



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA (UnB)
FACULDADE DE TECNOLOGIA (FT)
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL (EFL)

**DETERMINAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE DE TRÊS ESPÉCIES DE
MADEIRA ATRAVÉS DE MÉTODOS NÃO DESTRUTIVOS**

REBECCA PERCIANO PORTO

Orientador: Professor Dr. Alexandre Florian da Costa
Coorientador: Me. Helder Resende de Carvalho

Brasília, Distrito Federal

Julho, 2023

REBECCA PERCIANO PORTO

**DETERMINAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE DE TRÊS ESPÉCIES DE MADEIRA
ATRAVÉS DE MÉTODOS NÃO DESTRUTIVOS**

Trabalho apresentado ao Departamento de Engenharia Florestal da Universidade de Brasília (UnB), como parte das exigências para obtenção do título bacharel em Engenharia Florestal.

Brasília, Distrito Federal

Julho, 2023.

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|------------------|---|----|
| Figura 1 | Representação esquemática da parede celular vegetal..... | 12 |
| Figura 2 | Marupá (Árvore)..... | 14 |
| Figura 3 | Corte transversal em tronco de Marupá..... | 15 |
| Figura 4 | Tábuas de madeira de Marupá..... | 16 |
| Figura 5 | Cumarú (Árvore)..... | 17 |
| Figura 6 | Corte transversal em tronco de Cumaru..... | 18 |
| Figura 7 | Tábua de madeira de Cumaru para fins diversos..... | 19 |
| Figura 8 | Eucalipto Vermelho (Árvore)..... | 20 |
| Figura 9 | Corte transversal em tronco de Eucalipto Vermelho..... | 20 |
| Figura 10 | Dormentes de madeira de Eucalipto Vermelho..... | 21 |
| Figura 11 | Stress Wave Timer, modelo 239A da Metriguard, apresentando o polo emissor e o receptor..... | 22 |
| Figura 12 | Caixas plásticas de água usadas para saturação das madeiras..... | 28 |
| Figura 13 | Dessecadores com gel de sílica utilizados para aclimatizar as amostras das madeiras estudadas..... | 29 |
| Figura 14 | Imagem do aparelho utilizado para obtenção dos valores de velocidade de propagação da onda ultrassônicas..... | 32 |
| Figura 15 | Dispersão dos valores da velocidade de propagação da onda de tensão obtidos a partir do ajuste gerado pela regressão não linear, para o aparelho Stress Wave Timer, para a espécie Cumaru..... | 37 |
| Figura 16 | Dispersão dos valores da velocidade de propagação da onda ultrassônica obtidos a partir do ajuste gerado pela regressão não linear, para o aparelho Ultrassom, para a espécie Cumaru..... | 39 |
| Figura 17 | Dispersão dos valores da velocidade de propagação da onda de tensão obtidos a partir do ajuste gerado pela regressão não linear, para o aparelho Stress Wave Timer, para a espécie Eucalipto..... | 41 |
| Figura 18 | Dispersão dos valores da velocidade de propagação da onda ultrassônica obtidos a partir do ajuste gerado pela regressão não linear, para o aparelho Ultrassom, para a espécie Eucalipto..... | 43 |

- Figura 19** Dispersão dos valores da velocidade de propagação da onda de tensão obtidos a partir do ajuste gerado pela regressão não linear, para o aparelho Stress Wave Timer, para a espécie Marupá..... 44
- Figura 20** Dispersão dos valores da velocidade de propagação da onda ultrassônica obtidos a partir do ajuste gerado pela regressão não linear, para o aparelho Ultrassom, para a espécie Marupá..... 45

LISTA DE TABELAS

| | | |
|-----------------|---|-----------|
| Tabela 1 | Densidade e velocidade média de propagação de ondas ultrassônicas para Eucalipto e Jatobá | 26 |
| Tabela 2 | Massa específica básica da madeira das espécies estudadas..... | 28 |
| Tabela 3 | Temperatura da estufa aplicada para cada dia de secagem das amostras..... | 29 |
| Tabela 4 | Cronograma diário de secagem..... | 30 |
| Tabela 5 | Valores médios da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas em m/s, para as três espécies de madeiras..... | 34 |
| Tabela 6 | Valores médios da velocidade de propagação de ondas de tensão em m/s, para as três espécies de madeiras..... | 34 |
| Tabela 7 | Valores de β_0 , β_1 , erro padrão da estimativa (%) e R2 obtidos através da análise de regressão linear, com probabilidade de 95%, para os dados obtidos através dos aparelhos Stress Wave Timer (SWT) e Ultrassom (US)..... | 35 |
| Tabela 8 | Funções obtidas através da aplicação da regressão linear múltipla, para os aparelhos Stress Wave Timer (SWT) e Ultrassom (US), para as espécies de madeiras estudadas..... | 36 |
| Tabela 9 | Valores do coeficiente de correlação e erro padrão percentual obtidos através da análise de regressão não linear, para os aparelhos Stress Wave Timer e Ultrassom, para as três espécies de madeiras..... | 36 |

LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANOVA – Análise de Variância

CV – Coeficiente de Variação

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

LPF – Laboratório de Produtos Florestais

MLC – Madeira Laminada Colada

MMA – Ministério do Meio Ambiente e Mudanças Climáticas

MOE – Módulo de Elasticidade Dinâmico

MOEDir – Módulo de Elasticidade Obtido de Forma Direta

NDT – Ensaio não destrutivo

NPWS – National Parks and Wildlife Service

SWT – *Stress Wave Timer*

UnB – Universidade de Brasília

,

AGRADECIMENTOS

Me baseio sempre na conhecida afirmação "o que é para ser, será e até os ventos mais fortes perdem as suas forças". Por isso, dedico este trabalho a Deus, que perfeitamente planeja e conduz cada passo meu. Cursar Engenharia Florestal, certamente, foi um perfeito plano dele - que eu seja sempre um instrumento.

Agradeço aos meus pais e à minha irmã, que, mais do que eu poderia imaginar, foram meus maiores incentivadores e apoiadores. Obrigada por todo amor, tempo e cuidado depositados em mim. Que eu cresça, floresça e possa retribuí-los à altura. Eu amo vocês!

Também, agradeço ao meu namorado, Luiz Augusto Fidalgo, por toda parceria e companheirismo que temos. Com certeza, viver a vida ao seu lado é mais fácil, colorida e rodeada de bondade. Obrigada por fazer parte de quem eu sou há 7 anos.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Alexandre Florian, o meu mais sincero obrigada. Como eu fui feliz na escolha de um orientador que valoriza o esforço, respeita a Universidade e o aluno, e incentiva a pesquisa científica como forma de transformar a realidade. Obrigada por todas as reuniões, conselhos e ajudas ao longo do ano de trabalho!

Aos meus colegas do curso, vocês foram fundamentais. Em especial, agradeço à Joelma Costa, Luiza Lopes, Milenny Eduarda e Vanessa Carvalho - vocês me tornaram uma pessoa muito melhor! Obrigada pelos aprendizados, incentivos, carinho e parceria ao longo do curso. Levarei vocês para sempre no coração.

Caros amigos do ICP, obrigada por termos vivido o intercâmbio juntos, durante a Universidade. A vida sem vocês já não é mais a mesma. Arthur César, Fernando Bisi, Guilherme Arguesso, Iasmin Ofugi, Luiza Alckmim, Maria Clara Zuba, Mayara Dias, Raquel Evangelista, Rodrigo Jimenez e Thayná Borges: obrigada por tanto!

À Engenharia Florestal e ao Departamento de Engenharia Florestal da Universidade de Brasília (UnB), obrigada por ensinarem a importância do bem mais precioso existente: a vida, em todas as suas formas e jeitos.

A todos vocês, meu muito obrigada!

Rebecca Perciano Porto

RESUMO

Paralelo ao crescimento do mercado de produtos e subprodutos madeireiros e à necessidade de maior eficiência produtiva, são estudados métodos não destrutivos para a avaliação de diferentes propriedades da madeira. Este estudo utilizou as metodologias não destrutivas Stress Wave Timer e Ultrassom para estimar o teor de umidade, através da velocidade de propagação de ondas de tensão e ultrassônicas das espécies Simarouba amara, Eucalyptus camaldulensis e Dipteryx odorata. Foram coletadas 30 amostras de cada espécie e os dados foram analisados por regressão linear múltipla. O método *Stress Wave Timer* mostrou maior consistência nos dados para o Marupá, mas apresentou resultados menos satisfatórios para o Cumaru e o Eucalipto Vermelho. Esta pesquisa ressalta a viabilidade dos métodos não destrutivos para estimar o teor de umidade da madeira, mas destaca a importância da execução de futuros estudos, a fim de obter resultados mais precisos e aplicáveis.

Palavras-chave: Teor de umidade; Stress Wave Timer; Ultrassom; Métodos não destrutivos.

ABSTRACT

Parallel to the growth of the market for timber products and by-products and the need for greater production efficiency, non-destructive methods for evaluating different wood properties are being studied. This study used the non-destructive methodologies Stress Wave Timer and Ultrasonic to estimate moisture content through the propagation speed of stress wave and ultrasonic waves in the species *Simarouba amara*, *Eucalyptus camaldulensis* and *Dipteryx odorata*. Thirty samples of each species were collected, and the data were analyzed using multiple linear regression. The Stress Wave Timer method showed greater consistency in the data for *Simarouba amara* but yielded less satisfactory results for *Dipteryx odorata* and *Eucalyptus camaldulensis*. This research highlights the viability of non-destructive methods for estimating wood moisture content but emphasizes the importance of conducting future studies to obtain more accurate and applicable results.

Keywords: Moisture content; Stress Wave Timer; Ultrasound; Non-destructive methods.

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| INTRODUÇÃO..... | 11 |
| OBJETIVOS..... | 13 |
| 1. Objetivo Geral..... | 13 |
| 2. Objetivos Específicos..... | 13 |
| REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 14 |
| 1. Espécies estudadas..... | 14 |
| 1.1. Marupá (Simarouba amara Aubl.)..... | 14 |
| 1.2. Cumaru (Dipteryx odorata Aubl. Willd.)..... | 16 |
| 1.3. Eucalipto Vermelho (Eucalyptus camaldulensis Dehnh.)..... | 19 |
| 2. Stress Wave Timer..... | 21 |
| 2.1. Aplicação do Stress Wave Timer para o teor de umidade..... | 23 |
| 3. Ultrassom..... | 23 |
| 3.1. Aplicação do Ultrassom para o teor de umidade..... | 23 |
| 4. Perfil de usos gerais do Ultrassom e Stress Wave Timer..... | 24 |
| MATERIAIS E MÉTODOS..... | 24 |
| 1. Ensaio preliminar..... | 24 |
| 1.1. Dimensionamento das amostras..... | 25 |
| 1.2. Determinação dos parâmetros de secagem..... | 26 |
| 2. Coleta e preparo das amostras..... | 27 |
| 2.1. Massa específica básica das espécies..... | 28 |
| 3. Metodologia e cronograma de coleta dos dados..... | 28 |
| 4. Coleta dos Dados..... | 30 |
| 4.1. Massa Úmida e Seca das Amostras..... | 30 |
| 5. Velocidade de Propagação das Ondas de Tensão e Ultrassônicas..... | 31 |
| 5.1. Stress Wave Timer..... | 31 |
| 5.2. Ultrassom..... | 32 |
| 6. Análise dos dados e ajuste dos modelos..... | 33 |
| RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 33 |
| 1. Velocidade média de propagação das ondas..... | 33 |
| 2. Regressão linear simples..... | 34 |
| 3. Regressão linear múltipla..... | 35 |
| 4. Dipteryx odorata Aubl. Willd. (Cumaru)..... | 37 |
| 4.1. Stress Wave Timer..... | 37 |
| 4.2. Ultrassom..... | 38 |
| 5. Eucalyptus camaldulensis Dehnh. (Eucalipto Vermelho)..... | 40 |
| 5.1. Stress Wave Timer..... | 40 |
| 5.2. Ultrassom..... | 42 |
| 6. Simarouba amara Aubl. (Marupá)..... | 43 |
| 6.1. Stress Wave Timer..... | 43 |

| | |
|--|-----------|
| 6.2. Ultrassom..... | 45 |
| CONCLUSÃO..... | 46 |
| RECOMENDAÇÕES..... | 47 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 47 |

