructive testing

Wood - Mechanical properties

Testing of materials

Mechanical properties

Ultrasonography

Área de concentração: Métodos Não Destrutivos Aplicados a Materiais, Estruturas e Árvores

Titulação: Mestra em Engenharia Agrícola

Banca examinadora:

Julio Soriano [Orientador]

Cinthy Bertoldo Pedroso

Juliano Fiorelli

Data de defesa: 26-02-2019

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Agrícola

Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)

- ORCID do autor: <https://orcid.org/0000-0003-1818-0022>

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/0917098790309350>

Este exemplar corresponde à redação final da **Dissertação de Mestrado** defendida por Ingrid Zacharias Martins, aprovada pela Comissão Julgadora em 26 de Fevereiro de 2019, na Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.

FEAGRI

Prof. Dr. Julio Soriano – **Presidente e Orientador**
FEAGRI/UNICAMP

Faculdade de
Engenharia Agrícola
Unicamp

Dr. Juliano Fiorelli – **Membro Titular**

A Ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no processo de vida acadêmica da discente.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pelo dom da vida,

Aos meus pais, Carlos e Regina, que sempre estiveram me apoiando e me auxiliando nesta jornada. As minhas irmãs, Elga (*in memorian*) e Agatha, que mesmo não sabendo, sempre me espelhei e segui os exemplos que elas são,

Ao meu noivo, Pedro Ivo, que passou horas na madrugada me ouvindo e dando seus conselhos,

Ao Prof. Dr. Julio Soriano, pelas longas reuniões me orientando com sábios pensamentos e muita dedicação,

À Faculdade de Engenharia Agrícola,

Aos meus amigos que me apoiaram, mas, especialmente, àqueles do grupo LabEND que foram parceiros durante os ensaios no laboratório, em cursos e congressos, além dos momentos de lazer e tranquilidade,

À Faculdade de Tecnologia (FT) por me receber e permitir a realização de alguns ensaios,

E por fim, à Capes, sendo o presente trabalho realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Todo efeito tem uma causa; todo efeito inteligente tem uma causa inteligente; a potência de uma causa está na razão da grandeza do efeito.

Allan Kardec

RESUMO

A madeira possui características diferentes para cada espécie e com a grande diversidade, é conhecido o seu potencial para diversas aplicações, tais como na construção civil, na fabricação de móveis e paletes. No entanto, é necessário o conhecimento das propriedades físicas e mecânicas para o seu uso adequado. A dureza Janka, obtida por ensaio convencional de laboratório, é uma propriedade mecânica que possibilita identificar a trabalhabilidade da madeira, sendo que o método de ensaio não faz distinção segundo as direções normais às fibras (radial e tangencial). Métodos de ensaios não destrutivos (END) permitem a inspeção e avaliação de propriedades sem a necessidade de extração de corpos de prova, como exemplo, a ultrassonografia. A esclerometria normatizada para o material concreto vem sendo pesquisada para possíveis aplicações à madeira. Este trabalho teve por objetivo avaliar correlações entre a dureza Janka e o índice esclerométrico, que possibilitem a estimativa da dureza da madeira sem a necessidade de extração de corpos de prova, bem como analisar se a dureza Janka se distingue segundo as direções normais às fibras, tendo a ultrassonografia como método comparativo. Os ensaios para obtenção dessas propriedades nas direções paralela e normal às fibras foram realizados em quatro espécies de folhosas: garapa (*Apuleia leiocarpa*), cumaru (*Dipteryx odorata*), E. saligna (*Eucalyptus saligna*) e freijó (*Cordia goeldiana*) nas condições de madeira saturada e em equilíbrio com o ambiente, utilizando-se 09 corpos de prova para cada espécie. As correlações de dureza Janka com esclerometria resultaram em funções crescentes e influenciadas pelas condições de umidade e pela direção de aplicação dos ensaios. A orientação dos anéis de crescimento na seção transversal de peças de madeira serrada não influenciou os resultados da dureza Janka segundo a direção normal às fibras, diferentemente do que ocorre com a velocidade do pulso ultrassônico. Com os resultados desta pesquisa pode-se concluir que os melhores coeficientes de correlação para a estimativa da dureza Janka por esclerometria foram obtidos na condição de madeira estabilizada e na direção paralela às fibras.

Palavras-chave: ensaios não destrutivos; propriedades mecânicas; propriedades físicas; ultrassonografia.

ABSTRACT

The wood has different characteristics for each species and with great diversity, it has known its potential for various applications, such as construction, furniture and pallets. However, it is necessary the knowledge of physical and mechanical properties for its proper use. Janka hardness, obtained by conventional laboratory tests, is a mechanical property that makes it possible to identify the wood workability, and the test method does not distinguish according to the perpendicular directions to the fibers (radial and tangential). Non-destructive testing (NDT) methods allow the inspection and evaluation of properties without extraction of specimens, such as ultrasonography. The objective of this research was to evaluate the correlation between the Janka hardness and the sclerometric index, which makes it possible to estimate the wood hardness without extraction of specimens, as well as to analyze if the Janka hardness differs according to the perpendicular directions to the fibers, taking the ultrasonography as a comparative method. The tests to obtain these properties in the parallel and perpendicular to grain were accomplished with four hardwood species: garapa (*Apuleia leiocarpa*), cumaru (*Dipteryx odorata*), E. saligna (*Eucalyptus saligna*) and freijó (*Cordia goeldiana*) under conditions of wood saturated and in equilibrium with the environment, using nine specimens of each species. The correlations of Janka hardness with sclerometry resulted in increasing functions influenced by the humidity conditions and the direction of application of the tests. The orientation of the growth rings in the cross-section of sawn wood pieces did not influence the results of the Janka hardness obtained in the perpendicular direction to the fibers, unlike the velocity of the ultrasonic pulse. With the results of this research it can be concluded that the best correlation to estimate the Janka hardness by sclerometry were obtained in the condition of stabilized wood and in the direction parallel to the fibers.

Keywords: non-destructive testing; mechanical properties; physical properties; ultrasonography.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	10
1.1 Justificativa	12
1.2 Hipótese	13
1.3 Objetivos gerais	13
1.4 Objetivos específicos	13
2 Artigo: Dureza Janka de espécies de madeira folhosas estimada pelo método esclerométrico	14
2.1 Introdução	16
2.2 Materiais e métodos	17
2.3 Resultados e Discussão	20
2.4 Conclusões	28
2.5 Referências Bibliográficas	29
3 Artigo: Comportamento da dureza e do pulso ultrassônico segundo as direções de inspeção de peças de madeira	32
3.1 Introdução	34
3.2 Materiais e Métodos.....	35
3.3 Resultados e Discussão	37
3.4 Conclusões	46
3.5 Referências Bibliográficas	46
4 Discussão Geral	50
5 Conclusão	52
6 Referências Bibliográficas.....	53
Apêndice 1. Densidade e Teor de Umidade	57
Apêndice 2. Dados de esclerometria e dureza Janka para cada corpo de prova.....	59
Apêndice 3. Dados de velocidade para cada corpo de prova	61
Apêndice 4. Matriz dos coeficientes de correlação e P-valor.....	63

INTRODUÇÃO

A madeira por ser um material biológico possui características físicas, anatômicas, químicas e mecânicas diferenciadas para cada espécie, o que implica na escolha da espécie ou da classe de resistência para uma adequada aplicação, quer na construção civil, no setor moveleiro, na confecção de paletes e de equipamentos urbanos e rurais.

A dureza é uma propriedade mecânica importante para a caracterização de espécies florestais, bem como para a escolha apropriada das espécies, tanto sob os aspectos das aplicações quanto da trabalhabilidade.

Concernente as correlações entre propriedades, destaca-se que estudos publicados em meios diversos (periódicos, dissertações e teses) mostram bons resultados entre a dureza Janka e a densidade, com a dependência da direção anatômica e do teor de umidade da madeira. Portanto, esses estudos evidenciaram a possibilidade de correlações da dureza Janka com outras propriedades, no caso a densidade que é uma das mais importantes propriedades dos materiais, podendo ser empregada como indicadores da qualidade, bem como para a caracterização da madeira.

Outra propriedade que influencia diretamente as propriedades de resistência da madeira é a umidade, a resistência decresce com o aumento do teor de umidade, sendo que, o efeito da variação do teor de umidade quando acima do ponto de saturação das fibras se torna insignificante e, com isto a resistência torna-se praticamente constante. Neste aspecto, a ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT (ABNT NBR 7190, 1997) apresenta expressões para correção das propriedades mecânicas de resistência e do módulo de elasticidade para teores de umidade de 10 a 20%.

A dureza da madeira caracterizada pelo método de ensaio de Janka requer a confecção de corpos de prova e a execução do ensaio em laboratório (ABNT NBR 7190, 1997; AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS - ASTM D143, 2000). Pesquisas sugerem a implementação de métodos de ensaios não destrutivos (END) para a determinação dessa propriedade da madeira, como é o caso do Pilodyn, do Resistógrafo e, mais recentemente o durômetro portátil.

O Pilodyn é descrito na literatura como um instrumento desenvolvido na Suíça para determinar o grau de podridão macia em postes. Os resultados desse equipamento dependem do operador e mesmo sendo considerado um END causa uma perfuração devida a penetração por impacto de um pino metálico com 2,5 mm de diâmetro, sendo a profundidade de penetração dependente do grau de degradação da madeira.

O resistógrafo foi desenvolvido com o objetivo de se criar um sistema fácil e preciso para detecção de defeitos internos na madeira, tais como em peças estruturais de construções civis e postes de serviço. Por esse equipamento é medida a resistência da madeira à perfuração de uma broca. Esse equipamento também, considerado um END, causa uma perfuração controlada devido a introdução de uma broca de 3 mm de diâmetro.

O durômetro portátil, que se apresenta na terceira geração, tem por fundamento a metodologia Brinell. Trata-se de um transdutor de deslocamento e processador eletrônico embutido para automatizar a medição da dureza dinâmica. A força empregada para promover a indentação é resultante da queda livre, limitando, assim, seu uso somente na direção vertical.

Visando proporcionar o uso de métodos não destrutivos aplicados a madeira, estudos recentes testam a aplicação da esclerometria na madeira. O método esclerométrico é um END que possui um equipamento portátil com fácil e rápida aplicação, desenvolvido por Ernst Schmidt no ano de 1948 com o objetivo de determinar a dureza superficial do material concreto. O método é normatizado pela ABNT (NBR 7584:2012) e pela norma americana AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS - ASTM C805, com o qual se obtém a relação entre energia restituída e energia aplicada pelo esclerômetro.

Aplicações da esclerometria em peças de madeira serrada vêm sendo estudadas pelo grupo de pesquisa do Laboratório de Ensaio Não Destrutivos da Faculdade de Engenharia Agrícola da UNICAMP. Nesse contexto, foram pesquisadas correlações entre impactos esclerométricos e resistência à compressão de um lote de *E. saligna*, em que na direção longitudinal (paralela às fibras) os resultados foram mais representativos. No âmbito da estimativa de propriedades físicas da madeira pelo método esclerométrico, o grupo pesquisou peças das espécies: garapa (*Apuleia leiocarpa*), cumaru (*Dipteryx odorata*) e cedro (*Cedrela ssp.*), tendo obtido correlações representativas entre a densidade e os impactos esclerométricos.

Num estudo preliminar, foi avaliado potencial de correlações da dureza Janka com os índices esclerométricos, tendo sido empregadas apenas duas espécies de madeira, a garapa (*Apuleia leiocarpa*) e o cedro (*Cedrela ssp.*), tendo os resultados, ainda que preliminares, mostrado o potencial do método esclerométrico como END para a estimativa da dureza da madeira. Pelo fato de terem sido empregadas apenas duas espécies a correlação não faz abrangente e expressiva para outras espécies. Isto fez surgir a proposta de continuidade desses estudos embasando a justificativa da presente pesquisa.

A ultrassonografia, utilizada para obter a velocidade de propagação de ondas mecânicas em meios materiais, é outro exemplo de aplicação END em madeira com aplicações

em campo. Esse método possui simples operação e equipamentos de baixo custo, que por correlações estatísticas com a velocidade de propagação de ondas torna viável a obtenção de propriedades da madeira. Para obtenção da velocidade de propagação de ondas devem ser empregados transdutores com a frequência adequada para o material, cujos resultados são afetados por fatores tais como: teor de umidade, propriedades anatômicas da madeira, presença de nós e rachaduras. A técnica de ultrassonografia aplicada à madeira de folhosas é normatizada pela ABNT (NBR 15521, 2007), podendo ser utilizada em condições de laboratório, de serrarias e de indústria.

Neste contexto, esta pesquisa teve por objetivo analisar experimentalmente a dureza Janka e os índices esclerométricos em espécies de madeiras tropicais, que correlacionados possibilitam a estimativa da dureza da madeira de forma não destrutiva. Também foi analisada a sensibilidade dos métodos de dureza Janka e de propagação de ondas ultrassônicas, segundo a direção de execução desses ensaios em peças de madeira serrada.

1.1 Justificativa

A dureza Janka é uma propriedade mecânica que possibilita identificar a trabalhabilidade das diversas espécies de madeira e, por ser determinada por ensaio convencional de corpos de prova, não pode ser obtida diretamente em peças instaladas nas construções civis.

A caracterização da dureza da madeira se faz pelo método de ensaio de Janka, normalizado pela ABNT NBR 7190 (1997), que requer a confecção de corpos de prova e a execução do ensaio em laboratório, causando perfurações na amostra (corpo de prova).

A esclerometria é um método END normatizado pela ABNT NBR 7584 (2012) para a determinação da dureza do material concreto, para qual o LabEND (FEAGRI/UNICAMP) vem estudando as possíveis aplicações para avaliação de propriedades da madeira. De forma a contribuir nessa linha pesquisa, as correlações entre dureza Janka e os índices esclerométricos, proporcionará a expansão dos métodos não destrutivos (END) aplicados à madeira, possibilitando, inclusive, as aplicações em campo para avaliação da dureza da madeira.

1.2 Hipótese

No contexto deste trabalho, esta pesquisa foi desenvolvida com a hipótese de que a dureza da madeira pode ser estimada de forma não destrutiva pelo método esclerométrico.

1.3 Objetivos gerais

O objetivo desta pesquisa foi avaliar possíveis correlações entre a dureza Janka e o índice esclerométrico, que possibilitem estimar a dureza da madeira de forma não destrutiva, bem como analisar se a dureza Janka se distingue segundo as direções normais às fibras utilizando a ultrassonografia como padrão comparativo.

1.4 Objetivos específicos

Analisar experimentalmente a dureza Janka e os índices esclerométricos em espécies de madeiras tropicais, que correlacionados possibilitam a estimativa da dureza da madeira de forma não destrutiva.

Analisar a sensibilidade dos métodos de dureza Janka e de propagação de ondas ultrassônicas, segundo a direção de execução desses ensaios em peças de madeira serrada saturada ou estabilizada.

Para validar a hipótese e alcançar os objetivos desta pesquisa foram elaborados dois artigos científicos para publicação em revistas indexadas na área de ciências agrárias I com qualis B1 ou superior, como seguem nos itens 2 e 3.

2 Artigo: Dureza Janka de espécies de madeira folhosas estimada pelo método esclerométrico

“Janka hardness of hardwood species estimated by the sclerometric method”

Autores: Ingrid Zacharias Martins e Julio Soriano.

Dureza Janka de espécies de madeira folhosas estimada pelo método esclerométrico

Ingrid Zacharias Martins e Julio Soriano

RESUMO

A madeira possui características diferentes para cada espécie e tem conhecido o seu potencial para diversas aplicações na construção civil. A dureza Janka, obtida por ensaio convencional de laboratório, é uma propriedade mecânica que possibilita identificar a trabalhabilidade na madeira. Dentre os ensaios não destrutivos (END), buscam-se por métodos para inspeções de peças de madeira instaladas nas construções civis. Este trabalho teve por objetivo avaliar correlações entre a dureza Janka e o índice esclerométrico, que possibilitem a estimativa da dureza da madeira sem a necessidade de extração de corpos de prova. Os ensaios para obtenção dessas propriedades nas direções paralela e normal às fibras, foram realizados em quatro espécies de folhosas: garapa (*Apuleia leiocarpa*), cumaru (*Dipteryx odorata*), E. saligna (*Eucalyptus saligna*) e freijó (*Cordia goeldiana*) nas condições de madeira saturada e em equilíbrio com o ambiente. As correlações resultaram em funções crescentes e influenciadas pelas condições de umidade e direção dos ensaios. Com os resultados desta pesquisa pode-se concluir que os melhores coeficientes de correlação foram obtidos na condição de madeira estabilizada e na direção paralela às fibras.

