



**PÂMELA DA SILVA FERREIRA**

**EFEITO DA UMIDADE NA RIGIDEZ DA MADEIRA DE *Pinus  
elliottii* E *Bertholletia excelsa* Humn. & Bonpl.**

**LAVRAS-MG**

**2020**

**PÂMELA DA SILVA FERREIRA**

**EFEITO DA UMIDADE NA RIGIDEZ DA MADEIRA DE *Pinus elliottii*  
E *Bertholletia excelsa* Humn. & Bonpl.**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, área de concentração em Ciência e Tecnologia da Madeira, para a obtenção do título de Mestre.

**Orientador**

Prof. Dr. Paulo Ricardo Gherardi Hein

**Coorientadora**

Dra. Fernanda Maria Guedes Ramalho

**LAVRAS-MG**

**2020**

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca  
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

Ferreira, Pâmela da Silva.

Efeito da umidade na rigidez da madeira de *Pinus elliottii* e  
*Bertholletia excelsa* Humn. & Bonpl. / Pâmela da Silva Ferreira. -  
2020.

48 p.

Orientador(a): Paulo Ricardo Gherardi Hein.

Coorientador(a): Fernanda Maria Guedes Ramalho.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de  
Lavras, 2020.

Bibliografia.

1. Vibração transversal. 2. Higromecânica. 3. Visco-  
elasticidade. I. Gherardi Hein, Paulo Ricardo. II. Guedes Ramalho,  
Fernanda Maria. III. Título.

**PÂMELA DA SILVA FERREIRA**

**EFEITO DA UMIDADE NA RIGIDEZ DA MADEIRA DE *Pinus elliottii* E *Bertholletia excelsa* Humn. & Bonpl.**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, área de concentração em Ciência e Tecnologia da Madeira, para a obtenção do título de Mestre.

Aprovada em 29 de outubro de 2020.

Prof. Dr. Paulo Ricardo Gherardi Hein UFLA

Dr. Allan Motta Couto UEMS

Dr. Thiago Campos Monteiro UFPR

**Orientador**

Prof. Dr. Paulo Ricardo Gherardi Hein

**Coorientadora**

Dra. Fernanda Maria Guedes Ramalho

**LAVRAS-MG  
2020**

*Para honra e gloria do Senhor meu Deus  
E as pessoas que deixaram em mim um pouco de si.  
Dedico.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela sua infinita bondade e sua misericórdia que não tem fim. Toda minha trajetória e minha vida é graça de Deus.

A meus pais Zilma e Fidelcino que deram aos meus irmãos e a mim a melhor criação possível, que na sua simplicidade nos ensinaram o valor do trabalho e a doce alegria de ter um lar para onde retornar.

As minhas tias Gleice, Marcia, Cida e minha Fada Madrinha Lucycleia por acreditarem no meu potencial, mesmo que eu não mereça. Obrigada por me ensinarem por meios concretos que devemos dar o nosso melhor em tudo que fazemos.

Aos meus irmãos Pablo, Bruno e Eliane (cunhada) por compartilharmos tantos momentos bons e até os momentos ruins. Sou extremamente grata a Deus por compartilharmos o mesmo seio familiar.

As pessoas maravilhosas que compartilhou comigo este tempo em Lavras, meu querido José, Renato, Iara, João, Bruna, Lívia, Camila, Dáfilla, Emylle, Leticia, Michelly, Laura, Manuela e vários outras pessoas que transformaram esses dias de lutas em dias alegres e de muito carinho.

Aos meus amigos Débora Santana, Nixon Oliveira e Hernandes Cesar pela amizade a distância. As peculiaridades de cada um fazem de vocês pessoas sensacionais, amo vocês.

Ao professor Dr. Paulo Ricardo Gherardi Hein e a Dr. Fernanda Maria Guedes Ramalho pelo conhecimento compartilhado e pela dedicação dada ao projeto.

À Universidade Federal de Lavras (UFLA) e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira pela infraestrutura e oportunidade de cursar o mestrado.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) –Código de Financiamento 001.

*“A humildade é o primeiro degrau da escada para a sabedoria”*

Santo Tomás de Aquino

## RESUMO

Os métodos não destrutivos têm sido aplicados com sucesso na estimativa de propriedades da madeira devido à rapidez, em relação aos métodos clássicos, e, por permitir que o mesmo corpo de prova seja reutilizado. Além disso, as propriedades mecânicas da madeira são fortemente influenciadas pela umidade e densidade básica, mas se conhece pouco sobre o efeito da densidade aparente na relação umidade x rigidez na madeira. O objetivo deste estudo foi avaliar a influência da umidade no módulo de elasticidade dinâmico (MOE) e na velocidade de propagação (VP) das ondas de tensão em diferentes madeiras, bem como, verificar o efeito da densidade aparente na relação rigidez x umidade na madeira. A tora da base de árvores de *Pinus elliottii* e *Bertholletia excelsa* provenientes de plantios experimentais foram processadas para retirada de corpos de prova prismáticos nas dimensões de 410 mm no eixo longitudinal e 25 mm de aresta na seção transversal quadrada orientada de acordo com os anéis de crescimento. A estimativa do MOE e VP foram obtidas a partir do método de vibração transversal a partir de 30 amostras de madeira de *Pinus* e 40 de *Bertholletia*. As análises de ressonância do som foram executadas nos corpos de prova medidos em diferentes faixas de umidade, entre a madeira saturada e a madeira anidra. A redução da umidade proporcionou o aumento do módulo de elasticidade e da velocidade de propagação. Na umidade de equilíbrio a 12% o *Pinus* obteve MOE de 11,41 GPa e a *Bertholletia* de 14,96 GPa, assim como nos demais teores de água a espécie de maior densidade apresentou maior MOE e VP. A densidade aparente apresentou forte correlação com o módulo de elasticidade tanto para umidade a 12% quanto a 90%. Porém, não foi possível observar interferência da densidade aparente no comportamento higromecânico da madeira. A resistência a flexão apresentou variação similar para ambas as espécies.

**Palavras-chave:** Vibração transversal, Higromecânica, Visco-elasticidade.



## ABSTRACT

Non-destructive methods have been successfully applied in estimating the wood properties due to its speed, in relation to classic methods, and, above all, by allowing the same specimen to be reused. In addition, the mechanical properties of wood are strongly influenced by moisture and density, but little is known about the effect of density on the moisture x stiffness in wood. The aim of this study was to evaluate the influence of moisture on the dynamic elastic modulus (DEM) and the wave propagation speed (WSP) of stress waves in low and high basic density wood, as well as to verify the effect of apparent density on the relationship stiffness x moisture in the wood. The log from the base of *Pinus elliottii* and *Bertholletia excelsa* trees from experimental plantings was processed to remove prismatic specimens in the dimensions of 410 mm in the longitudinal axis and 25 mm of edge in the square cross section oriented according to the growth rings. The estimation of DEM and WSP was obtained from the method of transverse vibration from 30 wood samples from *Pinus* and 40 from *Bertholletia*. The sound resonance analyses were performed on the specimens at equilibrium moisture, after saturation in water, during water desorption to anhydrous condition and during water adsorption until equilibrium humidity was reached again. The reduction in moisture provided an increase in the modulus of elasticity and the speed of propagation. At equilibrium moisture of 12%, *Pinus* obtained an MOE of 11,41 GPa and *Bertholletia* of 14,96 GPa, as well as in the other water contents, the species with the highest density showed the highest MOE and VP. The apparent density showed a strong correlation with the modulus of elasticity for both 12% and 90% moisture. However, it was not possible to observe density interference in the wood's hygromechanical behavior. Flexural strength showed a similar variation for both species.

**Key words:** Transverse vibration, Hygromechanical, Visco-elasticity.

## SUMÁRIO

|   |    |
|---|----|
| <b>1. INTRODUÇÃO</b> .....  | 12 |
| <b>2. OBJETIVOS</b> .....   | 13 |
| <b>3. REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....   | 13 |
| <b>3.1 Aplicação estrutural da madeira</b> .....  | 13 |
| <b>3.2 Módulo de Elasticidade</b> .....   | 14 |
| <b>3.3 Fatores que afetam as propriedades mecânicas</b> .....   | 16 |
| <b>3.3.1 Umidade</b> .....  | 17 |
| <b>3.3.2 Densidade</b> .....  | 18 |
| <b>3.4 Métodos para caracterização mecânica da madeira</b> .....  | 19 |
| <b>3.4.1 Ensaio destrutivos</b> .....   | 19 |
| <b>3.4.2 <i>Stress wave timer</i></b> .....   | 20 |
| <b>3.4.3 Ultrassom</b> .....  | 21 |
| <b>3.4.4 Vibração transversal</b> .....   | 22 |
| <b>3.5 Influência da umidade na rigidez da madeira</b> .....  | 23 |
| <b>4. MATERIAL E MÉTODOS</b> .....  | 25 |
| <b>4.1 Material biológico</b> .....   | 25 |
| <b>4.2 Preparo dos corpos de prova</b> .....  | 26 |
| <b>4.3 Ensaio dinâmico na madeira</b> .....   | 27 |
| <b>4.4 Densidade</b> .....  | 28 |
| <b>4.5 Procedimento experimental</b> .....  | 29 |
| <b>4.6 Análise estatística dos dados</b> .....  | 30 |
| <b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....  | 31 |
| <b>5.1 Efeito da variação da umidade nas propriedades da madeira</b> .....  | 31 |
| <b>5.2 Efeito da umidade a 12% e 90% na rigidez e velocidade de propagação de ondas</b> .....                       | 34 |
| <b>5.3 Efeito da umidade e densidade aparente na rigidez da madeira</b> .....                                       | 37 |
| <b>5.4 Efeito da umidade e densidade básica na rigidez e velocidade de propagação das amostras de madeira</b> ..... | 39 |

|                           |           |
|---------------------------|-----------|
| <b>6. CONCLUSÕES.....</b> | <b>42</b> |
| <b>REFERÊNCIAS.....</b>   | <b>44</b> |

# 1. INTRODUÇÃO

O uso racional das espécies de madeira requer o conhecimento de suas propriedades físicas e mecânicas. Deve-se conhecer as características tecnológicas da madeira para evitar o emprego inadequado destas espécies, o comprometimento das estruturas, como a perda da sua capacidade portante de uso e o desperdício de matéria-prima. Assim, é imprescindível que informações sobre o comportamento físico-mecânico da madeira estejam disponíveis tanto no processo de produção como nos locais de suas aplicações, visando não só a beleza e o conforto dos ambientes, mas a permanência, segurança e durabilidade dos elementos de madeira.

Com o aumento da velocidade dos processos de produção o setor madeireiro vem buscando cada vez mais técnicas que permitam avaliações rápidas das propriedades da madeira. As técnicas não destrutivas permitem, de forma rápida e precisa, classificar as peças de madeira em classes logo após ser produzida. Permitindo o aumento do valor agregado das peças produzidas.

Contudo, as propriedades físicas e mecânicas da madeira sofrem direta influência das condições ambientais como a variação na umidade, temperatura, exposições a intempéries e xilófagos a atuação antrópica. A umidade da madeira tem sido apontada como um dos fatores que mais influenciam suas propriedades mecânicas. Vivian et al. (2010) ressaltam que o efeito da umidade na rigidez varia significativamente da condição anidra até o ponto de saturação das fibras (PSF) enquanto Logsdon e Calil Junior (2002) afirmam que essa interferência não é significativa acima de 20%.

As propriedades mecânicas de resistência (resistência a compressão paralela as fibras e a tração paralela as fibras) e rigidez (indicada pelo módulo de elasticidade - MOE) podem ser avaliadas por meio de ensaios destrutivos, normalmente preconizados por diretrizes analíticas que inviabilizam o ensaio da mesma amostra em outras condições. Já ensaios não destrutivos, ou seja, ensaios que não impossibilitem a utilização das peças. Teles et al. (2011) observaram que os métodos não destrutivos dinâmicos são uma alternativa viável para a obtenção do módulo elástico da madeira devido à forte correlação com os testes estáticos normatizados realizados em máquina universal de ensaios. Dentre os métodos não destrutivos mais empregados para avaliação da madeira, o ultrassom (ALVES et al., 2015), ondas de tensão (RIBEIRO et al., 2016) e o de vibração transversal (HEIN et al., 2012) tem se destacado.

O ensaio de vibração transversal (ou flexural) vem sendo empregado com sucesso na obtenção de propriedades elásticas tanto de madeiras nativas como de exóticas (ALMEIDA et

al., 2016; TELES et al., 2011; HEIN et al., 2010) Diversos estudos têm demonstrado que o módulo elástico estimado pelo método da vibração flexural e o método estático possui uma boa correlação (ILIC, 2001, 2003). Estudos têm sido realizados para compreender o efeito da umidade sobre a rigidez da madeira (CAVE, 1978a; JIANG et al., 2017; KORKMAZ; BÜYÜKSARI, 2019; OZYHAR et al., 2013; VOROBYEV et al., 2017) e outros produtos, como painel de madeira laminada colada (GÜLZOW; RICHTER; STEIGER, 2011). Bengtsson (2000) pesquisou detalhadamente o efeito das condições de umidade na rigidez da madeira de *Picea abies*. Apesar dos diversos trabalhos empregando o método de vibração transversal, o mesmo não tem sido utilizado para avaliar o efeito da densidade no comportamento higromecânico da madeira. A influência da umidade sobre a rigidez da madeira de *Pinus elliottii* e *Bertholletia excelsa* e o efeito da densidade da madeira na relação rigidez x umidade são ainda desconhecidos.