INTRODUÇÃO

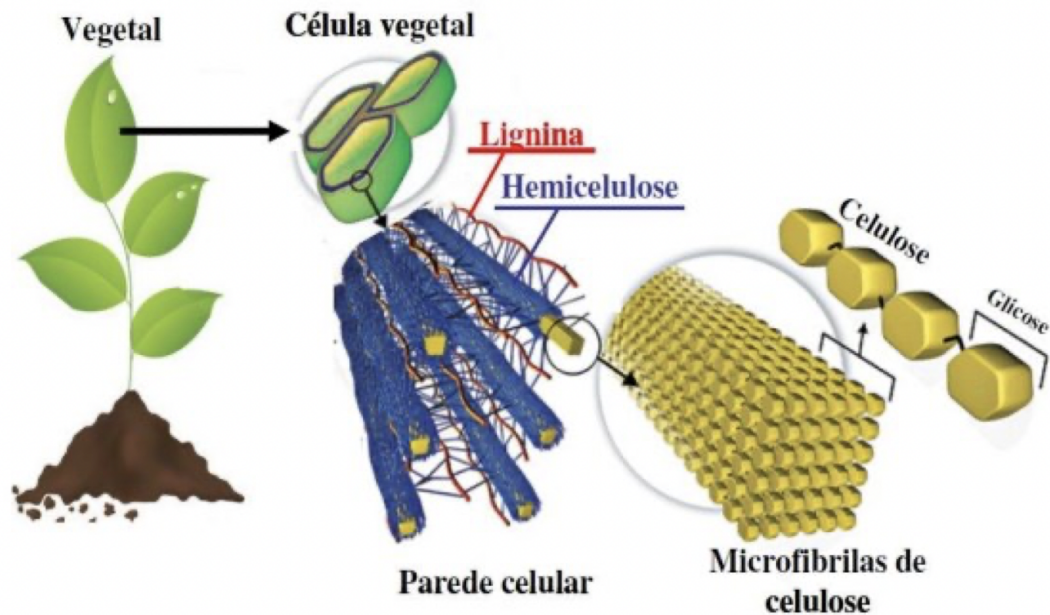
Nos últimos anos, conforme advento tecnológico, a madeira tem sido cada vez mais utilizada em diversos setores, como construção civil, produção de celulose e papel, indústria moveleira, produção de energia, alimentos, cosméticos e outros produtos manufaturados. A exemplo, conforme o Grupo Index (2022), a demanda global por celulose é crescente e aumenta em torno de 100 toneladas por mês. Ainda, o Brasil destaca-se internacionalmente, uma vez que diversos países do continente europeu encontram dificuldades em manter a produção proporcional à demanda.

Dessa forma, torna-se imprescindível o desenvolvimento de metodologias que promovam maior eficiência no aproveitamento da madeira, visando aumentar a produtividade, paralelamente ao incentivo à sustentabilidade e redução custos e desperdício.

A madeira é um material heterogêneo e anisotrópico, ou seja, suas propriedades variam entre os seus três eixos (longitudinal, radial e tangencial). Sua qualidade é o resultado de práticas de manejo florestal e de uma combinação de características genéticas, físicas, anatômicas e químicas (SHIMOYAMA; BARRICHELLO, 1991). Sob ótica da anatomia macroscópica, conforme Panshin e Zeeuw (1970), a madeira formada por um conjunto de células com propriedades específicas, designadas às funções vitais de crescimento, condução de água, transformação de compostos e estruturas, armazenamento e condução de substâncias nutritivas, além de sustentação do vegetal.

Em termos químicos, sua composição é, basicamente, dada por carbono, oxigênio, hidrogênio e componentes acidentais (aqueles que não fazem parte da composição da parede celular e lamela média da madeira). Conforme Rowell *et al.* (2005), esses arranjam-se entre si formando os principais componentes estruturais, que são a celulose (40 - 45%), hemicelulose (15 - 25%) e lignina (18 - 35%), conforme a Figura 1. Quando juntos, conferem propriedades físicas e mecânicas a cada espécie vegetal e essas dependem do teor de umidade da madeira.

Figura 1 - Representação esquemática da parede celular vegetal.



Fonte: adaptado de Martins (2018).

O conjunto das citadas propriedades garante o padrão de qualidade para uma respectiva finalidade, de tal modo que o uso da madeira seja adequado ao seu potencial. Em especial, as propriedades mecânicas determinam a resistência da madeira quando submetida a esforços externos e essa resistência pode ser influenciada por fatores como teor de umidade, retratibilidade, porcentagem de lenho juvenil e densidade (JOSINO, 2014).

Nesse contexto, Galvão e Jankowsky (1985) afirmam que há, na madeira, dois tipos de água: água livre (ou de capilaridade) e água de adesão. A água livre é aquela localizada no lúmen das células (vasos, traqueídeos e fibras), sendo a primeira a ser eliminada assim que a árvore é abatida e inicia o processo natural de secagem. A água de adesão é a que está contida no interior das paredes celulares, sendo mais dificilmente eliminada. Uma alternativa à eliminação é através do fornecimento de energia para a mesma, possibilitando-a alcançar o ponto de saturação das fibras.

A determinação do teor de umidade da madeira permite controlar o custo e tempo de produção, reduzir a quantidade de defeitos na forma, proporcionar estabilidade dimensional nos três eixos, além de facilitar outros tratamentos, como o uso de preservantes químicos (GALVÃO; JANKOWSKY, 1985). Para tal, atualmente, existem dois métodos gerais: os destrutivos e os não destrutivos. O primeiro, como seu nome sugere, requer a destruição do

material em questão, além de demandar mais tempo, recursos financeiros e desperdício de material. Como exemplo, cita-se o método gravimétrico.

Já os ensaios não destrutivos (NDT), não demandam destruição das amostras (podem ser feitos nos próprios materiais), tendem a ser mais rápidos e podem evitar gastos extras - pilares fundamentais num processo de produção comercial. Ross e Pellerin (1994) definiram a avaliação de material por meio de métodos não destrutivos como a ciência de identificar as propriedades físicas e mecânicas das peças sem alteração das suas propriedades.

Estudos conduzidos por Calegari L. *et al.* (2007 e 2011) indicam que a relação entre o teor de umidade na madeira e a velocidade de propagação das ondas de tensão e ultrassônicas é inversamente proporcional. Portanto, quanto maior o teor de umidade na madeira, menor será a velocidade de propagação dessas ondas. Ainda, conforme os autores, é possível identificar influência da massa específica básica sobre as velocidades de propagação dos dois tipos de onda, em que, a depender da espécie, a relação pode ser proporcional ou inversamente proporcional.

Sendo assim, o objetivo do presente trabalho é avaliar a viabilidade de uso de métodos não destrutivos (*Stress Wave Timer* e Ultrassom) como forma de estimar o teor de umidade presente na madeira, a partir de funções matemáticas.

OBJETIVOS

1. Objetivo Geral

O objetivo geral da pesquisa é avaliar a viabilidade do uso dos métodos não destrutivos *Stress Wave Timer* e Ultrassom para estimar o teor de umidade de amostras de madeiras das espécies Cumaru (*Dipteryx odorata*), Marupá (*Simarouba amara* Aubl.) e Eucalipto Vermelho (*Eucalyptus camaldulensis* Dehnh.).

2. Objetivos Específicos

Quanto aos objetivos específicos, o projeto visa:

- Gerar funções para estimar o teor de umidade das amostras de madeiras das espécies estudadas;

- Estabelecer qual modelo estatístico apresenta a melhor correlação entre a velocidade de propagação da onda (*Stress Wave Timer* e Ultrassom) e o teor de umidade das amostras de madeira;
- Avaliar a viabilidade de uso dos aparelhos *Stress Wave Timer* e Ultrassom como métodos para estimar o teor de umidade das amostras das madeiras estudadas.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1. Espécies estudadas

1.1. Marupá (*Simarouba amara* Aubl.)

A *Simarouba amara* Aubl., também conhecida como Marupá ou Caixeta (Figura 2), é uma espécie de madeira da família Simaroubaceae e possui ocorrência na América do Sul, principalmente no Brasil e países vizinhos. Neste País, ocorre majoritariamente na Região Amazônica e, conforme o Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (2023), a massa específica básica da espécie é de $0,37 \text{ g/cm}^3$.

Figura 2 - Marupá (Árvore)



Fonte: Laboratório de Produtos Florestais (2022).

Apresenta altura média entre 15 e 25 m, com tronco de 50 a 80 cm de diâmetro. É uma planta semidecídua, dependente da luz solar (heliófita) e seletiva higrófita (adaptada às condições de umidade abundante do ambiente). Essas características configuram espécies de florestas pluviais, o que permite ao Marupá ser encontrado no interior de mata primária densa e em formações abertas e secundárias (LORENZI, 1992).

Anualmente, essa espécie produz grande quantidade de sementes e sua floração ocorre nos meses de agosto e setembro, enquanto seus frutos amadurecem entre novembro e dezembro (LORENZI, 1992). Fisicamente é caracterizada por sua coloração branca amarelada (Figura 3), grã direta, anéis de crescimento pouco distintos e sua textura média (LABORATÓRIO DE PRODUTOS FLORESTAIS, 2022).

Figura 3 - Corte transversal em tronco de Marupá



Fonte: Laboratório de Produtos Florestais (2022).

Devido à sua baixa massa específica básica e à fácil trabalhabilidade, na construção civil, seu uso é destinado à confecção de tábuas (Figura 4), rodapés, forros e lambris. Na indústria mobiliária, principalmente à produção de móveis de *design* contemporâneo, como cadeiras, mesas e armários (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2023). Além disso, a madeira dessa espécie apresenta usos diversos, como produção de cabo de vassoura, palitos, chapas compensadas, saltos para calçados e instrumentos musicais, como o violão.

Figura 4 - Tábuas de madeira de Marupá



Fonte: Grupo Bernadoni (2023).

1.2. Cumaru (*Dipteryx odorata* Aubl. Willd.)

O Cumaru é uma madeira da família Leguminosae e é, também, conhecida por Cumaru-Verdadeiro (Figura 5). A espécie ocorre no Brasil, em toda Região Amazônica, do Acre ao Maranhão (LABORATÓRIO DE PRODUTOS FLORESTAIS, 2022).

Figura 5 - Cumaru (Árvore)



Fonte: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (2022)

Conforme o Laboratório de Produtos Florestais (2022), sua densidade básica é de $0,91 \text{ g/cm}^3$, o que a qualifica como uma madeira de alta massa específica básica (JANKOWSKY *et al.*, 1990). Ainda, a espécie apresenta anéis de crescimento distintos, cerne castanho escuro, alburno bege claro (Figura 6), grã cruzada revessa, textura ao tato de média a fina e brilho ausente. O Cumaru apresenta súber de cor amarelo-cinza a bege e forma cascas não perenes, de textura similar à cortiça. A presença de sapopemas assimétricas é comum, de até 1 m de comprimento (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA, 2022).

Figura 6 - Corte transversal em tronco de Cumaru



Fonte: Laboratório de Produtos Florestais (2022).

Ainda conforme a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (2022), a madeira do Cumaru é de difícil trabalhabilidade e apresenta elevada resistência e durabilidade. Dessa forma, essa madeira é largamente utilizada na construção civil (vigas, pilares, assoalhos, *decks* e revestimentos), para a produção de móveis de uso comercial e residencial, no desenvolvimento de esquadrias e carpintaria, e na confecção de instrumentos musicais, principalmente guitarras, violões e violinos (Figura 7).

Figura 7 - Tábua de madeira de Cumaru para fins diversos



Fonte: Central Norte Madeiras (2023).

1.3. Eucalipto Vermelho (*Eucalyptus camaldulensis* Dehnh.)

O gênero *Eucalyptus* é conhecido por sua diversidade de espécies e boa adaptação às condições ambientais brasileiras (COSTA, *et al.*, 2012). Dentre as espécies de Eucalipto produzidas no Brasil, encontra-se o *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh., popularmente conhecido como Eucalipto Vermelho, representado na Figura 8. Trata-se de uma espécie originária da Austrália, que possui grande plasticidade ambiental e, portanto, foi capaz de adaptar-se ao Brasil e suas diversas condições ecológicas, como clima, solo e pluviosidade (MORAES, *et al.*, 1997).

Conforme Nieto e Rodriguez (2003), essa espécie apresenta crescimento rápido, copa densa, raízes profundas e é resistente aos fortes ventos e frio. Além disso, apresenta fuste reto, podendo atingir entre 25 e 30 m de altura. Na Austrália, essa espécie é encontrada à beira de rios e apresenta vida útil entre 500 e 1000 anos, conforme a *National Parks and Wildlife Service* (2023).