Palavras-chave: ensaio não destrutivo, propriedades mecânicas; propriedades físicas; teor de umidade; direção anatômica.

2.1 Introdução

A madeira por ser um material biológico possui características físicas, anatômicas, químicas e mecânicas diferenciadas para cada espécie, e os procedimentos convencionais de avaliação da qualidade deste material como matéria-prima são lentos e caros (COUTO *et al.*, 2013). A escolha da espécie ou da classe de resistência para uma adequada aplicação, quer na construção civil, no setor moveleiro, na confecção de paletes e de equipamentos urbanos e rurais, requer conhecimento destas propriedades.

A dureza é uma propriedade mecânica importante para a caracterização de espécies florestais (COLENCI e BALLARIN, 2008), bem como para a escolha apropriada das espécies, tanto sob os aspectos das aplicações quanto da trabalhabilidade. Gonçalves *et al.* (2006) que avaliaram a dureza em duas espécies de eucalipto concluíram que o *Eucalyptus grandis* W.Hill *ex* Maiden é adequado para produção de móveis, enquanto que a espécie *Eucalyptus cloeziana* é mais adequada para fabricação de pisos. Lahr *et al.* (2010) pesquisaram a dureza Janka para a adequabilidade de catorze espécies tropicais de alta densidade para confecção de dormentes e pisos.

Concernente as correlações entre propriedades, destacam-se estudos que mostram bons resultados entre a dureza Janka e a densidade, com a dependência da direção anatômica e do teor de umidade da madeira (HOLMBERG, 2000 e LAHR *et al.*, 2010). Esses estudos evidenciaram a possibilidade de correlações da dureza Janka com outras propriedades, no caso a densidade que é uma das mais importantes propriedades dos materiais, podendo ser empregada como indicadores da qualidade e para a caracterização da madeira (COUTO *et al.*, 2013; MARTÍNEZ *et al.*, 2017).

A dureza da madeira caracterizada pelo método de ensaio de Janka requer a confecção de corpos de prova e a execução do ensaio em laboratório (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS ABNT (NBR 7190-1997 e AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS - ASTM D143, 2000). Pesquisas sugerem a implementação de métodos de ensaios não destrutivos (END) para a determinação dessa propriedade da madeira. Há amplos estudos para a avaliação da qualidade da madeira em espécies arbóreas a partir de END (SILVA *et al.*, 2014) e, atualmente, diversas técnicas de END estão sendo aplicadas para a classificação de peças estruturais de madeira (SEGUNDINHO *et al.*, 2012)

Métodos de medições da resistência a penetração de agulha (Pilodyn) e perfurações com brocas (Resistógrafo), são exemplo de END aplicados à madeira (LIMA *et al.*, 2007, SHIN-JUN *et al.*, 2010; ACUÑA *et al.* 2011; BOBADILLA *et al.* 2018), no entanto, são

técnicas que causam pequenas perfurações nas peças. No âmbito da busca por métodos e equipamentos END, uma contribuição importante foi o desenvolvimento do durômetro portátil (BALLARIN *et al.*, 2015 e ASSIS *et al.*, 2017), cujo sistema de massa em queda livre contém um transdutor de deslocamento e um processador eletrônico para avaliar a dureza dinâmica da madeira.

A esclerometria já de uso tradicional para avaliação da dureza superficial do concreto (ABNT NBR 7584:2012 e ASTM C805:2000), aplicada por um dispositivo portátil massa-mola, tem sido pesquisada como uma técnica END promissora para estimativa de propriedades da madeira (Soriano *et al.*, 2011a e Soriano *et al.*, 2015). A técnica desperta para as vantagens das aplicações em campo com um equipamento que não cause danos a peça ensaiada e cuja energia de impacto é uma constante do equipamento.

Este estudo teve por objetivo analisar experimentalmente a dureza Janka e os índices esclerométricos em espécies de madeiras tropicais, que correlacionados possibilitem a estimativa da dureza da madeira de forma não destrutiva.

2.2 Materiais e métodos

Com o propósito de se avaliar madeiras com propriedades físicas e mecânicas distintas, foram empregadas peças serradas de quatro espécies folhosas: cumaru (*Dipteryx odorata*), garapa (*Apuleia leocarpa*), E. saligna (*Eucalyptus saligna*) e freijó (*Cordia goeldiana*). Os corpos de prova foram extraídos de 09 vigas (60 mm x 160 mm x 1500 mm) de cada espécie, obtidas em pátio de madeireira e que se encontravam estabilizadas (com teor de umidade menor que 25%). Foram estabelecidos dois grupos para análise: madeira estabilizada e madeira saturada.

No caso do grupo de madeira saturada, as peças destinadas a extração dos corpos de prova foram submetidas ao procedimento de saturação com base na ABNT NBR 7190 (1997) que especifica para o cálculo da densidade básica, que os corpos de prova devem ser mantidos submersos em água até alcançar massa constante ou, que a variação entre duas medidas consecutivas seja de no máximo 0,5%. Com isso, essas peças ficaram submersas em água por um período mínimo de 16 dias.

Teor de umidade e Densidade

De cada uma das vigas foram extraídos dois corpos de prova medindo 20 mm x 30 mm x 50 mm e, seguindo os procedimentos da ABNT NBR 7190 (1997) foram determinados a densidade aparente e o teor de umidade. Para tanto, os corpos de prova foram secos em estufa a uma temperatura de 103° C +/- 2° C, até que a estabilidade dos valores de massa fosse alcançada, ou seja, quando a variação entre duas leituras consecutivas de massa resultou inferior a 0,5%.

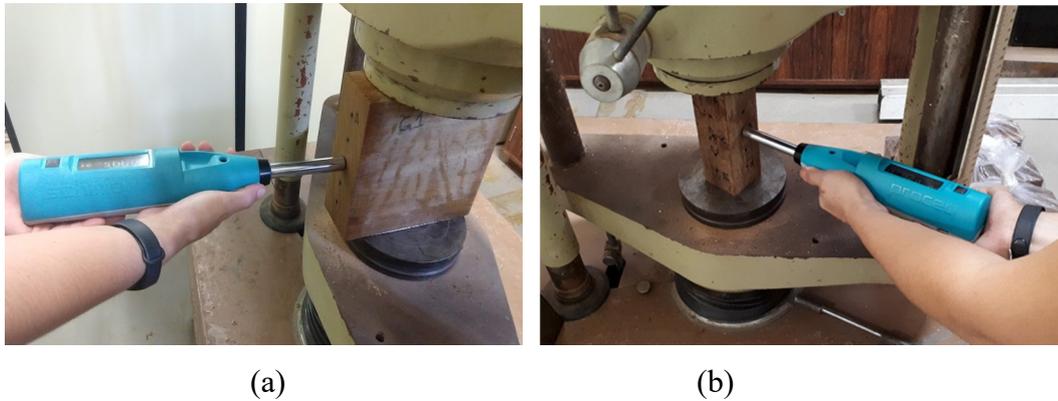
Esclerometria

As peças destinadas ao ensaio de esclerometria foram cortadas das vigas com seção transversal (60 mm x 160 mm), com o comprimento de 180 mm na direção paralela às fibras. Nessa direção, foram aplicados um total de 10 impactos, ou seja, 05 impactos a cada seção transversal do prisma (Figura 1), com o equipamento portátil (Digital Silver Schmidt BN, PROCEQ, Switzeland). Os pontos de impactos foram marcados na linha de eixo da seção e espaçados de 25 mm.

Para impedir o deslocamento de pequenas peças prismáticas durante a série de impactos esclerométricos, Soriano et al. (2011a) e Soriano *et al.* (2015) sugerem a fixação das peças numa prensa hidráulica, a uma intensidade baixa de tensão que assegure o comportamento elástico do material. Para cada espécie e na condição de madeira saturada, foi obtida, de corpos de prova padronizados (50 mm x 50 mm x 100 mm), a resistência média à compressão normal às fibras (ABNT NBR 7190, 1997), resultando para o cumaru (15,0 MPa), E. saligna (8,3 MPa), garapa (11,6 MPa) e freijó (4,4 MPa). Com base no percentual de 15% dessas resistências à compressão e na dimensão da seção transversal dos corpos de prova (50 mm x 50 mm), foram calculadas as forças aplicadas pela prensa para fixação dos prismas durante os impactos da esclerometria.

Após a aplicação dos impactos na direção paralela às fibras, cada prisma foi cortado na direção paralela às fibras para obtenção da peça com seção 60 mm x 60 mm x 180 mm, destinada ao ensaio de esclerometria na direção normal às fibras. Com esse procedimento de corte resultando nas dimensões de 60 mm da seção transversal, foi garantida a mesma rigidez aos impactos nas direções normais. Cada peça fixada na prensa hidráulica (Fig. 2.1) recebeu 05 impactos por face lateral, perfazendo um total de 20 impactos na direção normal às fibras.

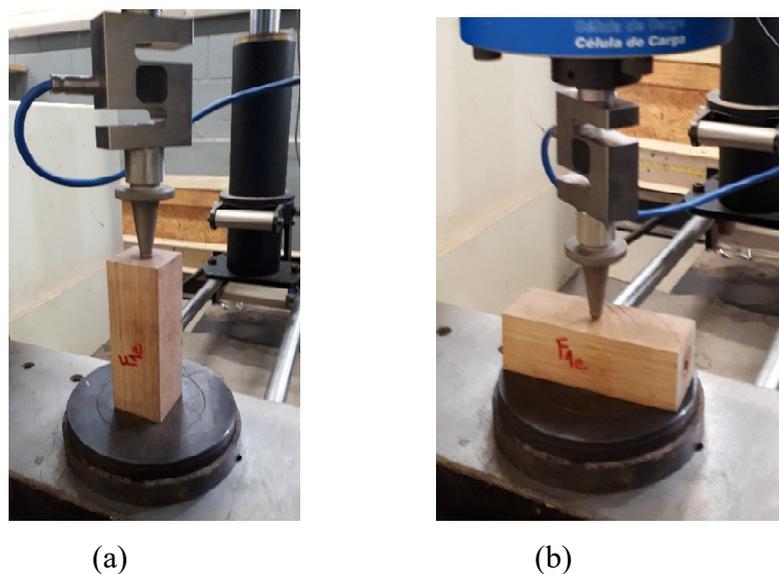
Figura 2.1. Esclerometria aplicada em prismas, (a) direção paralela às fibras (seção transversal frontal com 05 pontos de impacto), (b) direção normal às fibras (05 impactos por face lateral).



Dureza Janka

Os corpos de prova estabilizados e saturados para o ensaio de dureza Janka (Figura 2.2) foram confeccionados com as dimensões de 50 mm x 50 mm x 150 mm conforme padronização da ABNT (NBR 7190: 1997). Os ensaios foram realizados na máquina universal de ensaios (DL 30000, EMIC, Brasil), sendo realizadas duas penetrações na direção paralela às fibras (ou seja, uma penetração em cada face transversal, Fig. 2.2a) e quatro penetrações para direção normal às fibras (ou seja, uma penetração em cada face lateral do corpo de prova, Fig. 2.2b).

Figura 2.2. Ensaio de dureza Janka, (a) direção paralela às fibras e (b) direção normal às fibras.



Análise dos resultados

Para cada ensaio realizado (teor de umidade, densidade, esclerometria e dureza Janka), os dados coletados foram ordenados e avaliados através de alguns parâmetros como: média, desvio padrão, coeficiente de variação, assimetria e curtose.

A fim de se verificar a existência de diferenças estatisticamente significativas ou não, fez-se a comparação entre as médias, tanto dos impactos esclerométricos e da dureza Janka, ao nível de confiança de 95%. Por fim, para a obtenção das correlações entre os dois métodos, obteve-se a matriz de correlação e seu P-valor associado.

2.3 Resultados e Discussão

Teor de umidade e Densidade aparente

O procedimento de saturação das peças proporcionou, em relação a condição de madeira estabilizada, teores médios de umidades da ordem de 9,0 % a 13,4 % enquanto que, a condição saturada foi da ordem de 32,4 a 38,9% (Tab. 2.1). As densidades aparentes apresentaram valores maiores na condição saturada com exceção da espécie freijó que apresentou $465,9 \text{ kg.m}^{-3}$ para o grupo saturado e $484,5 \text{ kg.m}^{-3}$ para o grupo estabilizado.

Segundo o IPT (1989) as densidades básicas para o cumaru, garapa e freijó são, respectivamente, 908 kg.m^{-3} , 670 kg.m^{-3} e 480 kg.m^{-3} . O E. saligna não consta nesta referência. Contudo, comparativamente, nota-se que, para os lotes estudados as densidades aparentes resultaram maiores que essas respectivas densidades básicas, com exceção da espécie freijó que a densidade básica da referência IPT (1989) ficou compreendida entre os valores da densidade básica desta pesquisa (Tab. 2.1).

Tabela 2.1. Médias das densidades aparentes e teores de umidade.

Espécie	Lote	ρ (kg.m ⁻³) ⁽¹⁾	DP ⁽²⁾	CV (%) ⁽³⁾	U (%) ⁽⁴⁾	DP ⁽²⁾	CV (%) ⁽³⁾
cumaru	Saturado	1019,4	68,2	6,7	37,4	0,1	14,6
	Estabilizado	966,8	69,6	7,2	9,0	0,0	18,1
E. saligna	Saturado	913,5	87,4	9,6	36,8	0,1	18,4
	Estabilizado	858,3	78,1	9,1	13,4	0,0	3,4
garapa	Saturado	813,0	64,9	8,0	32,4	0,0	9,5
	Estabilizado	765,9	59,5	7,8	10,8	0,0	2,7
freijó	Saturado	465,9	68,2	14,6	38,9	0,1	17,9
	Estabilizado	484,5	70,2	14,5	11,2	0,0	5,4

(1)Densidade básica (2)Desvio Padrão (3)Coeficiente de variação (4)Teor de umidade

Esclerometria

Primeiramente, com a comparação entre as médias dos impactos esclerométricos (Tabela 2.2), foi verificado se os dados obtidos para a condição saturada apresentavam diferenças estatisticamente significativas em relação aos dados obtidos na condição estabilizada, os quais foram calculados considerando-se as duas direções anatômicas da madeira (paralela e normal às fibras).

Tabela 2.2. Médias dos impactos esclerométricos, para cada direção anatômica da madeira, obtidas nas duas condições de umidade.

Espécie	Direção	Médias		Intervalo de Confiança
		Saturada	Estabilizada	
cumaru	Paralela	36,4	33,2	[-7,105; -0,594]
	Normal	34,5	30,4	[-7,438; -0,707]
E. saligna	Paralela	30,4	27,3	[-7,038; 0,849]
	Normal	32,7	25,5	[-9,574; -4,783]
garapa	Paralela	35,3	27,9	[-11,088; -4,658]
	Normal	35,6	27,5	[-11,221; -5,040]
freijó	Paralela	13,5	14,9	[-1,828; 4,776]
	Normal	30,8	22,3	[-12,220; -4,779]

Pode-se notar (Tabela 2.2) que somente os intervalos de confiança que contêm o valor 0 (zero) são para o E. saligna e o freijó na direção paralela, não havendo, portanto, para essas espécies e direção, diferença estatisticamente significativa entre as médias dos dados obtidos pelas duas condições de umidade, no nível de confiança de 95%.

Dureza Janka

Assim como para a esclerometria, foram feitas as comparações entre as médias dos valores de dureza Janka (Tabela 2.3), para isso, foi verificado se os dados obtidos para a condição saturada apresentavam diferenças estatisticamente significativas em relação aos dados obtidos na condição estabilizada, os quais foram calculados considerando-se as duas direções anatômicas da madeira (paralela e normal).

Tabela 2.3. Médias dos valores de dureza Janka (N), para cada direção anatômica da madeira, obtidas nas duas condições de umidade.

Espécie	Comparação Direção	Médias		Intervalo de Confiança
		Saturado	Estabilizado	
cumaru	Paralela	11806,6	16112,1	[2869,8; 5741,3]
	Normal	12364,1	16440,0	[2137,4; 6014,4]
E. saligna	Paralela	6510,8	12767,3	[5116,8; 7396,3]
	Normal	6630,3	11347,6	[3219,0; 6215,7]
garapa	Paralela	7560,2	11212,4	[2301,2; 5003,2]
	Normal	7696,9	9958,1	[631,4; 3891,1]
freijó	Paralela	3431,0	4387,9	[-64,4; 1978,2]
	Normal	2986,6	3486,5	[-551,2; 1550,9]

É possível verificar que na Tabela 2.3, somente o freijó apresentou intervalos que contêm o valor 0 (zero) não havendo, portanto, diferença estatisticamente significativa entre as médias dos dados obtidos para ambas as condições de umidade, no nível de confiança de 95%, para ambas as direções, nesta espécie.