## **2. OBJETIVOS**

Os Objetivos deste estudo foram utilizar o método não destrutivo para avaliar a influência da umidade no módulo de elasticidade dinâmico (MOE) e na velocidade de propagação (VP) das ondas de tensão em madeiras de baixa a alta densidade básica e avaliar o efeito da densidade aparente no comportamento higromecânico na madeira.

## **3. REFERENCIAL TEÓRICO**

### **3.1 Aplicação estrutural da madeira**

A utilização da madeira como elemento estrutural está presente em diversas culturas conforme o desenvolvimento da humanidade. Principalmente porque, a madeira é um recurso renovável que apresenta características como boa resistência mecânica, durabilidade, abundância e versatilidade. Estas qualidades da madeira permitiram, com o passar do tempo, que se tornasse um dos materiais mais empregados na construção civil (CALIL JÚNIOR; DIAS, 1997).

A primeiras aplicações da madeira como elemento estrutural na construção de abrigos datam de 120.000 a 40.000 anos a.C quando a humanidade na busca por proteção contra as intempéries climáticas, ao ataque de animais e agentes externos buscaram nos recursos

disponíveis o que se tornou a base das atuais edificações, entre os materiais a disposição havia o couro de animais, minerais e plantas (ALMEIDA, 2012).

Quando comparada a outros materiais estruturais como aço, alumínio e o concreto, a madeira apresenta algumas vantagens decorrentes de suas características anatômicas e propriedades físicas e mecânicas. Que proporcionam beleza, possui reduzido custo energético na produção, alta relação a resistência/densidade, além de possuir propriedades como o isolamento termo-acústico. Calil Júnior e Dias (1997) ressaltam esta comparação, visto que a madeira pode ser três vezes mais resistente que o aço e dez vezes mais que o concreto em relação a densidade destes materiais.

Ademais, Verma, Cronhjort e Kuittinen (2016) perceberam o efeito positivo da aplicação de estruturas de madeira, nos ambientes e nas pessoas que utilizam estes espaços, sejam em hospitais ou em ambientes de trabalho, reduzindo o estresse. Esta interação ambiente e conforto é importante ao ponto de existir normas como a EN 15643-3 (2012) que avaliam o efeito das propriedades da madeira sobre a saúde e conforto das pessoas.

A madeira é empregada em situações de grande relevância como: pontes, casas, edifícios e em produtos de menor valor agregado como caixotes, palitos de dente e fósforos, entre uma infinidade de estruturas presentes no cotidiano. Visto que, conforme há crescimento da população mundial a demanda por esses produtos segue a mesma tendência e acredita-se que em 2050 a demanda anual será de  $5,2 \times 10^9$  m<sup>3</sup> (LAM, 2001).

Para otimizar o processo de produção e assim auxiliar para que a demanda por madeira seja suprida, técnicas de caracterização das propriedades físicas e mecânicas deste material vem sendo empregadas para classificação de peças. As técnicas de caracterização da madeira visam a rapidez e praticidade do processo de produção, possibilitando a separação das peças por classes de acordo com a similaridade entre as suas propriedades. Permitindo com isso, não só maior valor agregado, como também o emprego adequado das peças.

### **3.2 Módulo de Elasticidade**

A elasticidade da madeira se refere a deformação proporcionada por uma carga sobre a amostra, possível de se recuperar após a remoção desta carga. Cargas muito altas podem causar deformações plásticas (KRESTSCHMANN, 2010). De forma que o módulo de elasticidade e módulo de ruptura são os principais parâmetros utilizados para avaliar as propriedades mecânicas da madeira.

Para conhecer a rigidez da madeira à flexão é necessário obter o módulo de elasticidade a partir do trecho linear formado pelo diagrama carga x deslocamento das peças ensaiadas, expressa em MPa (mega pascal) (MORALES; LAHR, 2002). O módulo de elasticidade é determinado pela inclinação da reta secante à curva tensão x deformação, definida pelos pontos ( $\sigma_{10\%}$ ;  $\epsilon_{10\%}$ ) e ( $\sigma_{50\%}$ ;  $\epsilon_{50\%}$ ), correspondentes respectivamente a 10% e 50% da resistência à compressão paralela às fibras, medida no ensaio (ABNT, 1997).

Para Krestschmann (2010) o módulo de elasticidade à flexão é um dos dados de rigidez da madeira mais comuns para as espécies e este inclui o efeito da deflexão de cisalhamento. No entanto este parâmetro é afetado principalmente por fatores como: ângulo da grã, densidade, presença de nós, características da ultraestrutura e o conteúdo de umidade (ILLSTON; DOMONE, 2002).

Os métodos dinâmicos de determinação do módulo de elasticidade geralmente apresentam valores aproximadamente 10% maiores do que os métodos de avaliação estático do módulo de elasticidade (DIVÓS; TANAKA, 2005). Enquanto que outros autores acreditam que este percentual tende a aumentar conforme o módulo de elasticidade do espécime aumenta (TARGA; BALLARIN; BIAGGIONI, 2005).

Determinados métodos dinâmicos como ultrassom, *stress wave timer* e de vibração transversal utilizam a velocidade de propagação de ondas mecânicas para caracterizar o módulo de elasticidade de uma peça. Ao impactar uma amostra com algum pulsador manual é gerada uma onda de tensão que se propaga e atenua pelo material. Esta onda se movimenta em direção a outra extremidade da amostra por meio da excitação das partículas (CANDIAN; SALES, 2009). A velocidade de propagação varia de acordo com a sua posição no vegetal. Ballarin e Nogueira (2005) observaram que a velocidade de propagação na madeira adulta foi de aproximadamente 12% maior que na madeira juvenil para a espécie de *Pinus taeda*.

Bartholomeu, Gonçalves e Bucur (2003) utilizaram o método de ultrassom e ressaltam que as dimensões das amostras na velocidade de propagação da onda podem afetar a segurança dos dados. Os autores afirmam que para a velocidade de propagação longitudinal a razão Radial/Tangencial deve ser superior que 0,3 e para a velocidade de propagação tangencial razão acima de 0,75.

A velocidade de propagação de onda é um parâmetro que pode ser empregado para o controle de qualidade, acompanhamento de processos de deterioração e estimar a resistência do material (LORENZI, 2009). Partindo do pressuposto de que a onda percorre amostras sadias com velocidade maior que as com defeitos, ao se ter uma amostra referência, a velocidade de

propagação pode ser utilizada para detectar a presença de defeitos no interior das peças (CANDIAN; SALES, 2009).

### **3.3 Fatores que afetam as propriedades mecânicas**

A madeira é um material eficiente quando aplicada a estruturas, seja ela empregada de forma estrutural ou como componente arquitetônico. Esta eficiência se dá pela escolha correta da espécie madeireira. Suas propriedades mecânicas e o tratamento aplicado, de forma a assegurar a resistência e durabilidade da estrutura (MACHADO, 2003).

No entanto a madeira tem sido associada à ideia de material de baixa qualidade e pouca segurança devido ao equívoco de que a mesma possui menor vida útil comparada a outros materiais comumente utilizados na construção civil (CALIL JR; DIAS, 1997). Sendo que, esta ideia pode ser passada pelo fato de empregos inadequados da madeira, quando não se leva em consideração os fatores que afetam o seu desempenho gerando defeitos ou reduzindo a sua durabilidade, bem como o uso incorreto de tratamento preservativo.

Entre os principais fatores que podem influenciar as propriedades físico-mecânicas da madeira encontra-se os inerentes como a variação entre espécies, dentro da mesma espécie e principalmente dentro do mesmo indivíduo como proporção cerne e alborno. Além da proporção de lenho juvenil e adultos, presença de nós, característica da grã, densidade básica, umidade da madeira, que quando não controlados, geram defeitos nas estruturas (ILLSTON; DOMONE, 2002; LATORRACA; ALBUQUERQUE, 2000).

Os elementos anatômicos como, parênquima axial, ângulo da grã, ângulo microfibrilar, frequência dos vasos nas folhosas e os constituintes químicos da madeira como celulose, lignina e hemiceluloses são diretamente responsáveis pela resistência mecânica. Assim como a disposição deste elementos, visto que espécies que possuem porosidade em anel são menos resistentes a determinados esforços do que espécies que possuem porosidade difusa (BURGER; RICHTER, 1991).

As condições ambientais possuem também a sua parcela de responsabilidade sobre a resistência da madeira, visto que estas condições afetaram a taxa de crescimento do vegetal. Para as madeiras de coníferas conforme a taxa de crescimento aumenta haverá uma redução da densidade e da resistência, enquanto que em madeiras de folhosas com porosidade difusa o aumento da taxa de crescimento possui pouca influência sobre as propriedades de resistência da mesma (ILLSTON; DOMONE, 2002).



### 3.3.1 Umidade

Outro fator que tem influência direta sobre as propriedades mecânicas da madeira é a umidade, visto que a madeira é um material biológico e higroscópico, ou seja, tem a capacidade tanto de adsorção como de desorção de umidade até atingir o equilíbrio com a umidade do ambiente em que está inserido podendo causar defeitos como frestas em assoalhos e empenos de paredes e portas. De forma mais acentuada o aumento da umidade na madeira dentro do limite de saturação das fibras (entre 0% e  $28 \pm 2\%$  umidade) podem provocar redução significativa da resistência mecânica das peças estruturais (ELEOTÉRIO et al., 1998).

O percentual de água na madeira pode chegar até a 200% variando de forma significativa mesmo dentro de um mesmo vegetal. No estado verde as coníferas possuem maior umidade no alburno comparado ao cerne, enquanto que para as folhosas esta variação vai depender da espécie (GLASS; ZELINKA, 2010). Para Illston e Domone (2002) a madeira possui três tipos de umidade, a água livre que está presente nas cavidades das células, água de constituição presente nas paredes das células e água de vapor que se desloca por difusão pelo vegetal.

A interação dos elementos anatômicos com a água ocorre de forma diferente. No qual a lignina possui menos interação comparado as hemiceluloses e celulose amorfa. Enquanto que a nível de parede celular a celulose cristalina ocupa de 8 a 33% da estrutura, fazendo com que a remoção da umidade na porção interna da parede sofra resistência. A remoção desta água proporciona a aproximação das microfibrilas por meio das ligações interfibrilar, de maneira que esta mudança quase sempre será reversível (ILLSTON; DOMONE, 2002).

Logsdon (1998) acrescenta ainda que esta característica higroscópica da madeira tem influência na densidade, dimensões e massa de forma a afetar as propriedades acústicas, térmicas, elástica, elétrica e mecânicas. A resistência mecânica tende a aumentar de acordo com a redução da umidade, no entanto a proporção desta influência ocorre de forma diferente para cada um dos planos anatômicos e direção das fibras.

Korkmaz e Büyüksari (2019) observaram avaliando a influência da umidade no módulo de elasticidade, resistência a flexão, compressão e tração que a cada aumento de 1% de umidade havia uma redução de 3% na resistência a flexão, 2,5% no E, 2% para a resistência a tração e 3,1% para a compressão, mostrando que a resistência a compressão é afetada de forma mais intensa pela umidade que as demais propriedades mecânicas.

Há muitos estudos que avaliaram a resistência da madeira em diferentes condições de umidade. Como Ortiz e Vito (2017) que avaliaram vigas de dimensões estruturais de madeira de Cambará com umidades próximas a 12, 14 e 17% submetendo-os a ensaios de flexão estática, no entanto não obtiveram variação estatisticamente significativa, provavelmente devido ao baixo número de amostras e umidades muito próximas. Ozyhar et al. (2013) observaram a influência da umidade nas propriedades elásticas da madeira de Faia, utilizando o método não destrutivo de ultrassom para umidades próximas a 9, 12, 16 e 18%. Os autores notaram que o módulo de Young e o módulo de cisalhamento foram afetados pelos teores de umidade, contudo o método empregado ainda foi considerado como incerto. Os autores supracitados Jiang et al. (2017) e Korkmaz e Büyüksari (2019) também estudaram a influência da umidade nas propriedades mecânicas da madeira. No entanto, se voltam para umidades abaixo do ponto de saturação das fibras, deixando uma lacuna sobre o efeito que diferentes umidades exercem sobre a rigidez da madeira acima do PSF.

### **3.3.2 Densidade**

A densidade é um dos principais preditores das propriedades da madeira, sejam elas anatômicas, físicas ou mecânicas. Pode ser medida de três formas, a primeira é a densidade real na qual não leva em consideração os espaços vazios e encontraram  $1,53 \text{ g/cm}^3$ , devido pouca variação entre as espécies se tornou um valor fixo. Outra forma é a densidade aparente que leva em consideração a massa pelo volume da amostra, ambos na umidade que ela se encontra no momento requerido. Contudo, a mais empregada a nível de caracterização e comparação é a densidade básica que é a relação entre a massa seca e o volume saturado da madeira, tornando possível dividir as espécies em classes de acordo com as suas propriedades (BROWN; PANSHIN; FORSAITH, 1949).

A IAWA (IAWA, 1989) classificou os diferentes valores de densidade básica em grupos compostos por determinada variação, para possibilitar uma melhor caracterização e identificação das espécies madeireiras. De tal forma, são denominadas de baixa densidade as madeiras com densidades inferiores a  $0,40 \text{ g/cm}^3$ , entre  $0,40$  e  $0,75 \text{ g/cm}^3$  de média densidade e acima deste valor como de alta densidade.