Figura 8 - Eucalipto Vermelho (Árvore)



Fonte: *Biodiversity for all* (2023).

Quando cortada, a madeira dessa espécie apresenta coloração vermelha (Figura 9) devido aos compostos químicos presentes em sua composição, que também conferem maior durabilidade e proteção biológica contra agentes patógenos (THE CONVERSATION, 2019).

Figura 9 - Corte transversal em tronco de Eucalipto Vermelho



Fonte: Associação dos Fumicultores do Brasil (2023).

Devido ao seu rápido desenvolvimento e crescimento, o uso da madeira de Eucalipto Vermelho abrange diferentes setores da economia. As principais aplicações são vistas na indústria de produção de papel e celulose; na construção civil, sendo utilizada para a produção de vigas, caibros, ripas, tábuas e outros elementos estruturais (Figura 10); na produção de biomassa para a produção de energia renovável e, também, a madeira de Eucalipto Vermelho é aproveitada na fabricação de móveis, especialmente em peças de mobiliário rústico e artesanato.

Figura 10 - Dormentes de madeira de Eucalipto Vermelho



Fonte: *Aldinga Landscape* (2023)

2. *Stress Wave Timer*

O aparelho *Stress Wave Timer* (SWT) é o temporizador de ondas de tensão longitudinais e é utilizado como método não destrutivo, pois consegue avaliar parâmetros em peças inteiras, sem que seja necessária a remoção de amostras. Dentre outros materiais, sua aplicação ocorre em peças de madeiras, como árvores vivas, vigas, colunas, estacas, postes e painéis.

O modelo utilizado no estudo é o 239A da Metriguard (Figura 11) e fundamenta-se na mensuração do tempo de propagação das ondas de tensão geradas pelo impacto promovido entre o aparelho e a peça avaliada, no sentido paralelo às fibras. O aparelho é composto por dois polos transdutores, o emissor e o receptor, que devem ficar acoplados de forma diametralmente oposta na peça. A velocidade de propagação de uma onda de tensão induzida e sua atenuação no material são os principais parâmetros analisados nesta técnica (TARGA *et al.*, 2005).

Figura 11 - *Stress Wave Timer*, modelo 239A da Metriguard, apresentando o polo emissor e o receptor



Fonte: Metriguard (1997).

O SWT conta com um acelerômetro em cada polo e ambos detectam a propagação da onda ao longo da peça. O primeiro acelerômetro (*start*) localiza-se embutido no dispositivo de impacto (pêndulo), enquanto o segundo (*stop*) é fixado ao corpo de prova. Em funcionamento, o temporizador eletrônico inicia quando a frente de onda de tensão chega no *start* e para quando chega no *stop*. Conforme o manual do aparelho (METRIGUARD, 1997), a precisão do aparelho é de 1 microssegundo e o tempo obtido é utilizado para o cálculo da velocidade de propagação das ondas de tensão.

2.1. Aplicação do *Stress Wave Timer* para o teor de umidade

Cruz *et al.* (2009) aplicou o *Stress Wave Timer* para determinar o teor de umidade de madeira de *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus cloeziana*. Através da correlação de densidade, velocidade de propagação das ondas, presença de nós e o teor de umidade, concluiu-se que o teor de umidade de madeira pode ser estimado através do uso de propagação de ondas e ajuste dos dados por modelos não lineares. Ainda, para as amostras das espécies, a densidade e a área afetada por nós foi determinante sobre o comportamento das ondas, reduzindo a acurácia dos resultados.

3. Ultrassom

Ultrassom são ondas sonoras mecânicas, ou seja, propagam-se apenas em meio físico e apresentam frequências inaudíveis pelo ser humano, pois encontram-se acima de 20 KHz (GONÇALEZ *et al.*, 2001). Conforme a variação do material, a propagação dessas ondas ocorre em diferentes frequências e direções.

Conforme Brook e Martin (2012), é possível obter evidências de defeitos, níveis de dureza, sentidos de organização e crescimento granular em materiais sólidos ou líquidos altamente viscosos, através da identificação dos diferentes tipos de propagação das ondas sonoras e seu nível de intensidade.

A transmissão das ondas ultrassônicas ocorre através de transdutores dispostos diametralmente opostos, formando um circuito elétrico. Conforme Calegari (2006), os pulsos gerados nesse circuito são conduzidos por cabos e convertidos em ondas elásticas pelo cristal piezoelétrico, localizado nos transdutores.

O cristal piezoelétrico é um cristal oscilador, também conhecido por XTAL, que gera um campo elétrico quando submetido a alguma pressão e é amplamente utilizado por sua alta sensibilidade dentro de um circuito elétrico. Ainda, é necessário o uso de gel condutor (carbogel), de forma a evitar a presença de ar entre os transdutores e a peça sob estudo, reduzindo a chance de interferências na aferição da velocidade.

3.1. Aplicação do Ultrassom para o teor de umidade

Calegari, *et al.* (2007) realizou os ensaios com as espécies *Eucalyptus grandis* e *Pinus elliottii*, e constatou que a velocidade de propagação das ondas ultrassônicas foi

significativamente influenciada pelo teor de umidade da madeira, havendo uma relação inversa entre ambas as propriedades. Ainda, os modelos de regressão adequaram-se melhor às estimativas do teor de umidade da madeira de Eucalipto, quando comparados à de Pinus.

Pereira (2018) analisou as influências sobre a leitura de propagação de ondas no ensaio de ultrassom na madeira e concluiu que, o teor de umidade, as condições estruturais e o uso de acoplante adequado podem alterar a velocidade de propagação das ondas.

4. Perfil de usos gerais do Ultrassom e *Stress Wave Timer*

Nos últimos dez anos, muitos estudos foram desenvolvidos utilizando os métodos não destrutivos, principalmente o *Stress Wave Timer* (SWT) e o Ultrassom (US). Para o primeiro, a principal aplicação deu-se para obtenção e avaliação do módulo de elasticidade de diversas espécies. Abreu, *et al.* (2013) aplicou o SWT em estruturas madeireiras de um edifício histórico em Tiradentes (MG), a fim de obter o módulo de elasticidade dinâmico das peças e avaliar sua integridade.

O estudo realizado por Souza *et al.* (2022, p. 15) avaliou os módulos de elasticidade por meio de ensaios não destrutivos para madeira laminada colada (MLC) e concluiu que “é possível efetuar uma adequada estimativa do módulo de elasticidade de elementos de MLC, sem a necessidade de retirada de corpos de prova para a execução de ensaios destrutivos”.

Quanto ao tratamento de madeiras, o ultrassom é utilizado, principalmente, para gerar conclusões sobre a qualidade, defeitos e características da madeira. Stangerlin *et al.* (2010) utilizaram essa metodologia para estimar propriedades mecânicas da madeira de *Peltophorum dubium*, avaliando o comportamento da constante elástica dinâmica.

Ribeiro, *et al.* (2016, p. 37), realizou a avaliação de propriedades mecânicas de madeiras por métodos destrutivos e não destrutivos, concluindo que “os métodos de ondas de tensão e ondas ultrassônicas mostram-se eficientes e um importante instrumento para a inferência não-destrutiva do módulo de elasticidade da madeira de florestas nativas”.

MATERIAIS E MÉTODOS

1. Ensaio preliminar

Objetivando fundamentar e orientar a metodologia adotada a essa pesquisa, foi realizado um ensaio prévio com a espécie Jequitibá (*Cariniana* spp.). Através desse, foram

obtidos parâmetros de quantidade ideal e tamanho das amostras, diversidade de massas específicas necessárias, tempo, temperatura e programa de secagem, bem como o desenvolvimento de melhor uso dos aparelhos não destrutivos.

1.1. Dimensionamento das amostras

Precedentemente ao ensaio, o primeiro passo foi determinar a dimensão ideal das amostras a serem utilizadas e, para isso, levou-se em consideração dois fatores. O primeiro foi a seção transversal do aparelho Ultrassom, que é de 3 cm, indicando que as amostras não poderiam apresentar seção menor, para que não houvesse redução da superfície de contato entre a face da amostra e o transdutor do aparelho.

Segundamente, quanto ao comprimento das amostras, considerou-se o comprimento mínimo de propagação da onda na madeira, para a velocidade média máxima considerada, calculado pela Equação 1.

$$\lambda = V \times f \text{ (Equação 1)}$$

Onde:

λ é o comprimento de onda (m);

V é a velocidade média de propagação da onda na madeira (m/s); e

f é a frequência do transdutor utilizado (kHz).

Para tal, considera-se a velocidade média de propagação da onda na madeira sendo 5500 m/s (metros por segundo) e a frequência do transdutor do aparelho Ultrassom, que é igual 45 kHz. Sendo assim, o comprimento de onda obtido é de 0,12 m ou 12 cm. No entanto, para que os transdutores comuniquem-se, são necessárias duas ondas, no mínimo, completando uma frequência. Desse modo, o comprimento mínimo da amostra foi determinado em 24 cm.

Esse valor de velocidade foi adotado através da análise das velocidades médias obtidas para madeiras de massa específica básica maiores do que a do Jequitibá. Os valores considerados foram os expostos na Tabela 1 abaixo, conforme o estudo de Oliveira e Sales (2006).

Tabela 1: Densidade e velocidade média de propagação de ondas ultrassônicas para Eucalipto e Jatobá.

| Espécie | Densidade média (g/cm³) | Velocidade média de propagação de ondas ultrassônicas (m/s) |
|-----------------------|---|--|
| Eucalyptus citriodora | 1,13 | 4800 |
| Jatobá | 0,88 | 4600 |

Fonte: adaptado de Oliveira e Sales, 2006.

A velocidade média dessas espécies, portanto, é de 4.700 m/s. Considerando a Equação 1 e que a frequência do transdutor manteve-se a mesma (45 kHz), para a velocidade supracitada, o comprimento de onda mínimo deveria ser de 0,10 cm, totalizando 20 cm de comprimento de amostra, para uma frequência completa. A fim de obter maior precisão quanto aos resultados deste estudo, extrapolou-se a velocidade máxima para 5.500 m/s e, por conseguinte, o comprimento mínimo da amostra para 24 cm.

Além de garantir maior precisão dos resultados, fez-se necessário conciliar o estudo com o material amostral disponível no LPF. Sendo assim, como amostras de 24 cm estavam disponíveis para uso, a escolha acima foi reafirmada.

1.2. Determinação dos parâmetros de secagem

As amostras foram fornecidas pelo Laboratório de Produtos Florestais (LFP) e, até que alcançassem saturação máxima e conseguinte massa constante, foram mantidas em caixas plásticas com água por 30 dias constantes e, após, suas massas foram aferidas diariamente, por 7 dias.

Em seguida, o ensaio de avaliação não destrutiva foi conduzido por três dias consecutivos, com início na manhã (9h00) e fim à noite (20h00). Foram utilizadas 30 amostras de *Cariniana* spp., de 3cm x 3cm x 30cm, respectivamente, de largura, altura e comprimento. Para a obtenção dos dados, executou-se ciclos de secagem consecutivos, em que um ciclo era perfomado a cada uma hora e trinta minutos, composto da seguinte forma: a cada 30 minutos dentro da estufa, as amostras eram removidas e armazenadas em dessecador por 20 minutos, para equalizar a temperatura das mesmas. Em seguida, individualmente,

coletou-se os dados de massa seca parcial, tempo de propagação das ondas ultrassônicas e das ondas de tensão de todas as amostras num período de 40 minutos.

Ao passo que ocorreu a coleta, as amostras foram mantidas ao ar livre, para que perdessem água para o meio de forma igual. Imediatamente à coleta de todos os dados de massa, tempo de propagação do SWT e US, as amostras foram retornadas à estufa, iniciando mais um ciclo de secagem. Objetivando mínima perda de água, ao final do primeiro e segundo dias, as amostras foram mantidas em estufa durante o período da madrugada, à temperatura constante de 50°C.

No primeiro dia, foram feitos 10 ciclos de secagem. No segundo, sete ciclos e, no terceiro, dois. Com essas informações, percebeu-se que 30 minutos dentro da estufa não eram suficientes para que as amostras perdessem água significativamente, gerando valores de massa, SWT e US muito próximos quando coletados, principalmente no primeiro dia de coleta de dados.

