



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE FLORESTAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL

ROGÉRIO RODRIGUES DOS SANTOS

**APLICAÇÃO DOS MÉTODOS DINÂMICOS VIBRACIONAIS E ESTÁTICO,
NA DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES ACÚSTICAS E MECÂNICA
DE MADEIRAS EXÓTICAS**

Prof. Dr. ALEXANDRE MIGUEL DO NASCIMENTO
Orientador

SEROPÉDICA, RJ
DEZEMBRO – 2021



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE FLORESTAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL

ROGÉRIO RODRIGUES DOS SANTOS

**APLICAÇÃO DOS MÉTODOS DINÂMICOS VIBRACIONAIS E ESTÁTICO,
NA DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES ACÚSTICAS E MECÂNICA
DE MADEIRAS EXÓTICAS**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Florestal, como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Florestal, Instituto de Florestas da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.

Prof. Dr. ALEXANDRE MIGUEL DO NASCIMENTO
Orientador

SEROPÉDICA, RJ
DEZEMBRO – 2021

**APLICAÇÃO DOS MÉTODOS DINÂMICOS VIBRACIONAIS E ESTÁTICO,
NA DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES ACÚSTICAS E MECÂNICA
DE MADEIRAS EXÓTICAS**

ROGÉRIO RODRIGUES DOS SANTOS

APROVADA EM: 9 de dezembro de 2021

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. ALEXANDRE MIGUEL DO NASCIMENTO – UFRRJ
Orientador

FRANCISCO ANTONIO LOPES LAUDARES – UFRRJ
Membro

ROBERTO CARLOS COSTA LELIS – UFRRJ
Membro

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho de conclusão a mim.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao Divino, sem o qual não seria possível a realização desse trabalho;

À minha família, que me ofereceu o aporte necessário para realização da graduação; à minha companheira, que me apoiou e deu força;

Aos amigos, que fizeram da experiência universitária completa;

Aos professores que proporcionaram grande parte do meu aprendizado.

Agradeço também àqueles que importunamente atrapalharam ou me frustraram, pois me deram reatividade e sangue nos olhos para essa conquista.

RESUMO

No Brasil, apesar da grande quantidade de madeira produzida, há uma grande vacância de informações tecnológicas no que tange a qualificação de madeiras exóticas, em especial com uso final em instrumentos musicais. Nesse sentido abre-se espaço para desenvolvimento de pesquisas e ferramentas que facilitem a determinação das principais propriedades que qualificam a madeira para tal finalidade, à saber propriedades acústicas e mecânicas. Nesse estudo foram aplicados métodos não-destrutivos vibracional longitudinal, vibracional transversal, stress wave timer e máquina de ensaios universal em madeiras exóticas plantadas de *Corymbia citriodora* anos, *Pinus sp.*, *Khaya ivorensis* de baixa densidade, *Eucalyptus paniculata*, *Pinus caribaea* e *Khaya ivorensis* de alta densidade, para determinação de módulo de elasticidade, velocidade do som, atenuação acústica e frequência de ressonância, assim como calculada eficiência acústica. Os resultados foram obtidos em dois teores de umidade, 12% e 15%. Concluiu-se que madeiras com maior grau de desvio de grã resultaram em menor qualidade acústica, e aquelas com menor teor de umidade e densidade obtiveram maior índice de eficiência acústica. Os métodos foram comparados entre si tomando por referência a máquina de ensaios universal, e o método vibracional transversal foi o que obteve resultados mais consistentes.

Palavras-chave: Métodos não-destrutivos; módulo de elasticidade; Qualidade da madeira; sustentabilidade.

ABSTRACT

In Brazil, despite the large amount of wood produced, there is a great lack of technological information regarding the qualification of exotic wood, especially with final use in musical instruments. In this sense, space is open for the development of research and tools that facilitate the determination of the main properties that qualify wood for this purpose, namely acoustic and mechanical properties. In this study, non-destructive longitudinal vibrational, transverse vibrational, stress wave timer and universal testing machine methods were applied to exotic planted woods of *Corymbia citriodora*, *Pinus sp.*, Low density *Khaya ivorensis*, *Eucalyptus paniculata*, *Pinus caribaea* and *Khaya ivorensis* de high density, for determination of modulus of elasticity, sound velocity, acoustic attenuation and resonant frequency, as well as calculated acoustic efficiency. The results were obtained at two moisture contents, 12% and 15%. It was concluded that woods with a higher degree of grain deviation resulted in lower acoustic quality, and those with lower moisture content and density had a higher level of acoustic efficiency. The methods were compared to each other taking as reference the universal testing machine, and the transverse vibrational method was the one that obtained the most consistent results.

Keywords: Non-destructive methods; modulus of elasticity; Wood quality; sustainability.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
2.1. Exploração de madeiras de rápido crescimento.....	2
2.2. Importância dos estudos acústicos.....	2
2.3. Definição de métodos não-destrutivos.....	3
2.4. Frequência de ressonância e atenuação acústica.....	3
2.5. Métodos de avaliação.....	5
2.6. Aplicação em comparação de madeiras.....	6
2.8. Efeito da grã.....	7
2.9. Efeito da umidade nas propriedades	7
3. MATERIAL E MÉTODOS	8
3.1. Desenvolvimento do equipamento	8
3.2. Dimensionamento e produção dos corpos de prova	9
3.3. Climatização	10
3.4. Determinação da densidade aparente.....	11
3.5. Métodos de ensaios.....	11
3.5.1. Método Não Destrutivo Vibracional Transversal	12
3.5.1.1. Módulo de Elasticidade (Ed).....	12
3.5.2. Método Não Destrutivo Vibracional Longitudinal	13
3.5.2.1. Módulo de Elasticidade (Ed).....	13
3.5.2.2. Velocidade do som.....	14
3.5.3. Método De Flexão Estática Em Máquina De Ensaio	14
3.5.3.1. Determinação do Módulo de Elasticidade em Máquina de Ensaio.....	15
3.5.4. Stress Wave Timer	15
3.5.4.1. Velocidade do som.....	16
3.5.4.2. Módulo de elasticidade dinâmico.....	17
3.6. Índice de Eficiência acústica	17
3.7. Análise dos dados e estatísticas	17

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	18
4.1.Densidade da madeira e Teor de Umidade	18
4.2.Módulos de elasticidade	19
4.3. Frequência de ressonância	21
4.4. Atenuação acústica	22
4.5. Velocidade do som	23
4.6. Índice de eficiência acústica	25
5. CONCLUSÕES	28
6. REFÊRENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	29

1. INTRODUÇÃO

Apesar de ser um dos maiores produtores de madeira do mundo, quando se trata da construção de instrumentos musicais, o Brasil é essencialmente um país importador madeiras (SLOOTEN, 1993), sendo ainda pequeno o número de pesquisas científicas que consolidem o conhecimento de madeiras brasileiras como úteis para esse fim.

No entanto, alguns fatores podem alterar a tradicional dinâmica de uso massivo de madeiras estrangeiras. Motivos como elevação dos custos de importação e de câmbio, aumento da demanda por madeira e redução nos estoques mundiais de florestas naturais podem interferir na chegada de madeiras exóticas ao Brasil.

Dessa forma, estudos que ratifiquem o potencial acústico e de uso de madeiras já difundidas no mercado brasileiro são úteis no desenvolvimento de uma oferta local. Para isso, é fundamental o desenvolvimento de ferramentas que permitam a avaliação desse potencial acústico.

Sabendo-se da disponibilidade sazonal de madeiras no tempo e nas regiões, faz-se necessário o aprimoramento e conhecimento efetivo de técnicas e ferramentas que no mesmo tempo em que cumprem suas funções de análise, também sejam de simples operacionalidade e baixo custo.