A densidade é uma das propriedades que mais influencia as propriedades mecânicas da madeira, devido à gravidade representar a quantidade de umidade por madeira por volume. Este parâmetro é mais preciso para madeiras claras com grã reta, por não serem influenciadas por resinas, gomas e extrativos (KRETSCHMANN, 2010).

Abruzzi et al. (2012) avaliaram a resistência de postes com diferentes estados de deterioração por meio de métodos destrutivos e observaram uma correlação de 0,94 e 0,74 da densidade com o módulo de elasticidade e módulo de ruptura a flexão, respectivamente. Os autores ressaltaram que a densidade se apresenta como um preditor confiável das propriedades de resistência de madeiras no emprego de peças estruturais.

Já Yang e Evans (2003) avaliaram a relação entre o ângulo microfibrilar e a densidade com as propriedades mecânicas de módulo de elasticidade e módulo de ruptura para três espécies de eucaliptos, com dimensões próximas das utilizadas neste trabalho. Os autores observaram que o ângulo microfibrilar foi responsável por 87% da variação do MOE enquanto a densidade foi responsável por 81% e juntos este percentual aumenta para 92%.

### **3.4 Métodos para caracterização mecânica da madeira**

Alguns parâmetros de avaliação se destacam quando se trata da caracterização das propriedades mecânicas de espécies madeireiras, entre eles o módulo de elasticidade, resistência a flexão e resistência a compressão paralela às fibras. Estes parâmetros se sobressaem por serem os que melhor representam os esforços empregados para determinação destas propriedades na aplicação estrutural das peças de madeira. Entre os métodos mais empregados para avaliar a resistência mecânica da madeira está o *stress wave timer*, ultrassom e vibração transversal como não destrutivo e o destrutivo por flexão estática.

#### **3.4.1 Ensaio destrutivos**

O método clássico de caracterização mecânica da madeira por flexão estática, consiste em ensaios destrutivos, regularizados por organizações regionais, nacionais e internacionais, entre as mais empregadas estão a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) International Standardization Organization (ISO), Comisión Panamericana de Normas Técnicas (COPANT), Norma Europeia (EUROCODE EN) e American Society for Testing and Materials (ASTM). Algumas normas recomendam o uso de corpos de prova nas dimensões de peças estruturais e outras nas dimensões reduzidas para avaliar o módulo de elasticidade e ruptura do material pelos métodos de compressão paralela as fibras ou flexão estática das amostras.

Os ensaios podem ser realizados em corpos de prova pequenos (25 x 25 x 410 mm) e isentos de defeitos ou de tamanho estrutural suscetíveis a presença de defeitos. Estes métodos

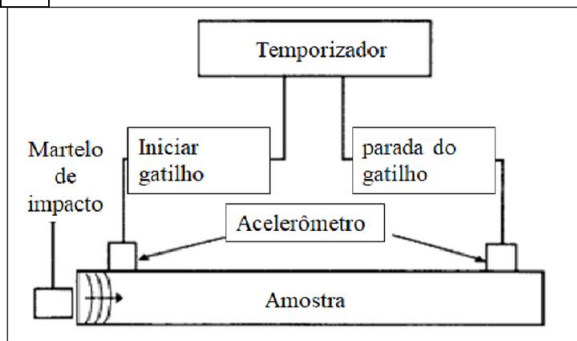
geralmente utilizam a máquina de ensaio universal, associada a um *Software*, que exerce uma força sobre os diferentes eixos da madeira possibilitando medir a resistência e a rigidez do material. Entre as vantagens encontra-se o fato de ser um método seguro e consolidado na área da pesquisa e controle tecnológico, servindo como base para comparações. E como desvantagem tem o fato de utilizar equipamentos caros e de grandes dimensões.

### 3.4.2 *Stress wave timer*

O método do temporizador de Ondas de Tensão (*stress wave timer*) é um método não destrutivo que utiliza a propagação de ondas de tensão para prever as propriedades físicas e mecânicas da madeira. O método consiste em um instrumento, com um acelerômetro acoplado, que induz a emissão do sinal por meio do impacto em uma das extremidades do corpo de prova, na outra extremidade um outro acelerômetro capta a borda principal da onda, sendo possível verificar o tempo decorrido para que a tensão atravessasse o material, conforme a Figura 1.A (WANG et al., 2004a).

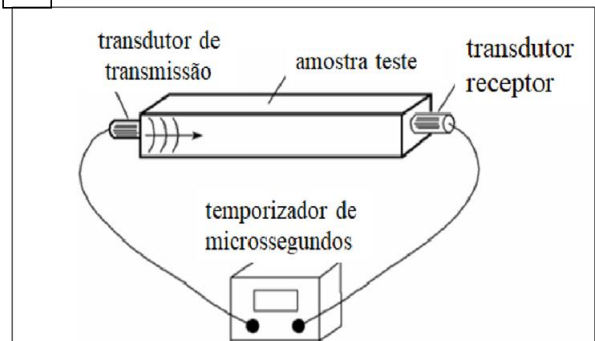
Figura 1 – Métodos de análise não destrutiva da madeira.

A. Método de análise *stress wave timer*.



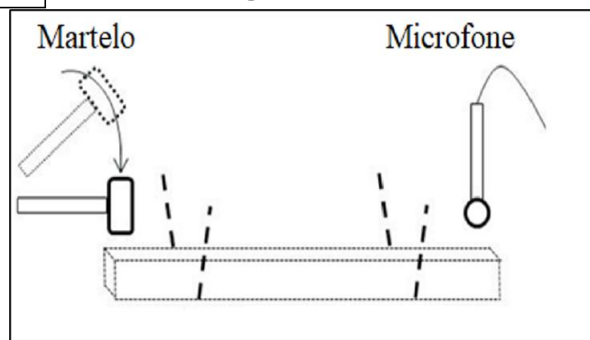
Fonte: Wang et al. (2004).

B. Método de análise por ultrassom.



Fonte: Wang et al. (2004).

C. Método de análise por vibração transversal.



Fonte: Adaptado de Hein et al. (2012)

Estudos mostram correlações significativas entre o módulo de elasticidade obtidos pelos ensaios experimentais estático e por propagação de onda, além de ajudarem a prever a umidade das peças de madeira (CANDIAN; SALES, 2009; DEL MENEZZI; SILVEIRA; SOUZA, 2010; WANG et al., 2004a). Cruz et al. (2009) que demonstram que a umidade pode ser estimada utilizando modelos não lineares ou vários modelos lineares que incluem outras variáveis. Esta técnica por ser um método não destrutivo vem cada vez mais sendo empregada na avaliação da resistência e para inspecionar pontes e monumentos históricos que empregam madeira.

Del Menezzi, Silveira e Souza (2010) buscaram validar o método de temporização de ondas de tensão avaliando seis espécies amazônicas com densidades aparentes que se distribuíam de 0,630 a 1,220 g/cm<sup>3</sup> pela técnica destrutiva de flexão estática e não destrutiva por onda de tensão. Observaram que o módulo de elasticidade dinâmica é um ótimo preditor das propriedades de flexão em casos onde há variabilidade entre as espécies, quando a variabilidade é pequena, como dentro de uma mesma espécie, no entanto o modelo acaba apresentando baixa previsibilidade.

Apesar da segurança apresentada pela forte correlação entre o método dinâmico e o estático, utilizando o método de ondas de tensão e o método de módulo de elasticidade estático, é evidenciado que o MOE dinâmico apresenta valores de rigidez mais baixos do que o MOE estático (RIBEIRO et al., 2016). Percebendo esta diferença, Wang et al. (2004b) buscaram avaliar também o efeito do diâmetro de toras no módulo de elasticidade pelo método de ondas de tensão e observaram que a técnica é sensível a determinados fatores como dimensões e imperfeições geométricas, de forma que o maior diâmetro da amostra gera um aumento no desvio padrão entre o MOE estático e dinâmico. Entre as vantagens do método está o fato de que não é necessário a confecção de corpos de prova, já que as análises podem ser realizadas na própria estrutura.

### **3.4.3 Ultrassom**

Outro método não destrutivo é o ultrassom, que diferente do *stress wave timer* usa frequência sonora entre 20 kHz e 1 MHz. Inicialmente empregado para aplicação concreto na construção civil na década de 50 e posteriormente adaptado as características biológicas da madeira (CANDIAN; SALES, 2009). Esta técnica é aplicada de forma que um transdutor acelerômetro gera vibrações mecânicas que se propagam pelo material e é captado por outros

transdutores acoplados na amostra, estes transdutores são compostos por cristais piezoelétricos que captam e convertem os pulsos elétricos, de acordo com a Figura 1.B (OLIVEIRA, 2001).

O método também foi avaliado quando utilizado em tratamentos térmicos comparando o módulo de elasticidade estático e dinâmico e observaram variação da correlação de 0,78 e 0,94, considerando-o adequado para a previsão da resistência do material em temperaturas elevadas (AYDIN; AYDIN, 2018).

Entre as desvantagens encontra-se o fato de a ressonância possuir alta atenuação, ou seja, possui o limitante de ser eficaz em estruturas de dimensões menores quando comparada ao método de onda de tensão. Contudo, com a melhoria da técnica a mesma já pode ser empregada como alternativa na determinação do módulo de elasticidade até mesmo para painéis de aglomerado em diferentes condições de umidade (GÜNTEKIN; KAYA, 2018). As vantagens deste método está o fato de ser rápido, de baixo custo e ao utilizar múltiplos leitores é possível avaliar o material em várias dimensões, além de treinamento rápido e fácil dos operadores.

#### **3.4.4 Vibração transversal**

A vibração transversal ou vibração flexural é um dos métodos de avaliação não destrutiva que visa identificar as propriedades físicas e mecânicas de um material por meio da correlação entre a frequência natural e a rigidez à flexão do mesmo (CARREIRA; CANDIAN, 2008). Tendo como princípio as propriedades de armazenamento e dissipação de energia e as propriedades de cada material.

Um corpo quando retirada de seu estado de equilíbrio por um impulso, gera uma vibração mecânica que busca voltar ao seu estado estático. O período de vibração, dado por um ciclo completo de movimento, no qual o número de ciclos por determinado tempo gera a frequência. E esta frequência mesmo amortecida se assemelha a frequência natural não amortecida (CALIL JÚNIOR; MINÁ, 2003).

Calil Júnior e Miná, (2003) acreditam que esta técnica há muito tempo é empregada para materiais como o ferro por exemplo, segundo os autores as hipóteses de armazenamento e dissipação de energia na madeira levantados por Jayme (1959) serviram de base para aplicação de métodos não destrutivos em peças de madeira, entre elas o de vibração transversal.

Estudos e pesquisas ajudam no aprimoramento dos métodos de avaliação não destrutiva na busca por tornar os resultados mais confiáveis. Atualmente as amostras prismáticas são

situadas sobre dois suportes posicionados sobre os pontos nodais, estes pontos nodais estão a 0,225 do comprimento do corpo de prova, de forma a desconsiderar a influência do suporte na madeira. A amostra então é excitada por um pulsador manual sobre uma das extremidades, enquanto na outra extremidade é posicionado um captor acústico que capta a frequência gerada pelo material e manda a informação para o computador que identifica a vibração fundamental da amostra e realiza os cálculos de velocidade de propagação e módulo de elasticidade (FIGURA 1.c).

A aplicação deste teste dinâmico se dá em estruturas e formas distintas como em peças de madeira maciça de tamanho estrutural (ALMEIDA et al., 2016; CARREIRA et al., 2003; CARREIRA; CANDIAN, 2008; HEIN et al., 2010; TELES et al., 2011), amostras de tamanho reduzido (CARRASCO et al., 2017; ILIC, 2001; LEITE et al., 2012) e até mesmo em compósitos de madeira (QUINAYÁ; D'ALMEIDA, 2017). Carrasco et al. (2017) observaram que o módulo de elasticidade apresentou coeficiente de determinação  $R^2=97,54\%$  em relação ao método estático, e estimativas aceitáveis para a resistência a compressão paralela com  $R^2=74,53\%$ .

### **3.5 Influência da umidade na rigidez da madeira**

Estudos voltados para a influência da umidade nas propriedades mecânicas da madeira são os mais diversos (GERHARDS, 1982; GÜLZOW; RICHTER; STEIGER, 2011; VOROBYEV et al., 2017). Estes estudos ressaltam que há uma tendência entre a umidade da madeira o módulo de elasticidade das espécies empregadas, apresentando uma relação inversamente proporcional, no qual quanto maior o teor de água menor a rigidez.

Cave (1978a) estudou o assunto de forma mais aprofundada e observou a influência dos elementos anatômicos principais na rigidez da madeira. O autor sugere que a fração ligada da água absorvida é responsável pelas alterações nas tensões de inchaço e pela alteração da rigidez da lignina e das hemiceluloses. Além disso, os resultados de Cave (1978b) indicam que a magnitude da rigidez de cada um dos três elementos são, lignina com variação de  $1 \times 10^9$  e  $3 \times 10^9$ , as hemiceluloses de  $6 \times 10^9$ , e para a celulose  $136 \times 10^9$ . O autor mostra que conforme se eleva o teor de água há uma redução da rigidez da madeira com teores de água até 30%.

Ilic (2001) observou, após testes para validação do método de vibração transversal, a variação do módulo de elasticidade e velocidade de propagação para a espécie de *Eucalyptus regnans* durante o processo de secagem. Observou para a madeira verde correlação de  $R^2=53\%$

com a velocidade de propagação e  $R^2 = 45\%$  para o MOE. O autor ressalva também que há um crescimento constante do MOE conforme inicia a secagem até o PSF, sendo pouco o aumento entre o PSF e 60% de umidade, e levanta a hipótese de que a densidade seja um dos fatores que interferem na relação umidade x rigidez.