2. Coleta e preparo das amostras

Para a realização do presente estudo, foram confeccionadas, no total, 90 amostras, sendo 30 de cada espécie. Todas foram cedidas pelo Laboratório de Produtos Florestais, sediado no Serviço Florestal Brasileiro (SFB), pertencente ao Ministério do Meio Ambiente e Mudanças Climáticas (MMA), em Brasília no Distrito Federal.

A escolha das espécies deu-se por dois fatores: diversidade de classes de densidade (alta, média e baixa) e disponibilidade amostral no Laboratório de Produtos Florestais (LPF). As amostras foram dimensionadas conforme os ensaios preliminares, tendo dimensão final de 3 cm x 3 cm x 24 cm, respectivamente, de largura, altura e comprimento.

Previamente à coleta dos dados, as amostras foram armazenadas em caixas plásticas de água (Figura 12), vedadas, objetivando sua saturação completa, até obtenção de massa constante. As amostras permaneceram imersas por 30 dias e, em seguida, iniciou-se a coleta das massas, que durou outros 18 dias consecutivos, até que obter-se massa constante nas últimas duas pesagens. Os dados foram coletados duas vezes por semana.

Figura 12 - Caixas plásticas de água usadas para saturação das madeiras



2.1. Massa específica básica das espécies

A massa específica básica da madeira de cada espécie estudada foi obtida a partir do Banco de Dados de Madeiras Brasileiras (LABORATÓRIO DE PRODUTOS FLORESTAIS, 2023) e encontram-se na Tabela 2.

Tabela 2: Massa específica básica da madeira das espécies estudadas.

| Espécie | Massa Específica Básica (g/cm ³) |
|--|--|
| <i>Eucalyptus camaldulensis</i> Dehnh. | 0,77 |
| <i>Dipteryx odorata</i> | 0,91 |
| <i>Simarouba amara</i> Aubl. | 0,37 |

3. Metodologia e cronograma de coleta dos dados

Tendo em vista os resultados do ensaio preliminar, a metodologia definitiva de coleta dos dados foi determinada. Para tal, estipulou-se seis dias consecutivos de secagem em estufa para cada espécie e todas passaram pelos mesmos processos.

De maneira a otimizar o processo de secagem e coleta dos dados, foram adotadas diferentes temperaturas de secagem na estufa a cada dia, conforme apresentado na Tabela 3.

Para a secagem durante a noite, foi adotada uma temperatura mais amena comparada à diurna (50°C), de modo a evitar a perda d'água pelas amostras durante o referido período.

Tabela 3: Temperatura da estufa aplicada para cada dia de secagem das amostras.

| Dia de secagem | Temperatura da estufa diurna | Temperatura noturna |
|----------------|------------------------------|-------------------------|
| 1° | 70°C | 50°C |
| 2° | 100°C | 50°C |
| 3° | 103 ± 2°C | Amostras fora da estufa |
| 4° | 103 ± 2°C | 103 ± 2°C |
| 5° | 103 ± 2°C | 103 ± 2°C |
| 6° | 103 ± 2°C | 103 ± 2°C |

Para o processo de secagem, no primeiro dia, cada amostra foi removida da caixa d'água, enxuta com um pano úmido, pesada (para a aferição da massa saturada) e testada nos aparelhos *Stress Wave Timer* e Ultrassom. Em seguida, foram dispostas ao ar livre até que os dados da última (trigésima) amostra fossem coletados. Logo após todos os dados serem coletados, todas as trinta amostras foram inseridas em estufa à 70°C. Passadas duas horas em estufa, as amostras foram removidas e armazenadas por 20 minutos em dessecador com gel de sílica (Figura 13). Por fim, os processos de pesagem (aferição da massa seca parcial) e de coleta do tempo de propagação das ondas foram executados.

Figura 13 - Dessecadores com gel de sílica utilizados para aclimatizar as amostras das madeiras estudadas.

A quantidade de vezes que os dados foram coletados, diariamente, está disposta conforme a Tabela 4. Ressalta-se que foram necessárias uma hora e vinte minutos para o processo de pesagem apenas no primeiro dia de secagem, na primeira pesagem, devido à necessidade de remover as amostras das caixas d'água e enxugá-las. Nas seguintes, uma hora fez-se suficiente para as etapas de pesagem. Desse modo, nos dias dois e três, a última pesagem foi finalizada às 17h00.

Tabela 4: Cronograma diário de secagem

| Horário | Status da madeira |
|-----------------------------|-------------------|
| 7h00 às 8h20 | Pesagem |
| 8h20 às 10h20 | Secagem em estufa |
| 10h20 às 11h20 | Pesagem |
| 11h20 às 13h20 | Secagem em estufa |
| 13h20 às 14h20 | Pesagem |
| 14h20 às 16h20 | Secagem em estufa |
| 16h20 às 17h20 | Pesagem |
| 17h20 às 7h00 ⁺¹ | Secagem em estufa |

No início do quarto dia (Tabela 4), as amostras foram levadas ao Laboratório de Produtos Florestais (LPF) e dispostas na estufa, à 103°C, por três dias seguidos (dias quatro, cinco e seis) permitindo, dessa forma, que as amostras atingissem massa constante. Posteriormente, foram coletados os dados de massa seca final e respectivos valores de velocidade de propagação das ondas de todas as amostras das três espécies de madeiras.

4. Coleta dos Dados

4.1. Massa Úmida e Seca das Amostras

Após a saturação das amostras, foram coletados os dados da massa saturada para todas as amostras das três espécies de madeiras, na condição úmida. Ao início do quarto dia, por espécie, todas as amostras foram submetidas à secagem à $103 \pm 2^\circ\text{C}$, por três dias seguidos, para obtenção dos valores de massa na condição seca.

4.2. Determinação do teor de umidade (TU)

O teor de umidade da madeira corresponde à relação entre a massa da água nela contida e a sua massa seca (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1982). Os teores de umidade das amostras saturadas (massa inicial), durante o processo de secagem (massa seca parcial) e ao final da secagem (massa seca final), foram obtidos utilizando-se a Equação 2.

$$U (\%) = \frac{M_i - M_s}{M_s} \times 100 \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

U = Umidade da madeira (%)

Mi = massa inicial da amostra (g)

Ms = massa seca da amostra (g)

5. Velocidade de Propagação das Ondas de Tensão e Ultrassônicas

5.1. *Stress Wave Timer*

Para o aparelho não destrutivo *Stress Wave Timer*, foram feitas três coletas de dados por amostra, com o objetivo de minimizar possíveis interferências na velocidade do pêndulo. A partir dos três valores de tempo de propagação da onda, foi determinada a sua média e, em seguida, a velocidade de propagação da onda de tensão foi calculada através da Equação 3. A distância utilizada corresponde à distância em que os acelerômetros foram acoplados na amostra, padronizada em 23,06 cm.

$$V = \frac{d}{t \times 10^6} \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:

V = velocidade de propagação das ondas (m/s);

d = distância ou comprimento longitudinal das amostras (cm);

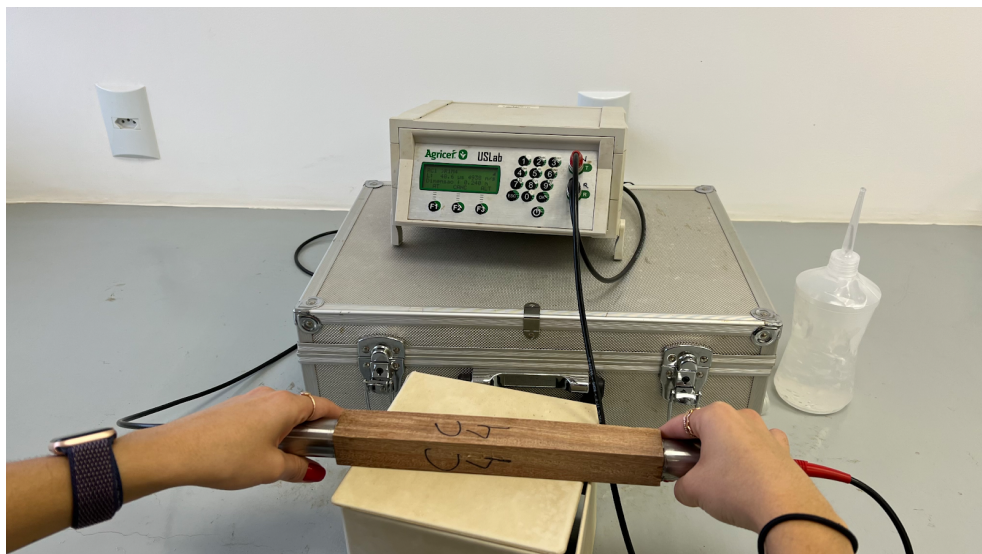
t = tempo de propagação das ondas, obtido pelo aparelho utilizado (μ s).

5.2. Ultrassom

Esse aparelho, de forma similar ao princípio de propagação de ondas de tensão, emite ondas ultrassônicas entre dois sensores denominados transdutores, permitindo obter o tempo de propagação dessas ondas no material em questão, correlacionando-as com as suas propriedades e condições.

O aparelho utilizado foi o da marca Agricef, modelo USLab (Figura 14). Esse aparelho possui seção diametral dos transdutores de 2,6 cm, menor que a transversal das amostras estudadas que foi de 3,0 cm. A medida do tempo percorrido pela onda entre os dois transdutores permite obter a velocidade de propagação da onda ultrassônica através da Equação 3, também.

Figura 14 - Imagem do aparelho utilizado para obtenção dos valores de velocidade de propagação da onda ultrassônicas



Para esse aparelho, diferentemente do *Stress Wave Timer*, foi feita a coleta de apenas um dado por amostra de madeira, para a determinação da velocidade de propagação da onda ultrassônica.

6. Análise dos dados e ajuste dos modelos

Entendendo que, na madeira, o teor de umidade tende a estabilizar-se conforme ocorre a perda de água disponível, compreende-se que o comportamento desses dados não é linear, uma vez que a linearidade não prediz estabilidade, mas aumento ou decaimento constante dos valores obtidos.

Dessa forma, a análise estatística aplicada aos modelos do presente estudo foi do tipo regressão linear múltipla, com o auxílio dos softwares de ajuste de curvas e análise de dados, *Curve Expert* (versão 1.38) e *Microsoft Excel*. O *Curve* permite calcular qual o melhor modelo de regressão linear múltipla, baseado nos valores das variáveis de coeficiente de correlação, erro padrão absoluto e gráfico de distribuição do erro dos resíduos.

Para tanto, foram assumidos o teor de umidade como variável dependente (Y) e a velocidade de propagação da onda como variável independente (x). Ainda, considera-se que ambas as variáveis podem ser consideradas como variáveis contínuas, ou seja, surgem de um processo de mensuração de dados (LEVINE *et al.*, 2008).

Foi analisado o conjunto de dados de cada espécie quando aplicados os dois aparelhos (SWT e US), gerando seis funções, sendo duas por espécie. Para melhor ajuste dos dados e para fins de comparação, foi aplicada também a análise de regressão linear simples, objetivando maior confiabilidade dos resultados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

1. Velocidade média de propagação das ondas

Nas Tabelas 5 e 6 são apresentados os valores obtidos de velocidade média de propagação das ondas ultrassônicas e de tensão, respectivamente.

Tabela 5: Valores médios da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas em m/s, para as três espécies de madeiras

| Espécie | Velocidade média de propagação das ondas ultrassônicas (m/s) | Coefficiente de variação da média (%) |
|-----------|--|---------------------------------------|
| Cumaru | 4715,73 | 3,76 |
| Eucalipto | 4396,61 | 4,16 |
| Marupá | 4359,01 | 9,55 |

Tabela 6: Valores médios da velocidade de propagação de ondas de tensão em m/s, para as três espécies de madeiras

| Espécie | Velocidade média de propagação das ondas de tensão (m/s) | Coefficiente de variação da média (%) |
|-----------|--|---------------------------------------|
| Cumaru | 4025,89 | 5,91 |
| Eucalipto | 3760,37 | 8,56 |
| Marupá | 4167,64 | 13,14 |

2. Regressão linear simples

Inicialmente, foi realizada a análise de variância (ANOVA) dos dados, utilizando-se o *software Excel*, objetivando avaliar os valores de P-valor, erro padrão da estimativa e o coeficiente de determinação (R^2) recalculado. A regressão linear simples visa qualificar a dependência entre duas variáveis, sendo uma dependente e outra independente, procurando explicar os resultados através da função descrita pela Equação 4.

$$Y(x) = \beta_0 + \beta_1 * x + \varepsilon \text{ (Equação 4)}$$

Onde:

Y = variável dependente ou resposta

β_0 = constante determinada pelo modelo

β_1 = constante determinada pelo modelo

x = variável independente ou regressora

ε = erro associado ao modelo

A Tabela 7 apresenta os resultados de β_0 , β_1 , erro padrão percentual da estimativa e coeficiente de determinação por aparelho para cada espécie de madeira.