Métodos não destrutivos, em especial barras livres, são considerados de baixo custo e de alta eficiência (SEGUNDINHO et al., 2012), apresentando-se como ferramentas úteis para determinação de propriedades mecânicas e acústicas tradicionalmente determinadas com dano ao material.

Para isso, utiliza-se dispositivo de suporte e impacto para execução dos ensaios vibracional longitudinal e vibracional transversal, sendo observados material da base em madeira, material de contato, dimensionamento e funcionalidade para execução em laboratório. Uma vez que equipamentos para ensaios não destrutivos são variados e com tamanhos distintos, os corpos de prova podem variar de 150×14×2 mm (comprimento x largura x espessura) (FARVARDIN; ROOHNIA; LASHGAR, 2015) à 3000 x 110 x 50 mm (CANDIAN; SALLES, 2009).

Após a geração da onda mecânica decorrente do impacto do martelo na amostra, o software de transformada de Fourier (FFT), automaticamente informa o valor do decaimento logarítmico e da frequência de ressonância ou frequência natural de vibração.

O tamanho dos corpos de prova também interfere no resultado, como encontrado por Segundinho et al. (2018). Dessa forma, a determinação do tamanho ótimo de corpos de prova foi resultado de condições de ensaio, material disponível e intenção do estudo. Onde o material foi testado e avaliado com diferentes dimensões de corpos de prova e comparados resultados em relação aos métodos tradicionais.

Por serem métodos vibracionais, averiguou-se também a hipótese de diferentes formas de impactar os corpos de prova influenciarem na determinação das propriedades do material testado. Haines, Leban e Herbé (1996) sugere o uso de martelo com massa para empregar energia suficiente à provocar vibrações no impacto e corpo rígido, enquanto Ross (2015) a vibração pode ser exercida através de martelos, pêndulos ou transdutores piezoelétricos, onde os transdutores piezo vibram, então transferem vibração ao corpo e são utilizados em END de vibração forçada.

Também foi avaliada a diferença entre os diferentes métodos empregados. Haines, Leban e Herbé (1996) já relata diferença entre dois métodos não destrutivos de flexão por ressonância e método de flexão estático. Assim, foi averiguada a eficiência na determinação das propriedades Módulo de elasticidade, Frequência de ressonância, velocidade do som e atenuação acústica, uma vez que os métodos diferem entre si.

O presente estudo teve por objetivos a determinação das propriedades acústicas e do módulo de elasticidade através do ensaio em máquina de ensaio universal e dos métodos não-destrutivos, a saber: método vibracional longitudinal, método vibracional transversal, equipamento Stress Wave Timer. Foi avaliado também o efeito do teor de umidade de equilíbrio nas propriedades estudadas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Exploração de madeiras de rápido crescimento

As pressões por sustentabilidade são cada vez mais intensas no século XXI, e nesse contexto a exploração de florestas naturais vem sendo gradualmente substituída pela silvicultura baseada em plantios comerciais. No entanto, em virtude da baixa difusão da tecnologia silvicultural de espécies nativas, os principais pacotes tecnológicos adotados no Brasil são de madeiras exóticas de rápido crescimento, como *Pinus* spp. e *Eucalyptus* spp. (COSTA et al, 2020)

No sentido produtivo em volume de madeira, o Brasil se destaca pela produtividade alcançada por espécies exóticas. Esse fato se deve tanto às condições edafoclimáticas favoráveis encontradas no território brasileiro quanto à escolha de material genético adequado e desenvolvimento de tratamentos silviculturais adequados. No entanto, madeiras de rápido crescimento tem características distintas daquelas de crescimento lento. A mudança na qualidade da madeira em virtude do rápido crescimento inicial e da alta produção em volume de idades mais elevadas é um dos problemas associados ao plantio de espécies de rápido crescimento, assim como menor densidade, maior proporção de lenho juvenil e tensões de crescimento. (LATORRACA e ALBUQUERQUE, 2012)

2.2. Importância dos estudos acústicos

Dentre os muitos usos da madeira, está o uso como material acústico. Segundo Araújo (2020) a madeira é sensível em responder a estímulos mecânicos e isso faz dela um importante material adequado à confecção de peças de instrumentos musicais. Nesse sentido, é possível investigar propriedades acústicas de interesse em cada qualidade e espécie de madeira.

O som da madeira, oriundo da capacidade desse material em vibrar e propagar ondas em forma de som, é dependente principalmente de suas características físico-mecânicas, que variam em função de espécie, região no fuste, idade, composição e condições de desenvolvimento. (LATORRACA; ALBUQUERQUE, 2012; NCUBE; MASILINGA, 2017)

Estudos com métodos não-destrutivos podem ser interessantes para investigar madeiras em boas condições sem comprometer seu uso futuro (BUCUR, 1995, 2006). Halachan et al. (2017), ratificam a importância de estudos acústicos com métodos não-destrutivos, sendo úteis para investigação de qualidade acústica de madeiras para instrumentos musicais, para verificação da resistência de elementos estruturais e para verificar a fitossanidade de árvores vivas.

2.3. Definição de métodos não-destrutivos

Por definição, método não destrutivo é a ciência que investiga e determina propriedades físicas e mecânicas de um material sem interferir na possibilidade de uso após a avaliação, utilizando as informações geradas para destinar corretamente o material avaliado (ROSS, 2015).

2.4. Frequência de ressonância e atenuação acústica

A frequência de ressonância para que possa ser lida numericamente, o sinal acústico é convertido pela transformada rápida de Fourier (FFT), saindo do domínio do tempo para o domínio da frequência. (ROSA et al., 2014)

Na publicação “Avaliação das Espécies Madeireiras da Amazônia Seleccionadas para a Manufatura de Instrumentos Musicais” (SLOOTEN, 1993), madeiras brasileiras foram categorizadas, mediante sua aplicação nas diferentes partes de instrumentos musicais, considerando a atenuação acústica como variável.

Através da frequência de ressonância são obtidos módulos de elasticidade de corpos de prova por ensaios vibracionais (SEGUNDINHO et al, 2018; SLOOTEN e SOUZA, 1993). No entanto, por variar também com tamanho e forma do corpo de prova diferentes equações e métodos serem determinantes nos resultados, muitas vezes comparações entre estudos, tomando essa propriedade por referência, são inconclusivas.

A figura 1, ilustra a conversão realizada através da transformada rápida de Fourier, permitindo a visualização da magnitude da onda no campo da frequência.

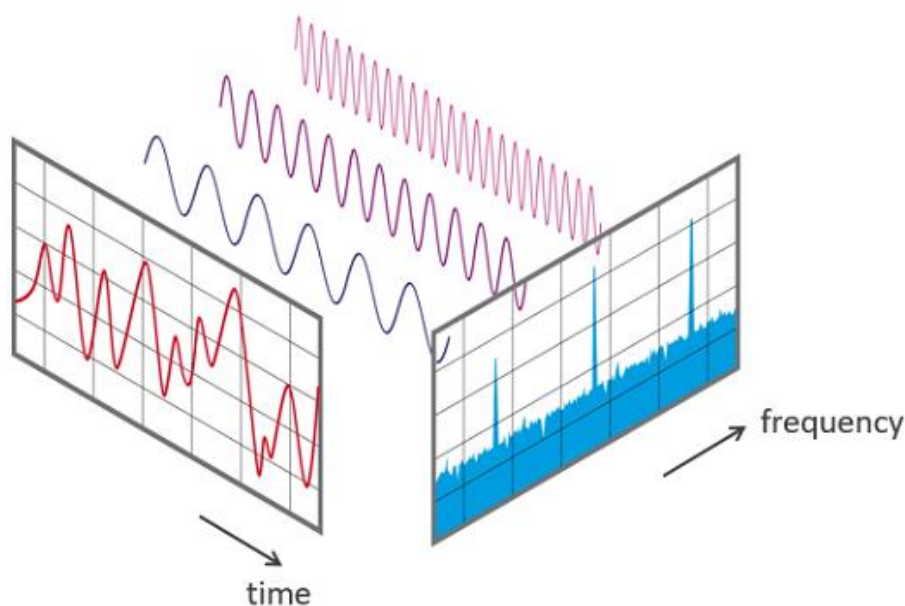


Figura 1. Onda vista no campo do tempo e da frequência (fonte: <https://www.nti-audio.com/pt/suporte/saber-como/transformacao-rapida-de-fourier-fft>)

Atenuação acústica, ou atrito interno, é a propriedade física que indica o grau de amortecimento da vibração no corpo de prova. Quanto mais elevado o atrito interno, menor o tempo no qual a energia da onda acústica se mantém no corpo de prova, no entanto a sensibilidade por diferentes métodos pode ser diferente, em virtude também do posicionamento do microfone e também do software analisador de espectro.