Em estudo para verificar a influência da umidade nas propriedades da madeira Korkmaz e Büyüksari (2019) avaliaram principalmente esta interação dentro da faixa de higroscopicidade e verificaram que a taxa de mutação induzida por 1% de umidade é calculada 2,5% para o MOE. Apesar de reduzir significativamente o módulo de elasticidade o aumento da umidade afeta de forma diferente as direções ortotrópicas da madeira, com redução de 34,1% para o MOE radial e 37,5% para o MOE tangencial (JIANG et al., 2017).

Enquanto Ozyhar et al. (2013) utilizaram também uma técnica dinâmica, porém com ultrassom e observaram o mesmo padrão, no qual os valores de rigidez eram menores na direção longitudinal tangencial que na longitudinal radial. Este comportamento é relatado também para a velocidade de propagação da onda, no entanto essa diferença não foi significativa para o teor de água.

Partindo da premissa de que o comportamento mecânico da madeira depende da organização do material em todos os níveis e a ligação existente entre estrutura e propriedades. Alméras et al. (2017) observaram a razão existente entre a tensão cristalina e a tensão macroscópica da madeira durante o carregamento elástico analisados no estado seco e úmido. Os autores observaram que as tensões na celulose cristalina foram menores que as tensões macroscópicas e que esta diferença não é explicada apenas pela diferença de orientação entre a parede celular e a celulose, mas também por fontes de conformidades ligadas a celulose cristalina. E que esta conformidade associada a celulose cristalina corresponde a 9% da conformidade total da madeira seca e aumenta para 31% na madeira umidade.

Cousins (1976) estudando o módulo elástico da lignina em diferentes umidades, descreve que houve aumento linear do módulo de Young de  $3.1 \times 10^9$  para  $6.1 \times 10^9$  Pa com a redução da umidade de 12% para 3.6%. O mesmo autor em (1978) analisou o comportamento do módulo de Young das hemiceluloses proveniente de *Pinus radiata* submetida a diferentes umidades. Os valores mínimos do módulo de Young da lignina foram bem mais expressivos do que observado para as hemiceluloses. O módulo de elasticidade das hemiceluloses variou de  $8.0 \times 10^9$  Pa na umidade seca para  $1.0 \times 10^7$  Pa na umidade saturada.

Apesar da forte correlação apresentada pelo módulo de elasticidade entre o método de flexão estática e o método dinâmico de vibração transversal, ainda carece de informações sobre



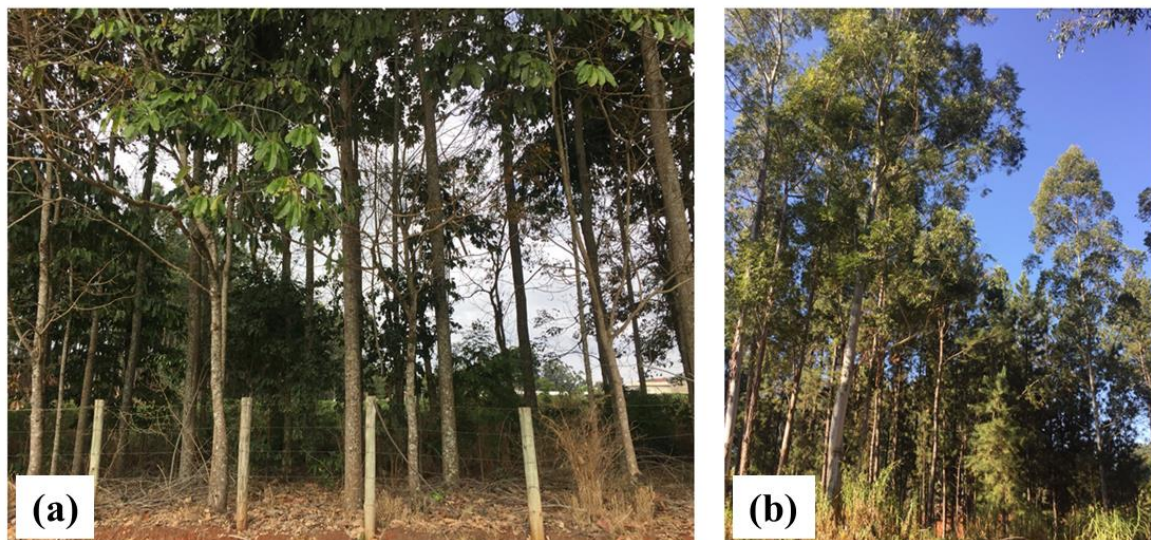
o efeito da densidade no comportamento higromecânico da madeira e a influência da umidade na rigidez da madeira de *Pinus elliottii* e *Bertholletia excelsa*.

## 4. MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 Material biológico

Três árvores de <sup>1</sup>*Bertholletia excelsa*, popularmente conhecida como Castanha do Pará e três árvores de *Pinus elliottii*. Os indivíduos foram abatidas aos 20 anos de idade, provenientes de plantio experimental da Universidade Federal de Lavras situado nas coordenadas: 21°13'30" latitude Sul, 44°58'16" longitude Oeste e a 931 m de altitude, como ilustra a Figura 2. A cubagem das árvores seguiu a metodologia de *Smalian* e as medições utilizaram a suta. As árvores foram seccionadas em toras ainda em campo com auxílio de moto serra e as toras das seções iniciais de aproximadamente 2 m cada (tora 1 e 2) levadas para a serraria para desdobramento e secagem.

Figura 2 – Plantio experimental de *Bertholletia excelsa* e *Pinus elliottii*.



Plantio experimental no campus da Universidade Federal de Lavras, (a) plantio de *Bertholletia excelsa*; (b) Plantio de *Pinus elliottii*.

---

<sup>1</sup> O corte de castanheiras nativas foi proibido por decreto federal em 1994 (Decreto 1.282, de 19 de outubro de 1994), as árvores deste experimento foram cortadas de plantio experimental para cumprir plano de desbaste favorecendo as árvores remanescentes para crescimento vigoroso.

O desdobro foi realizado na Unidade Experimental de Desdobro e Secagem da Madeira da Universidade Federal de Lavras utilizando-se a máquina serra fita e auxílio de guindaste para obter tabuas radiais retirada da prancha central com 5 cm de largura e posteriormente tábuas radiais foram retiradas das costaneiras, com o uso de serra circular (FIGURA 3).

Figura 3 – Desdobro de toras e secagem das amostras.



Tora marcada para desdobro em serra fita (a); Pilha de secagem ao ar livre com amostras controladoras para acompanhamento de secagem (b).

Após o desdobro as tábuas foram empilhadas de forma espaçadas e organizadas em pilha separadas com tabiques (FIGURA 3.b). Uma pilha com as peças foi montada e secas naturalmente até umidade de equilíbrio.

As condições climáticas da região são denominadas de quente e temperada com temperatura média de 19,0°C, classificado por Köppen e Geiger como Cwa.

## 4.2 Preparo dos corpos de prova

Inicialmente as peças de madeira foram secas ao ar livre até perder o excesso de umidade e posteriormente foram acondicionadas na câmara climática com temperatura de  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  e umidade relativa a  $60 \pm 5\%$  com o objetivo de mantê-las a aproximadamente 12% de umidade.

Trinta corpos de provas da espécie de *P. elliottii* e quarenta corpos de provas de *B. excelsa*. foram confeccionados a partir dos pranchões com as dimensões 2,5 cm (eixo radial), 2,5 cm (eixo tangencial) e 41,0 cm (eixo longitudinal) de acordo com a norma D143.9491

(ASTM, 2014). Este procedimento foi realizado no Laboratório de Usinagem do Departamento de Ciências Florestais (DCF) da Universidade Federal de Lavras (UFLA).

### 4.3 Ensaio dinâmico na madeira

O ensaio dinâmico empregado nas amostras de madeira foi o de vibração transversal utilizando o *Software* e equipamento *Sonelastic*® (ATCP instrument), que é composto por um suporte regulável, pulsador manual e captador acústico (FIGURA 4). A amostra é apoiada nos pontos nodais pelo suporte e os dados são inseridos no programa e em seguida, com o pulsador, o corpo de prova é excitado em uma das extremidades enquanto o captor recebe a frequência sonora gerada. O *software* realiza os cálculos, armazena os dados e os resultados dos testes em uma planilha.

Figura 4 – Modelo de ensaio mecânico não destrutivo utilizando o método de vibração transversal.

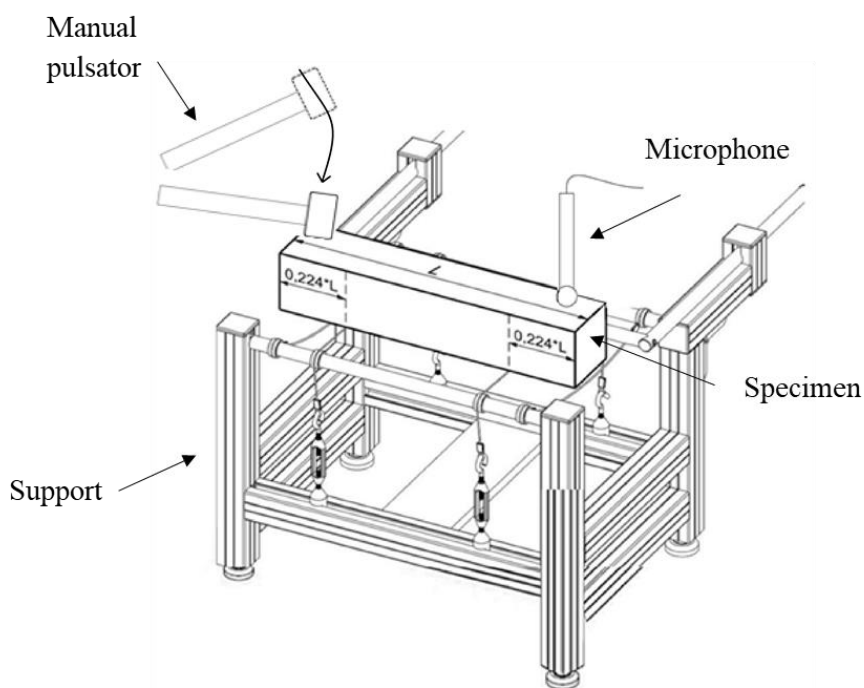


Imagem adaptada de Catálogo Sistema Sonelastic®

Para os testes de análise dinâmica da madeira primeiramente foram necessários os dados de massa dos corpos de prova, obtidos utilizando balança analítica e de precisão, e as dimensões das amostras com o auxílio do paquímetro. Os dados de massa e volume, de cada corpo de prova, foram coletados em níveis pré-determinados de umidade, tanto acima como a baixo do

ponto de saturação das fibras, para imediatamente em seguida serem inseridos no *Software* para realizar as análises de vibração transversal.

Os cálculos base para a interpretação dos dados e conversão em módulo de elasticidade e velocidade de propagação são apresentados também por Fonseca et al., (2019). O programa *Sonelastic*® identifica a frequência fundamental gerada pela vibração e gera a densidade aparente da peça, o módulo de elasticidade e a velocidade de propagação da onda pelo material. O cálculo realizado para a obtenção do MOE e VP seguem, respectivamente, nas equações 01, 02 e 03:

$$MOE = \frac{f^2 L^4}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 I} \frac{W}{gL} \quad (01)$$

$$VP = \frac{L}{T} \quad (02)$$

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad (03)$$

Da qual:

E - Módulo de elasticidade; I - Momento de inércia (m<sup>4</sup>); f - Frequência natural de vibração (Hz); L - Comprimento da viga (m); W - Peso da viga (N); g - Aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>); W/gL - Massa por unidade de comprimento da viga; Vp - Velocidade de propagação (m/s); T - Tempo de trânsito da onda; b - Largura (mm); h - Altura (mm).

Os testes de vibração transversal foram realizados no Laboratório de Nanotecnologia Florestal na UFLA.