Correlações

Para cada espécie, com valores agrupados pelas direções anatômicas (paralela e normal às fibras) e pelas condições de umidade (saturada e estabilizada), foram calculados os índices esclerométricos (Tabela 2.4) que representam a média do conjunto de impactos (adimensionais), bem como a dureza Janka. Para um conjunto de dados apresentar uma distribuição normal, os valores de assimetria e curtose devem estar dentro do intervalo de -2 e 2. Portanto, para a espécie E. saligna foi excluído um dos valores para se respeitar esse intervalo, resultando nos valores apresentados nesta mesma tabela.

Por efeito da saturação das peças, em todos os casos, a propriedade de dureza Janka foi reduzida (Tab. 2.4), ou seja, quanto maior o teor de umidade, menor os valores de dureza Janka. Isto é visto nos estudos de Wiemann e Green (2007), que ao analisarem a dureza de

coníferas e folhosas, obtiveram valores maiores de dureza para a madeira seca em relação com a madeira verde, sendo de 31% para folhosas de clima temperado. No caso dos índices esclerométricos, com exceção da espécie freijó (direção paralela), a saturação fez aumentar o coeficiente de impacto, indicando haver uma maior restituição da energia quando as peças se encontram com teor de umidade maior que o teor de saturação das fibras.

Os coeficientes de variação para os resultados (Tab. 2.4) foram obtidos nos ensaios de dureza Janka para as quatro espécies analisadas, num intervalo de 8,8 a 35,5 % sendo a espécie cumaru, na direção paralela que apresentou os dados mais homogêneos. Já para os índices esclerométricos os coeficientes de variação resultaram de 5,7 a 22,7 %, sendo a garapa aquela que apresentou maior homogeneidade dos dados na direção normal.

Tabela 2.4. Índices esclerométricos e dureza Janka para as quatro espécies.

	Esclerometria				Janka (N)			
	Estabilizada		Saturada		Estabilizada		Saturada	
	E _P	E _N	E _P	E _N	J _P	J _N	J _P	J _N
<i>Cumaru (Dipteryx odorata)</i>								
Média	33,2	30,4	36,4	34,5	16112	16440	11806	12364
Desvio padrão	3,00	3,64	4,55	3,07	1418	2124	1454	1735
Coef. Var. (%)	9,0	12,0	12,5	8,9	8,8	12,9	12,3	14,0
Assimetria	-1,25	-0,51	-0,07	0,65	0,34	-0,35	0,41	1,06
Curtose	1,97	-0,50	0,01	-0,09	0,43	-0,20	-0,80	0,34
<i>E. saligna (Eucalyptus saligna)</i>								
Média	27,3	25,5	30,4	32,7	12767	10921	6510	6630
Desvio padrão	2,71	2,75	4,88	2,21	1190	791	1087	1520
Coef. Var. (%)	9,9	10,8	16,0	6,8	9,3	7,2	16,7	22,9
Assimetria	0,33	-0,30	0,62	0,24	0,92	1,03	1,59	1,69
Curtose	-1,45	-0,11	-0,81	-0,36	0,22	0,76	1,19	1,11
<i>Garapa (Apuleia leocarpa)</i>								
Média	27,4	27,5	35,3	35,6	11212	9958	7560	7696
Desvio padrão	3,28	3,88	3,16	2,02	1645	1850	973	1377
Coef. Var. (%)	12,0	14,1	8,9	5,7	14,7	18,6	12,8	17,9
Assimetria	1,45	0,70	0,19	1,06	0,44	0,98	0,83	0,44
Curtose	0,43	-0,77	-0,09	-0,45	-0,42	0,58	-1,03	-1,00
<i>Freijó (Cordia goeldiana)</i>								
Média	15,0	22,3	13,5	30,8	4387	3486	3431	2986
Desvio padrão	3,05	4,75	3,06	2,26	1015	1044	1028	1059
Coef. Var. (%)	20,4	21,3	22,7	7,3	23,1	29,9	30,0	35,5
Assimetria	0,87	-0,31	1,60	-0,79	-1,54	-1,50	-0,58	-0,40
Curtose	-0,16	-1,03	1,62	-0,80	0,48	0,14	-0,01	0,26

(*) as direções anatômicas são representadas pelos índices: P = paralela e N = normal.

Após a análise básica de estatística, foram obtidas as correlações entre os parâmetros de esclerometria e de dureza Janka, tendo para cada uma das espécies os correspondentes coeficientes de correlação e o P-valor para a associação das variáveis (Tabela 2.5). Tendo por objetivo desta etapa a verificação de correlações entre a dureza Janka e índices esclerométricos para uma mesma espécie, nota-se que em grande parte não se apresentam correlações significativas. As exceções ocorreram, com correlações estatisticamente significativas (com P-valor menor que 0,05) entre os valores de dureza Janka e esclerometria, na condição de madeira saturada e na direção paralela às fibras, para as espécies garapa ($R=0,81$) e freijó ($R=0,93$) e, na condição de madeira estabilizada e na direção paralela às fibras, para estas mesmas as espécies, garapa ($R=0,85$) e freijó ($R=0,75$).

Tabela 2.5 – Coeficiente de correlação e P-valor entre o índice esclerométrico e a dureza Janka.

Condição		Cumarú	E. saligna	Garapa	Freijó
Saturada e direção normal	R	0,48	0,38	0,63	0,12
	P-valor	(0,18)	(0,31)	(0,07)	(0,75)
Saturada e direção paralela	R	0,62	0,64	0,81	0,93
	P-valor	(0,07)	(0,06)	(0,01)	(0,00)
Estabilizada e direção normal	R	0,32	0,16	0,44	0,29
	P-valor	(0,40)	(0,69)	(0,23)	(0,45)
Estabilizada e direção paralela	R	0,67	0,31	0,85	0,75
	P-valor	(0,05)	(0,42)	(0,00)	(0,02)

P-valor apresentados entre parêntesis, em que valores menores que 0,05 implicam em correlações estatisticamente significativas.

Considerando-se os dados obtidos para as quatro espécies, obteve-se uma matriz onde não há separação por espécies, apenas pelas direções anatômicas e das condições de umidade (Tab. 2.6), com os valores dos índices esclerométricos e da dureza Janka. Pode-se notar que esta análise resultou em correlações estatisticamente significativas (com P-valor menor que 0,05) entre todos os valores de dureza Janka e índice esclerométrico. Destaca-se aquelas correlações de dureza Janka e índice esclerométrico para uma mesma condição de umidade e mesma direção anatômica (Tab. 2.7), observando o maior coeficiente de correlação na condição estabilizada e direção paralela ($R=0,93$) e menor coeficiente na condição saturada e direção normal ($R=0,50$).

Tabela 2.6 - Matriz dos coeficientes de correlação e P-valor para as quatro espécies.

	E _{EN}	E _{EP}	E _{SN}	E _{SP}	J _{EN}	J _{EP}	J _{SN}	J _{SP}
E _{EN}	-	0,52 (0,00)	0,60 (0,00)	0,50 (0,00)	0,61 (0,00)	0,58 (0,00)	0,62 (0,00)	0,62 (0,00)
E _{EP}	0,52 (0,00)	-	0,45 (0,01)	0,88 (0,00)	0,92 (0,00)	0,93 (0,00)	0,87 (0,00)	0,86 (0,00)
E _{SN}	0,60 (0,00)	0,45 (0,01)	-	0,53 (0,00)	0,45 (0,01)	0,43 (0,01)	0,50 (0,00)	0,48 (0,00)
E _{SP}	0,50 (0,00)	0,88 (0,00)	0,53 (0,00)	-	0,83 (0,00)	0,86 (0,00)	0,80 (0,00)	0,79 (0,00)
J _{EN}	0,61 (0,00)	0,92 (0,00)	0,45 (0,01)	0,83 (0,00)	-	0,98 (0,00)	0,94 (0,00)	0,94 (0,00)
J _{EP}	0,58 (0,00)	0,93 (0,00)	0,43 (0,01)	0,86 (0,00)	0,98 (0,00)	-	0,89 (0,00)	0,89 (0,00)
J _{SN}	0,62 (0,00)	0,87 (0,00)	0,50 (0,00)	0,80 (0,00)	0,94 (0,00)	0,89 (0,00)	-	0,99 (0,00)
J _{SP}	0,62 (0,00)	0,86 (0,00)	0,48 (0,00)	0,79 (0,00)	0,94 (0,00)	0,89 (0,00)	0,99 (0,00)	-

P-valor apresentados entre parêntesis, em que valores menores que 0,05 implicam em correlações estatisticamente significativas. As condições de umidade e direções anatômicas são representadas pelas letras: EN = estabilizada e normal, EP = estabilizada e paralela, SN = saturada e normal, SP = saturada e paralela.

Tabela 2.7 – Coeficiente de correlação e P-valor obtidos para as quatro espécies.

Condição de Umidade Direção Anatômica	Estabilizada Normal	Estabilizada Paralela	Saturada Normal	Saturada Paralela
R	0,61	0,93	0,50	0,79
P-valor	(0,00)	(0,00)	(0,00)	(0,00)

P-valor apresentados entre parêntesis, em que valores menores que 0,05 implicam em correlações estatisticamente significativas.

Com os dados obtidos para as quatro espécies de folhosas e discretizadas as condições de umidade (madeira saturada ou estabilizada), bem como as direções (paralela e normal), obteve-se as correlações entre dureza e índices esclerométricos (Figuras de 2.3 a 2.6).

Na direção normal, a condição de madeira estabilizada (Fig. 2.3) apresentou valores mais representativos que na condição de madeira saturada (Fig. 2.4).

Figura 2.3 - Linha de tendência para correlação Dureza Janka *versus* Índice esclerométrico na direção normal e na condição estabilizada.

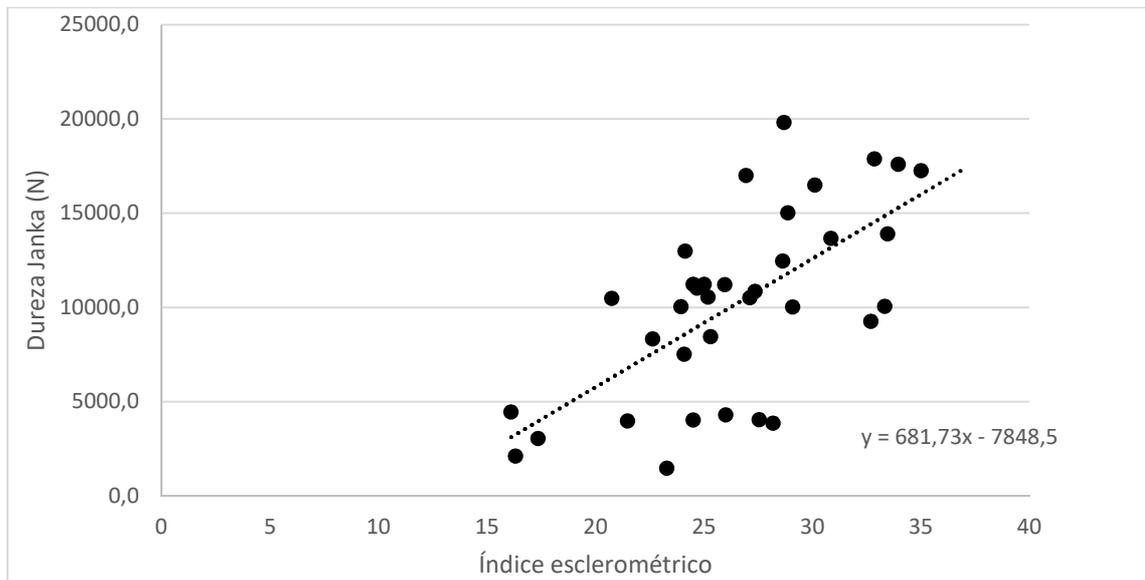
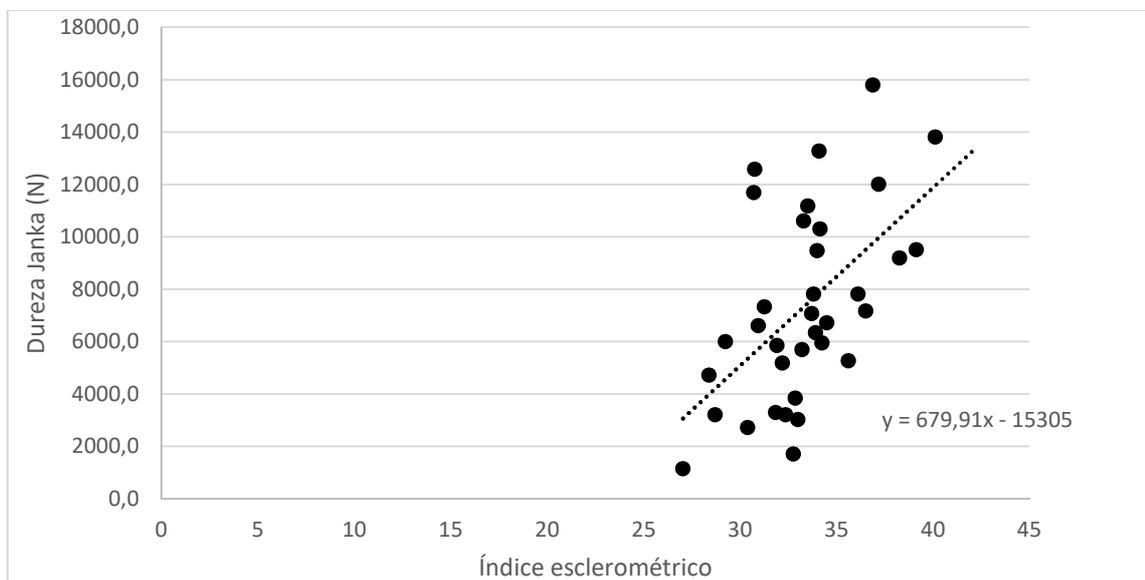


Figura 2.4 - Linha de tendência para correlação Dureza Janka *versus* Índice esclerométrico na direção normal e na condição saturada.



Assim como na direção normal, na direção paralela houve maiores valores de R para a condição estabilizada (Figura 2.5), se comparada com a condição saturada (Figura 2.6), o que já era esperado, já que nesta condição (direção paralela e condição estabilizada) a matriz de correlação (Tab. 2.6) apresentou o maior coeficiente de correlação, demonstrando assim que, nestas condições, há uma correlação forte da dureza Janka com a esclerometria.

Figura 2.5 - Linha de tendência para correlação Dureza Janka *versus* Índice esclerométrico na direção paralela e na condição estabilizada.