A atenuação acústica é uma propriedade acústica também expressa pelo decréscimo logarítmico (DL) da onda sonora gerada por um estímulo na madeira. Existem duas formas de se estabelecer essa grandeza: por largura de banda, definida através da frequência de ressonância obtida a partir do sinal tratado no domínio das frequências, então teremos o coeficiente de amortecimento ($\tan\delta$) e o Decréscimo Logarítmico, obtido através do sinal acústico no domínio do tempo. Numa curva exponencial em dado período de tempo, ao inverter a frequência obtém-se uma onda decrescente. DL é a expressão do quanto essa onda diminuiu em um período. Os valores são muito pequenos, uma vez que em um material considerado “sonoro” a onda demora a ser dissipada, e por essa razão multiplica-se o DL por 1000 para obtenção de números inteiros. A figura 2 ilustra a redução da amplitude no tempo, onde DL pode ser percebido como a diferença de amplitude entre um intervalo de tempo conhecido.

As equações:

$$\tan \delta = \frac{f_2 - f_1}{f_r} \quad (1)$$

Onde,

f_1 = frequência -3dB da frequência f_r (hz);

f_2 = frequência +3dB da frequência f_r (hz);

f_r = é a frequência (hz);

$$Dl = \frac{1}{n} \ln \frac{A_0}{A_n} \approx \pi \tan \delta \quad (2)$$

Onde,

$A_0 = o x(t)$

$A_n = x(t-T)$

n = modo de vibração

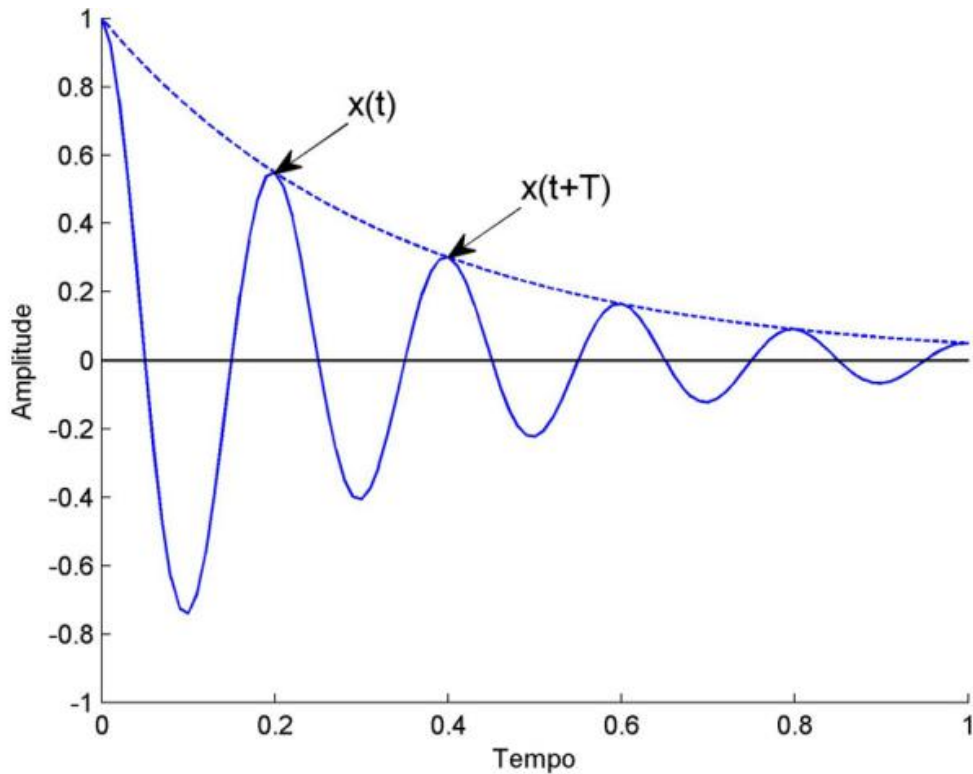


Figura 2. Ilustração de onda com decaimento sendo medido em intervalo de tempo entre $x(t)$ e $x(t+1)$. (fonte: MUSOLINO, 2011)

$$Dl = \pi x \tan \delta \quad (3)$$

$$Dl = \beta x T \quad (4)$$

$$e^{-\beta t} \quad (5)$$

A expressão $e^{-\beta t}$ curva descreve a onda no campo do tempo (ilustrada pela linha trastejada na Figura 2), de forma que o decaimento logarítmico pode também ser descrito pela equação 3, onde beta é o parâmetro de cobertura da curva exponencial, “t” é o tempo e “T” é o período, inverso do tempo.

No sentido físico o DL é uma caracterização da capacidade de amortecimento do material, no caso, da madeira testada. A obtenção de altos valores de DL, sugere que o amortecimento é rápido, e que a onda é percebida por pouco tempo. Por outro lado, se o decaimento logarítmico é baixo, o amortecimento é lento, e o som pode ser percebido por mais tempo.

2.5. Métodos de avaliação

Diferentes métodos são utilizados para determinação de propriedades físicas e mecânicas da madeira, dentre eles há aqueles considerados como dinâmicos e estáticos. Métodos estáticos são tradicionalmente utilizados como referência aquele de determinação do módulo de elasticidade através informações geradas pelo deslocamento

num ponto de um corpo de prova em função da aplicação de tensão em máquina de ensaios universal.

Métodos dinâmicos, são de rápida e fácil aplicação, tendo como vantagem também baixo custo de operação. Haines, Leban e Herbé (1996) compara métodos estáticos e dinâmicos, conclui que métodos dinâmicos são muito aplicáveis para determinação de propriedades como velocidade do som e módulo de elasticidade, obtendo resultados muito próximos daqueles determinados por métodos estáticos.

Métodos não-destrutivos, como sugere o nome, mantém a integridade dos elementos testados, possibilitando classificação direta dos elementos e uso posterior dos corpos de prova, que podem ser peças com futuro uso (CARREIRA et al., 2017)

Rosa et al. (2014), ao caracterizar madeira de maçaranduba por métodos destrutivos e não destrutivos, evidencia o método vibracional transversal como o mais confiável dentre os métodos não destrutivos, obtendo estimativas para o módulo de elasticidade com maior coeficiente de determinação e menor erro da estimativa.

A heterogeneidade de elementos no sentido longitudinal interfere na acuracidade do dos métodos vibracionais, em especial no método vibracional longitudinal. Carreira et al. (2012) em estudo comparativo entre duas espécies de reflorestamento através de testes vibracionais transversal e longitudinal conclui que o método vibracional longitudinal tem precisão reduzida em virtude da presença de nós, desvio de grã, buracos, podridão, xilófagos, aumentam a quantidade de ocos na amostra elementos que interferem desviando a onda, e dependendo do método utilizado, pode aumentar o tempo que a onda percorre o objeto.