#### 4.4 Densidade

A densidade aparente e a densidade básica das amostras foram obtidas pelos dados de volume e massa dada a cada nova umidade, de acordo com a NBR 7190 (ABNT, 1997), pelas Equações 04 e 05:

$$\rho_{ap} = \frac{m_u}{v_u} \quad (04)$$

$$d_b = \frac{m_3}{(m_2 - m_1)} \quad (05)$$

Da qual:

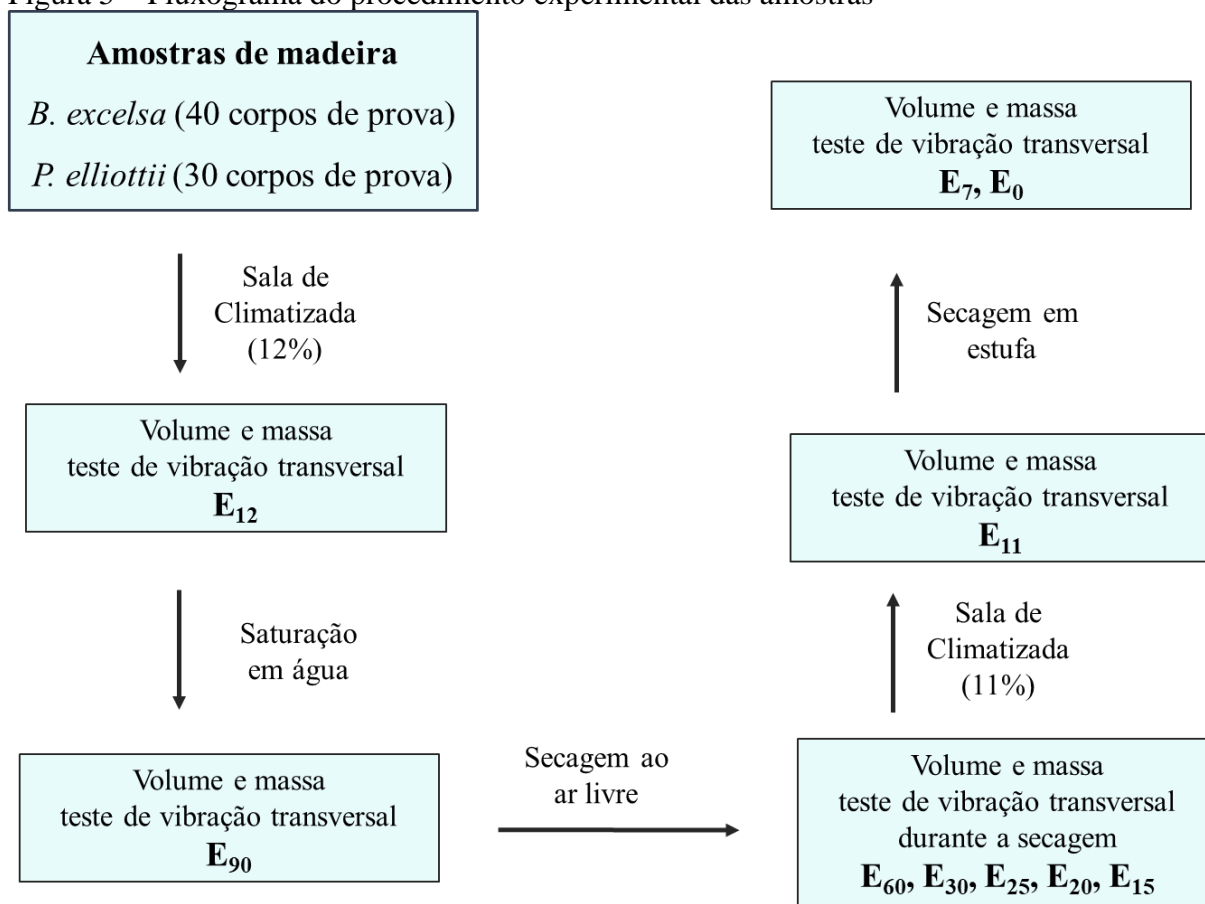
$\rho_{ap}$  – Densidade aparente;  $M_u$  – Massa úmida;  $M_0$  – Massa a 0% de umidade;  $V_u$  – Volume úmido;  $V_s$  – Volume saturado.

#### 4.5 Procedimento experimental

Após estabilização da umidade das amostras dentro da sala de climatização foram coletados os dados de volume e massa dos corpos de prova e realizado o teste de vibração transversal para a umidade de 12%. Em seguida o material foi colocado para saturar mergulhados em recipientes com água.

Diariamente foram estimadas a umidade das amostras controle a partir do peso seco obtido da massa das amostras a 12% de umidade. Após a saturação, o volume e a massa foram coletados para as amostras com média de umidade de aproximadamente 90%, 60% e 30%. Terminada as medidas para os corpos de prova acima do PSF, teve início o processo de secagem ao ar livre com análise das amostras com teor de água médio de 25%, 20%, 15% aproximadamente, em seguida foram direcionadas para a sala de climatização e analisadas a 11% de umidade. Em sequência, as amostras foram secas em estufa até 7% e 0% de umidade e testadas. O processo é melhor exemplificado pelo fluxograma da Figura 5.

Figura 5 – Fluxograma do procedimento experimental das amostras



#### 4.6 Análise estatística dos dados

As análises estatísticas foram realizadas utilizando a linguagem R versão 3.4.3 (R Core Team, 2018), através das estatísticas das ferramentas car (FOX; WEISBERG, 2011) e lmtest (ZELEIS; HOTHORN, 2002).

As equações da regressão linear múltipla foram obtidas no *software* R versão 4.3.4 utilizando o método dos mínimos quadrados ordinários. Além disso, as pressuposições básicas do modelo de regressão linear (normalidade, ausência de autocorrelação e homogeneidade de variâncias dos resíduos) foram verificadas pelos testes de Shapiro-Wilk, Durbin-Watson e Goldfeld-Quandt, respectivamente, todos a 5% de significância.

A análise estatística descritiva foi realizada para avaliar o efeito da umidade sobre o módulo de elasticidade e velocidade de propagação da madeira. Análise de correlação de Pearson foi aplicada para aferir o grau de correlação linear das variáveis umidade, densidade aparente e rigidez e averiguar se a correlação é positiva ou negativa. A análise de regressão linear foi empregada para verificar a influência de uma variável (umidade e densidade) no



comportamento da variável dependente (rigidez e velocidade de propagação), para verificar se uma pode ser utilizada na estimativa da outra.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Efeito da variação da umidade nas propriedades da madeira

A análise descritiva mostra os valores mínimos, médios, máximos e coeficiente de variação para o módulo de elasticidade, velocidade de propagação e densidade aparente das espécies de *Pinus elliottii* e *Bertholletia excelsa* em diferentes umidades obtidos a partir do teste de vibração transversal presentes na Tabela 1.

Tabela 1. Análise descritiva do módulo de elasticidade, velocidade de propagação e densidade aparente da *Bertholletia excelsa* e *Pinus elliottii* em diferentes umidades.

|                             |        | 90%    | 60%    | 30%    | 25%    | 20%    | 15%    | 12%    | 11%    | 5%     | 0%     |        |
|-----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| <i>Bertholletia excelsa</i> | MOE    | Méd    | 12,81  | 13,05  | 13,28  | 13,86  | 13,76  | 13,96  | 14,96  | 14,53  | 15,24  | 14,83  |
|                             |        | Min    | 9,26   | 6,84   | 9,74   | 9,83   | 9,52   | 9,85   | 10,50  | 10,23  | 10,48  | 10,27  |
|                             |        | Max    | 15,78  | 16,54  | 16,79  | 17,63  | 17,53  | 17,86  | 18,57  | 18,65  | 19,33  | 19,16  |
|                             |        | Cv (%) | 13,74  | 15,54  | 13,02  | 13,33  | 13,84  | 14,45  | 12,57  | 14,40  | 14,06  | 14,87  |
|                             | Vp     | Méd    | 3782,2 | 4126,3 | 4624,2 | 4778,8 | 4835,0 | 4957,6 | 5204,7 | 5124,3 | 5304,4 | 5358,4 |
|                             |        | Min    | 3428,9 | 3617,0 | 4132,2 | 4369,6 | 4450,6 | 4531,8 | 4747,5 | 4677,6 | 4714,2 | 4798,0 |
|                             |        | Max    | 4069,1 | 4658,0 | 4990,5 | 5153,9 | 5179,4 | 5284,0 | 5488,2 | 5437,2 | 5610,8 | 5706,7 |
|                             |        | Cv (%) | 4,51   | 5,24   | 4,32   | 4,28   | 3,90   | 3,61   | 3,00   | 3,53   | 3,66   | 3,70   |
|                             | Dap    | Med    | 1,070  | 0,905  | 0,732  | 0,711  | 0,692  | 0,655  | 0,668  | 0,654  | 0,638  | 0,614  |
|                             |        | Min    | 0,903  | 0,496  | 0,559  | 0,550  | 0,544  | 0,021  | 0,533  | 0,520  | 0,508  | 0,484  |
|                             |        | Max    | 1,148  | 1,083  | 0,833  | 0,819  | 0,783  | 0,759  | 0,747  | 0,744  | 0,723  | 0,694  |
|                             |        | Cv (%) | 6,67   | 12,41  | 9,50   | 9,99   | 10,29  | 18,76  | 10,04  | 10,86  | 10,92  | 10,97  |
| MOE                         | Med    | 9,21   | 9,32   | 9,34   | 9,76   | 10,12  | 10,77  | 11,41  | 11,14  | 11,54  | 11,34  |        |
|                             | Min    | 3,59   | 3,33   | 3,45   | 3,57   | 3,67   | 3,18   | 4,50   | 4,27   | 4,54   | 3,61   |        |
|                             | Max    | 17,79  | 15,59  | 15,12  | 15,14  | 16,59  | 17,64  | 18,69  | 18,06  | 19,06  | 19,66  |        |
|                             | Cv (%) | 39,32  | 38,36  | 39,32  | 39,02  | 38,63  | 39,57  | 37,16  | 36,92  | 37,62  | 39,23  |        |
| <i>Pinus elliottii</i>      | Vp     | Med    | 3595,3 | 3908,0 | 4214,5 | 4406,9 | 4519,1 | 4720,6 | 4975,3 | 4888,5 | 5082,7 | 5128,1 |
|                             |        | Min    | 2411,5 | 2551,0 | 2958,7 | 3149,7 | 3240,2 | 3116,6 | 3748,6 | 3585,8 | 3628,5 | 3526,7 |
|                             |        | Max    | 5470,5 | 4927,0 | 5148,3 | 5252,0 | 5411,8 | 5697,8 | 5848,9 | 5734,3 | 5968,6 | 6041,8 |
|                             |        | Cv (%) | 19,52  | 18,86  | 17,76  | 17,20  | 16,41  | 16,79  | 15,04  | 14,98  | 15,40  | 15,63  |
| Dap                         | Med    | 0,820  | 0,695  | 0,591  | 0,564  | 0,556  | 0,540  | 0,531  | 0,526  | 0,509  | 0,484  |        |
|                             | Min    | 0,713  | 0,541  | 0,465  | 0,425  | 0,408  | 0,386  | 0,381  | 0,375  | 0,358  | 0,342  |        |
|                             | Max    | 1,092  | 0,957  | 0,753  | 0,720  | 0,728  | 0,722  | 0,718  | 0,708  | 0,695  | 0,672  |        |
|                             | Cv (%) | 9,25   | 12,58  | 11,41  | 11,91  | 12,70  | 13,56  | 13,74  | 13,88  | 14,48  | 15,01  |        |

MOE: módulo de elasticidade; Vp: velocidade de propagação; Dap: densidade aparente; Min: Mínimo; Max: máximo; Méd: Média; Cv: coeficiente de variação.

É possível observar que conforme a umidade reduz o módulo de elasticidade das madeiras aumenta (FIGURA 6.A). Tanto o *P. elliottii* quanto a *B. excelsa* apresentaram o menor

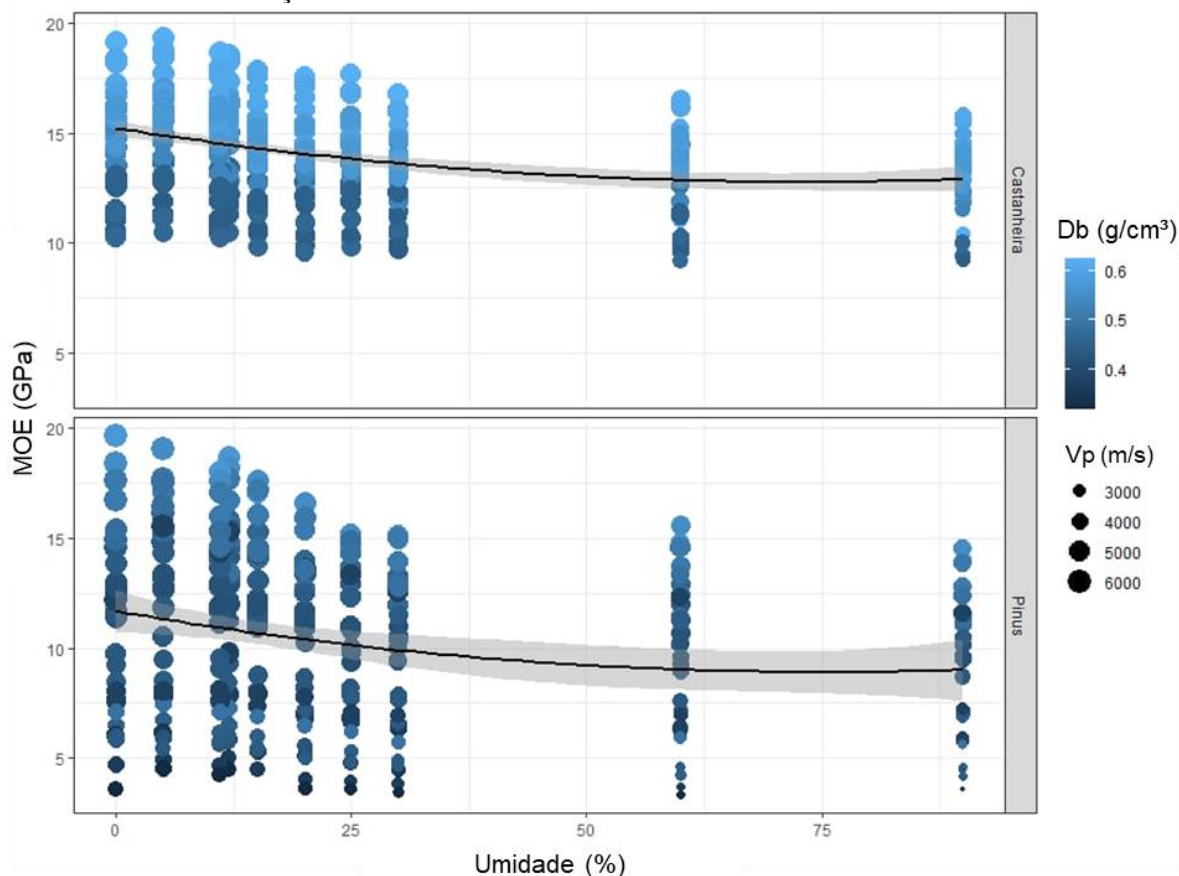
valor médio para a rigidez na umidade de 90%. No entanto os maiores valores de rigidez para ambas as espécies não ocorreram no teor mínimo de umidade, e sim a 5% de umidade, havendo uma redução de 2,33 GPa do módulo de elasticidade para o *P. elliotii* e de 2,43 GPa para a espécie de *B. excelsa*. Aproximadamente 94% e 80%, desta diferença ocorre principalmente entre 0% e o ponto de saturação das fibras, geralmente considerado entre 28 e 30% de umidade da madeira.