Tabela 7: Valores de β_0 , β_1 , erro padrão da estimativa (%) e R^2 obtidos através da análise de regressão linear, com probabilidade de 95%, para os dados obtidos através dos aparelhos *Stress Wave Timer* (SWT) e Ultrassom (US).

| Espécie | Aparelho | P-valor (β_0) | P-valor (β_1) | Erro padrão da estimativa (%) | R^2 (Coeficiente de determinação) |
|-----------|----------|-----------------------|-----------------------|-------------------------------|-------------------------------------|
| Cumaru | SWT | $2,45 \cdot 10^{-33}$ | $3,47 \cdot 10^{-24}$ | 45,580 | 0,250 |
| | US | 0,206 | 0,931 | 52,637 | $2 \cdot 10^{-05}$ |
| Eucalipto | SWT | $8,43 \cdot 10^{-46}$ | $8,33 \cdot 10^{-33}$ | 49,099 | 0,328 |
| | US | $1,23 \cdot 10^{-09}$ | $1,56 \cdot 10^{-06}$ | 58,009 | 0,062 |
| Marupá | SWT | $4,6 \cdot 10^{-212}$ | $6,9 \cdot 10^{-195}$ | 29,175 | 0,916 |
| | US | $1,2 \cdot 10^{-143}$ | $2,4 \cdot 10^{-131}$ | 43,895 | 0,810 |

Os valores do erro padrão da estimativa e do coeficiente de determinação recalculado apresentados na Tabela 7 não foram satisfatórios. A exemplo, para o Eucalipto, sob uso do aparelho Ultrassom, R^2 igual a 0,062 informa que apenas 6,2% dos valores de teor de umidade são explicados através da velocidade de propagação das ondas ultrassônicas.

Posterior à análise dos resultados, concluiu-se que o modelo não foi ajustado com máxima excelência através da regressão linear simples. Portanto, foi aplicada a análise de regressão múltipla, a fim de melhor estimar o teor de umidade das espécies de madeiras estudadas, através de suas respectivas velocidades de propagação das ondas de tensão e ultrassônica.

3. Regressão linear múltipla

A regressão linear múltipla foi desenvolvida, inicialmente, através do software Curve Expert, conforme o sistema de ranqueamento por *score*. Ao ajustar os dados e obter a melhor equação de ajuste linear múltiplo, a mesma análise foi desenvolvida no *software Excel*, para

que pudesse ser obtido o R^2 . Ambos alcançaram os mesmos resultados e a Tabela 8 apresenta o modelo das equações geradas para cada aparelho e espécie de madeira estudada, pelo *Excel*.

Tabela 8: Funções obtidas através da aplicação da regressão linear múltipla, para os aparelhos *Stress Wave Timer* (SWT) e Ultrassom (US), para as espécies de madeiras estudadas.

| Espécie | Aparelho | Equação |
|-----------|----------|--------------------------------------|
| Cumaru | SWT | $Y(x) = a + bx + cx^2 + dx^3 + ex^4$ |
| | US | $Y(x) = a + bx + cx^2 + dx^3 + ex^4$ |
| Eucalipto | SWT | $Y(x) = a + bx + cx^2 + dx^3$ |
| | US | $Y(x) = a + bx + cx^2$ |
| Marupá | SWT | $Y(x) = a + bx + cx^2 + dx^3$ |
| | US | $Y(x) = a + bx + cx^2 + dx^3 + ex^4$ |

Na Tabela 9 são apresentados os resultados do coeficiente de correlação de Pearson, o erro padrão da estimativa e o coeficiente de determinação, para os aparelhos *Stress Wave Timer* e Ultrassom, utilizados para as três espécies de madeiras.

Tabela 9: Valores do coeficiente de correlação e erro padrão percentual obtidos através da análise de regressão não linear, para os aparelhos *Stress Wave Timer* e Ultrassom, para as três espécies de madeiras

| Espécie | Aparelho | Coeficiente de correlação (r) | Erro padrão percentual (Syx %) | R^2 (Coeficiente de determinação) |
|-----------|----------|-------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|
| Cumaru | SWT | 0,52 | 45,41 | 0,260 |
| | US | 0,16 | 52,17 | 0,026 |
| Eucalipto | SWT | 0,58 | 49,03 | 0,338 |
| | US | 0,27 | 57,73 | 0,075 |
| Marupá | SWT | 0,96 | 26,72 | 0,930 |
| | US | 0,91 | 40,58 | 0,839 |

A regressão linear múltipla obteve coeficientes de determinação semelhantes ao da regressão linear simples, porém a mesma ainda apresentou maior eficiência quanto aos resultados estatísticos, pois os coeficientes são maiores.

4. *Dipteryx odorata* Aubl. Willd. (Cumaru)

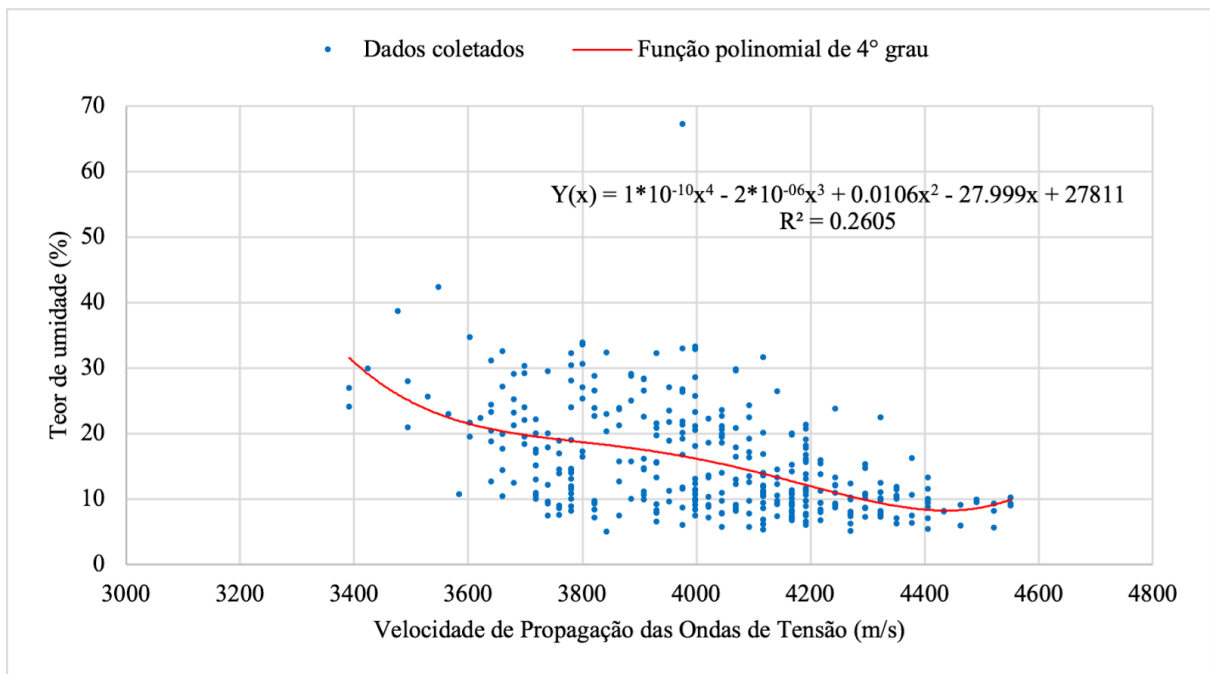
4.1. *Stress Wave Timer*

Quando aplicado o aparelho não destrutivo *Stress Wave Timer* à espécie de madeira Cumaru, a função modelo de ajuste de dados gerada foi do tipo polinomial do quarto grau, obtida através da Equação 5.

$$Y(x) = a + bx + cx^2 + dx^3 + ex^4 \quad (\text{Equação 5})$$

A Figura 15 apresenta a dispersão dos valores de velocidade de propagação da onda de tensão e a curva polinomial gerada para o aparelho *Stress Wave Timer*.

Figura 15 - Dispersão dos valores da velocidade de propagação da onda de tensão obtidos a partir do ajuste gerado pela regressão não linear, para o aparelho *Stress Wave Timer*, para a espécie Cumaru.



Onde: Y = variável dependente de interesse; a = 27811; b = - 27.999; c = 0,0106; d = - 2*10⁻⁰⁶; e = 1*10⁻¹⁰; x = valor da velocidade de propagação das ondas de tensão para a espécie.

Os valores obtidos para o coeficiente de determinação e o erro padrão percentual obtidos através do ensaio foram de 0,26 e 45,41%, respectivamente. Dessa forma, constata-se

que o aparelho não é adequado para estimar o teor de umidade da espécie. Tendo em vista que a projeção inicial desse aparelho foi voltada à avaliação da qualidade de estruturas - sendo uma delas a madeira - considera-se necessária a avaliação de outros cenários para que seja possível avaliar a adaptação do aparelho à obtenção do teor de umidade de madeiras.

O coeficiente de correlação estimado em 0,52 indica que há 52% de chance de explicação do teor de umidade (variável dependente) através dos valores de velocidade de propagação da onda de tensão (variável independente), sugerindo aleatoriedade do modelo e não confiança quanto à predição dos dados.

Além da não adaptação do aparelho, esse comportamento pode ser atrelado à alta massa específica básica da madeira do Cumaru (JANKOWSKY *et al.*, 1990) e ao programa de secagem adotado, posto que essa espécie apresenta fibras com a parede muito espessa (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA, 2004), requerendo um programa de secagem personalizado. A exemplo, Brito, *et al.* (2020), ao submeterem a madeira de Cumaru ao processo de secagem, chegaram à temperatura ideal inicial de 47°C e final de 83°C - valores diferentes aos deste estudo.

Ao avaliar o comportamento do *Stress Wave Timer* para a espécie Cumaru, Paula *et al.* (2016) obtiveram valor médio da velocidade de propagação da onda de tensão igual a 4.125 m/s, similar ao encontrado neste estudo, igual a 4.025 m/s. Ainda, constataram que o aparelho, quando aplicado ao Cumaru, é eficiente para obter o valor do módulo de elasticidade dinâmico, obtendo valor igual a 18.349 MPa, com respectivo coeficiente de variação (cv) igual a 5,68%.

Ainda, Paula *et al.* (2021), ao observar o comportamento do módulo de elasticidade dinâmico (MOE) através do *Stress Wave Timer* para a madeira da espécie Cumaru, concluiu valor médio igual 20.383,77 MPa para a propriedade e velocidade de propagação de ondas de tensão correspondente a 4.470,54 m/s.

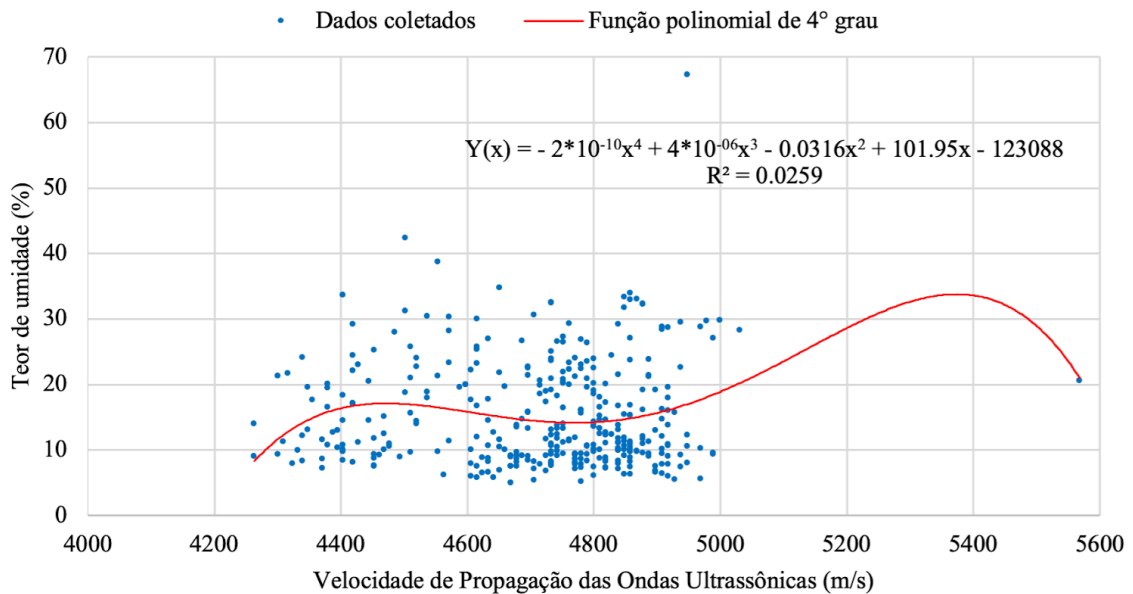
4.2. Ultrassom

Para o Ultrassom, a função modelo de ajuste de dados gerada foi do tipo polinomial de quarto grau, determinada pela Equação 6.

$$Y(x) = a + bx + cx^2 + dx^3 + ex^4 \text{ (Equação 6)}$$

A Figura 16 apresenta a dispersão dos valores de velocidade de propagação da onda de tensão e a curva gerada para o aparelho Ultrassom.