2.6. Aplicação em comparação de madeiras

A classificação de madeiras é um item vantajoso por diversos aspectos. Carreira et al. (2017) iniciam seus estudos afirmando a vantagem em classificar madeiras em função de suas características mecânicas, ao utilizar madeiras com melhores características para peças que demandam maior esforço, enquanto aquelas com classificação inferior podem ser utilizadas em elementos estruturais sujeitos a menor esforço, sem comprometer a resistência da estrutura.

A classificação por meio de métodos não-destrutivos apresenta boa correlação com aquela realizada através de outros métodos. Carreira et al. (2012) estudando correlação de propriedades mecânicas entre o método não-destrutivo vibracional transversal e destrutivo uma correlação, concluem que o nível de erro do método destrutivo em comparação ao método não destrutivo é inferior a 2%.

Diversos estudos de comparação e determinação de propriedades físicas e mecânicas de madeira foram desenvolvidos fazendo-se uso de métodos não destrutivos. Sproßmann, Zauer e Wagenführ (2017) caracterizaram acústica e mecanicamente madeiras tropicais comumente utilizadas em instrumentos musicais, como Jacarandá indiano (*Dalbergia latifolia*), Ziricote (*Cordia dodecantra*) Jacarandá africano *Dalbergia melanoxylon*) e Ébano (*Diospyros classiflora*), e para isso fez uso de método dinâmico de barras livres. Flores (2015) Analisou diferentes madeiras brasileiras, potenciais substitutas às espécies tradicionais utilizadas em violões clássicos, utilizando-se também de método não destrutivo.

No Brasil, os primeiros estudos relacionados a classificação de madeira para instrumentos musicais foram realizados na década de 80, sendo um dos precursores nesse sentido. Souza (1983) classificou no Laboratório de Produtos Florestais através de propriedades acústicas, físicas e mecânicas cerca de 100 madeiras de espécies Brasileiras na construção de instrumentos musicais. Em 2021 estudos nesse sentido ainda são realizados, Guilhon, Guimarães e Lourenço (2021) caracterizaram 20 espécies de madeira oriundas do maranhão passíveis de uso em construção de violões.

A classificação através de caracterização mecânica por métodos não destrutivos deve seguir alguns cuidados para que o resultado encontrado seja fidedigno. Fatores como densidade, teor de umidade variação de grã, idade da madeira e região no fuste, afetam a obtenção de dados através de métodos não-destrutivos, e devem ser observados durante a amostragem. (CARREIRA, 2012)

2.8. Efeito da grã

Mantilla e Azevedo (2003) observaram que alguns fatores são preponderantes para determinação das propriedades por métodos não destrutivos, dentre eles propriedades anatômicas, físicas (densidade), morfológicas (tipo de lenho e ângulo da grã), presença de defeitos, forma das amostras, condições do meio e procedimento utilizado para obtenção dos resultados.

Obataya, Ono e Norimoto (2000) verificaram através de métodos vibracionais a existência de correlação positiva entre a variação do ângulo de grã e propriedades acústicas da madeira. Através do ensaio de coníferas (*Picea Sitchensis* Carr.) verificou que o maior desvio de grã diminui o valor de módulo de elasticidade em relação à densidade.

Bucur (2017) descrevendo madeiras folhosas de clima temperado de grã ondulada, explicitou a preferência de construtores de instrumentos musicais de arco, como violas e violinos, por madeiras de apelo estético. Quanto suas propriedades, tais madeiras tendem a ter módulo de elasticidade sutilmente maior, densidade consideravelmente superior e, porém, velocidade de propagação sonora inferior e atenuação acústica superior.

A orientação da grã afeta principalmente velocidade da onda sonora e atenuação acústica. Beall (2002), afirma que a orientação da grã e o ângulo dos anéis de crescimento interferem diretamente nas propriedades de atenuação acústica e na velocidade do som, de forma que a atenuação é aumentada e a velocidade do som é reduzida ao passo que a orientação das fibras é aumentada do sentido longitudinal para o sentido transversal.

2.9. Efeito da umidade nas propriedades

A alteração do teor de umidade da madeira pode interferir nas propriedades físicas e mecânicas da madeira com alta correlação, esse fenômeno é observado abaixo do PSF. Segundinho et al (2017) concluem que, para madeira de pinus, o módulo de elasticidade tem correlação de 23% com o teor de umidade, enquanto as fibras não se encontram no seu ponto de saturação. Acima desse ponto, as variações no teor de umidade da madeira não têm efeito no seu módulo de elasticidade.

Josino (2014), ao estudar a relação existente entre resistência, umidade e densidade, para madeira de Eucalyptus, observou a existência de relação entre resistência

e teor de umidade da madeira. A relação encontrada foi de diminuição do módulo de elasticidade com o incremento da umidade do material.

O efeito da umidade deve ser considerado em estudos que compreendem propriedades de resistência e rigidez da madeira. Logsdon (1998) estudou a influência da umidade nas propriedades de 7 madeiras distintas, compreendendo folhosas e coníferas e apresentou propostas para correção das propriedades de resistência e rigidez para um teor de 12%.

Não só as propriedades de rigidez e resistência da madeira sofrem efeito do teor de umidade. De Oliveira e Sales (2005), estudaram a relação entre teor de umidade e velocidade do som na madeira por método não-destrutivo. Foi observado que os resultados de velocidade do som devem ser ajustados sempre que o teor de umidade for superior à 12%. Nesse sentido, a relação existente é inversamente proporcional, observando-se aumento da velocidade do som com redução no teor de umidade da madeira.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Desenvolvimento do equipamento

Foi construído dispositivo para execução métodos vibracionais, longitudinal e transversal (ver Figura 3).

A concepção do dispositivo é simples, composto por duas bases em madeira de alta densidade onde são fixadas duas hastes paralelas entre si e formando um ângulo de noventa graus com a base, fixadas por parafusos e enrijecidas por adesivo a base de PVA. Nas extremidades superiores das hastes, foram fixados elastômeros presos para suspensão das amostras.



Figura 3. Microfone, suportes e martelletes constituintes do dispositivo para ensaios vibracionais.

Paralelamente, marteleiros de madeira também foram necessários. Para tal foram testados marteleiros de diferentes materiais e massas até conseguir dados confiáveis para execução dos impactos.

Microfone foi utilizado para captação do som emitido pela madeira, que foi gerado após impacto pelo marteleiro (acionador), que deve ter uma massa proporcional à massa das amostras. O microfone utilizado tinha uma entrada P2 para conexão na placa de som do computador ou notebook onde foi executado o software para transformação do sinal acústico captado no domínio do tempo para o domínio das frequências, pela transformada rápida de Fourier, onde se observam os modos de vibração da amostra, e se destaca a frequência de ressonância (fr), e assim calcular das propriedades estudadas.

3.2. Dimensionamento e produção dos corpos de prova

As madeiras escolhidas para realização desse trabalho foram adquiridas de árvores isoladas no campus da UFRRJ em Seropédica, das espécies direita *Corymbia citriodora*, *Pinus sp*, *Eucalyptus paniculata*, *Pinus caribaea* e *Khaya ivorensis* (figura 4).

A madeira de *Khaya ivorensis* foi obtida de duas regiões do fuste, obtendo-se madeira de menor densidade próxima à medula, e madeira de alta densidade, mais próxima à casca.