A maior variação da rigidez até o ponto de saturação das fibras corre porque a água presente no interior da parede celular propicia o aumento do volume da madeira, reduzindo a quantidade de parede celular por unidade de área e diminuindo a força de coesão entre as microfibrilas de celulose influenciando de forma negativa as propriedades mecânicas. Comportamento este diferente da água de capilaridade presente nos lúmens das células, que não proporcionam aumento considerável de volume. Consequentemente a água de capilaridade afeta de forma mais branda as propriedades mecânicas da madeira (SKAAR, 1988; KORKMAZ; BÜYÜKSARI, 2019).

Mesmo passando pelo processo de saturação e perda de água a 11% de umidade a madeira de *B. excelsa* apresentou valores similares aos obtidos na condição inicial. Na condição anidra o MOE volta a se aproximar da rigidez a 11% de umidade.



Figura 6 – Comportamento do Módulo de elasticidade e velocidade de propagação de acordo com a variação da umidade.



Média geral, média dos cinco valores mínimos e máximos do módulo de elasticidade de acordo com a umidade (a); Média geral, média dos cinco valores mínimos e máximos da velocidade de propagação de onda de acordo com a variação da umidade (b).

Assim como observado para a espécie de castanheira, o pinus após passar pelo processo de saturação e perda de umidade até aproximadamente 11% apresentou valores mais reduzidos. Na condição anidra a espécie *P. elliotii*, comportamento similar ao da castanheira, foi observado MOE próximos aos obtidos nas umidades de 12% e 11% (TABELA 1).

Avaliando os dados médios dos cinco maiores e menores valores, assim como a média geral, do módulo de elasticidade e velocidade de propagação podemos observar que a média dos menores valores da madeira de castanheira se aproximam da média geral da madeira de pinus (FIGURA 6). É notório também a variação dos mínimos e máximos em relação à média geral.

Observa-se que a espécie que possui maiores valores de densidade básica apresenta menores variações das suas propriedades de resistência a flexão e velocidade de propagação em relação as médias dos valores mínimos e máximos, no caso a castanheira (FIGURA 6). Do que

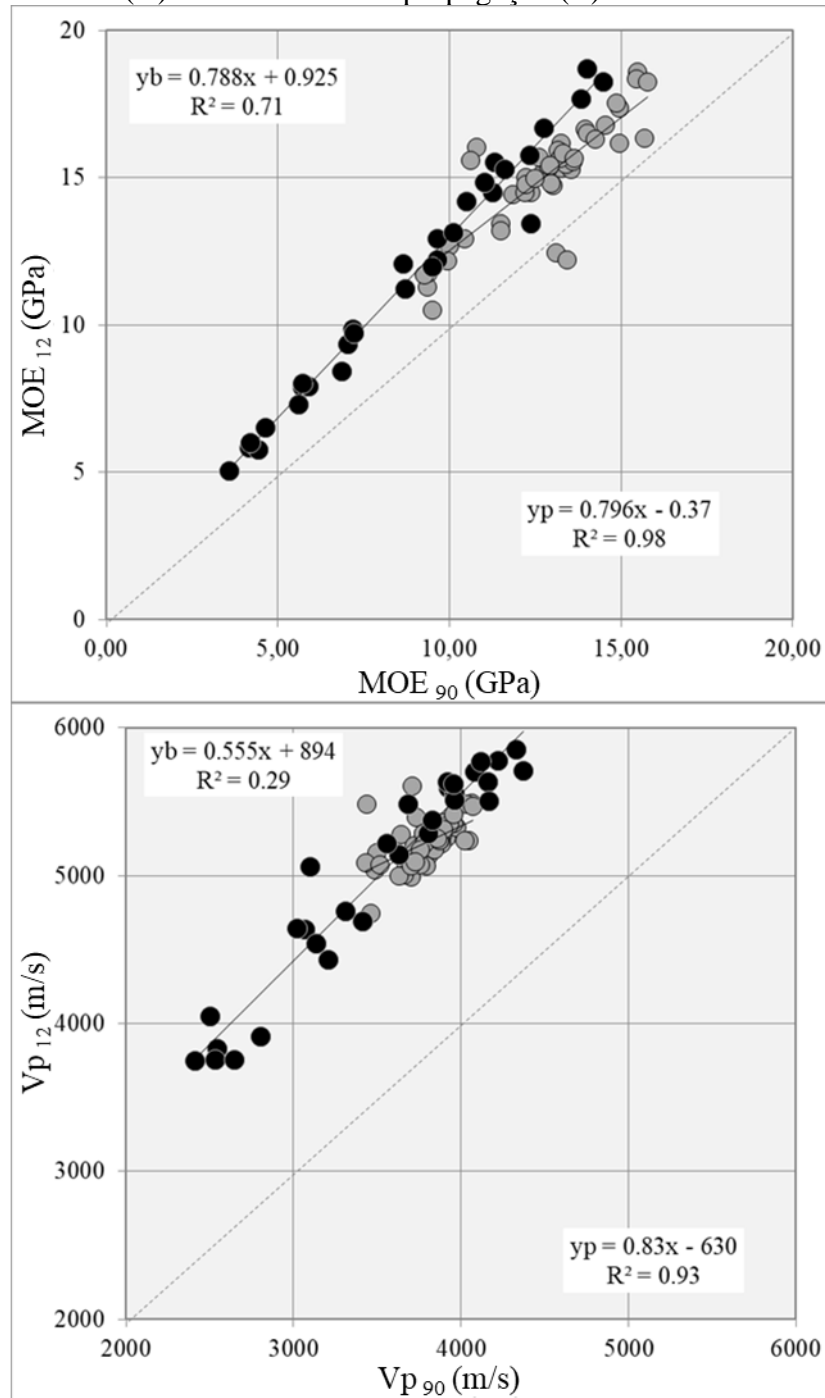
a espécie de menor densidade básica como o pinus, ou seja, madeiras de maior densidade tem suas propriedades mecânicas afetadas de forma mais branda pela umidade.

Por meio das análises observamos que diferente do que foi encontrado por Ilic (2003) tanto a velocidade de propagação quanto o módulo de elasticidade foram maiores para as espécies de maior densidade. O autor ressalta que a velocidade de propagação das ondas é evidentemente influenciada pelo ângulo das microfibrilas de celulose da camada S2.

## **5.2 Efeito da umidade a 12% e 90% na rigidez e velocidade de propagação de ondas**

Em vista que o processamento da madeira ocorre quando o teor de umidade está em aproximadamente 90% e que 12% é a umidade de equilíbrio onde realmente será utilizada, observou-se qual o efeito destas duas umidades na rigidez e velocidade de propagação. Com a realização das análises de vibração transversal para as espécies madeireiras de *Pinus elliottii* e *Bertholletia excelsa* nas duas umidades já mencionadas é possível ter uma visualização da influência da umidade nas propriedades de rigidez (FIGURA 7). No qual uma forte correlação é notável entre o módulo de elasticidade para os dois teores de água com  $R^2 = 0,71$  para a castanheira e  $R^2 = 0,98$  para o pinus (FIGURA 7.A), valores estes maiores do que o encontrado por Ilic (2001).

Figura 7 – Ajuste de modelo linear simples em correlação linear entre os Módulos de elasticidade (A) e Velocidades de propagação (B).



Correlação linear do Módulo de elasticidade saturado ( $MOE_{90}$ ) e Modulo de elasticidade a 12% ( $MOE_{12}$ ) (a), Correlação linear da velocidade de propagação ( $Vp$ ) a 12 e 90% de umidade (b). Círculos em cinza representam amostras de *Bertholletia* enquanto círculos pretos representam amostras de *Pinus*.

É notório, pela soma das amostras das duas espécies, que a redução da VP com o aumento da umidade de 12% para saturada a 90% foi em média de 28% (FIGURA 7). Enquanto que para a mesma variação de umidade o módulo de elasticidade reduziu em média 17%. O

mesmo comportamento para o MOE foi observado por Ozyhar et al. (2013), Jiang et al. (2017) e Korkmaz e Büyüksari (2019).

O coeficiente de determinação entre a velocidade de propagação de onda a 12% e 90% de umidade para a espécie de *Bertholletia* foi 0,29. Enquanto que o *Pinus* apresentou coeficiente de determinação de  $R^2 = 0,93$ . O baixo valor encontrado para o  $R^2$  para a espécie *Bertholletia excelsa* referente a velocidade de propagação pode esta associada a complexidade dos elementos anatômicos característicos das espécies folhosas. Entre os elementos anatômicos da espécie está a presença de anéis de crescimento, placa de perfuração simples, parênquima axial escalariforme com linhas marginais entre outros (BRAGA JÚNIOR et al., 2020). Diferente do *Pinus elliotii* que por ser uma conífera, possui características como a presença de traqueídes longos e menor variação de elementos anatômicos, facilitando assim a propagação das ondas de tensão.

A diferença acentuada entre os coeficientes de determinação, tanto para o módulo de elasticidade quanto para a velocidade de propagação, mostra que a espécie *B. excelsa* apresenta maior variação que o *P. elliotii*, esta variação pode estar relacionada com o pequeno número de amostras. Observa-se também que para o pinus esta variação em relação a velocidade de propagação não é constante, sendo maior quando as amostras são de menor magnitude.

Yang et al. (2015) observaram a mesma tendência decrescente da velocidade de propagação de ondas de ultrassom com o aumento da umidade até 60% para espécies de olmo, abeto e basswood. Os autores ressaltam que este comportamento se dá pela relação existente entre a velocidade da onda e a impedância do meio a ser propagada. E esta impedância muda com a umidade criando a relação inversa entre a umidade e a velocidade de propagação de onda. Os autores observaram também que a velocidade da onda apresenta maior redução abaixo de 32% de umidade.

Com a correlação linear do módulo de elasticidade a 12% com as demais umidades foi possível obter os coeficientes de determinação, coeficientes lineares e coeficientes angulares das regressões (TABELA 2).

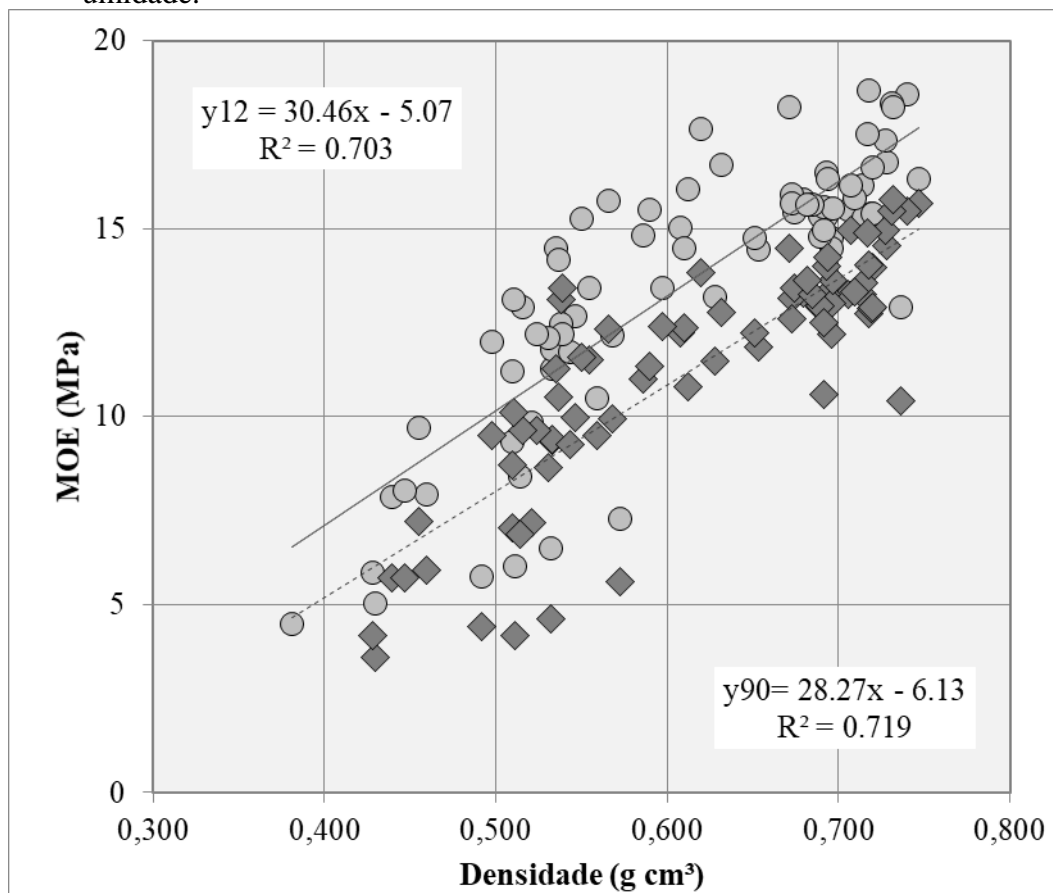
Tabela 2. Coeficiente de determinação ( $R^2$ ), linear (CL) e angular (CA) do MOE em diferentes umidades das espécies de *Pinus elliottii* e *Bertholletia excelsa*.

| MOE/<br>Umidade | <i>Bertholletia excelsa</i> |       |        | <i>Pinus elliottii</i> |       |        |
|-----------------|-----------------------------|-------|--------|------------------------|-------|--------|
|                 | $R^2$                       | CA    | CL     | $R^2$                  | CA    | CL     |
| 12x90           | 0,710                       | 0,788 | 0,925  | 0,980                  | 0,796 | -0,370 |
| 12x60           | 0,900                       | 0,940 | -0,820 | 0,970                  | 0,853 | -0,516 |
| 12x30           | 0,850                       | 0,836 | 0,836  | 0,987                  | 0,861 | -0,477 |
| 12x25           | 0,880                       | 0,922 | 0,044  | 0,960                  | 0,880 | -0,277 |
| 12x20           | 0,900                       | 0,959 | -0,579 | 0,980                  | 0,916 | -0,330 |
| 12x15           | 0,880                       | 0,981 | -0,592 | 0,980                  | 0,978 | -0,986 |
| 12x11           | 0,880                       | 0,886 | -0,253 | 0,990                  | 0,985 | -0,177 |
| 12x05           | 0,890                       | 1,077 | -0,867 | 0,960                  | 1,062 | -0,350 |
| 12x00           | 0,890                       | 1,062 | -0,887 | 0,970                  | 1,007 | -0,275 |

### 5.3 Efeito da umidade e densidade aparente na rigidez da madeira

Sabe-se que a interação da densidade com as propriedades mecânicas da madeira é forte (YANG; EVANS, 2003). É possível visualizar esse comportamento na Figura 8, na qual é evidenciado o desempenho do MOE em relação à densidade aparente e a umidade da madeira.