Figura 16 – Dispersão dos valores da velocidade de propagação das ondas ultrassônicas obtidos a partir do ajuste gerado pela regressão não linear, para o aparelho Ultrassom, para a espécie Cumaru.



Onde: Y = variável dependente de interesse; a = - 123088; b = 101,95; c = - 0,0316; d = $4 \cdot 10^{-6}$; e = $- 2 \cdot 10^{-10}$; x = valor da velocidade de propagação das ondas ultrassônicas para a espécie.

Inferior aos resultados obtidos para o *Stress Wave Timer*, o Ultrassom, quando aplicado ao Cumaru, gerou um coeficiente de determinação de 0,026 e erro padrão de 52,17%. Esse resultado indica que o aparelho demonstra precisão ainda menor, comparado ao SWT, para estimar o teor de umidade quando aplicado à espécie em questão, sugerindo baixa eficiência para espécies com alta densidade.

De forma semelhante ao observado através dos resultados do uso do *Stress Wave Timer*, o programa de secagem adotado pode ter influenciado negativamente nos resultados obtidos através do Ultrassom.

Stangerlin *et al.* (2017) encontraram velocidade média de propagação das ondas ultrassônicas igual a 5.534 m/s, enquanto este tudo constatou velocidade média de 4.715 m/s, ambos no sentido longitudinal da amostra, garantindo um meio contínuo de propagação.

Ainda, constataram que o Ultrassom é considerado um método eficiente quanto à determinação do módulo de elasticidade e de ruptura à compressão paralela, quando aplicado ao Cumaru, obtendo valor de MOE igual a 19.766 MPa e R^2 igual a 0,7, quando relacionados o MOE e o MOEDir (módulo de elasticidade obtido de forma direta, no estudo). Não obstante o elevado valor e uso comercial da madeira do Cumaru, a escassez de estudos na área deste trabalho dificulta a comparação dos resultados e possíveis diferentes conclusões.

Sob outra ótica, Teles (2014), ao aplicar a técnica do Ultrassom ao Cumaru, concluiu também ser possível monitorar o nível de deterioração das madeiras sem tratamento químico em campo de apodrecimento, avaliando-as no sentido longitudinal e transversal.

5. *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. (Eucalipto Vermelho)

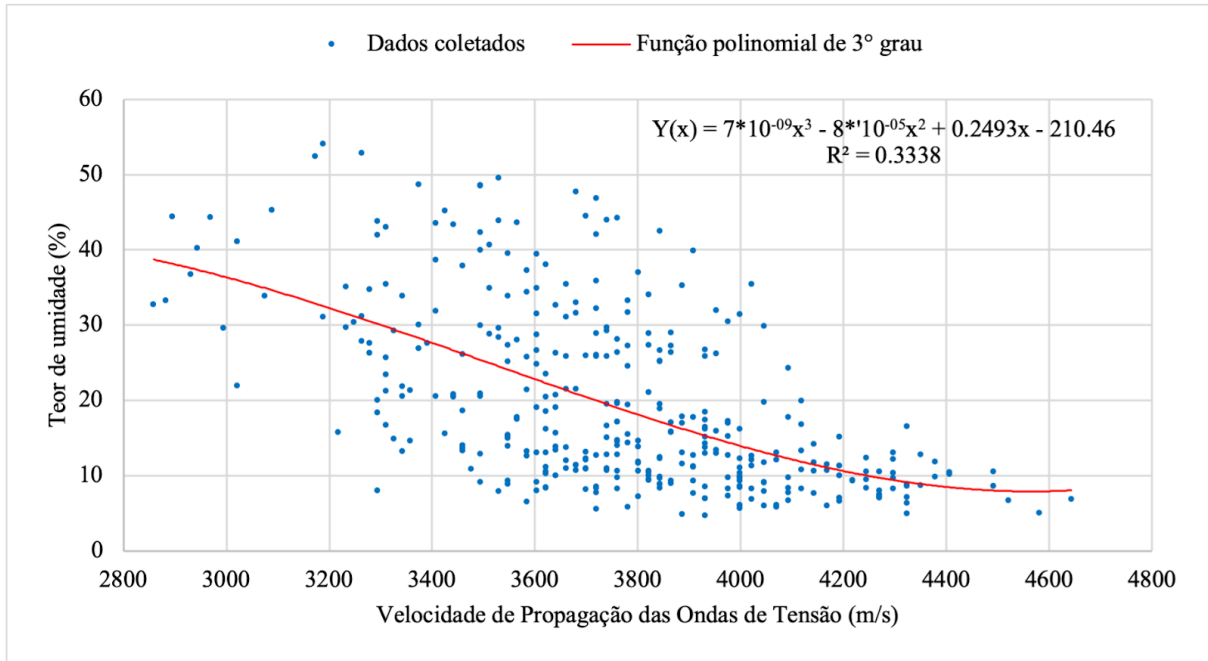
5.1. Stress Wave Timer

Para o aparelho *Stress Wave Timer*, a função modelo de ajuste de dados gerada foi do tipo polinomial de terceiro grau, determinada pela Equação 7.

$$Y(x) = a + bx + cx^2 + dx^3 \text{ (Equação 7)}$$

A Figura 17 apresenta a dispersão dos valores de velocidade de propagação da onda de tensão e a curva gerada para o SWT.

Figura 17 – Dispersão dos valores da velocidade de propagação das ondas de tensão obtidos a partir do ajuste gerado pela regressão não linear, para o aparelho *Stress Wave Timer*, para a espécie Eucalipto Vermelho.



Onde: Y = variável dependente de interesse; a = - 210,46; b = 0,2493; c = - $8 \cdot 10^{-5}$; d = $7 \cdot 10^{-09}$; x = valor da velocidade de propagação das ondas de tensão para a espécie.

Os resultados estatísticos obtidos para o Eucalipto são semelhantes aos do Cumaru, dada massa específica básica qualificada entre média e alta (JANKOWSKY *et al.*, 1990). Para o *Stress Wave Timer*, o R^2 obtido foi igual a 0,338 e o erro padrão igual a 49,03%. Através desses valores, conclui-se que o aparelho sob análise também é considerado inadequado para prever os valores de teor de umidade das amostras da espécie *E. camaldulensis*.

É possível atrelar tal resultado ao fato de o aparelho não ter sido desenvolvido para tal finalidade. Também, pode ser justificado pela classificação da massa específica básica da madeira de Eucalipto. Por fim, também foi associado o resultado ao programa de secagem adotado para esta espécie. Devido à massa específica básica ser classificada entre média e alta, o programa de secagem para a espécie deve ser personalizado e adequado à velocidade de perda de água da mesma.

Avaliando as propriedades químicas e físicas de *Eucalyptus camaldulensis* de 12 anos, Nezu *et al.* (2020) obtiveram velocidade média de propagação de ondas de tensão pelo aparelho *Stress Wave Timer* igual a 3.440 m/s. Por sua vez, este estudo obteve valor igual a 3.760,37 m/s. Tal diferença pode ser justificada pela diferença de idade entre as amostras

estudadas, tendo em vista que não se conhece a idade das amostras utilizadas neste projeto, mas é sabido que a massa específica básica de uma espécie é condicionada conforme sua idade, devido à quantidade de lenho presente.

Ainda, 3.450 m/s é o valor médio da velocidade de propagação obtida por Ishiguri *et al.* (2013) para amostras da espécie de 4 anos e concluíram que a velocidade das ondas de tensão das árvores estava significativamente correlacionada com o módulo de elasticidade dinâmico (MOE) das amostras, sugerindo que o MOE da madeira pode ser avaliado não destrutivamente pela velocidade das ondas de tensão das mesmas.

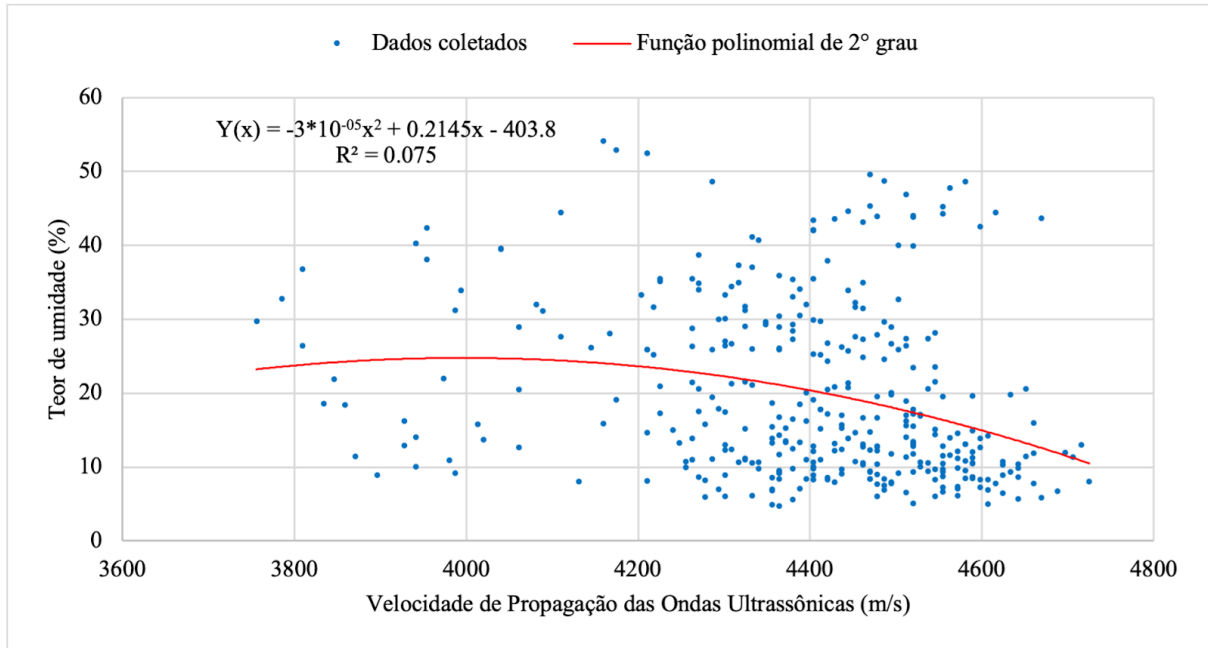
5.2. Ultrassom

Para o Ultrassom, a função modelo de ajuste de dados gerada foi do tipo polinomial quadrática, determinada pela Equação 8.

$$Y(x) = a + bx + cx^2 \text{ (Equação 8)}$$

A Figura 18 apresenta a dispersão dos valores de velocidade de propagação da onda de tensão e a curva gerada para o aparelho Ultrassom.

Figura 18 – Dispersão dos valores da velocidade de propagação das ondas ultrassônicas obtidos a partir do ajuste gerado pela regressão não linear, para o aparelho Ultrassom, para a espécie Eucalipto Vermelho.



Onde: Y = variável dependente de interesse; a = -403,8; b = 0,2145; c = $-3 \cdot 10^{-05}$; x = valor da velocidade de propagação das ondas ultrassônicas para a espécie.

De forma semelhante ao *Stress Wave Timer*, o Ultrassom apresentou valores imprecisos. O erro padrão foi de 57,73% e o R^2 igual à 0,075. Dessa forma, infere-se que este aparelho pode ser considerado como não é adequado para estimar o teor de umidade de amostras de espécies de média a alta massa específica básica.