Ao estabelecer as dimensões dos corpos de prova, para reduzir o efeito do cisalhamento na obtenção do valor do módulo de elasticidade estático e dinâmico, foi estabelecido o comprimento mínimo de 30 vezes a espessura da amostra de modo a se obter resultados confiáveis nos ensaios vibracionais. Dessa forma, estabeleceu-se, para realização dos ensaios, padrão com dimensões iguais a 400mm x 25mm x 10mm, referentes à comprimento, largura e espessura, respectivamente. O número de repetição foi de 7 amostras por tipo de madeira.

A norma ASTM 1856, sugere, para diminuição do efeito do cisalhamento em testes não-destrutivos, aumento da razão de esbeltez. Segundo a norma, os corpos de prova foram dimensionados considerando relação comprimento por espessura de no mínimo 20 vezes. Os corpos de prova para realização deste trabalho obtiveram relação de 40 vezes.

Os corpos de prova foram ensaiados com três martelos de massas e formatos diferentes e observou-se que o modelo do martelo não teve influência sobre os resultados obtidos, no entanto a execução do impacto foi facilitada quando feito com martelo de cabeça esférica de madeira para o método longitudinal, enquanto para o método transversal em lâminas, martelos no modelo de vareta.

Os corpos de prova foram confeccionados e analisados pelos três métodos previstos. Com os resultados obtidos, foi feita uma pré análise dos dados e observação sobre os possíveis ajustes necessários.



Figura 4. Corpos de prova, da esquerda para direita *Corymbia citriodora*, *Pinus sp.*, *Khaya ivorensis* de baixa densidade, *Eucalyptus paniculata*, *Pinus caribaea* e *Khaya ivorensis* de alta densidade.

Dentre as amostras produzidas foram escolhidas as amostras com maior homogeneidade visual (cor, textura e grã) e ausência de defeitos, tais como: presença de rachaduras, de ataque por insetos ou ainda parcialmente deteriorada por fungos, que pudessem interferir em suas propriedades (figura 4).

As amostras de Mogno africano, foram divididas em dois grupos, um de baixa densidade, retirado de região mais próxima à medula, e outro de alta densidade, localizado em área mais próxima ao alburno da tora.

3.3. Climatização

Os ensaios foram feitos em duas condições de umidade, sendo que na primeira condição, todas as amostras foram dispostas em sala climatizada por 15 dias à 25°C e umidade relativa do ar em torno de 65%.

Em seguida, após a realização dos ensaios em sala climatizada, foram feitos os ensaios com madeira umidificada. Para umidificação, deixou-se por 15 dias todas as amostras em autoclave desligada, com água ao fundo, porém sem contato direto com as amostras (figura 5). A condição de umidade relativa do ar e de temperatura dentro da autoclave foi de 25°C e 80%, respectivamente. Aferição foi feita com termo higrógrafo portátil.



Figura 5. Amostras em autoclave para umidificação

Nestas duas condições de umidade relativa do ar e de temperatura, a estimativa do teor de umidade de equilíbrio foi de 11,8% e 15,8%. Após 15 dias de absorção de água atmosférica, cada espécie de madeira pode absorver diferentes massas de água no mesmo período, apresentando, conseqüentemente, distintos teores de umidade.

A determinação do teor de umidade de cada espécie foi realizada selecionando alguns corpos que foram pesados antes e depois de secagem em estufa à 103 °C, admitindo-se o a média do teor dos corpos para cada espécie

Para fins comparativos foi necessário ajuste de todas as propriedades testadas para apenas dois teores de umidade, adotando-se TU=12% para o primeiro momento e TU=15% para o segundo momento. O módulo de elasticidade foi corrigido em 2% para cada percentual de alteração da umidade da madeira (ABNT 7190- 1997)

3.4. Determinação da densidade aparente

A densidade aparente das amostras foi determinada através da razão entre a sua massa e o seu volume, num determinado teor de umidade, como mostra a equação 3, Para determinação do volume foram medidas as dimensões de espessura, largura e comprimento das amostras com paquímetro digital. Já a pesagem das amostras foi feita em balança analítica, com precisão de três casas decimais,

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (6)$$

Onde,

m = massa, em gramas (g)

V = volume, em centímetros cúbicos (cm³)

3.5. Métodos de ensaios

Cada método utilizado possibilitou obtenção informações distintas. Na tabela 1 tem-se resumo dos métodos utilizados e as informações obtidas.

Tabela 1. Esquema das variáveis obtidas e determinadas por cada método.

	Variáveis			
	Módulo de elasticidade	Velocidade do som	Atenuação Acústica	Frequência de ressonância
Máquina Universal	x			
Stress Wave Timer	x	x		
Vibração transversal	x		x	x
Vibração longitudinal	x	x	x	x

3.5.1. Método Não Destrutivo Vibracional Transversal

O método vibracional transversal, consiste na suspensão do corpo de prova sobre dois elastômeros paralelos entre si (figura 6), com distância entre as extremidades das amostras e o apoio nos elastômeros de $0,224 L$, onde L é o comprimento das amostras. Para esse método foi utilizada para cálculo do módulo de elasticidade dinâmico a primeira frequência natural de ressonância.



Figura 6. Corpo de prova de Pinus suspenso por elastômeros sendo ensaiado pelo método de vibração transversal

Para geração das ondas, impactos são gerados verticalmente para baixo no centro da amostra por meio de martelo de madeira devidamente dimensionado, com massa menor que a das amostras, figura 6.

As ondas geradas pelo impacto no centro das amostras são captadas por um microfone disposto na mesma direção e sentido contrário ao impacto, que por meio de um software os sinais sonoros são transformados e disponibilizados no domínio das frequências, pela transformada rápida de Fourier, convertendo informações da onda mecânica no domínio do tempo. O pico espectral advindo da transformação, equivale à frequência de ressonância do objeto ensaiado.

3.5.1.1. Módulo de Elasticidade (E_d)

A determinação do módulo de elasticidade dinâmico pelo método vibracional transversal foi feita através da equação 7, descrita na ASTM C - 215 (2008):

$$E_{dinâmico} = \left(\frac{2f_n}{\gamma_n \pi} \right)^2 \frac{mL^3}{I} \quad (7)$$

Onde,

f_n = é a frequência de vibração transversal (hz);

n = é número do modo de vibração (1);

$$\gamma_n = (n+0.5)^2$$

m = é a massa da barra (g);

L = é o comprimento da barra (m);

I = é a inercia da barra(cm⁴);

3.5.2. Método Não Destrutivo Vibracional Longitudinal

Assim como o método vibracional transversal, o método vibracional longitudinal (figura 7) utilizado consiste na geração de impactos mecânicos que, transformados em ondas pela transformada rápida de Fourier, informam a frequência de ressonância relativa à amostra . A metodologia praticada no cálculo do módulo de elasticidade dinâmico utilizou-se da primeira frequência de vibração no sentido longitudinal, em Hz.



Figura 7. Corpo de prova de Pinus sendo ensaiado pelo método de vibração longitudinal

A frequência de ressonância dos corpos de prova ensaiados no sentido longitudinal está na faixa de 5000 Hz, diferentemente dos transversalmente ensaiados, que apresentam pico na faixa de 200 Hz.

3.5.2.1. Módulo de Elasticidade (Ed)

A determinação do módulo de elasticidade dinâmico (GPa) pelo método vibracional longitudinal foi realizada utilizando-se a equação 8, uma adaptação da equação descrita por Roohnia (2019).

$$MOE_{dinâmico\ longitudinal} = \rho V^2 * 10^6 \quad (8)$$

Onde:

ρ = densidade aparente da madeira (g/cm^3);

V = velocidade do som obtida nos ensaios (m/s).

3.5.2.2. Velocidade do som

A velocidade de propagação sonora no sentido longitudinal foi determinada através da equação expressa na equação 9.

$$V = 2Lf \quad (9)$$

Onde:

L = comprimento da barra prismática (m);

f = é a frequência de vibração longitudinal (hz).