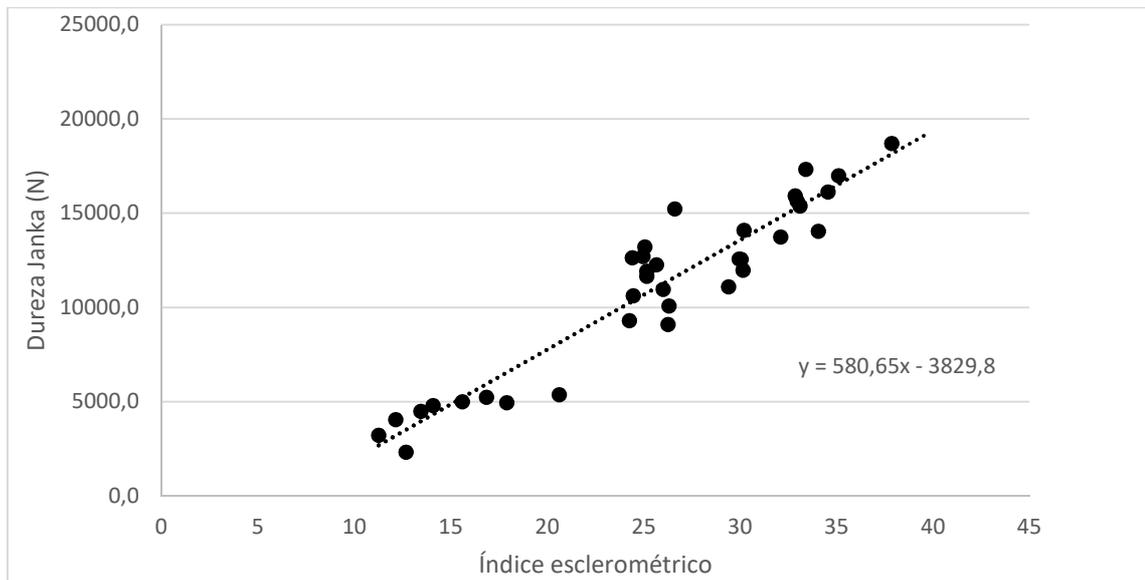
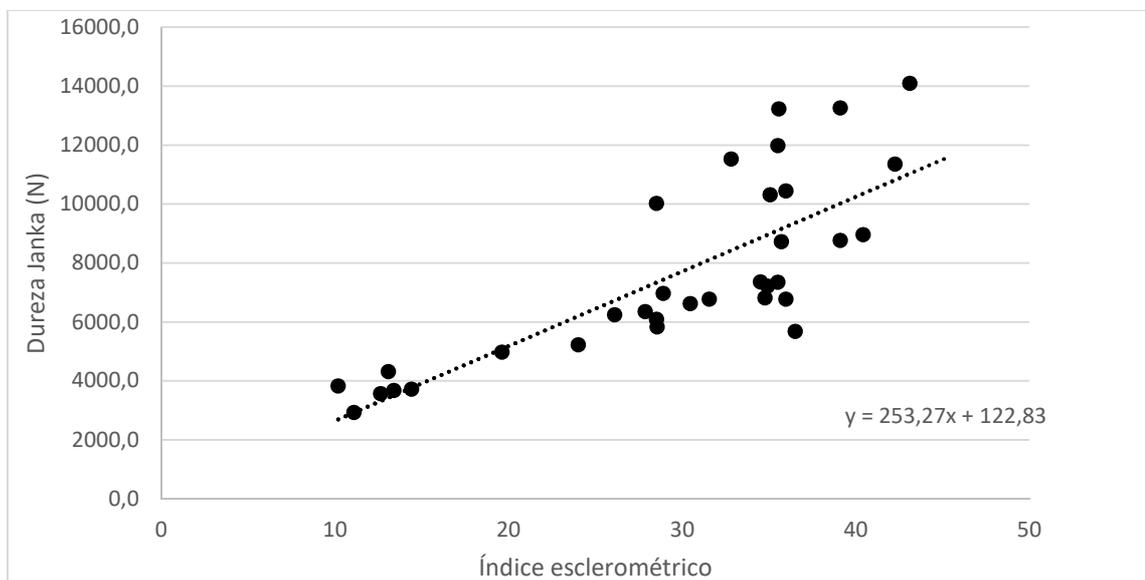


Figura 2.6 - Linha de tendência para correlação Dureza Janka *versus* Índice esclerométrico na direção paralela e na condição saturada.



Da análise dos resultados para ambas as direções (normal e paralela), foram obtidas correlações mais representativas na condição de madeira estabilizada.

Em relação a dureza Janka, a direção paralela apresentou correlações mais significativas com a esclerometria se comparada com as correlações obtidas para a direção normal. Lahr *et al.* (2010) obtiveram análises contrárias para as correlações da dureza Janka

com a densidade, na direção normal resultaram valores maiores de R em relação aos obtidos para a direção paralela.

Contudo, sugere-se que novas pesquisas podem ser realizadas em relação ao teor de umidade na condição de madeira estabilizada, em que neste trabalho variou de 9 a 13,4 %, para uma umidade padrão de forma que sejam estabelecidas curvas para a correção dos índices esclerométricos, ou ainda, verificar a existência, ou não, de expressões para representar o efeito dessa propriedade.

2.4 Conclusões

Os resultados obtidos nesta pesquisa com quatro espécies de madeira folhosa permitiram inferir que a dureza Janka e os índices esclerométricos podem ser correlacionados, sendo que as correlações mais fortes para essas duas propriedades mecânicas foram obtidas segundo a direção paralela às fibras da madeira.

As correlações representadas por funções crescentes (Janka *versus* índices esclerométricos) mostraram-se afetadas pelas condições de umidade dos corpos de prova, em que os coeficientes de correlação foram maiores nas peças em equilíbrio.

Esses resultados sugerem que a esclerometria tem o potencial como o método de inspeção END, que por correlações se possa estimar a dureza de madeira folhosa serrada em situação de umidade não saturada.

Agradecimentos: O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Os autores também agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de iniciação científica, à Fundação de Apoio à Pesquisa (FAEPEX) da Universidade de Campinas pelo apoio financeiro e à Faculdade de Engenharia Agrícola (FEAGRI/UNICAMP) pelo auxílio à pesquisa.

2.5 Referências Bibliográficas

- ACUÑA, L.; BASTERRA, L. A.; CASADO, M^a M.; LÓPEZ, G.; RAMÓN-CUETO, G.; RELEA, E.; MARTÍNEZ, C.; GONZÁLEZ, A. Application of resistograph to obtain the density and to differentiate wood species. *Materiales de Construcción*, v.61, n.303, p.451-464, jul./sep. 2011.
- ASSIS, A. A.; ALEXANDRE, R. P.; BALLARIN, A. W. Dynamic hardness of wood - measurements with an automated portable hardness tester. *HOLZFORSCHUNG*, v. 71, p. 383-389, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7190: Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997, 107p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7584: Concreto Endurecido – Avaliação da Dureza Superficial pelo Esclerômetro de Reflexão. Rio de Janeiro, 2012, 10p.
- ASTM C805 / C805M-13a, Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013.
- ASTM D143-94, Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2000.
- BALLARIN, A.; ASSIS, A.; ALEXANDRE, R. Development of an automated portable tester for evaluating dynamic hardness of wood. In: International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium, 19th, 2015, Rio de Janeiro, **Proceedings...** Madison, WI: United States Department of Agriculture, 688p. 131-139. 2015.
- BOBADILLA, I.; MARTÍNEZ, R. D.; ESTEBAN, M.; LLANA, D. F. Estimation of Wood density by the core drilling technique. *Holzforchung*, v.72, p.1051-1056, 2018.
- COLENCI, A. R.; BALLARIN, A. W. Utilização de dureza Brinell na avaliação de resistência mecânica de madeiras. *Revista Energia na Agricultura*, v.23, n.1, p.88-99, 2008.

COUTO, A. M.; TRUGILHO, P. F.; NEVES, T. A.; PROTÁSSIO, T. P.; SÁ, V. A. Modeling of basic density of wood from *Eucalyptus grandis* and *Eucalyptus urophylla* using nondestructive methods. **Cerne**, Lavras, v.19, n.1, p.27–34, jan./mar. 2013.

GONÇALEZ, J.C.; BREDA, L.C.S.; BARROS, J.F.M.; MACEDO, D.G.; JANIN, G.; COSTA, A.F.; VALE, A.T. Características Tecnológicas das Madeiras de *Eucalyptus grandis* W.Hill ex Maiden e *Eucalyptus cloeziana* F. Muell visando ao seu aproveitamento na indústria moveleira. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 16, n. 3, p.329-341, jul., 2006.

HOLMBERG, H. Influence of grain angle on Brinell hardness of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). **Holz als Roh-und Werkstoff**, v.58, p.91-95, 2000.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS -IPT. Informações sobre madeiras. Disponível em <www.ipt.br/informacoes_madeiras/>. Data de acesso: 10/12/2018.

LAHR, F.A.R.; CHAHUD, E.; FERNANDES, R.A.; TEIXEIRA, R.S. Influência da densidade na dureza paralela e na dureza normal às fibras para algumas espécies tropicais brasileiras. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, SP, v.38, n.86, p.153-158, jun., 2010.

LIMA, J.T.; HEIN, P.R.G.; TRUGILHO, P.F.; SILVA, J.R.M. Adequação do *Resistograph*® para a estimativa da densidade básica da madeira de *Eucalyptus*. **Scientia Forestalis**. Piracicaba, SP, n. 75, p. 85-93, set., 2007.

MARTÍNEZ, R.; CALVO, J.; ARRIAGA, F.; BOBADILLA, I. In situ density estimation of timber pieces by drilling residue analysis. **European Journal of Wood and Wood Products**, v.76, p.509-515, mar. 2017.

SEGUNDINHO, P. G.; COSSOLINO, L. C.; PEREIRA, A. H. A.; CALIL JUNIOR, C. Aplicação do método de ensaio das frequências naturais de vibração para obtenção do módulo de elasticidade de peças estruturais de madeira. **Revista Árvore**, v. 36, n. 6, p.1155-1161, 2012.

SHIN-JUN, W.; JIAN-MIN, X.; GUANG-YOU, L.; VUOKKO, R.; ZHAO-HUA, L. BAO-QI, L.; WEI, W. Use of the pilodyn for assessing wood properties in standing trees of *Eucalyptus* clones. **Journal of Forestry Research**, v.21, p.68-72, 2010.

SILVA, F.; HIGUCHI, N.; NASCIMENTO, C.C.; MATOS, J. L. M.; DE PAULA, E. V. C. M.; DOS SANTOS, J. Nondestructive evaluation of hardness in tropical wood. **Journal of Tropical Forest Science**, v. 26, n. 1, p.69-74. 2014.

SORIANO, J.; DA VEIGA, N. S.; MARTINS, I. Z.; Wood density estimation using the sclerometric method. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 73, p.1-6, 2015.

SORIANO, J.; GONÇALVES, R.; BERTOLDO P., C.; TRINCA, A. J. Aplicações do método de ensaio esclerométrico em peças de *eucalipto saligna sm*. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.15, n.3, p.322-328, mar., 2011a.

SORIANO, J.; GONÇALVES, R.; TRINCA, A. J.; LORENSANI, R. G. M.; MARTINS, I.Z. Janka and Esclerometer methods to predict the hardness of specimen of *Eucalyptus saligna*. In: International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium, 17, 2011b, Sopron. **Proceedings...** Sopron, v.1, p.1-7, 2011b.

WIEMANN, M. C.; GREEN, D. W. Estimating Janka hardness from specific gravity for tropical and temperate species. Research Paper FPL-RP-643. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 21 p. 2007.

3 Artigo: Comportamento da dureza Janka e do pulso ultrassônico segundo as direções de inspeção de peças de madeira

“Behavior of the Janka hardness and ultrasonic pulse according to directions of inspection of wood pieces”

Autores: Ingrid Zacharias Martins; Leonardo Roso Deldotti e Julio Soriano.

Comportamento da dureza Janka e da propagação do pulso ultrassônico segundo as direções de inspeção de peças de madeira serrada

Ingrid Zacharias Martins e Julio Soriano

RESUMO

A dureza é uma das propriedades mecânicas empregada para se definir a adequada empregabilidade de espécies, bem como para se avaliar o estado de integridade de peças de madeira. Diferentemente da técnica de inspeção por ultrassonografia, cujos resultados são diferenciados pelas três direções anatômicas da madeira, a dureza Janka é padronizada por um método de ensaio que não faz distinção segundo as direções normais às fibras (radial e tangencial). Este trabalho teve por objetivo analisar se a dureza Janka se distingue segundo as direções normais às fibras, tendo em vista que a orientação dos anéis de crescimento geralmente é desconhecida nas inspeções de peças serradas. Para isso, foram ensaiadas quatro espécies de folhosas: garapa (*Apuleia leiocarpa*), cumaru (*Dipteryx odorata*), E. saligna (*Eucalyptus saligna*) e freijó (*Cordia goeldiana*), na condição de madeira saturada e em equilíbrio com o ambiente. Em cada uma das faces dos corpos de prova foi cravado o dispositivo de dureza Janka, e a ultrassonografia foi aplicada com transdutores de ondas longitudinais com frequência de 100 kHz. A análise dos resultados, no que se refere as duas direções da seção transversal dos corpos de prova, mostrou que as distinções na velocidade de propagação de ondas ultrassônicas não foram identificadas na dureza Janka. Pode-se concluir que o desconhecimento da orientação dos anéis de crescimento na seção transversal das peças de madeira serrada não implica nos resultados da dureza Janka.

Palavras-chave: Ultrassonografia, propriedades mecânicas, folhosas, direções anatômicas.

3.1 Introdução

O crescente aumento do uso da madeira em construções civis, móveis e equipamentos, têm-se mostrado a grande necessidade e importância do conhecimento das características deste material. Sabe-se que, para destinar a madeira ao seu uso adequado, é necessário conhecer suas propriedades físicas e mecânicas. A ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (NBR 7190: 1997) descreve, para a determinação das propriedades da madeira diversos ensaios convencionais, ou seja, ensaios em que são necessários equipamentos e condições de laboratório.

A propriedade de dureza da madeira é um método normalizado pela ABNT NBR (7190:1997) através da metodologia de ensaio de Janka, que requer condições de laboratório, sendo necessário a extração de corpos de prova. Esta propriedade, segundo Colenci e Ballarin (2008) é de extrema importância para a caracterização de espécies florestais, além de prover a escolha apropriada das espécies, tanto sob os aspectos das aplicações quanto da trabalhabilidade sendo definida pelo quanto um dispositivo encontra resistência para penetrar na matéria (HOLMBERG, 2000; GONÇALEZ *et al.*, 2006 e LAHR *et al.*, 2010). A ABNT NBR 7190 (1997) estabelece que os ensaios de Janka devem ser realizados nas direções normal e paralela às fibras da madeira, considerando também o seu teor de umidade. Sabe-se que os resultados nos ensaios de dureza Janka dependem da densidade da madeira (COUTO *et al.*, 2013; MARTÍNEZ *et al.*, 2017) e, segundo Holmberg (2000), dependem também da direção anatômica das fibras.

Pelo fato da metodologia Janka não ser prevista para aplicações em campo, pesquisas sugerem a implementação de métodos de ensaios não destrutivos (END) para a determinação dessa propriedade mecânica da madeira, como é o caso do Pilodyn e do Resistógrafo (LIMA *et al.*, 2007, SHIN-JUN *et al.*, 2010; ACUÑA *et al.* 2011; BOBADILLA *et al.* 2018). Um exemplo recente dessa busca por métodos e equipamentos END, são as pesquisas que reportam o durômetro portátil (BALLARIN *et al.*, 2015 e ASSIS *et al.*, 2017).

A exemplo de aplicações END em madeira, a ultrassonografia, utilizada para obter a velocidade de propagação de ondas mecânicas em meios materiais, mostra-se como uma opção favorável devido a facilidade de operação e ao relativo baixo custo do equipamento (CARRASCO e AZEVEDO, 2003). Esses mesmos autores, afirmam que, a ultrassonografia na madeira, permite, através de sua sensibilidade, estabelecer correlações estatísticas entre a velocidade e as propriedades mecânicas da madeira. A técnica de ultrassonografia aplicada à

madeira de folhosas é normatizada pela ABNT (NBR 15521, 2007), podendo ser utilizada em condições de laboratório, de serrarias e de indústria.

O método da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas (VPU) é sensível as diferenças associadas às direções ortotrópicas da madeira. Com isto, segundo Bucur (2006), as constantes elásticas desse material podem ser obtidas por correlações da VPU e da densidade, por meio das equações de Christoffel. Essas equações, que são essenciais para a técnica de propagação de ondas acústicas, têm possibilitado a estimativa das propriedades da madeira (ALVES et al., 2015). A obtenção da VPU na madeira, segundo Calegari *et al.* (2008), requer transdutores com frequências adequadas e cujos resultados dependem de fatores, tais como: teor de umidade, propriedades anatômicas e morfológicas da madeira, presença de nós e rachadura.

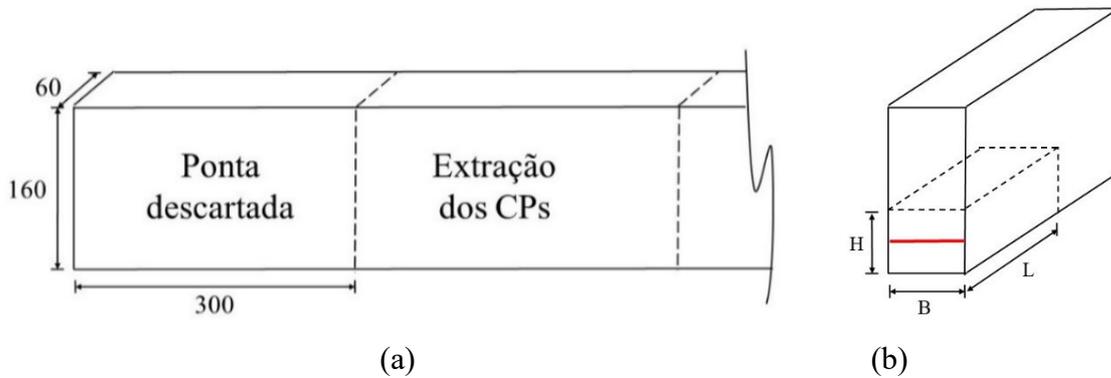
Neste contexto, o presente estudo teve como objetivo analisar a sensibilidade dos métodos de dureza Janka e de propagação de ondas ultrassônicas, segundo a direção de execução desses ensaios em peças de madeira serrada saturada e estabilizada.