Ao avaliar amostras da espécie *Eucalyptus camaldulensis* com 4 anos de idade, Melo *et al.* (2021) encontraram velocidade média de propagação das ondas ultrassônicas igual à 5.416,24 m/s. Neste estudo, o resultado médio obtido foi de 4.396,6 m/s. Ainda, concluíram que o ultrassom é uma ferramenta eficiente para determinar as propriedades físico-químicas dessa espécie, quando também correlacionado ao MOE.

6. *Simarouba amara* Aubl. (Marupá)

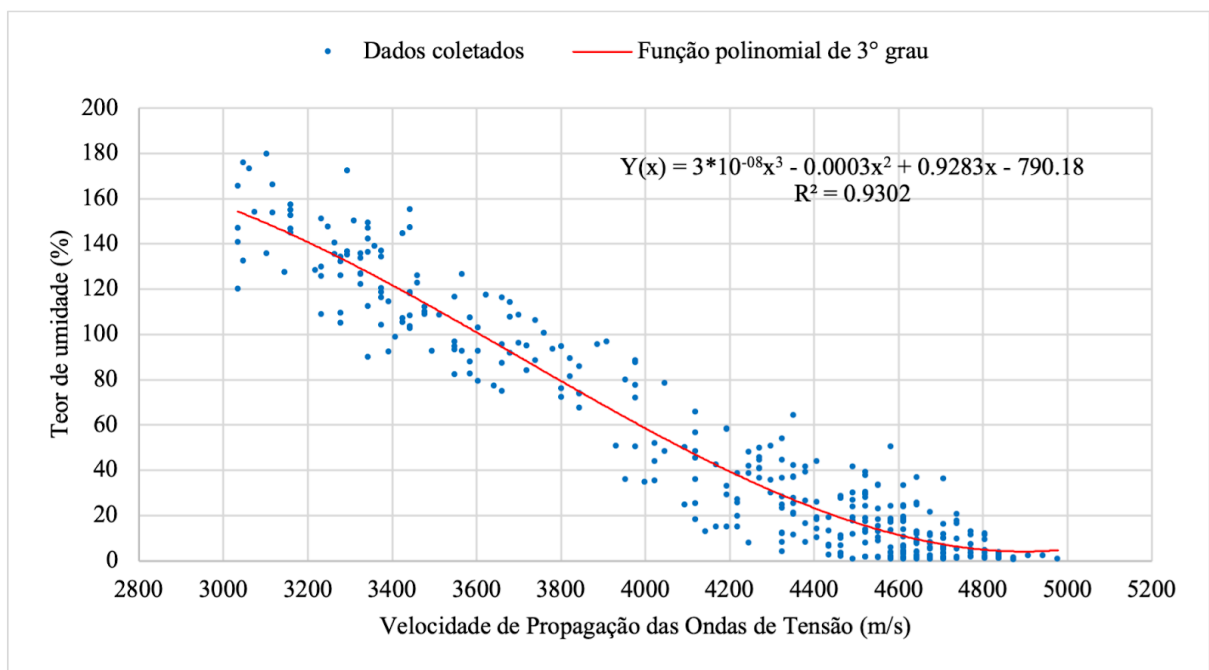
6.1. *Stress Wave Timer*

Para o SWT, a modelo função de ajuste de dados gerada foi do tipo polinomial de terceiro grau, determinada pela Equação 9.

$$Y(x) = a + bx + cx^2 + dx^3 \text{ (Equação 9)}$$

A Figura 19 apresenta a dispersão dos valores de velocidade de propagação da onda de tensão e a curva gerada para o aparelho *Stress Wave Timer*.

Figura 19 – Dispersão dos valores da velocidade de propagação das ondas de tensão obtidos a partir do ajuste gerado pela regressão não linear, para o aparelho *Stress Wave Timer*, para a espécie Marupá.



Onde: Y = variável dependente de interesse; a = - 790,18; b = 0,9283; c = - 0,0003; d = $3 \cdot 10^{-8}$; x = valor da velocidade de propagação das ondas de tensão para a espécie.

Quando aplicado às amostras de madeira da espécie Marupá, o *Stress Wave Timer* mostrou-se mais preciso e confiável, comparado às outras espécies deste estudo. O coeficiente de determinação obtido foi igual a 0,93, enquanto o erro padrão é igual a 26,72%. Conforme evidências do estudo, tais resultados são possíveis devido à massa específica básica da espécie, classificada como baixa (JANKOWSKY *et al.*, 1990).

Apesar de os dados indicarem alta correlação entre as variáveis, também foi obtido um alto valor para o erro padrão. Dessa forma, todos os resultados gerados, ainda que mais acurados que os das espécies anteriores, ainda apresentariam uma margem de erro de 26,72% para mais ou menos do valor resposta.

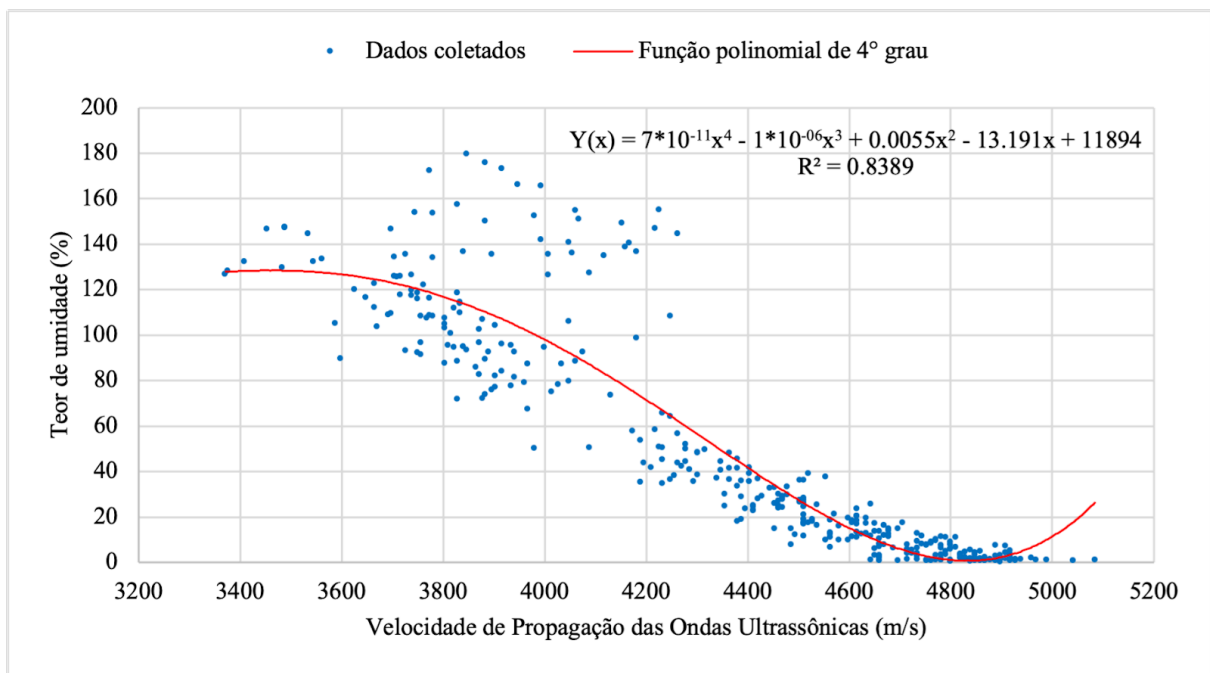
6.2. Ultrassom

Para o Ultrassom, a função modelo de ajuste de dados gerada foi do tipo polinomial de quarto grau, determinada pela Equação 10.

$$Y(x) = a + bx + cx^2 + dx^3 + ex^4 \quad (\text{Equação 10})$$

A Figura 20 apresenta a dispersão dos valores de velocidade de propagação da onda de tensão e a curva gerada para o aparelho Ultrassom.

Figura 20 – Dispersão dos valores da velocidade de propagação das ondas ultrassônicas obtidos a partir do ajuste gerado pela regressão não linear, para o aparelho Ultrassom, para a espécie Marupá.



Onde: Y = variável dependente de interesse; a = 11894 b = - 13.191; c = 0,0055; d = - 1*10⁻⁰⁶; e = 7*10⁻¹¹; x = valor da velocidade de propagação das ondas ultrassônicas para a espécie.

As funções obtidas para as três espécies representam o grau de dispersão dos dados coletados. Quanto maior é a dispersão gráfica dos dados, maior é o grau do polinômio, como forma de abarcar a maior quantidade de dados possíveis e menor é a correlação entre as variáveis dependentes e independentes, dado o comportamento não padronizado dos dados.

Para o aparelho não destrutivo Ultrassom, observa-se coeficiente de determinação igual a 0,839 e erro padrão de 40,58%. Esse resultado indica que os valores do teor de umidade são bem explicados pela velocidade de propagação das ondas ultrassônicas, mas ainda apresentam erro elevado. Analogamente à conclusão obtida para o *Stress Wave Timer*, também associa-se o resultado do Ultrassom à massa específica básica baixa da espécie em questão.

O elevado erro padrão (quando comparado ao valor obtido para esta espécie, sob efeito do *Stress Wave Timer*) pode ser justificado pela nuvem de dados obtidos entre as velocidades de 3.600 e 4.300 m/s, expressas no gráfico. Tais valores correspondem ao início da perda de água pela madeira de Marupá, que é o processo de perda d'água mais acelerado, podendo esse momento pode ser influenciado por diversos fatores, como densidade individual das amostras e quantidade de lenho tardio ou inicial.

Batista (2019) ao caracterizar as propriedades acústicas da madeira da espécie Marupá, encontrou o valor de velocidade de propagação das ondas ultrassônicas igual a 4.499,2 m/s, semelhante ao encontrado para este estudo, igual a 4.359 m/s. De forma semelhante, Teles e Peter (2022), ao avaliarem as propriedades acusticadas de 10 espécies amazônicas, chegaram ao valor de 4.400 m/s para a velocidade de propagação de ondas ultrassônicas para essa mesma espécie.

No geral, não foram encontradas informações de valores de módulo de elasticidade dinâmico para a madeira de Marupá, obtidos pelo *Stress Wave Timer* ou Ultrassom. O módulo de elasticidade dinâmico é uma medida de rigidez da madeira e, devido à sua baixa massa específica básica (JANKOWSKY *et al.*, 1990), a madeira de Marupá não é amplamente utilizada para estruturas que requeiram elevada resistência mecânica, como vigas e colunas, pois a mesma não é suficientemente resistente.

CONCLUSÃO

A análise estatística de regressão linear múltipla foi a que melhor delineou os dados e adequou as funções, individualmente geradas para cada espécie, gerando funções polinomiais do segundo ao quarto grau.

Os aparelhos Ultrassom e *Stress Wave Timer* apresentaram as melhores correlações entre a velocidade de propagação da onda e o teor de umidade da madeira para a espécie Marupá, podendo ser indicado para estimar o teor de umidade da madeira para essa espécie.

Para as espécies Cumaru e Eucalipto, ambos os aparelhos apresentaram baixa correlação entre a velocidade de propagação da onda e o teor de umidade da madeira, mostrando não serem indicados para estimar o teor de umidade da madeira dessas espécies.

Dos seis ensaios realizados (combinação de três espécies e dois aparelhos), o que mais demonstrou eficiência foi o *Stress Wave Timer* aplicado à madeira da espécie Marupá, pois demonstrou coeficiente de determinação de 0,93 entre os dados de teor de umidade e velocidade de propagação das ondas de tensão.

RECOMENDAÇÕES

A partir dos resultados obtidos, recomenda-se para futuros estudos:

- Realizar a coleta de dados de forma individual para cada espécie, conforme programa de secagem específico para cada espécie;
- Avaliar a velocidade de propagação das ondas de tensão e ultrassônicas em amostras com a idade e local de origem conhecidos, determinando a massa específica básica de cada uma;
- Trabalhar com espécies diferentes, mas que tenham massa específica básica semelhante;
- Avaliar o fenômeno de atenuação das ondas ultrassônicas e de tensão, quando aplicadas à madeira.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, L. B. *et al.* Avaliação não destrutiva de estruturas de madeiras em edifício histórico de Tiradentes, MG. *Cerne*, Lavras, v. 19, n. 3, p. 481-487, 2013. Disponível em: <https://www.redalyc.org/pdf/744/74428921016.pdf>. Acesso em: 27 jul. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190**: Projeto de Estruturas de Madeira. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO DOS FUMICULTORES DO BRASIL. **Eucalyptus camaldulensis**. 2023. Disponível em: <https://afubra.com.br/viveiro-muda/16/eucalyptus-camaldulensis.html>. Acesso em: 27 jul. 2023.