3.5.3. Método De Flexão Estática Em Máquina De Ensaio

Os ensaios de flexão estática, assim como testes vibracionais, foram realizados no Laboratório de Propriedades Físicas e Mecânicas da UFRRJ.

Para realização dos ensaios colocou-se as amostras sobre dois apoios articulados móveis, com vão de 39 cm, restando 0,5 cm em cada extremidade da amostra. A força foi aplicada no centro da peça (figura 8), que tinha seção de 25mm x 10mm de largura e espessura, respectivamente.

O carregamento foi feito de forma gradual, respeitando-se o limite de proporcionalidade da espécie utilizada, adotando-se a variação de cargas e deformações encontradas entre 20 e 30% do valor da resistência na flexão para cada tipo de madeira (sempre abaixo do limite de proporcionalidade).

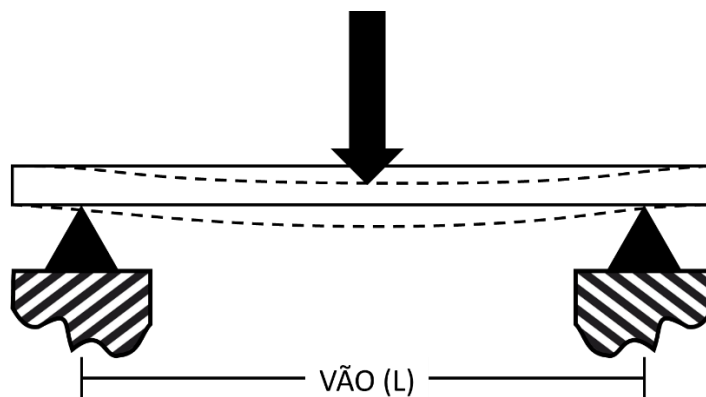


Figura 8. Esquema barra sofrendo flexão

O equipamento utilizado a máquina de ensaios universal mecânica modelo CAP 30TF UMC 300, fabricado pela empresa Contenco, usando célula de carga de 500 kgf (figura 9).



Figura 9. Ensaio de flexão em máquina de ensaios universal mecânica.

3.5.3.1. Determinação do Módulo de Elasticidade em Máquina de Ensaio

A determinação do módulo de elasticidade em máquina de ensaios universal foi feita através da equação descrita na equação 10.

$$E = \frac{8.\Delta P.L^3}{384.I.\Delta\delta} \text{ e } I = \frac{b.h^3}{12} \quad (10)$$

ΔP = Variação de carga entre 20 e 30% da expectativa de resistência à flexão, abaixo do limite de proporcionalidade (cm);

L = vão usado no ensaio (39 cm);

I = Momento de inércia do objeto (cm⁴);

$\Delta\delta$ = Variação da flecha formada, para o mesmo intervalo de carga (cm);

b = base (cm);

h = altura ou espessura da amostra (cm)

3.5.4. Stress Wave Timer

O aparelho Stress Wave Timer tem concepção simples, onde a amostra é fixada em grampos localizados em bases metálicas, onde dois sensores acelerômetros estão presentes e afastados por uma distância pré-definida (figura 10).

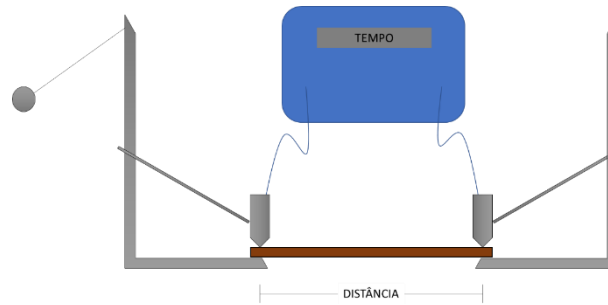


Figura 10. Esquema do aparelho stress wave timer

Um impacto é gerado por um pêndulo fixo em uma das bases metálicas (figura 11), provocando uma onda percebida no início e ao final do vão entre os sensores, que convertem a onda mecânica em sinais elétricos.

Para que a energia aplicada sobre o sistema fosse sempre a mesma, padronizou-se a altura de soltura do pêndulo.



Figura 11. Pêndulo suspenso antes do impacto.

A diferença de tempo em microssegundos entre a passagem da onda no primeiro e no segundo transdutor é apresentado no visor LCD do equipamento, permitindo assim determinar a velocidade do som na amostra, pela equação 11 e módulo de elasticidade pela equação 12.

Antes de cada ensaio as amostras foram pesadas usando-se uma balança do modelo MARTE com precisão de duas casas decimais.

3.5.4.1. Velocidade do som

Para determinação da velocidade do som foi utilizada equação descrita na equação 11.

$$v = \frac{s}{t} * 10^{-6} (m/s) \quad (11)$$

Onde,

S = é o espaço compreendido entre os dois sensores; (m)

t = é o tempo de propagação da onda, apresentado no visor; (μs)

3.5.4.2. Módulo de elasticidade dinâmico

Para determinação do módulo de elasticidade pelo método Stress Wave, foi utilizada a equação 12, seguindo a metodologia de Rosa et al (2014)

$$E_{SW} = \left(\frac{L}{t}\right)^2 \times \frac{D}{g} \times 10^{-5} \quad (12)$$

Onde,

E_{SW} = Módulo de elasticidade dinâmico pelo Stress Wave (MPa);

L = Comprimento do corpo de prova (m);

t = Tempo de propagação da onda (s);

D = Densidade do corpo de prova (kg.m^{-3});

g = Aceleração da gravidade (m.s^{-2}).

3.6. Índice de Eficiência acústica

O índice de eficiência acústica é um indicador para qualidade acústica das madeiras testadas. Foi determinado para os métodos vibracionais transversal e longitudinal, métodos pelos quais foi possível obter atenuação acústica para cálculo do. Para tanto, utilizou-se a equação 13, uma adaptação das equações utilizadas por Farvardin, Roohnia e Lashgar (2015)

$$ECA = \pi \frac{\sqrt{\frac{E_{din}}{\rho^3}}}{DI} \quad (13)$$

Onde,

E = Modulo de elasticidade é a densidade aparente da madeira (GPa);

DI = Decaimento logarítmico;

ρ = Densidade (g/cm^3)

3.7. Análise dos dados e estatísticas

Os dados foram analisados e apresentados através de tabelas com as médias dos valores e em alguns casos com os valores de desvio padrão. Para as variáveis com características não paramétricas, foi utilizado o teste de Kruskal-Wallis, comparando as médias dos postos, pelo teste de Dunn. Para comparação de duas médias foi utilizado o teste de Mann-Whitney. Análise de correlação de Pearson foi utilizada. Todos os testes foram feitos ao nível de 5% de significância. Foi também verificado a variação percentual das propriedades, entre diferentes métodos de determinação, e entre diferentes teores de umidade.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As variáveis, módulo de elasticidade, frequência de ressonância, atenuação acústica, velocidade do som, módulo de elasticidade relativo e eficiência acústica da madeira não atenderam os pressupostos de normalidade da ANOVA, e os resultados estão dispostos nas tabelas à seguir.

4.1. Densidade da madeira e Teor de Umidade

Os resultados dos teores de umidade e densidade aparente estão apresentados nas tabelas que se seguem (tabela 2 e 3), para duas condições de acondicionamento, sempre a $25^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ e uma delas a umidade relativa do ar a 65% e outra a 80%, respectivamente.

Tabela 2. Teores de umidade de equilíbrio nas duas condições de umidade de equilíbrio e para as diferentes madeiras e métodos de ensaio.