3.2 Materiais e Métodos

Para o desenvolvimento desta pesquisa foram utilizadas quatro espécies de madeira tropicais de uso comum na construção civil, nas condições de madeira saturada e estabilizada, sendo elas o cumaru (*Dipteryx odorata*), a garapa (*Apuleia leocarpa*), o E. saligna (*Eucalyptus Saligna*) e o freijó (*Cordia goeldiana*). Para a extração dos corpos de prova, foram adquiridas 09 peças de cada espécie com dimensões de 60 mm x 160 mm x 1500 mm. Dessas peças, conforme procedimentos da ABNT NBR 7190 (1997) foram descartadas as pontas (extremidade com pelo menos cinco vezes a menor dimensão da seção transversal e não menor que 300 mm, Figura 3.1a) e extraídos os corpos de prova isentos de defeitos.

Durante a confecção dos corpos de prova utilizados nos ensaios de ultrassom e de dureza Janka, com seção transversal de 50 mm x 50 mm e 150 mm de comprimento, para a distinção das direções dos ensaios, foram demarcadas as direções 'B' e 'H' (Fig. 3.1b), paralelas a base e a altura das peças, respectivamente.

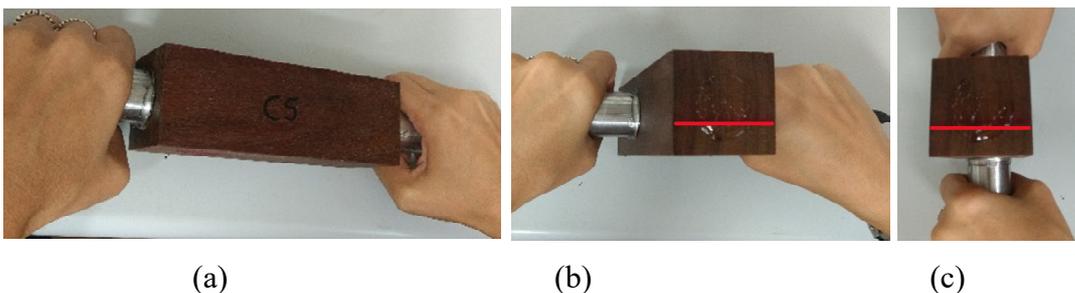
Figura 3.1. Extração dos corpos de prova, (a) descarte da ponta conforme ABNT NBR 7190 (1997), (b) demarcação da direção paralela à largura da peça identificada pela letra 'B'.



Os corpos de prova foram agrupados segundo às condições de umidade, ou seja, grupos de madeira saturada e estabilizada. As peças adquiridas em equilíbrio com ambiente, já apresentavam teores de umidades abaixo de 13,4 %. Para a condição de madeira saturada, os corpos de prova foram submetidos ao procedimento de saturação com base na ABNT NBR 7190 (1997) que especifica para o cálculo da densidade básica (quociente da massa seca pelo volume saturado), que o volume saturado é determinado em corpos de prova submersos em água até que os mesmos atinjam massa constante ou, que a variação da massa não exceda 0,5 % em relação à medida anterior. Portanto, para a saturação, os 36 corpos de prova (nove de cada espécie) ficaram submersos em água por um período de no mínimo de 16 dias.

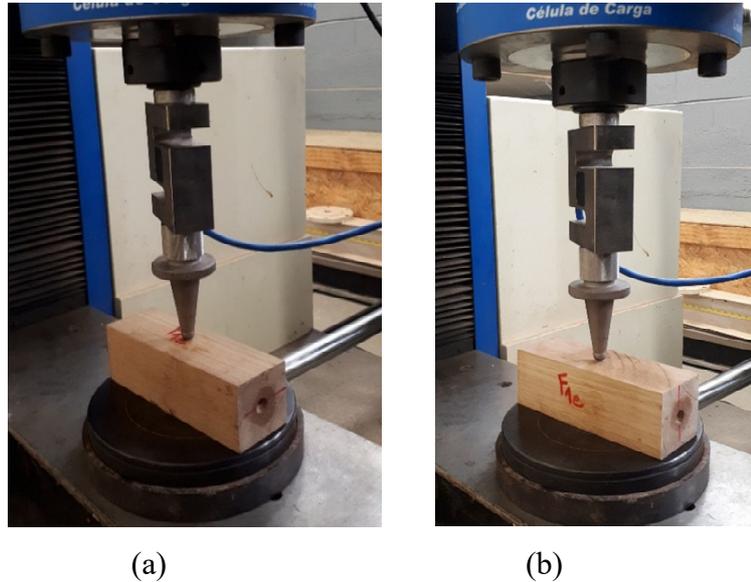
Para o ensaio de ultrassom foi utilizado o equipamento EP1000 (Olympus, Japão) com o transdutor de ondas longitudinais com frequência de 100 kHz. A cada uma das três direções do corpo de prova (Fig. 3.2), ou seja, longitudinal “L”, direção “B” e direção “H” foram tomadas três medições do tempo da propagação da onda ultrassônica.

Figura 3.2. Ultrassonografia aplicada nos corpos de prova, (a) direção longitudinal “L”, (b) direção “B”, (c) direção “H”.



Seguido da ultrassonografia, o ensaio de dureza Janka (Figura 3.3), foi realizado na máquina universal de ensaios (DL 30000, EMIC, Brasil), segundo as três direções (L, H e B) com duas penetrações para cada direção e, assim, totalizando 6 perfurações por corpo de prova.

Figura 3.3. Ensaio de dureza Janka, (a) direção “H”, (b) direção “B”.



Após os ensaios de ultrassom e dureza Janka, os dados obtidos foram analisados estatisticamente por meio de curtose e assimetria. Constatada a normalidade dos dados, estes foram analisados por meio de gráficos elaborados com os valores obtidos segundo as direções longitudinal (“L”) e normais (“H” e “B”).

3.3 Resultados e Discussão

3.3.1 Condição Saturada

Os resultados obtidos pelos ensaios de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas (VPU) e de dureza Janka, para as quatro espécies, na condição de madeira saturada (Tabelas 3.1 a 3.4) mostram todos os valores médios obtidos, mas para um conjunto de dados apresentar uma distribuição normal, os valores de assimetria e curtose devem estar dentro do intervalo de -2 e 2.

Tabela 3.1. Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas e dureza Janka, na condição saturada, para a espécie cumaru (*Dipteryx odorata*).

	VPU ($m s^{-1}$)*			Dureza Janka (N)*		
	V _L	V _H	V _B	J _L	J _H	J _B
Média	6198	2303	1693	11807	12361	12367
Desvio padrão	338,1	130,3	99,1	1454,5	1714,9	1787,8
Coef. Variação	5%	6%	6%	12%	14%	14%
Assimetria	-0,30	-0,12	-1,62	0,41	0,79	1,23
Curtose	-0,77	-0,43	1,35	-0,80	0,14	0,47

(*) as direções anatômicas são representadas pelos índices: L= longitudinal, B = em relação a base da extração do corpo de prova e H = altura.

Tabela 3.2. Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas e dureza Janka, na condição saturada, para a espécie E. saligna (*Eucalyptus Saligna*).

	VPU ($m s^{-1}$)*			Dureza Janka (N)*		
	V _L	V _H	V _B	J _L	J _H	J _B
Média	4130	1582	1603	6511	6590	6672
Desvio padrão	473,9	222,9	113,3	1087,8	1545,3	1531,2
Coef. Variação	11%	14%	7%	17%	23%	23%
Assimetria	-0,08	0,10	-0,37	1,59	1,67	1,63
Curtose	-0,27	-0,54	-0,39	1,19	1,12	0,86

(*) as direções anatômicas são representadas pelos índices: L= longitudinal, B = em relação a base da extração do corpo de prova e H = altura.

Tabela 3.3. Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas e dureza Janka, na condição saturada, para a espécie garapa (*Apuleia leocarpa*).

	VPU ($m s^{-1}$)*			Dureza Janka (N)*		
	V _L	V _H	V _B	J _L	J _H	J _B
Média	5264	2035	1658	7560	7624	7770
Desvio padrão	266,6	61,3	71,3	973,9	1271,7	1494,9
Coef. Variação	5%	3%	4%	13%	17%	19%
Assimetria	0,30	-0,63	0,49	0,83	0,50	0,37
Curtose	0,05	0,11	-0,32	-1,03	-0,98	-0,99

(*) as direções anatômicas são representadas pelos índices: L= longitudinal, B = em relação a base da extração do corpo de prova e H = altura.

Tabela 3.4. Velocidade de propagação de ondas ultrassônicas e dureza Janka, na condição saturada, para a espécie freijó (*Cordia goeldiana*).

	VPU (m s ⁻¹)*			Dureza Janka (N)*		
	V _L	V _H	V _B	J _L	J _H	J _B
Média	4608	1414	1521	3238	2776	2765
Desvio padrão	194,0	161,3	229,4	907,9	943,9	853,4
Coef. Variação	4%	11%	15%	28%	34%	31%
Assimetria	0,71	0,62	-0,86	-1,03	-1,21	-1,10
Curtose	-0,06	-0,09	-0,34	-0,13	0,24	-0,07

(*) as direções anatômicas são representadas pelos índices: L= longitudinal, B = em relação a base da extração do corpo de prova e H = altura.

Os valores de dureza Janka (Figuras 3.4a – 3.7a) correspondentes a cada um dos 09 corpos de prova foram agrupados segundo as direções longitudinal (“L”) e normais (“H” e “B”). Diferente dos resultados de Janka, as velocidades de propagação de ondas ultrassônicas, para todas as espécies (Figuras 3.4b – 3.7b) mostram de forma preponderante os valores elevados segundo a direção “L”.

Para a espécie cumaru, a ultrassonografia (Fig. 3.4b) evidenciou, para todos os corpos de prova, que as menores velocidades ocorreram segundo a direção “B” indicando a tendência dessa direção aproximar-se com a direção tangencial às fibras. No processo de desdobro de uma tora define-se o posicionamento dos anéis numa seção transversal da peça serrada, pois um plano de corte pode ser paralelo às direções anatômicas tangencial ou radial, bem como inclinado em relação a essas direções (UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE, USDA, 2010). No caso da dureza de Janka (Fig.3.4a) os valores obtidos segundo as direções “B” e ‘H’ mostram-se próximos, porém maiores que os obtidos na direção “L”. Segundo Lahr *et al.* (2010) os valores de Janka segundo as direções paralela e normal apresentam relações próximas a 1,0.

No caso do E. saligna (Fig. 3.5) e do freijó (Fig. 3.7) diferentemente das espécies cumaru e da garapa, a ultrassonografia mostrou que não houve o mesmo padrão da menor velocidade coincidir com a direção ‘B’, mas, ocorrendo também menores VPU para a direção ‘H’, o que indica que os planos de cortes foram alternados de uma peça para outra. Quanto a dureza Janka, para as espécies E. saligna e garapa os valores se alternam entre as três direções. Já, para o freijó os valores de Janka foram mais preponderantes para a direção longitudinal, havendo diferenças de 30 %, como apresentada pelo segundo corpo de prova.

Figura 3.6. Gráfico da espécie garapa (*Apuleia leocarpa*) nas 3 direções e condição saturada, (a) com os valores de dureza Janka, (b) com os valores de velocidade.

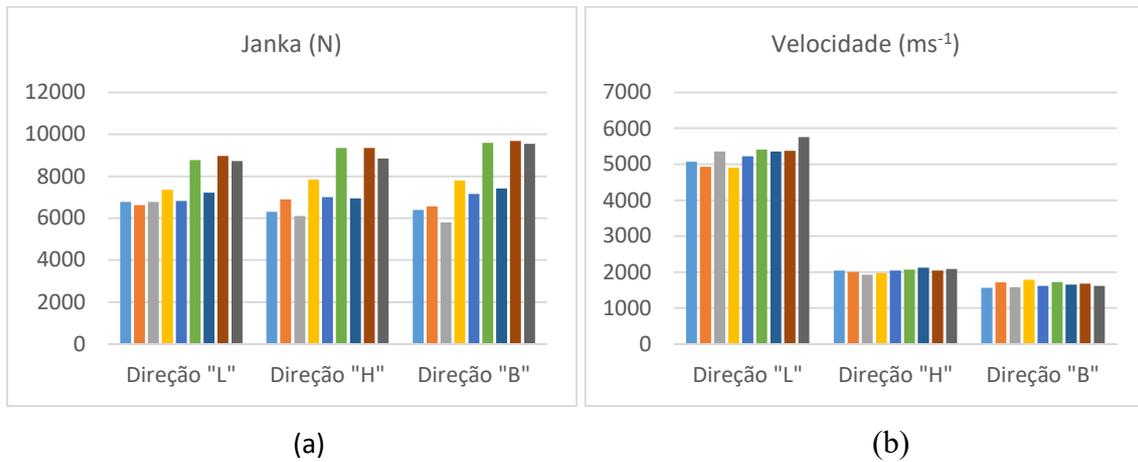


Figura 3.7. Gráfico da espécie freijó (*Cordia goeldiana*), nas 3 direções e condição saturada, (a) com os valores de dureza Janka, (b) com os valores de velocidade.

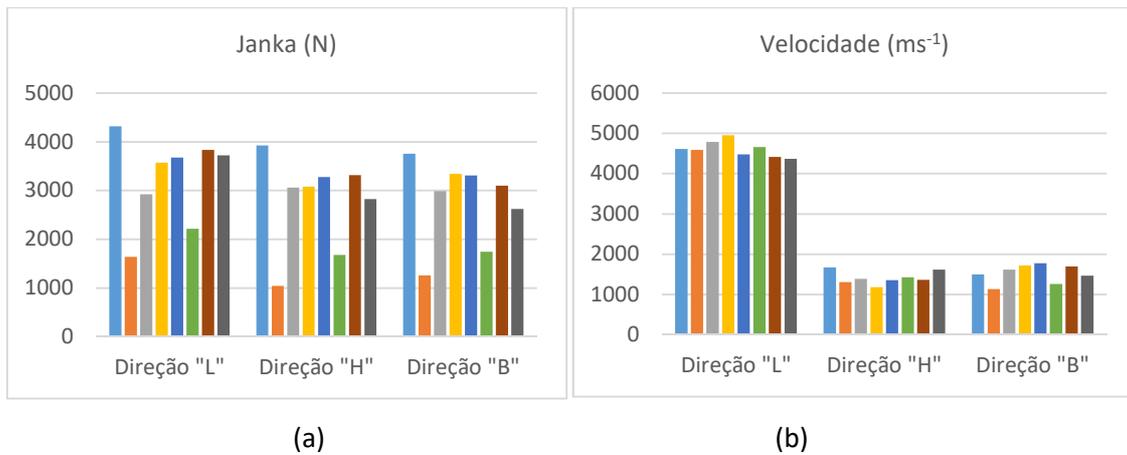


Tabela 3.5. Comparação entre a médias para as direções “H” e “B” nos ensaios de dureza Janka e velocidade condição saturada.

Espécie	Ensaio	Médias das Direções		Intervalo de Confiança
		“H”	“B”	
cumarú	Dureza Janka (N)	12361	12367	[-1756,120; 1744,960]
	Velocidade (m.s^{-1})	2303	1694	[493,781; 725,068]
E. saligna	Dureza Janka (N)	6589	6672	[-1619,800; 1454,690]
	Velocidade (m.s^{-1})	1582	1603	[-197,169; 156,228]
garapa	Dureza Janka (N)	7624	7770	[-1532,400; 1241,370]
	Velocidade (m.s^{-1})	2035	1658	[310,765; 443,678]
freijó	Dureza Janka (N)	2776	2765	[-953,492; 976,310]
	Velocidade (m.s^{-1})	1414	1521	[-319,556; 105,703]

Não se sabendo numa inspeção se “B” ou “H” é radial ou tangencial, mas que os valores de velocidade são decrescentes da direção radial para a tangencial, bem como na direção L a velocidade é muito maior do que para as outras duas direções, pode-se analisar nas Figuras 3.4 a 3.7 e nas Tabelas 3.1 a 3.4 que, os valores de Janka se diferenciaram em no máximo 26% entre as direções “H” e “B”, enquanto que os valores de velocidade de propagação de ondas entre as duas direções não apresentaram diferenças percentuais menores que 41%.