BARROS, Sámia Valéria dos Santos. **Avaliação da qualidade da madeira de árvores da Amazônia por método não destrutivo de propagação de onda: tomógrafo de impulso e stress wave Timer**. Manaus: [s. n.], 2016.

BUCUR, V.; LANCELEUR, P.; ROGE, B. Acoustic properties of wood in tridimensional representation of slowness surfaces. **Ultrasonics**, v. 01-08, n. 40. p.537-541, 2002.

CALEGARI, L. *et al.* Influence of moisture content, specific gravity and specimen geometry on the ultrasonic pulse velocity in *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden wood. **Ciência da Madeira (Braz. J. Wood Sci.)**, Pelotas, v. 02, n. 02, p. 64-74, 2011. Disponível em: <https://periodicos.ufpel.edu.br/index.php/cienciadamadeira/article/view/4031/3174>. Acesso em: 27 jul. 2023.

CALEGARI, L. *et al.* Monitoramento do teor de umidade de madeiras de *Pinus elliottii* Engelm. e *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden, sob diferentes temperaturas de secagem, através do Ultrassom. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 17, n. 04, p. 399-408, 2007. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cflo/a/LvHJrBJQSRdv4OpXwJcjjHt/?lang=pt>. Acesso em: 27 jul. 2023.

CENTRAL NORTE MADEIRA. **Kit 10 metros Lineares Deck de Madeira 7cm Cumaru Puro (Cor única)**. 2023. Disponível em: <https://www.lojacentralnorte.com.br/sob-medida/kit-10-metros-lineares-deck-de-madeira-7x2-cumaru-puro-cor-unica>. Acessado em: 27 jul. 2023.

CRUZ, C. R. *et al.* Aplicação de ondas de tensão para a estimativa da umidade em madeira de *Eucalyptus*. **Cerne**, Lavras, v. 15, n. 4, p. 430-438, 2009. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/10297>. Acesso em: 27 jul. 2023.

CUNHA, A. B.; MATOS, J. L. M. Determinação do módulo de elasticidade em madeira laminada colada por meio de ensaio não destrutivo ("stress wave Timer"). **Revista Árvore**, Viçosa - MG, v. 34, n. 02, p. 345-354, 2010. Disponível em: https://www.scielo.br/j/rarv/a/TdyJbNRp_CcYJq3gLFGrv9HR/abstract/?lang=pt. Acesso em: 27 jul. 2023.

DA COSTA, R. B. *et al.* Avaliação genética de *Eucalyptus camaldulensis* no Estado de Mato Grosso. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 32, n. 70, p. 165-173, 2012. Disponível em:

<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/102743/1/AvaliacaoGenetica.pdf>.

Acesso em: 27 jul. 2023.

DE BRITO, D. Y. O. *et al.* Programa de secagem para madeira de Cumaru (*Dipteryx odorata*). In: CONGRESSO BRASILEIRO INTERDISCIPLINAR EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA; 1, 2020. **Anais** [...]. [S. l.: s. n.], 2020.

DEL MENEZZI, C. H. S. *et al.* Evaluation of Thermally Modified Wood by Means of Stress Wave and Ultrasound Nondestructive Methods. *Polymers and Composites, Materials Science*, v. 20, n. 01, 2014. Disponível em: <https://matsc.ktu.lt/index.php/MatSc/article/view/3341/3513>. Acesso em: 27 jul. 2023.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Espécies Arbóreas da Amazônia: Cumaru. Embrapa Amazônia, n. 07, 2004. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/408641/cumaru-dipteryx-odorata>. Acesso em: 27 jul. 2023.

GRUPO BERNARDONI. **Conheça a Madeira Marupá (ou Caixeta)**. 2023. Disponível em: <https://www.grupobernardon.com.br/madeiras/conheca-a-madeira-marupa-ou-caixeta/>. Acesso em: 27 jul. 2023.

GRUPO INDEX. **10 previsões para o mercado de base florestal em 2023**. 2022. Disponível em: <https://indexgrupo.com.br/10-previsoes-para-o-mercado-de-base-florestal-em-2023/>. Acesso em: 27 jul. 2023.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Marupá**: informações sobre madeiras. 2023. Disponível em: http://www.ipt.br/consultas_online/informacoes_sobre_madeira/busca. Acesso em: 27 jul. 2023.

ISHIGURI, F. *et al.* Stress-wave velocity of trees and dynamic Young's modulus of logs of 4-year-old *Eucalyptus camaldulensis* trees selected for pulpwood production in Thailand. **Journal of Wood Science**, v. 59, p. 506–511, 2013. Disponível em:

<https://jwoodscience.springeropen.com/articles/10.1007/s10086-013-1363-1>. Acesso em: 27 jul. 2023.

JANKOWSKY, I. P.; CHIMELO, J. P.; CAVALCANTE, A. de A.; GALINA, I. C. M.; NAGAMURA, J. C. S. **Madeiras brasileiras**. Caxias do Sul: Spectrum, 1990.

JOSINO, Maiara Neri. **Relação da resistência com a umidade e com a densidade da madeira de um clone de *Eucalyptus urophylla***. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Florestal) - Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Florestal, Brasília, 2014. Disponível em: https://bdm.unb.br/bitstream/10483/16342/1/2014_MaiaraNeriJosino.pdf. Acesso em: 27 jul. 2023.

LABORATÓRIO DE PRODUTOS FLORESTAIS. **Banco de Dados de Madeiras Brasileiras**. 2023. Disponível em: <https://lpf.florestal.gov.br/pt-br/bd-madeiras-brasileiras>. Acesso em: 27 jul. 2023.

LABORATÓRIO DE PRODUTOS FLORESTAIS. **Cumarú: Banco de Dados de Madeiras Brasileiras**. 2023. <https://lpf.florestal.gov.br/pt-br/bd-madeiras-brasileiras>. Acesso em: 27 jul. 2023.

MARQUES, M. H. B.; MARTINS, V. A. Secagem da Madeira. **Laboratório de Produtos Florestais**. Brasília: Laboratório de Produtos Florestais, 2002.

MINGOTI, S. A. **Análise de dados através de métodos de estatística multivariada: uma abordagem aplicada**. Belo Horizonte. Editora: UFMG, 2005.

MORAES, M. L. T. *et al.* Avaliação da densidade básica da madeira e de sua relação com os caracteres de crescimento, em uma população base de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. In: CONFERÊNCIA IUFRO SOBRE SILVICULTURA E MELHORAMENTO DE EUCALIPTOS; 1. 2021. Anais [...]. [S. l.: s. n.], 2021.

NATIONAL PARKS AND WILDLIFE SERVICE. **Red River Gum**. 2023. Disponível em: <https://www.nationalparks.nsw.gov.au/plants-and-animals/river-red-gum>. Acessado em: 23 de junho de 2023.

NEZU, I. *et al.* Repeatability of growth characteristics and wood properties for solid wood production from *Eucalyptus camaldulensis* half-sib families growing in Thailand. **Silvae Genetica**, Sciendo, v. 69, p. 36 - 43, 2020. Disponível em: <https://sciendo.com/article/10.2478/sg-2020-0006>. Acesso em: 27 jul. 2023.

NIETO, V. M.; RODRIGUES, J. **Eucalyptus camaldulensis Dehnh**: Vozzo, J. A Tropical tree seed manual. Santafé de Bogotá: Corporacion Nacional de Investigacion of Forestal, 2003. p. 466-467.

OLIVEIRA, F. G. R. *et al.* Moisture content effect on ultrasonic velocity in *Goupia glabra*. **Materials Research**, v. 08, n. 01, p. 11-14, 2005. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/mr/a/vDRvtYw5PYDVLj83ZmPBfvQ/?lang=en>. Acesso em: 27 jul. 2023.

OLIVEIRA, F. G. R.; SALES, A. Relationship between density and ultrasonic velocity in Brazilian tropical woods. **Bioresource Technology**, v. 97, p. 2443-2446, 2006. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/16311030/>. Acesso em: 27 jul. 2023.

OLIVEIRA, F. G. R.; SALES, A. Relationship between density and ultrasonic velocity in Brazilian tropical woods. **Bioresource Technology**, v. 97, p. 2443-2446, 2006. Disponível em: https://www.academia.edu/15207477/Relationship_between_density_and_ultrasonic_velocity_in_Brazilian_tropical_woods. Acesso em: 27 jul. 2023.

PAULA, M. H. *et al.* Utilização de métodos não destrutivos para caracterização simplificada da madeira de Cumaru (*Dipteryx odorata*). **Biodiversidade**, v. 15, n. 02, p. 136, 2016. Disponível em: <https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/biodiversidade/article/view/3967>. Acesso em: 27 jul. 2023.

REDGUM HARDWOOD SLEEPERS. **Aldinga Landscape**, 2023. Disponível em: <https://www.aldingalandscape.com.au/product/redgum-hardwood-sleepers/>. Acesso em: 27 jul. 2023.

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

<https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/nativa/article/view/3408>. Acesso em: 27 jul. 2023.

ROSS, R. J.; PELLERIN, R. F. NDE of wood-based composites with longitudinal stress waves. **Forest Product Journal**, v. 38, n. 05, p. 39-45, 1988. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/246923961_NDE_of_Wood-based_Composites_with_Longitudinal_Stress_Waves. Acesso em: 27 jul. 2023.

ROWELL, R. M.; **Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites**. Madison: RC Press, 2005.

SHIMOYAMA, V. R. S.; BARRICHELLO, L. E. G. Influência de características anatômicas e químicas sobre a densidade básica da madeira de Eucalyptus sp. *In*: CONGRESSO ANUAL DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA TÉCNICA DE CELULOSE E PAPEL; 1, 1991. **Anais** [...] São Paulo: ABTCP, 1991. p. 23-36.

SILVEIRA, L. H. C.; REZENDE, A. B.; VALE, A. T. Teor de umidade e densidade básica da madeira de nove espécies comerciais amazônicas. **Acta Amazônica**. v. 43, n. 02, p. 179 - 184, 2003. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/aa/a/NGSVtngTkgZ4DssRyRpTsPB/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 27 jul. 2023.

SMULSKI, S. J. Relationship of stress wave and static bending-determined properties of four northeastern hardwoods. **Wood and Fiber Science**, v. 23, n. 01, p. 44-57, 1991. Disponível em: <https://wfs.swst.org/index.php/wfs/article/view/1290>. Acesso em: 27 jul. 2023.

SOUZA, C. G. F. *et al.* Elavuation of the modulus of elasticity by non-destructive testing for glued laminated timber. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 08, n. 06, p. 47288-47298, 2022. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/262762463_Evaluation_of_the_modulus_of_elasticity_of_glued_laminated_timber_beams_obtained_by_transverse_vibration. Acesso em: 27 jul. 2023.

STANGERLIN, D. M. *et al.* Propriedades mecânicas de madeiras amazônicas estimadas por meio de métodos de propagação de ondas ultrassônicas. **Nativas**, Sinop, v. 5, esp., p. 628-633, 2017. Disponível em:

<https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/nativa/article/download/4712/4731/24006>.

Acesso em: 27 jul. 2023.

TELES, R. F.; PETER, W. Acoustical properties of 10 amazonian hardwoods. *In: INTERNATIONAL CONGRESS ON SOUND AND VIBRATION*; 25, 2022. **Anais [...]**. [S. l.: s. n.], 2022.

THE CONVERSATION. **Red River Gum is an Icon of the Driest Continent**. Disponível em: <https://theconversation.com/the-river>. Acesso em: 27 jul. 2023.

VIANA, R. B. **Caracterização acústica de doze espécies comerciais brasileiras para confecção de instrumentos musicais**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Florestal) - Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Florestal, Brasília, 2019. Disponível em: <https://bdm.unb.br/handle/10483/25365>. Acesso em: 27 jul. 2023.

WANG, X. *et al.* Nondestructive Evaluation of Standing Trees With a Stress Wave Method. **Wood and Fiber Science**. v. 33, n. 04, p. 522-533, 2001. Disponível em: <https://www.fs.usda.gov/research/treesearch/5973>. Acesso em: 27 jul. 2023.

ZEVIANI, W. M. *et al.* Modelos de regressão não linear. *In: REGIÃO BRASILEIRA DA SOCIEDADE INTERNACIONAL DE BIOMETRIA*; 58, 2013 ; *SIMPÓSIO DE ESTATÍSTICA APLICADA À EXPERIMENTAÇÃO AGRONÔMICA*; 5, 2013. **Anais [...]** Campina Grande: s. n., 2013.