Madeiras	12%	15%
<i>Khaya Ivorensis</i> *	11,5	15,3
<i>Pinus caribaeae</i>	10,8	16,7
<i>Pinus sp</i>	11,6	17,6
<i>Khaya ivorensis</i> **	11,6	14,4
<i>Corymbia citriodora</i>	12,3	15,8
<i>Eucalyptus paniculata</i>	11,9	13,9
média	11,6	15,6

Em que: * madeira de densidade mais baixa e **densidade mais alta; SWT stress wave time, MU máquina universal de ensaio; VL método de vibração longitudinal e VT método de vibração transversal

Em média, para as madeiras estudadas, foi alcançado 11,6% de teor de umidade para a primeira condição e 15,6% para a segunda condição de acondicionamento. Na primeira condição, a madeira com menor percentual de umidade foi *Pinus caribaeae*, com 10,8% de teor de umidade. Na segunda condição de acondicionamento, as madeiras *de Pinus caribaeae* e *Pinus sp.* alcançaram os maiores teores de umidade em relação às outras madeiras, 16,7% e 17,6%, respectivamente.

Tabela 3. Densidade aparente em duas condições de umidade de equilíbrio para as diferentes madeiras e métodos de ensaio.

madeira	Densidade aparente	
	12%	15%
<i>Khaya Ivorensis</i> *	0,520 0,023	0,531 0,026
<i>Pinus caribaeae</i>	0,576 0,024	0,598 0,029
<i>Pinus sp</i>	0,594 0,023	0,617 0,031
<i>Khaya ivorensis</i> **	0,725 0,031	0,736 0,034
<i>Corymbia citriodora</i> *	0,811 0,050	0,826 0,054
<i>Corymbia citriodora</i> **	0,999 0,050	1,009 0,050
<i>Eucalyptus paniculata</i>	1,087 0,024	1,097 0,026

Em que: * madeira de densidade mais baixa e **densidade mais alta. SWT stress wave time, MU máquina universal de ensaio; VL método de vibração longitudinal e VT método de vibração transversal

A tabela 3 apresenta valores referentes à densidade aparente das madeiras nas duas condições de acondicionamento testadas, em ordem crescente de densidade aparente. Foi observado que para todas as madeiras a densidade aparente foi maior na segunda condição de acondicionamento que na primeira.

4.2. Módulos de elasticidade

Na tabela 4 tem-se os valores médios dos módulos de elasticidade de todas as madeiras testadas para cada método de ensaio utilizado e os dois teores de umidade de equilíbrio. Foi adotado o método da máquina universal de ensaio (ME) como o método referência pois é o método mais utilizado para determinação das propriedades de rigidez da madeira.

Tabela 4. Módulo de elasticidade em duas condições de umidade de equilíbrio para as diferentes madeiras e métodos de ensaio.

Madeira	Módulo de Elasticidade - GPa (E)							
	Umidade de 12%				Umidade de 15%			
	ME	SW	VL	VT	ME	SW	VL	VT
<i>Khaya Ivorensis</i> *	9,7	9,5	10,4	10,4	9,8	7,2	10,1	10,2
<i>Pinus caribae</i>	11,3	9,5	12,2	12,1	11,0	9,1	12,0	11,9
<i>Pinus sp</i>	6,6	6,4	7,8	7,4	5,9	5,7	7,2	7,0
<i>Khaya ivorensis</i> **	10,6	8,9	12,0	11,1	10,5	7,8	11,6	10,8
<i>Corymbia citriodora</i>	19,9	16,4	21,8	21,7	20,0	13,7	21,9	21,3
<i>Eucalyptus paniculata</i>	21,7	15,9	23,8	23,1	22,0	14,3	23,3	22,8
Média	13,3	11,1	14,7	14,3	13,2	9,6	14,4	14,0

Em que: * madeira de densidade mais baixa e **densidade mais alta. SWT stress wave time, MU máquina universal de ensaio; VL método de vibração longitudinal e VT método de vibração transversal

Observa-se que o método do stress wave (SW) subestima o valor de módulo de elasticidade (E), por apresentar valor médio abaixo do encontrado ao método ME.

Métodos vibracionais apresentam valores de módulo de elasticidade próximos entre si, se aproximam mais dos valores obtidos em máquina de ensaios (ME) e vê-se que apresentam os maiores valores de (E).

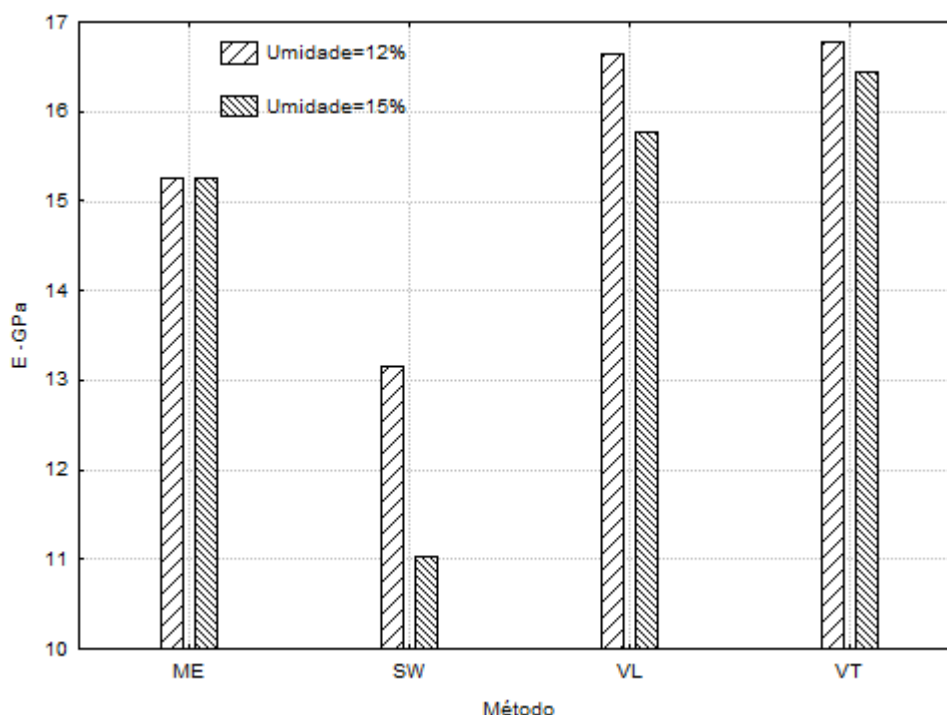


Figura 12. Resultados com os valores médios dos módulos de elasticidade (E), de todas as madeiras ensaiadas, pelos métodos Máquina de ensaios (ME), Stress Wave Timer (SW), Vibracional Longitudinal (VL) e Vibracional Transversal (VT).

Na Figura 12, para o método ME, o módulo de elasticidade médio para todas as espécies foi igual a 14,9 GPa. O efeito dos diferentes teores de umidade de equilíbrio foi mais notável no método de SW e depois nos métodos VL e VT, respectivamente. Esse efeito não foi observado em testes realizados em máquina de ensaios

Tabela 5. Comparação as médias entre diferentes métodos de avaliação para diferentes teores de umidade pelo teste de Kruskal-Wallis e Mann-Witney, ao nível de 5% de probabilidade.

Método	Tu=12%		Tu=15%	
	média	K-W	média	K-W
ME	15,2b	⁶⁵³	15,3a	⁶⁹⁵
SW	13,2c	⁵⁴⁴	11,0c	⁴⁸⁰
VL	16,6a	⁷⁴⁸	15,8a	⁷⁴³
VT	16,8a	⁷³⁶	16,4a	⁷⁶³
Média	15,5A		14,6B	

Letras minúsculas mostram diferenças estatísticas entre as médias dos postos dentro de cada teor de umidade; valores sobre escritos são as médias dos postos obtidos pelo teste de Kruskal-Wallis Letras maiúsculas mostram diferença pelo teste de Mann-Witney.