Pode-se notar (Tab. 3.5) que somente os intervalos de confiança que não contêm o valor 0 (zero) são para o ensaio de velocidade nas espécies cumaru e garapa. No ensaio de dureza Janka, as quatro espécies obtiveram intervalor de confiança contando o valor 0 (zero), não havendo, portanto, diferença estatisticamente significativa entre as médias das duas amostras no nível de confiança de 95,0%.

3.3.2 Condição Estabilizada

As Tabelas 3.6 a 3.9 apresentam os dados obtidos através dos ensaios em cada espécie, cumaru, *E. saligna*, garapa e freijó, respectivamente. Nelas constam a média, desvio padrão, coeficiente de variação, assimetria e curtose para cada direção da madeira nos ensaios de ultrassom e dureza Janka, para a condição de madeira estabilizada.

Nota-se nas quatro tabelas (Tabela 3.6 a 3.9) que, para esta condição de umidade, todos os valores apresentaram distribuição normal, ou seja, com valores de assimetria e curtose dentro do intervalo de -2 e 2. Pode-se inferir que, assim como na condição saturada, o ensaio de dureza Janka apresentou maiores coeficientes de variação em relação ao ensaio de ultrassom, para as três direções analisadas e as quatro espécies.

Tabela 3.6. Análise estatística para os ensaios de ultrassom e dureza Janka, na condição estabilizada, para a espécie cumaru (*Dipteryx odorata*).

	VPU (m s ⁻¹)*			Dureza Janka (N)*		
	V _L	V _H	V _B	J _L	J _H	J _B
Média	5158	2178	2430	16112	16088	16792
Desvio padrão	288,4	82,0	100,0	1418,6	2114,6	2238,6
Coef. Variação	6%	4%	4%	9%	13%	13%
Assimetria	-0,48	-0,09	0,17	0,34	0,42	-0,73
Curtose	-0,54	-0,39	0,08	0,43	0,66	-0,68

(*) as direções anatômicas são representadas pelos índices: L= longitudinal, B = em relação a base da extração do corpo de prova e H = altura.

Tabela 3.7. Análise estatística para os ensaios de ultrassom e dureza Janka na condição estabilizada, para a espécie *E. saligna* (*Eucalyptus Saligna*).

	VPU (m s ⁻¹)*			Dureza Janka (N)*		
	V _L	V _H	V _B	J _L	J _H	J _B
Média	4972	1718	1740	12487	10967	10875
Desvio padrão	317,9	131,9	267,1	900,4	857,8	830,5
Coef. Variação	6%	8%	15%	7%	8%	8%
Assimetria	-0,77	-0,64	0,73	0,46	0,40	1,11
Curtose	-0,13	0,60	0,63	0,37	0,34	0,23

(*) as direções anatômicas são representadas pelos índices: L= longitudinal, B = em relação a base da extração do corpo de prova e H = altura.

Tabela 3.8. Análise estatística para os ensaios de ultrassom e dureza Janka na condição estabilizada, para a espécie garapa (*Apuleia leocarpa*).

	VPU (m s ⁻¹)*			Dureza Janka (N)*		
	V _L	V _H	V _B	J _L	J _H	J _B
Média	5203	1964	2246	11450	10155	10370
Desvio padrão	174,8	86,6	44,3	1584,8	1819,4	1681,8
Coef. Variação	3%	4%	2%	14%	18%	16%
Assimetria	-0,21	0,97	0,52	0,23	1,07	1,07
Curtose	-0,62	-0,51	-0,47	-0,22	0,53	0,471

(*) as direções anatômicas são representadas pelos índices: L= longitudinal, B = em relação a base da extração do corpo de prova e H = altura.

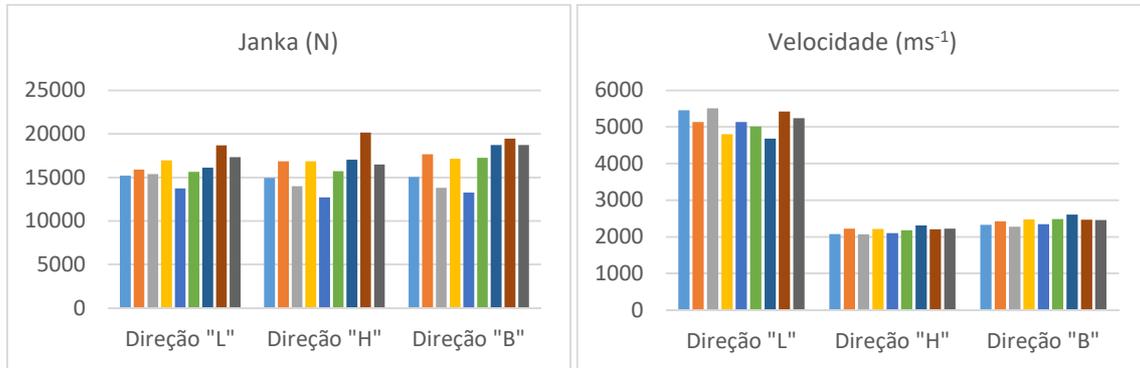
Tabela 3.9. Análise estatística para os ensaios de ultrassom e dureza Janka na condição estabilizada, para a espécie freijó (*Cordia goeldiana*).

	VPU (m s ⁻¹)*			Dureza Janka (N)*		
	V _L	V _H	V _B	J _L	J _H	J _B
Média	5124	1615	1730	4388	3425	3548
Desvio padrão	179,5	152,9	373,6	1015,4	1094,1	1025,9
Coef. Variação	3%	9%	17%	23%	32%	29%
Assimetria	0,42	0,37	-1,18	-1,54	-1,02	-1,74
Curtose	-0,96	-0,83	-0,16	0,48	-0,17	0,39

(*) as direções anatômicas são representadas pelos índices: L= longitudinal, B = em relação a base da extração do corpo de prova e H = altura.

Nas Figuras 3.8, 3.9, 3.10 e 3.11 constam dois gráficos de barras, um com os valores de dureza Janka e outro com os valores da velocidade, obtidos para cada corpo de prova avaliado (9 corpos de prova) para cada espécie estudada, na condição de madeira estabilizada.

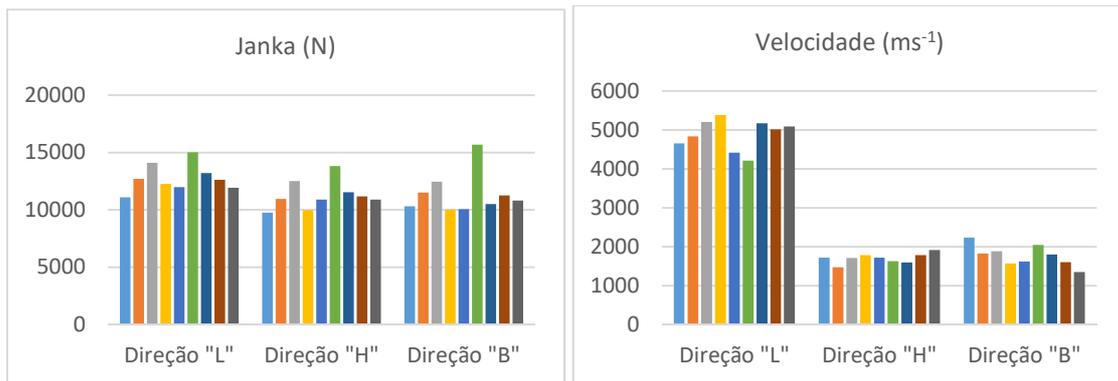
Figura 3.8. Gráfico da espécie cumaru (*Dipteryx odorata*), nas 3 direções e condição estabilizada, (a) com os valores de dureza Janka, (b) com os valores de velocidade.



(a)

(b)

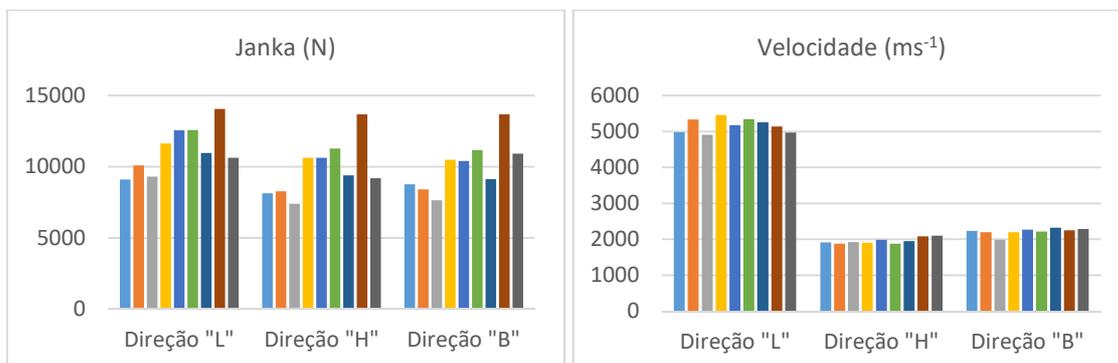
Figura 3.9. Gráfico da espécie E. saligna (*Eucalyptus saligna*), nas 3 direções e condição estabilizada, (a) com os valores de dureza Janka, (b) com os valores de velocidade.



(a)

(b)

Figura 3.10. Gráfico da espécie garapa (*Apuleia leocarpa*), nas 3 direções e condição estabilizada, (a) com os valores de dureza Janka, (b) com os valores de velocidade.



(a)

(b)

Figura 3.11. Gráfico da espécie freijó (*Cordia goeldiana*), nas 3 direções e condição estabilizada, (a) com os valores de dureza Janka, (b) com os valores de velocidade.

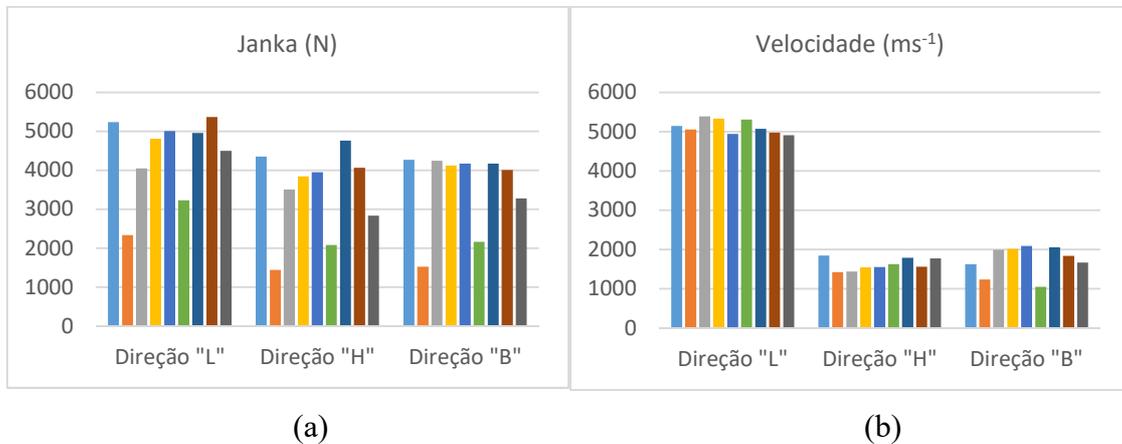


Tabela 3.10. Comparação entre a médias para as direções “H” e “B” nos ensaios de dureza Janka e velocidade condição estabilizada.

Espécie	Ensaio	Médias das Direções		Intervalo de Confiança
		“H”	“B”	
cumaru	Dureza Janka (N)	16088	16792	[-2880,430; 1471,640]
	Velocidade (m.s ⁻¹)	2178	2430	[-343,371; -160,607]
E. saligna	Dureza Janka (N)	10967	10875	[-813,034; 997,728]
	Velocidade (m.s ⁻¹)	1718	1740	[-247,996; 203,859]
garapa	Dureza Janka (N)	10155	10370	[-2093,710; 1663,820]
	Velocidade (m.s ⁻¹)	1964	2246	[-355,282; -207,698]
freijó	Dureza Janka (N)	3425	3548	[-1183,420; 936,288]
	Velocidade (m.s ⁻¹)	1615	1730	[-400,372; 170,180]

Assim como na condição saturada, nota-se pelas figuras que pelo método Janka houve uma máxima variação de 3% entre as direções “H” e “B” enquanto que nos resultados de velocidade, houve uma variação máxima de 12%. Obtendo, para ambas as condições de umidade, uma grande variação nos resultados de dureza Janka para a espécie freijó, nas três direções anatômicas, apresentando as maiores diferenças entre cada corpo de prova ensaiado.

Também, pode-se notar (Tab. 3.10) que somente os intervalos de confiança que não contêm o valor 0 (zero) são para o ensaio de velocidade nas espécies cumaru e garapa, o mesmo que ocorreu na condição saturada. Portanto, também no ensaio de dureza Janka, as quatro espécies obtiveram intervalo de confiança contendo o valor 0 (zero), não havendo, portanto, diferença estatisticamente significativa entre as médias das duas direções no nível de confiança de 95,0%.

3.4 Conclusões

Os resultados obtidos nesta pesquisa com quatro espécies de madeira folhosa permitem inferir que:

As maiores variações nos resultados de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas foram obtidas nas peças em condições de madeira saturada, sendo que, as maiores variações nos valores de dureza Janka, foram em peças de madeira estabilizada.

O comportamento da propriedade de dureza Janka, diferentemente da propagação de ondas ultrassônicas, não se distingue segundo a orientação dos anéis de crescimento numa seção de peça de madeira serrada.

Na direção paralela às fibras, em que ocorrem as maiores VPU, a dureza Janka não se diferenciou significativamente em relação a direção normal às fibras.

Esses resultados fundamentam novas técnicas que possibilitem a estimativa da propriedade da dureza da madeira, que possam ser também aplicadas nas inspeções de peças em serviço e sem a necessidade de se conhecer a orientação dos anéis de crescimento na seção transversal.

Agradecimentos: O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Os autores também agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de iniciação científica, à Fundação de Apoio à Pesquisa (FAPEX) da Universidade de Campinas pelo apoio financeiro e à Faculdade de Engenharia Agrícola (FEAGRI/UNICAMP) pelo auxílio à pesquisa.

3.5 Referências Bibliográficas

ACUÑA, L.; BASTERRA, L. A.; CASADO, M^a M.; LÓPEZ, G.; RAMÓN-CUETO, G.; RELEA, E.; MARTÍNEZ, C.; GONZÁLEZ, A. Application of resistograph to obtain the density and to differentiate wood species. *Materiales de Construcción*, v.61, n.303, p.451-464, jul./sep. 2011.

- ALVES, R.C., MANTILLA, J.N.R, BREMER, C.F., CARRASCO, V. M. “Application of Acoustic Tomography and Ultrasonic Waves to Estimate Stiffness Constants of Muiracatiara Brazilian Wood”, **Bioresources**, v. 10, n. 1, p.1845-1856, 2015.
- ASSIS, A. A.; ALEXANDRE, R. P.; BALLARIN, A. W. Dynamic hardness of wood - measurements with an automated portable hardness tester. **HOLZFORSCHUNG**, v. 71, p. 383-389, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15521: Ensaio não destrutivo — Ultra-som — Classificação mecânica de madeira serrada de dicotiledôneas. Rio de Janeiro, 2007, 8p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7190: Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997, 107p.
- BALLARIN, A.; ASSIS, A.; ALEXANDRE, R. Development of an automated portable tester for evaluating dynamic hardness of wood. In: International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium, 19th, 2015, Rio de Janeiro, **Proceedings...** Madison, WI: United States Department of Agriculture, 688p. 131-139. 2015.
- BOBADILLA, I.; MARTÍNEZ, R. D.; ESTEBAN, M.; LLANA, D. F. Estimation of Wood density by the core drilling technique. **Holzforchung**, v.72, p.1051-1056, 2018.
- BUCUR, V. Acoustics of Wood. 2^a ed. Springer Series in Wood Science, v. 1431, n. 8563, 393 p., 2006 apud BUCUR V. Wood structural anisotropy estimated by invariants. **International Association of Wood Anatomists**. Bulletin, p. 67–74, 1988.
- CALEGARI, L.; STANGERLIN, D. M.; SANTINI, E. J.; HASELEIN, C. R.; GATTO, D. A.; CARMO, P. I. O.; SILVA FILHO, L. C. P. Avaliação de alguns fatores influentes na velocidade ultra-sônica na madeira. **Floresta**, Curitiba, v. 38, n. 4, p. 607-615, out./dez. 2008.