Figura 8 – Relação do módulo de elasticidade (MOE) e densidade aparente a 12% e 90% de umidade.



Os pontos circulares correspondem a relação entre a rigidez e a densidade aparente nas amostras a 12% de umidade; e os pontos quadrados representam a relação entre rigidez e densidade aparente nas amostras a 90% de umidade.

É possível observar que quanto mais densa as amostras, maiores os valores obtidos para o MOE. E pela inclinação similar das retas é perceptível que a densidade aparente afeta igualmente o módulo de elasticidade da madeira seja ela saturada a 90% de umidade ou na umidade de equilíbrio a 12% de umidade (FIGURA 8). Vörös et al. (2019) ao avaliarem seis espécies com umidade de 12% e a acima do ponto de saturação ressaltam que houve redução das propriedades mecânicas com o aumento da umidade, e que a redução variou de acordo com a espécie.

Por meio da disposição das retas, que se apresentam de forma similar, nota-se que a densidade aparente não interfere na relação umidade x rigidez de forma significativa, exibindo apenas uma pequena abertura maior entre as retas onde os valores de densidade aparente e módulo de elasticidades são maiores.

Os coeficientes de determinação encontrados foram de  $R^2 = 0,70$  e  $R^2 = 0,719$  para a umidade a 12% e a 90%, respectivamente. Estes dados coincidem com estudos realizados por

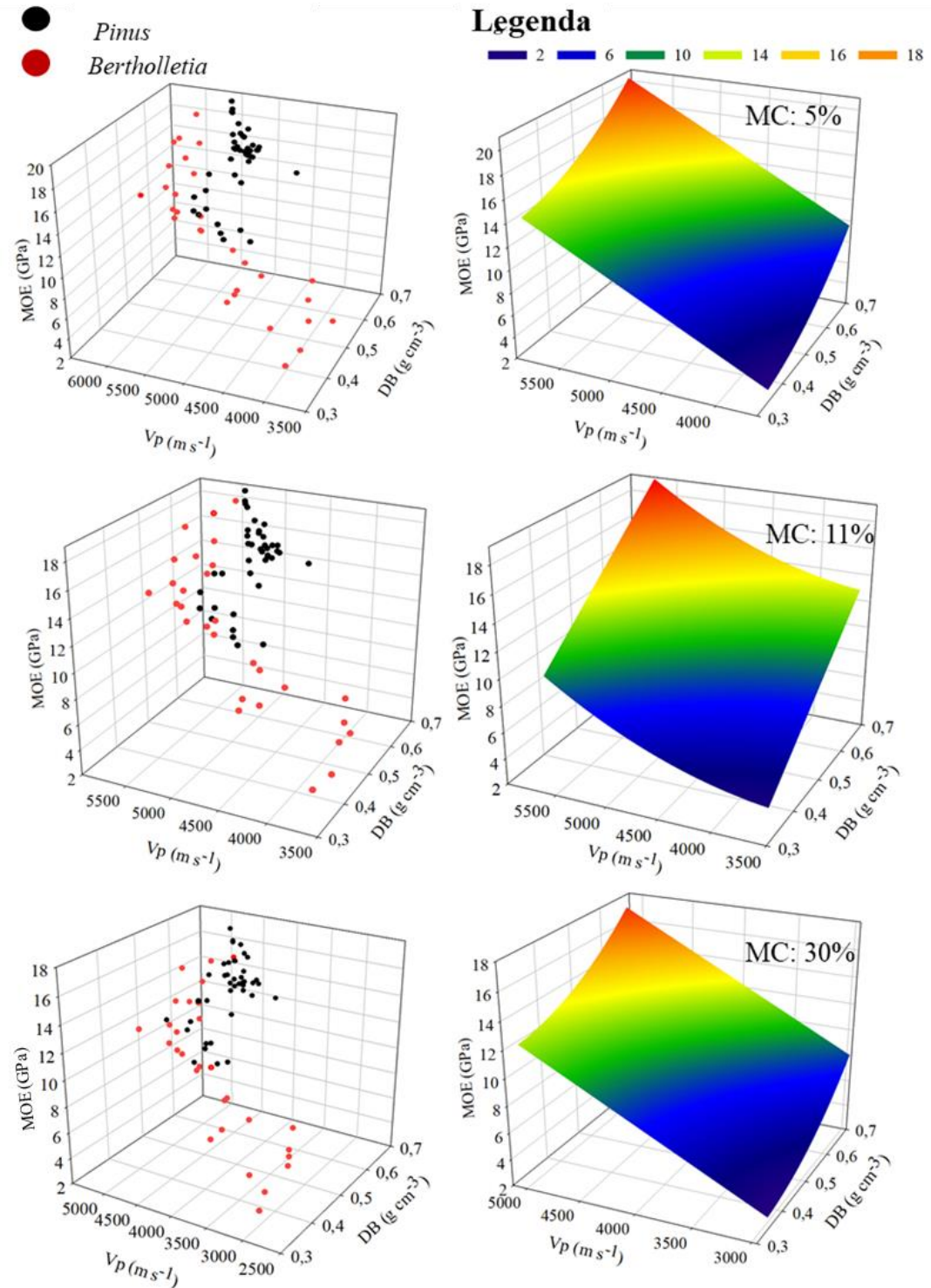
Dias e Lahr, (2004) que observaram ao avaliar quarenta espécies nativas que a densidade aparente e o módulo de elasticidade a flexão apresentou coeficiente de determinação de 0,71. Abruzzi et al. (2012) ao analisarem postes com diferentes classes de deterioração observaram forte correlação entre a densidade aparente e módulo de elasticidade e de ruptura a flexão.

#### **5.4 Efeito da umidade e densidade básica na rigidez e velocidade de propagação das amostras de madeira**

Para o material com umidade abaixo do ponto de saturação das fibras é possível observar que essa propriedade influencia de maneira similar o comportamento das amostras de madeira (FIGURA 9). De forma que há um padrão, no qual quanto maior a umidade, menor são os valores de velocidade de propagação da onda e de módulo de elasticidade, e maior a densidade aparente. Entretanto esta proporção é diferente para cada um destes fatores.

Em relação ao MOE a madeira de pinus apresentou média de 9,34 GPa e castanheira 13,28 GPa quando o teor de água se aproximava de 30% (FIGURA 9). Com queda da umidade para 11% observa-se que o módulo de elasticidade de ambas as espécies aumentou para 11,14 e 14,53 GPa, respectivamente. Então, ao elevar a umidade em 19%, há uma redução média de aproximadamente 13% da resistência da madeira. Esta proporção permanece conforme a madeira é seca, visto que com 5% de umidade o MOE estático do *P. elliottii* é de 11,54 GPa e da *B. excelsa* de 15,24 GPa, sofrendo uma redução de aproximadamente 5% da resistência para o aumento de 6% de umidade.

Figura 9 – Rigidez da madeira e sua relação com a densidade básica (BD) e velocidade da onda acústica a 5%, 11% e 30% da umidade



Korkmaz e Büyüksari (2019) observaram comportamento semelhante ao avaliar carvalho em diferentes umidades abaixo do ponto de saturação das fibras. Os autores destacam que a resposta da madeira está condicionada ao inchaço do material e redução da proporção da



parece celular por área, bem como pelas forças de coesão existente entre as microfibrilas de celulose.

Já em relação ao efeito da umidade na velocidade de propagação, Oliveira e Sales (2005) ressaltam que o aumento da atenuação proporcionada pela água livre ocasiona a redução da velocidade de propagação nos diferentes planos e que isto ocorre devido ao efeito intrínseco da rigidez e na densidade da madeira.

É evidente que a velocidade de propagação da onda é afetada pela umidade, apresentando um comportamento linear, visto que com 30% de umidade o *P. elliotii* e a *B. excelsa* apresentaram médias de VP de 4214,53 m/s e 4624,18 m/s, respectivamente (FIGURA 9). Quando a umidade é reduzida para 11% as velocidades de propagação apresentam aumento para 4888,46 m/s e 5124,31 m/s para as respectivas espécies, havendo um aumento de cerca de 11% da VP. Seguindo o processo de secagem, quando a umidade da madeira atingiu 5%, a velocidade de propagação do Pinus alcançou valor de 5128,06 m/s e a Castanheira 5358,37 m/s.

O decréscimo da velocidade de propagação de onda decorrente do aumento da umidade na madeira também é observado para a madeira de Faia por Ozyhar et al. (2013). Além disso, os autores observaram que a VP ocorre de forma diferente para cada um dos planos anisotrópicos, no qual a velocidade de propagação longitudinal é duas vezes maior que a radial e quatro vezes maior que a tangencial.

O Modulo de elasticidades das espécies estudadas demonstrou comportamento diferente do comportamento linear da velocidade de propagação. O MOE apresentou três procedências, a primeira entre a umidade a 90% e o ponto de saturação das fibras, a segunda entre o PSF e a 5% de umidade e a terceira de 5% a 0%. A primeira corresponde a água livre presente na madeira, a segunda é decorrente do processo de inchamento e contração da madeira causada para saída da água de adsorção e de adesão responsável pelo inchamento e contração da madeira. E a terceira ocorre provavelmente devido ao início do processo de degradação térmica ocasionado pela submissão das amostras a temperaturas próximas de 100°C para a remoção da umidade (CARRASCO; OLIVEIRA; MONTILLA, 2016).

Observa-se que tanto a espécie que possui menor densidade básica quanto a que possui densidade básica maior, apresentam variações semelhantes das suas propriedades de resistência a flexão (FIGURA 9).

A densidade básica média das amostras de *Pinus elliotii* foi de 0,438 g.cm<sup>-3</sup> e as de *Bertholletia excelsa* foi de 0,555 g.cm<sup>-3</sup>, similar a encontrada por Braga Junior et al. (2020) no sudeste do estado do Pará, proveniente da exploração ilegal de madeira. Quanto maior a

densidade básica das amostras, maiores foram os valores do módulo de elasticidade (FIGURA 9). Lai et al. (2019) também observaram esta correlação para *Pinus elliottii* em ensaios de progênie no sul da China, além disso, os autores obtiveram valores médios de densidade maiores para esta espécie.

Comportamento semelhante foi observado para a velocidade de propagação de onda, visto que as amostras de maior densidade apresentaram maiores valores de VP. Para Oliveira e Sales (2005) a densidade não é o fator de maior peso em relação ao efeito na velocidade, pois há outros fatores de maior importância, como as características anatômicas, a espécie em questão e a direção em que foi medida. Carrasco e Azevedo Júnior (2003) acrescentam que além destes, outros fatores também afetam esta propriedade, como heterogeneidade da composição química, a microestrutura da parede celular, irregularidade na disposição dos elementos anatômicos e fatores inerentes à estrutura biológica da madeira.

O presente estudo ressalta a importância de conhecer as propriedades inerentes a madeira e seu comportamento mediante as condições de umidade para melhor aplicá-la. Para estudos futuros seria interessante análises que comparem as respostas entre os métodos de avaliação não destrutiva e os métodos clássicos.

## 6. CONCLUSÕES

A espécie de maior densidade básica, *B. excelsa*, manifestou maiores valores para o módulo de elasticidade e velocidade de propagação que o *P. elliottii* de menor densidade básica. Estabilizados a 12% de umidade, a castanheira obteve a média de 14,96 GPa de MOE e o pinus 11,41 GPa. A maior variação do MOE e VP para ambas as espécies ocorreram entre o ponto de saturação das fibras e 5% de umidade das amostras, obtendo a média máxima de rigidez a 5% de umidade.