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

COLENCI, A. R.; BALLARIN, A. W. Utilização de dureza Brinell na avaliação de resistência mecânica de madeiras. **Revista Energia na Agricultura**, v.23, n.1, p.88-99, 2008.

COUTO, A. M.; TRUGILHO, P. F.; NEVES, T. A.; PROTÁSSIO, T. P.; SÁ, V. A. Modeling of basic density of wood from *Eucalyptus grandis* and *Eucalyptus urophylla* using nondestructive methods. **Cerne**, Lavras, v.19, n.1, p.27–34, jan./mar. 2013.

GONÇALEZ, J.C.; BREDA, L.C.S.; BARROS, J.F.M.; MACEDO, D.G.; JANIN, G.; COSTA, A.F.; VALE, A.T. Características Tecnológicas das Madeiras de *Eucalyptus grandis* W.Hill ex Maiden e *Eucalyptus cloeziana* F. Muell visando ao seu aproveitamento na indústria moveleira. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 16, n. 3, p.329-341, jul., 2006.

HOLMBERG, H. Influence of grain angle on Brinell hardness of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). **Holz als Roh-und Werkstoff**, v.58, p.91-95, 2000.

LAHR, F.A.R; CHAHUD, E.; FERNANDES, R.A.; TEIXEIRA, R.S. Influência da densidade na dureza paralela e na dureza normal às fibras para algumas espécies tropicais brasileiras. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, SP, v.38, n.86, p.153-158, jun., 2010.

LIMA, J.T.; HEIN, P.R.G.; TRUGILHO, P.F.; SILVA, J.R.M. Adequação do *Resistograph*® para a estimativa da densidade básica da madeira de *Eucalyptus*. **Scientia Forestalis**. Piracicaba, SP, n. 75, p. 85-93, set., 2007.

MARTÍNEZ, R.; CALVO, J.; ARRIAGA, F.; BOBADILLA, I. In situ density estimation of timber pieces by drilling residue analysis. **European Journal of Wood and Wood Products**, v.76, p.509-515, mar. 2017.

SHIN-JUN, W.; JIAN-MIN, X.; GUANG-YOU, L.; VUOKKO, R.; ZHAO-HUA, L. BAO-QI, L.; WEI, W. Use of the pilodyn for assessing wood properties in standing trees of *Eucalyptus* clones. **Journal of Forestry Research**, v.21, p.68-72, 2010.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE, FOREST SERVICE, Forest Products Laboratory, USDA, **Wood handbook - Wood as an engineering material**. General Technical Report FPL-GTR-190. Madison: WI, 2010.

4 Discussão Geral

A avaliação das quatro espécies de madeira folhosas com densidades distintas utilizadas nesta pesquisa, permitiram desenvolver análise com o alcance do objetivo proposto, de forma a concluir acerca da possibilidade da dureza Janka pode ser correlacionada com os resultados do método de ensaio não destrutivos esclerométrico.

No primeiro artigo, foi analisado através dos impactos esclerométricos possíveis correlações com a dureza Janka. Para isto, obteve-se primeiramente dados estatísticos como média, desvio padrão, coeficiente de variação, assimetria e curtose para as duas direções da madeira (normal e paralela) e nas duas condições de umidade (saturada e estabilizada). Com os valores de assimetria e curtose, verificou-se a distribuição normal dos dados.

Após a análise básica de estatística, obteve-se por espécie a matriz de correlação e P-valor para a associação das variáveis e com isso, pode-se notar que para cada direção anatômica e para cada condição de umidade, não houve (por espécie isolada) um padrão nas correlações, sendo que a maioria das correlações não houve P-valor menor que 0,05.

Considerando então, o conjunto de dados obtidos para as quatro espécies, o que fundamenta uma correlação que abranja diversas espécies, pode-se notar que esta análise resultou em correlações estatisticamente significativas (com P-valor menor que 0,05) entre todos os valores de dureza Janka e índice esclerométrico. Destaca-se aquelas correlações de dureza Janka e índice esclerométrico para uma mesma condição de umidade e mesma direção anatômica, observando o maior coeficiente de correlação na condição estabilizada e direção paralela às fibras ($R=0,93$) e menor coeficiente na condição saturada e direção normal às fibras ($R=0,50$).

No estudo em que foi analisado o comportamento da dureza Janka em relação ao comportamento do pulso ultrassônico segundo as direções de inspeção de peças de madeira, os dados foram analisados estatisticamente, tendo sido considerada cada direção da madeira nos ensaios de ultrassom e dureza Janka, para a condição de madeira estabilizada. Obteve-se que todos os valores apresentaram distribuição normal, ou seja, com valores de assimetria e curtose dentro do intervalo de -2 e 2, com exceção dos dados para a espécie freijó na condição saturada, tendo sido excluído então um dos valores para se respeitar esse intervalo. Pode-se inferir também que, o ensaio de dureza Janka, apresentou maiores coeficientes de variação em relação ao ensaio de ultrassom, para as três direções analisadas e as quatro espécies.

Também foi possível obter, através de gráficos, que na condição saturada, é evidente que pelo método Janka houve uma máxima variação 3% entre as direções “H” e “B” enquanto que nos resultados de velocidade, houve uma variação máxima de 12%.

Não se sabendo numa inspeção se “B” ou “H” é radial ou tangencial, como foi adotado no Artigo 2, mas que os valores de velocidade são decrescentes da direção radial para a tangencial, bem como na direção L a velocidade é muito maior do que para as outras duas direções, pode-se analisar que, os valores de Janka se diferenciaram em no máximo 26% entre as direções “H” e “B”, enquanto que os valores de velocidade de propagação de ondas entre as duas direções não apresentaram diferenças percentuais maiores que 41% na condição de madeira saturada.

Assim como na condição saturada, houve uma máxima variação de 3% entre as direções “H” (paralela à altura da peça serrada) e “B” (paralela a base da peça serrada) pelo método Janka, enquanto que nos resultados de velocidade, houve uma variação máxima de 12%. Obtendo, para ambas as condições de umidade, uma grande variação nos resultados de dureza Janka para a espécie freijó, nas três direções anatômicas, apresentando as maiores diferenças entre cada corpo de prova ensaiado.

5 Conclusão

Os resultados obtidos nesta pesquisa com quatro espécies de madeira folhosa permitiram inferir que a dureza Janka e os índices esclerométricos podem ser correlacionados, sendo que as correlações mais fortes para essas duas propriedades mecânicas foram obtidas segundo a direção paralela às fibras da madeira.

As correlações representadas por funções crescentes (Janka *versus* índices esclerométricos) mostraram-se afetadas pelas condições de umidade dos corpos de prova, em que os coeficientes de correlação foram maiores nas peças em equilíbrio e com teores abaixo do teor de saturação das fibras. Esses resultados indicam que a esclerometria tem o potencial como o método de inspeção END, que por correlações se possa estimar a dureza de madeira folhosa serrada em situação de umidade não saturada.

As maiores variações nos resultados de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas foram obtidas nas peças em condições de madeira saturada, sendo que, as maiores variações nos valores de dureza Janka, foram em peças de madeira estabilizada.

O comportamento da propriedade de dureza Janka, diferentemente da propagação de ondas ultrassônicas, não se distingue segundo a orientação dos anéis de crescimento numa seção de peça de madeira serrada.

Na direção paralela às fibras, em que ocorrem as maiores VPU, a dureza Janka não se diferenciou significativamente em relação a direção normal às fibras.

Esses resultados fundamentam novas técnicas que possibilitem a estimativa da propriedade da dureza da madeira, que possam ser também aplicadas nas inspeções de peças em serviço e sem a necessidade de se conhecer a orientação dos anéis de crescimento na seção transversal.

6 Referências Bibliográficas

- ACUÑA, L.; *et al.*. Application of resistograph to obtain the density and to differentiate wood species. *Materiales de Construcción*, v.61, n.303, p.451-464, jul./sep. 2011.
- ALVES, R.C., *et al.*. “Application of Acoustic Tomography and Ultrasonic Waves to Estimate Stiffness Constants of Muiracatiara Brazilian Wood”, *Bioresources*, v. 10, n. 1, p.1845-1856, 2015.
- ASSIS, A. A.; ALEXANDRE, R. P.; BALLARIN, A. W. Dynamic hardness of wood - measurements with an automated portable hardness tester. *HOLZFORSCHUNG*, v. 71, p. 383-389, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15521: Ensaio não destrutivo — Ultra-som — Classificação mecânica de madeira serrada de dicotiledôneas. Rio de Janeiro, 2007, 8p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7190: Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997, 107p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7584: Concreto Endurecido – Avaliação da Dureza Superficial pelo Esclerômetro de Reflexão. Rio de Janeiro, 2012, 10p.
- ASTM C805 / C805M-13a, Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013.
- ASTM D143-94, Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2000.
- BALLARIN, A.; ASSIS, A.; ALEXANDRE, R. Development of an automated portable tester for evaluating dynamic hardness of wood. In: International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium, 19th, 2015, Rio de Janeiro, **Proceedings...** Madison, WI: United States Department of Agriculture, 688p. 131-139. 2015.

BOBADILLA, I.; *et al.*. Estimation of Wood density by the core drilling technique. **Holzforschung**, v.72, p.1051-1056, 2018.

BUCUR, V. Acoustics of Wood. 2^a ed. Springer Series in Wood Science, v. 1431, n. 8563, 393 p., 2006 apud BUCUR V. Wood structural anisotropy estimated by invariants. **International Association of Wood Anatomists**. Bulletin, p. 67–74, 1988.

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

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

COLENCI, A. R.; BALLARIN, A. W. Utilização de dureza Brinell na avaliação de resistência mecânica de madeiras. **Revista Energia na Agricultura**, v.23, n.1, p.88-99, 2008.

COUTO, A. M.; *et al.*. Modeling of basic density of wood from *Eucalyptus grandis* and *Eucalyptus urophylla* using nondestructive methods. **Cerne**, Lavras, v.19, n.1, p.27–34, jan./mar. 2013.

GONÇALEZ, J.C.; *et al.*. Características Tecnológicas das Madeiras de *Eucalyptus grandis* W.Hill ex Maiden e *Eucalyptus cloeziana* F. Muell visando ao seu aproveitamento na indústria moveleira. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 16, n. 3, p.329-341, jul., 2006.

HOLMBERG, H. Influence of grain angle on Brinell hardness of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). **Holz als Roh-und Werkstoff**, v.58, p.91-95, 2000.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS -IPT. Informações sobre madeiras. Disponível em <www.ipt.br/informacoes_madeiras/>. Data de acesso: 10/12/2018.

- LAHR, F.A.R.; *et al.*. Influência da densidade na dureza paralela e na dureza normal às fibras para algumas espécies tropicais brasileiras. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, SP, v.38, n.86, p.153-158, jun., 2010.
- LIMA, J.T.; *et al.*. Adequação do *Resistograph*® para a estimativa da densidade básica da madeira de *Eucalyptus*. **Scientia Forestalis**. Piracicaba, SP, n. 75, p. 85-93, set., 2007.
- MARTÍNEZ, R.; *et al.*. In situ density estimation of timber pieces by drilling residue analysis. **European Journal of Wood and Wood Products**, v.76, p.509-515, mar. 2017.
- SEGUNDINHO, P. G.; *et al.*. Aplicação do método de ensaio das frequências naturais de vibração para obtenção do módulo de elasticidade de peças estruturais de madeira. **Revista Árvore**, v. 36, n. 6, p.1155-1161, 2012.
- SHIN-JUN, W.; *et al.*. Use of the pilodyn for assessing wood properties in standing trees of *Eucalyptus* clones. **Journal of Forestry Research**, v.21, p.68-72, 2010.
- SILVA, F.; *et al.*. Nondestructive evaluation of hardness in tropical wood. **Journal of Tropical Forest Science**, v. 26, n. 1, p.69-74. 2014.
- SORIANO, J.; DA VEIGA, N. S.; MARTINS, I. Z.; Wood density estimation using the sclerometric method. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 73, p.1-6, 2015.
- SORIANO, J.; *et al.*. Aplicações do método de ensaio esclerométrico em peças de *eucalipto saligna sm*. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.15, n.3, p.322-328, mar., 2011a.
- SORIANO, J.; *et al.*. Janka and Esclerometer methods to predict the hardness of specimen of *Eucalyptus saligna*. In: International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium, 17, 2011b, Sopron. **Proceedings...** Sopron, v.1, p.1-7, 2011b.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE, FOREST SERVICE, Forest Products Laboratory, USDA, **Wood handbook - Wood as an engineering material**. General Technical Report FPL-GTR-190. Madison: WI, 2010.

WIEMANN, M. C.; GREEN, D. W. Estimating Janka hardness from specific gravity for tropical and temperate species. Research Paper FPL-RP-643. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 21 p. 2007.

Apêndice 1. Densidade e Teor de Umidade

Tabela A1.1 Valores de densidade e teor de umidade para a espécie cumaru.

CP	Saturado		Estabilizado	
	Densidade (kg.m ⁻³)	Teor de umidade (%)	Densidade (kg.m ⁻³)	Teor de umidade (%)
C1	1003,9	43	943,0	10
C2	1074,2	39	1036,7	7
C3	966,0	45	908,3	10
C4	1045,7	40	997,6	9
C5	883,8	35	832,4	10
C6	1008,2	42	977,3	8
C7	1058,4	32	1040,6	7
C8	1121,0	30	1031,9	11
C9	1012,9	31	933,5	11
Média	1019,4	37	966,8	9
DP*	68,2	0,1	69,6	0,0
CV**	7%	15%	7%	18%

*Desvio Padrão **Coeficiente de variação

Tabela A1.2 Valores de densidade e teor de umidade para a espécie E. saligna.

CP	Saturado		Estabilizado	
	Densidade (kg.m ⁻³)	Teor de umidade (%)	Densidade (kg.m ⁻³)	Teor de umidade (%)
E1	793,9	38	743,7	13
E2	1020,9	30	943,3	14
E3	950,5	35	899,9	14
E4	807,9	42	765,1	13
E5	824,5	31	802,9	14
E6	1015,7	27	971,9	14
E7	892,4	49	830,5	13
E8	964,5	38	885,3	13
E9	950,9	41	881,7	14
Média	913,5	37	858,3	13
DP*	87,4	0,1	78,1	0,0
CV**	10%	18%	9%	3%

*Desvio Padrão **Coeficiente de variação

Tabela A1.3 Valores de densidade e teor de umidade para a espécie garapa.

CP	Saturado		Estabilizado	
	Densidade (kg.m ⁻³)	Teor de umidade (%)	Densidade (kg.m ⁻³)	Teor de umidade (%)
G1	753,5	34%	709,4	11%
G2	760,8	30%	715,2	10%
G3	718,9	32%	678,0	11%
G4	851,0	30%	796,8	11%
G5	841,6	29%	791,7	11%
G6	836,0	39%	799,6	11%
G7	780,8	32%	739,4	10%
G8	930,6	31%	868,8	11%
G9	843,9	35%	794,1	11%
Média	813,0	32%	765,9	11%
DP*	64,9	0,0	59,5	0,0
CV**	8%	9%	8%	3%

*Desvio Padrão **Coeficiente de variação

Tabela A1.4 Valores de densidade e teor de umidade para a espécie feijó.

CP	Saturado		Estabilizado	
	Densidade (kg.m ⁻³)	Teor de umidade (%)	Densidade (kg.m ⁻³)	Teor de umidade (%)
F1	518,5	34	555,2	12
F2	309,8	46	342,0	11
F3	487,1	37	507,1	11
F4	488,0	32	511,0	11
F5	515,8	32	542,6	10
F6	424,1	36	420,8	11
F7	518,2	43	525,6	11
F8	498,9	37	521,6	10
F9	433,2	53	434,9	11
Média	465,9	39	484,5	11
DP*	68,2	0,1	70,2	0,0
CV**	15%	18%	14%	5%

*Desvio Padrão **Coeficiente de variação

Apêndice 2. Dados de esclerometria e dureza Janka para cada corpo de prova

Tabela A2.1 – Dados de todos os corpos de prova para a espécie cumaru.

	Esclerometria				Janka (N)			
	Estabilizado		Saturado		Estabilizado		Saturado	
	E _P	E _N	E _P	E _N	J _P	J _N	J _P	J _N
C1	26,6	28,9	35,1	33,3	15217,8	15015,5	10321,6	10604,3
C2	32,9	35,0	35,6	40,1	15913,3	17259,6	13231,6	13817,8
C3	33,1	33,5	36,0	33,5	15373,2	13911,1	10451,3	11176,4
C4	35,1	26,9	35,5	34,1	16979,3	16999,2	11983,4	13281,0
C5	32,1	24,1	28,5	34,1	13736,7	12985,4	10024,0	10306,8
C6	33,0	30,1	32,8	30,7	15654,1	16501,8	11530,3	11692,7
C7	34,6	32,9	42,3	37,2	16123,9	17883,8	11357,1	12013,6
C8	37,9	28,7	43,1	36,9	18691,1	19806,6	14096,3	15796,8
C9	33,4	34,0	39,1	30,8	17319,7	17597,2	13263,5	12587,8

(*) as direções anatômicas são representadas pelos índices: P = paralela e N = normal.

Tabela A2.2 – Dados de todos os corpos de prova para a espécie E. saligna.

	Esclerometria				Janka (N)			
	Estabilizado		Saturado		Estabilizado		Saturado	
	E _P	E _N	E _P	E _N	J _P	J _N	J _P	J _N
E1	29,4	23,9	26,1	31,9	11104,8	10044,2	6245,2	5852,3
E2	25,0	25,0	28,9	31,3	12697,8	11228,7	6967,3	7331,6
E3	30,2	28,6	35,5	33,8	14086,1	12475,5	7348,0	7819,1
E4	25,7	29,1	24,0	32,2	12258,8	10021,8	5226,0	5181,7
E5	30,2	20,8	36,5	29,2	11973,9	10483,0	5676,7	6002,9
E6	30,7	25,6	37,6	36,0	15012,4	14759,4	8852,6	9910,9
E7	25,1	24,7	28,6	33,2	13207,5	11027,8	5834,3	5694,2
E8	24,4	24,5	28,5	35,6	12632,6	11227,8	6095,8	5272,5
E9	25,2	27,4	27,9	30,9	11932,1	10860,5	6351,2	6607,6

Os valores em destaques são àqueles excluídos para a obtenção da normalidade dos dados. (*) as direções anatômicas são representadas pelos índices: P = paralela e N = normal.

Tabela A2.3 – Dados de todos os corpos de prova para a espécie garapa.

	Esclerometria				Janka (N)			
	Estabilizado		Saturado		Estabilizado		Saturado	
	E _P	E _N	E _P	E _N	J _P	J _N	J _P	J _N
G1	26,3	25,3	31,6	33,9	9099,6	8457,7	6780,8	6342,7
G2	26,3	22,6	30,5	34,5	10087,1	8342,6	6629,0	6726,2
G3	24,3	24,1	36,0	34,2	9309,6	7520,2	6770,7	5952,3
G4	25,2	25,2	34,5	36,1	11647,1	10557,4	7356,9	7817,6
G5	30,1	27,1	34,8	33,7	12557,0	10518,7	6823,3	7078,7
G6	30,0	26,0	39,1	34,0	12575,4	11218,5	8773,8	9473,1
G7	26,0	32,7	34,9	36,5	10960,1	9267,6	7221,7	7176,2
G8	34,1	30,9	40,4	39,1	14048,4	13676,7	8961,3	9512,0
G9	24,5	33,3	35,7	38,3	10627,4	10063,8	8724,6	9193,1

(*) as direções anatômicas são representadas pelos índices: P = paralela e N = normal.

Tabela A2.4 – Dados de todos os corpos de prova para a espécie freijó.

	Esclerometria				Janka (N)			
	Estabilizado		Saturado		Estabilizado		Saturado	
	E _P	E _N	E _P	E _N	J _P	J _N	J _P	J _N
F1	16,9	26,0	13,1	32,9	5237,8	4306,9	4319,5	3841,2
F2	12,7	23,3		27,0	2337,1	1481,0	1637,2	1152,5
F3	12,1	28,2	11,1	33,0	4047,8	3876,9	2926,6	3024,4
F4	14,1	21,5	12,6	28,7	4806,3	3983,9	3572,3	3209,6
F5	15,6	27,5	13,4	31,8	5005,2	4057,8	3678,2	3291,3
F6	11,3	16,3		32,8	3227,0	2121,9	2214,0	1712,8
F7	17,9	16,1	19,6	28,4	4960,7	4462,9	4978,2	4716,6
F8	20,6	24,5	10,2	32,4	5367,8	4034,2	3832,2	3209,0
F9	13,4	17,3	14,4	30,4	4501,5	3052,8	3721,2	2722,3

(*) as direções anatômicas são representadas pelos índices: P = paralela e N = normal.

Apêndice 3. Dados de velocidade para cada corpo de prova

Tabela A3.1 – Dados de todos os corpos de prova para a espécie cumaru.

	Velocidade (m.s ⁻¹)					
	Estabilizado			Saturado		
	V _L	V _H	V _B	V _L	V _H	V _B
C1	5460,7	2071,6	2331,7	5763,2	2167,4	1786,0
C2	5136,3	2220,2	2422,8	6304,3	2397,2	1733,8
C3	5513,7	2065,2	2275,5	6184,9	2097,6	1804,8
C4	4807,4	2214,3	2472,6	6452,4	2405,7	1624,3
C5	5136,8	2104,7	2344,3	5711,2	2262,8	1680,8
C6	5013,1	2180,8	2484,9	5927,0	2316,4	1667,5
C7	4685,0	2313,3	2608,9	6561,4	2507,8	1477,7
C8	5426,6	2202,6	2467,5	6651,9	2210,9	1719,6
C9	5238,5	2226,5	2458,8	6227,4	2362,3	1748,9

(*) as direções anatômicas são representadas pelos índices: L = longitudinal, H = normal e B = normal.

Tabela A3.2 – Dados de todos os corpos de prova para a espécie E. saligna.

	Velocidade (m.s ⁻¹)					
	Estabilizado			Saturado		
	V _L	V _H	V _B	V _L	V _H	V _B
E1	4655,5	1727,0	2243,3	3791,7	1877,7	1595,0
E2	4836,5	1476,7	1825,9	3338,7	1630,4	1610,5
E3	5207,9	1718,6	1890,5	4081,0	1663,8	1640,8
E4	5383,9	1788,8	1572,0	4014,7	1326,9	1745,5
E5	4417,1	1726,1	1624,5	4399,1	1514,7	1431,0
E6	4210,9	1635,2	2049,0	4681,0	1903,4	1444,5
E7	5171,1	1601,9	1808,2	3756,0	1628,5	1646,0
E8	5015,6	1784,9	1605,2	4271,1	1436,8	1752,5
E9	5089,9	1919,4	1350,4	4840,5	1258,2	1558,8

(*) as direções anatômicas são representadas pelos índices: L = longitudinal, H = normal e B = normal.

Tabela A3.3 – Dados de todos os corpos de prova para a espécie garapa.

	Velocidade (m.s ⁻¹)					
	Estabilizado			Saturado		
	V _L	V _H	V _B	V _L	V _H	V _B
G1	4974,5	1917,3	2234,0	5074,5	2047,3	1561,3
G2	5333,7	1882,9	2197,6	4926,0	2005,2	1710,6
G3	4907,8	1922,1	1982,7	5357,0	1924,2	1582,7
G4	5453,0	1909,8	2195,5	4904,0	1967,8	1782,8
G5	5171,6	1984,5	2267,3	5225,4	2045,1	1620,5
G6	5338,5	1880,6	2214,2	5411,7	2065,4	1718,9
G7	5253,1	1954,9	2319,7	5352,4	2126,7	1650,7
G8	5135,7	2087,7	2251,8	5375,5	2045,5	1676,0
G9	4966,8	2098,5	2288,2	5750,4	2086,6	1615,3

(*) as direções anatômicas são representadas pelos índices: L = longitudinal, H = normal e B = normal.

Tabela A3.4 – Dados de todos os corpos de prova para a espécie freijó.

	Velocidade (m.s ⁻¹)					
	Estabilizado			Saturado		
	V _L	V _H	V _B	V _L	V _H	V _B
F1	5148,5	1841,5	1625,8	4613,5	1673,8	1498,7
F2	5053,6	1421,6	1239,1	4589,4	1305,7	1130,2
F3	5385,9	1437,2	1991,3	4787,4	1384,8	1618,5
F4	5332,4	1544,9	2017,7	4951,8	1181,5	1720,4
F5	4941,1	1549,0	2091,5	4481,1	1357,0	1775,4
F6	5306,4	1625,0	1049,5	4659,3	1429,7	1260,8
F7	5072,4	1788,1	2054,8	3395,0	1401,2	2024,9
F8	4972,0	1559,5	1834,7	4414,5	1363,5	1696,2
F9	4905,5	1771,4	1669,6	4370,3	1618,8	1470,1

Os valores em destaques são àqueles excluídos para a obtenção da normalidade dos dados. (*) as direções anatômicas são representadas pelos índices: L = longitudinal, H = normal e B = normal.

Apêndice 4. Matriz dos coeficientes de correlação e P-valor

Tabela A4.1. Condição de madeira saturada e direção normal às fibras.

	E _C	J _C	E _E	J _E	E _G	J _G	E _F	J _F
E _C	-	0,48 (0,18)	-0,08 (0,84)	-0,36 (0,34)	0,09 (0,81)	-0,33 (0,38)	-0,61 (0,08)	-0,02 (0,96)
J _C	0,48 (0,18)	-	0,39 (0,30)	-0,26 (0,49)	0,74 (0,02)	0,52 (0,15)	-0,35 (0,36)	-0,25 (0,52)
E _E	-0,08 (0,84)	0,39 (0,30)	-	0,38 (0,31)	0,24 (0,54)	0,45 (0,23)	0,36 (0,35)	-0,07 (0,85)
J _E	-0,36 (0,34)	-0,26 (0,49)	0,38 (0,31)	-	-0,47 (0,20)	0,14 (0,72)	0,27 (0,49)	-0,66 (0,05)
E _G	0,09 (0,81)	0,74 (0,02)	0,24 (0,54)	-0,47 (0,20)	-	0,63 (0,07)	-0,17 (0,66)	0,22 (0,57)
J _G	-0,33 (0,38)	0,52 (0,15)	0,45 (0,23)	0,14 (0,72)	0,63 (0,07)	-	0,13 (0,75)	-0,24 (0,54)
E _F	-0,61 (0,08)	-0,35 (0,36)	0,36 (0,35)	0,27 (0,49)	-0,17 (0,66)	0,13 (0,75)	-	0,12 (0,75)
J _F	-0,02 (0,95)	-0,25 (0,52)	-0,07 (0,85)	-0,66 (0,05)	0,22 (0,57)	-0,24 (0,54)	0,12 (0,75)	-

Os valores destacados correspondem aos coeficientes associados (com P-valor < 0,05). P-valor apresentados entre parêntesis. As espécies são representadas pelas letras: C = cumaru, E = eucalipto saligna, G = garapa e F = freijó.

Tabela A4.2. Condição saturada e direção paralela.

	E _C	J _C	E _E	J _E	E _G	J _G	E _F	J _F
E _C	-	0,62 (0,07)	-0,53 (0,14)	-0,21 (0,59)	0,29 (0,45)	0,41 (0,28)	0,34 (0,37)	0,41 (0,27)
J _C	0,62 (0,07)	-	-0,42 (0,26)	-0,03 (0,94)	0,27 (0,48)	0,61 (0,08)	-0,27 (0,48)	-0,22 (0,57)
E _E	-0,53 (0,14)	-0,42 (0,26)	-	0,64 (0,06)	0,37 (0,32)	0,03 (0,93)	-0,36 (0,35)	-0,40 (0,28)
J _E	-0,21 (0,59)	-0,03 (0,94)	0,64 (0,06)	-	0,28 (0,46)	0,27 (0,48)	-0,73 (0,03)	-0,67 (0,05)
E _G	0,29 (0,45)	0,27 (0,48)	0,37 (0,32)	0,28 (0,46)	-	0,81 (0,01)	-0,03 (0,94)	0,07 (0,87)
J _G	0,41 (0,28)	0,61 (0,08)	0,03 (0,93)	0,27 (0,48)	0,81 (0,01)	-	-0,14 (0,72)	0,01 (0,98)
E _F	0,34 (0,37)	-0,27 (0,48)	-0,36 (0,35)	-0,73 (0,03)	-0,03 (0,94)	-0,14 (0,72)	-	0,93 (0,00)
J _F	0,41 (0,27)	-0,22 (0,57)	-0,40 (0,28)	-0,67 (0,05)	0,07 (0,87)	0,01 (0,98)	0,93 (0,00)	-

Os valores destacados correspondem aos coeficientes associados (com P-valor < 0,05). P-valor apresentados entre parêntesis. As espécies são representadas pelas letras: C = cumaru, E = eucalipto saligna, G = garapa e F = freijó.

Tabela A4.3. Condição estabilizada e direção normal.

	E _C	J _C	E _E	J _E	E _G	J _G	E _F	J _F
E _C	-	0,32 (0,40)	0,44 (0,23)	0,27 (0,48)	0,08 (0,84)	-0,49 (0,18)	-0,35 (0,36)	-0,47 (0,20)
J _C	0,32 (0,40)	-	0,23 (0,56)	0,00 (0,99)	0,51 (0,17)	0,54 (0,13)	-0,56 (0,11)	-0,16 (0,68)
E _E	0,44 (0,23)	0,23 (0,56)	-	0,16 (0,69)	-0,10 (0,79)	-0,21 (0,60)	-0,23 (0,55)	-0,11 (0,79)
J _E	0,27 (0,48)	0,00 (0,99)	0,16 (0,69)	-	-0,16 (0,69)	0,10 (0,80)	-0,32 (0,40)	-0,52 (0,16)
E _G	0,08 (0,84)	0,51 (0,17)	-0,10 (0,79)	-0,16 (0,69)	-	0,44 (0,23)	-0,53 (0,15)	0,36 (0,34)
J _G	-0,49 (0,18)	0,54 (0,13)	-0,21 (0,60)	0,10 (0,80)	0,44 (0,23)	-	-0,21 (0,59)	0,08 (0,83)
E _F	-0,35 (0,36)	-0,56 (0,11)	-0,23 (0,55)	-0,32 (0,40)	-0,53 (0,15)	-0,21 (0,59)	-	0,29 (0,45)
J _F	-0,47 (0,20)	-0,16 (0,68)	-0,11 (0,79)	-0,52 (0,16)	0,36 (0,34)	0,08 (0,83)	0,29 (0,45)	-

Os valores destacados correspondem aos coeficientes associados (com P-valor < 0,05). P-valor apresentados entre parêntesis. As espécies são representadas pelas letras: C = cumaru, E = eucalipto saligna, G = garapa e F = freijó.

Tabela A4.4. Condição estabilizada e direção paralela.

	E _C	J _C	E _E	J _E	E _G	J _G	E _F	J _F
E _C	-	0,67 (0,05)	-0,57 (0,11)	0,35 (0,36)	0,37 (0,33)	0,66 (0,05)	0,23 (0,55)	0,04 (0,92)
J _C	0,67 (0,05)	-	-0,76 (0,02)	-0,03 (0,94)	0,21 (0,59)	0,36 (0,34)	0,38 (0,32)	0,17 (0,66)
E _E	-0,57 (0,11)	-0,76 (0,02)	-	0,31 (0,42)	0,02 (0,97)	-0,17 (0,67)	-0,42 (0,26)	-0,07 (0,85)
J _E	0,35 (0,36)	-0,03 (0,94)	0,31 (0,42)	-	0,11 (0,77)	0,18 (0,64)	-0,46 (0,22)	-0,52 (0,15)
E _G	0,37 (0,33)	0,21 (0,59)	0,02 (0,97)	0,11 (0,77)	-	0,85 (0,00)	0,52 (0,15)	0,21 (0,60)
J _G	0,66 (0,05)	0,36 (0,34)	-0,17 (0,67)	0,18 (0,64)	0,85 (0,00)	-	0,39 (0,30)	0,24 (0,54)
E _F	0,23 (0,55)	0,38 (0,32)	-0,42 (0,26)	-0,46 (0,22)	0,52 (0,15)	0,39 (0,30)	-	0,75 (0,02)
J _F	0,04 (0,92)	0,17 (0,66)	-0,07 (0,85)	-0,52 (0,15)	0,21 (0,60)	0,24 (0,54)	0,75 (0,02)	-

Os valores destacados correspondem aos coeficientes associados (com P-valor < 0,05). P-valor apresentados entre parêntesis. As espécies são representadas pelas letras: C = cumaru, E = eucalipto saligna, G = garapa e F = freijó.