Ao avaliar o comportamento da velocidade de propagação e rigidez conforme a variação de umidade, observou-se atuação diferente para os parâmetros analisados. A VP apresentou comportamento linear, aumentando conforme se reduzia a umidade. Já o módulo de elasticidade apresentou três fases que variaram de 90% a 30%, de 30% a 5% e de 5% a 0% de umidade.

Ao analisar as médias dos cinco maiores e menores valores em relação à média geral dos dados obtidos por cada espécie, observou-se que a espécie de menor densidade básica apresentou maior variação que a espécie de maior densidade.

Para *Pinus elliottii* e *Bertholletia excelsa* obteve-se forte correlação entre o módulo de elasticidade das amostras em condições ambientes a 12% de umidade e a 90% de umidade, com coeficiente de determinação de 0,98 e 0,71, respectivamente. Com as amostras das duas espécies observou-se com a redução da umidade o aumento de 17% na rigidez. Para a mesma variação de umidade a velocidade de propagação da onda apresentou coeficiente de determinação de 0,27 para a castanheira e 0,93 para o pinus, ambas resultaram no aumento de 28% da VP conforme a redução da umidade.

A correlação entre o módulo de elasticidade e a densidade aparente mostrou-se alta para as amostras a 12% e a 90% de umidade. Quanto maior a densidade aparente maior o MOE. No entanto, a densidade aparente não apresentou influência significativa no comportamento higromecânico das madeiras.

O método de avaliação não destrutiva por vibração flexural demonstrou ser uma ferramenta eficiente para análise da rigidez da madeira em diferentes umidades.

## REFERÊNCIAS

- ABNT, A. B. DE N. T. Projetos de estruturas em madeira. p. 107, 1997.
- ABRUZZI, R. C. et al. Relação das propriedades mecânicas e densidade de postes de madeira de eucalipto com seu estado de deterioração. **Revista Árvore**, v. 36, n. 6, p. 1173–1182, dez. 2012.
- ALMEIDA, D. H. et al. Determinação da rigidez de *Pinus elliottii* em diferentes teores de umidade por meio de ensaios mecânicos não destrutivos. **Scientia Forestalis**, v. 44, n. 110, p. 303–309, 1 jun. 2016.
- ALMEIDA, F. A. L. **A madeira como material estrutural – Projeto sa estrutura da cobertura de um edifício**. [s.l.] Universidade do Porto, 2012.
- ALMÉRAS, T. et al. Contribution of cellulose to the moisture-dependent elastic behaviour of wood. **Composites Science and Technology**, v. 138, p. 151–160, 2017.
- 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.
- AYDIN, T. Y.; AYDIN, M. Comparison of temperature dependent Young ' s modulus of oriental beech ( *Fagus orientalis* L .) that determined by ultrasonic wave propagation and compression test. **Turkish Journal of Forestry**, v. 19, n. 2, p. 185–191, 2018.
- BALLARIN, A. W.; NOGUEIRA, M. Determinação do módulo de elasticidade da madeira juvenil e adulta de *Pinus taeda* por ultra-som. **Engenharia Agrícola**, v. 25, n. 1, p. 19–28, 2005.
- BARTHOLOMEU, A.; GONÇALVES, R.; BUCUR, V. Dispersion of ultrasonic waves in Eucalyptus lumber as a function of the geometry of boards. **Scientia Forestalis/Forest Sciences**, n. 63, p. 235–240, 2003.
- BENGTSSON, C. Stiffness of spruce wood - Influence of moisture conditions. **Holz als Roh - und Werkstoff**, v. 58, n. 5, p. 344–352, 2000.
- BRAGA JÚNIOR, M. M. et al. Technological properties of woods used in boat's production in the Southeast of Pará, Brazil. **Rodriguésia**, v. 71, 2020.
- BROWN, H. P.; PANSHIN, A. J.; FORSAITH, C. C. **Textbook of wood technology: Commercial timber of the united states**. 1. ed. New york: McGraw-Hill Book Company, INC, 1949.
- BURGER, L. M.; RICHTER, H. G. **Anatomia da Madeira**. 1. ed. São Paulo: Livraria Nobel S. A., 1991.
- CALIL JÚNIOR, C.; DIAS, A. A. Utilização da madeira em construções rurais. **Revista**

**Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 1, p. 71–77, 1997.

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

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

CARRASCO, E. V. M. et al. Avaliação das características mecânicas da madeira por meio de excitação por impulso. **Revista Materia, Suplemento**, p. 12, 2017.

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

CARRASCO, E. V. M.; OLIVEIRA, A. L. C.; MONTILLA, J. N. R. Influencia da temperatura na resistencia e no módulo de elasticidade em madeiras de híbridos de Eucaliptos. **Ciencia e Floresta**, v. 26, n. 2, p. 389–400, 2016.

CARREIRA, M. R. et al. **Avaliação de tecnicas não-destrutivas aplicadas à madeira de Pinus sp.** III Pan-American for nondestructive testing. **Anais...**Rio de Janeiro- Brasil: 2003

CARREIRA, M. R.; CANDIAN, M. Teste de um equipamento para classificação de peças estruturais de madeira pela técnica da vibração transversal. **Ciências exatas e da terra**, v. 29, n. 1, p. 3–14, 2008.

CAVE, I. D. Modelling moisture-related mechanical properties of wood Part II: Compiutation of properties of a model of wood and comparison with experimental data. **Wood Science and Technology**, v. 12, n. 1, p. 127–139, 1978a.

CAVE, I. D. Modelling misture-related mechanical properties of wood. Part I: Properties of the wood Constituents. **Wood Science and Technology**, v. 12, n. 1, p. 75–86, 1978b.

COUSINS, W. J. Elastic lodulus of lignin as related to moisture content. **Wood Science and Technology**, v. 10, p. 9–17, 1976.

COUSINS, W. J. Young's modulus of hemicellulose as related to moisture content. **Wood Science and Technology**, v. 12, n. 3, p. 161–167, 1978.

CRUZ, C. R. et al. Aplicacion of stress waves to estimate moisture content in Eucalyptus wood. **Cerne**, v. 15, n. 4, p. 430–438, 2009.

DEL MENEZZI, C. H. S.; SILVEIRA, R. R.; SOUZA, M. R. Estimativa das propriedades de flexão estática de seis espécies de madeiras Amazônicas por meio da técnica não-destrutiva de ondas de tensão. **Acta Amazonica**, v. 40, n. 2, p. 325–332, 2010.

DIAS, F. M.; LAHR, F. A. R. Estimativa de propriedades de resistência e rigidez da madeira através da densidade aparente. **Scientia Forestalis/Forest Sciences**, n. 65, p. 102–113, 2004.

DIVÓS, F.; TANAKA, T. Relation between static and dynamic modulus of elasticity of wood. **Acta Silv. Lign. Hung.**, v. 1, p. 105–110, 2005.

FONSECA, C. S. et al. Jute fibers and micro/nanofibrils as reinforcement in extruded fiber-cement composites. **Construction and Building Materials**, v. 211, p. 517–527, 2019.

GERHARDS, C. C. Effect of moisture content and temperature on the mechanical properties of wood: An analysis of immediate effects. **Wood and Fiber**, v. 14, n. 1, p. 4–36, 1982.

GÜLZOW, A.; RICHTER, K.; STEIGER, R. Influence of wood moisture content on bending and shear stiffness of cross laminated timber panels. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 69, n. 2, p. 193–197, 2011.

GÜNTEKIN, E.; KAYA, H. Moisture dependent elastic constants of particleboard layers by ultrasound and compression tests. **wood Research**, v. 63, n. 6, p. 1059–1070, 2018.

HEIN, P. R. G. et al. Clonal and environmental variation of structural timbers of Eucalyptus for Growth, density, and dynamic properties. **Cerne**, v. 16, p. 74–81, 2010.

HEIN, P. R. G. et al. Resonance of scantlings indicates the stiffness even of small specimens of Eucalyptus from plantations. **wood sci technol**, v. 46, p. 621–635, 2012.

ILIC, J. Relationship among the dynamic and static elastic properties of air-dry Eucalyptus delegatensis R. Baker. **Holz als Roh- und Werkstoff**, v. 59, p. 169–175, 2001.

ILIC, J. Dynamic MOE of 55 species using small wood beams. v. 61, p. 167–172, 2003.

ILLSTON, J. M.; DOMONE, P. L. J. **Construction Materials: Their nature and behaviour**. 3rd. ed. London and New York: SPON PRESS Taylor e Francis Group, 2002.

JIANG, J. et al. Moisture-dependent orthotropic elasticity and strength properties of Chinese fir wood. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 75, n. 6, p. 927–938, 2017.

KORKMAZ, O.; BÜYÜKSARI, Ü. Effects of moisture content on mechanical properties of micro-size oak wood. **BioResources**, v. 14, n. 4, p. 7655–7663, 2019.

LAI, M. et al. Genotypic variation in the basic density, dynamic modulus of elasticity and tracheid traits of Pinus elliotii in three progeny trials in southern China. **Holzforschung**, v. 74, n. 1, p. 1–9, 18 dez. 2019.

LAM, F. Modern structural wood products. **Progress in Structural Engineering and Materials**, v. 3, n. 3, p. 238–245, 2001.

LATORRACA, J. V. DE F.; ALBUQUERQUE, C. E. C. Efeito Do Rápido Crescimento Sobre As Propriedades Da Madeira. **Floresta e Ambiente**, v. 7, n. 1, p. 279–291, 2000.

LEITE, E. R. DA S. et al. Estimation of the dynamic elastic properties of wood from Copaifera longsdorffii Des using resonance analysis. **Cerne**, v. 18, n. 1, p. 41–47, 2012.

LOGSDON, N. B. **Influência da umidade nas propriedades de resistenci e rigidez da**

**madeira.** [s.l.] Universidade de São Paulo, 1998.

LOGSDON, N. B.; CALIL JUNIOR, C. Influência da Umidade nas Propriedades de Resistência e Rigidez da Madeira. **Cadernos de Engenharia e Estruturas**, v. 18, p. 77–107, 2002.

LORENZI, A. **Aplicação de redes neurais artificiais para estimativa da resistência à compressão do concreto a partir da velocidade de propagação do pulso ultra-sônico.** [s.l.] Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009.

MORALES, E. A. M.; LAHR, F. A. R. Determinação do módulo de elasticidade da madeira: Análise do número de ciclos de carregamento. **Madeira: arquitetura e engenharia**, v. 3, n. 8, 2002.

OLIVEIRA, F. G. R. **Estudo de propriedades mecânicas de dicotiledôneas por meio de ensaio não-destrutivo utilizando equipamento de ultra-som.** [s.l.] Universidade de São Paulo, 2001.

OLIVEIRA, F. G. R.; SALES, A. Efeito da densidade e do teor de umidade na velocidade ultrassônica da madeira. **Revista Minerva**, v. 2, n. 1, p. 25–31, 2005.

ORTIZ, I. H. M.; VITO, M. **Análise da influência da umidade no comportamento à flexão de vigas de Madeira de Cambrará (Qualea ssp.).** [s.l.] Universidade do Extremo Sul Catarinense, 2017.

OZYHAR, T. et al. Determining moisture-dependent elastic characteristics of beech wood by means of ultrasonic waves. **Wood Science and Technology**, v. 47, n. 2, p. 329–341, 2013.

QUINAYÁ, D. C. P.; D'ALMEIDA, J. R. M. Nondestructive characterization of epoxy matrix composites reinforced with Luffa lignocellulosic fibers. **Revista Materia**, v. 22, n. 02, p. 08, 2017.

RIBEIRO, E. S. et al. Avaliação de propriedades mecânicas da madeira por meio de métodos destrutivos e não-destrutivos. **Nativa**, v. 4, n. 2, p. 103–106, 2016.

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

TELES, R. F. et al. Nondestructive evaluation of a tropical Hardwood: Interrelationship between methods and physical-acoustical variables. **Ciência da Madeira**, v. 02, n. 01, p. 1–14, 2011.

VERMA, I.; CRONHJORT, Y.; KUITTINEN, M. Design for care - Use of wood in public buildings. **WCTE 2016 - World Conference on Timber Engineering**, p. 22–25, 2016.

VIVIAN, M. A. et al. Rêsistencia da madeira de Canafístula (*Peltophorum dubium* (Spreng.) Taub.) ao PSF e a umidade de equilíbrio. **Ciência da Madeira**, v. 01, n. 01, p. 11–24, 2010.

VOROBYEV, A. et al. Relations of density, polyethylene glycol treatment and moisture

content with stiffness properties of Vasa oak samples. **Holzforschung**, v. 71, n. 4, p. 327–335, 2017.

VÖRÖS, Á.; NÉMETH, R.; BÁDER, M. The effect of different moisture contents on selected mechanical properties of wood. **Gradus**, v. 6, n. 3, p. 75–81, 2019.

WANG, X. et al. Diameter effect on stress-wave evaluation of modulus of elasticity of logs. **Wood and Fiber Science**, v. 36, n. 3, p. 368–377, 2004a.

WANG, X. P. et al. Assessment of decay in standing timber using stress wave timing nondestructive evaluation tools - a guide for use and interpretation. **General Technical Report - Forest Products Laboratory, USDA Forest Service**, p. 14 pp., 2004b.

YANG, H.; YU, L.; WANG, L. Effect of moisture content on the ultrasonic acoustic properties of wood. **Journal of Forestry Research**, v. 26, n. 3, p. 753–757, 2015.

YANG, J. L.; EVANS, R. Prediction of MOE of eucalypt wood from microfibril angle and density. **Holz als Roh - und Werkstoff**, v. 61, n. 6, p. 449–452, 2003.