Conforme observado na tabela 5, pelo teste de Kruskal-Wallis e Mann-Witney, ao nível de 5% de probabilidade, em média, diferentes métodos apresentam valores médios estatisticamente distintos. Em testes realizados à 12% e 15% de umidade, os métodos VL e VT não diferem estatisticamente entre si e apresentam valores superiores aos demais

métodos. Para testes realizados com teor de umidade à 15%, os valores obtidos em máquina de ensaio são equivalentes aos métodos VL e VT.

Ainda na tabela 5, foi observado que o método SW diferenciou-se dos demais métodos testados, tanto à 12% quanto à 15% de umidade. O efeito da umidificação foi distinto em média para o método, no entanto essa diferença não foi estatisticamente significativa.

4.3.Frequência de ressonância

Em relação às frequências de ressonância obtidas, observou-se que as espécies e os métodos obtiveram, em média, resultados distintos, conforme observado na Tabela 6. Valores de frequência foram maiores para madeiras com menores teores de umidade de equilíbrio. Para 12% de teor de umidade, as frequências observadas foram em média 5527 Hz para o método VL e 293 para o método VT, sendo ligeiramente mais altas do que as obtidas à 15%, onde os resultados médios foram 5372 Hz para o método VL e 285 para o método VT, atestando a diferença no efeito da umidade para ambos os métodos testados.

Foi também calculada a variação percentual da frequência de ressonância entre os teores de 12 e 15% de umidade (tabela 6). Madeiras com menores densidades apresentaram maiores variações percentuais de Frequência de ressonância a medida que se altera os teores de umidade de equilíbrio, com destaque para as madeiras de *Pinus sp*, *Pinus caribaea* e *Khaya ivorensis* de baixa densidade. Isso sugere que madeiras de menor densidade são mais afetadas, acusticamente quando é elevada a umidade de equilíbrio.

Tabela 6. Frequências de ressonância e variação (%) nas duas condições de umidade de equilíbrio e para as diferentes madeiras e métodos de ensaio.

Madeira	VL		
	12%	15%	Delta
<i>Khaya Ivorensis</i> *	5.640	5.483	2,9%
<i>Pinus caribaea</i>	5.510	5.322	3,5%
<i>Pinus sp</i>	4.654	4.343	7,1%
<i>Khaya ivorensis</i> **	5.069	4.933	2,8%
<i>Corymbia citriodora</i>	6.453	6.413	0,6%
<i>Eucalyptus paniculata</i>	5.836	5.736	1,7%
Média	5.527	5.372	3,1%
	VT		
<i>Khaya Ivorensis</i> *	303	296	2,4%
<i>Pinus caribaea</i>	296	286	3,4%
<i>Pinus sp</i>	244	232	5,3%
<i>Khaya ivorensis</i> **	257	251	2,3%
<i>Corymbia citriodora</i>	348	340	2,2%
<i>Eucalyptus paniculata</i>	309	305	1,2%
Média	293	285	3%

Em que: * madeira de densidade mais baixa e **densidade mais alta; VL método de vibração longitudinal e VT método de vibração transversal.

O menor valor de frequência de ressonância observado no método de vibração longitudinal foi de 4343Hz e o maior foi 6453Hz, para madeira *Pinus sp.* e *Corymbia citriodora*, respectivamente. Para o método de vibração transversal, os valores máximos e mínimos foram 232 e 348 Hz, relativos também as madeiras de *Pinus sp.* e *Corymbia citriodora*.

A variação média (delta), para todas as madeiras, foi de 3% para os dois métodos vibracionais, indicando uma variação de 1% fr para cada percentual de variação de umidade.

4.4. Atenuação acústica

Observa-se na tabela 7, que as variáveis madeiras, teor de umidade e métodos diferem-se, em média, na propriedade atenuação acústica.

Foi verificado que a atenuação acústica, nas duas condições de umidade de equilíbrio, apresentou um aumento médio de 14% e 17% à medida que se reduz em 3% o teor de umidade das madeiras, respectivamente para VL e VT.

As médias encontradas para o método VT, diferem das médias encontradas no método VL, sendo aquelas obtidas através do método VL inferiores às obtidas através do método VT (Tabela 7). Em média o método VT foi mais sensível às variações de atenuação acústica assim como as diferentes madeiras respondem com diferentes intensidades para a mesma variação de umidade, ou seja, 3%.

Tabela 7. Atenuação acústica e desvios nas duas condições de umidade de equilíbrio e para as diferentes madeiras e métodos de ensaio.

Madeiras	VL			VT		
	12	15	Delta	12	15	Delta
<i>Khaya ivorensis</i> *	25,3	28,1	10%	26,1	27,3	4%
<i>Pinus caribae</i>	29,1	31,1	7%	27,6	33,7	18%
<i>Pinus sp.</i>	27,1	35,1	23%	26,7	40,7	34%
<i>Khaya ivorensis</i> **	21,7	30,1	28%	27,6	31,5	12%
<i>Corymbia citriodora</i>	22,0	23,9	8%	24,7	29,2	15%
<i>Eucalyptus paniculata</i>	24,3	25,8	6%	21,0	24,6	15%
Média	24,9	29,0	14%	25,6	31,2	17%

Em que: * madeira de densidade mais baixa e **densidade mais alta; VL método de vibração longitudinal e VT método de vibração transversal.

Os resultados de variação entre os teores de 12 e 15% de umidade nos ensaios realizados pelos métodos vibracionais longitudinal e vibracional transversal estão apresentados na figura 13. Observou-se que há distinção entre as espécies avaliadas, e entre os métodos.

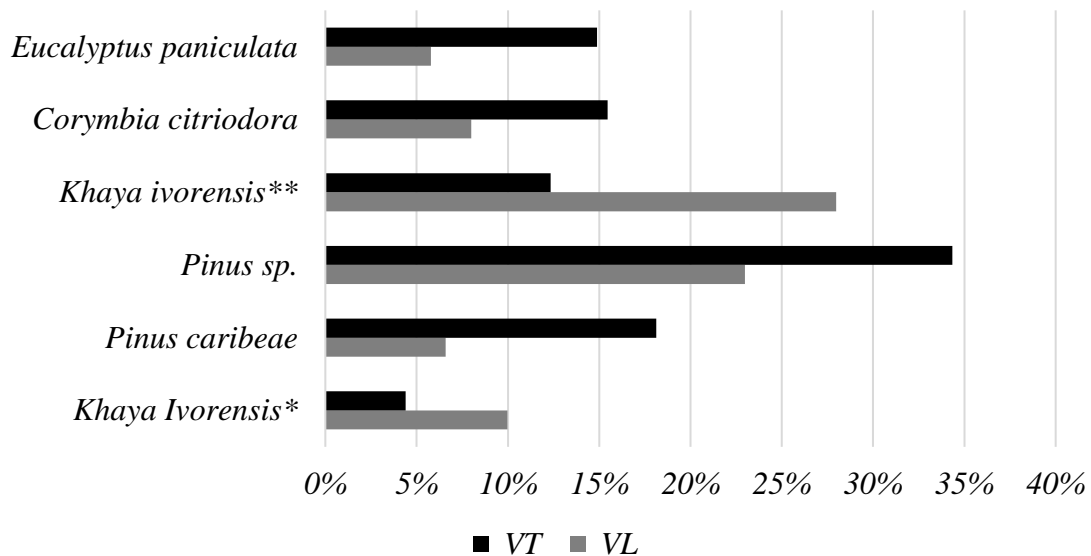


Figura 13. Variação da atenuação acústica entre diferentes madeiras com teores de umidades de 12 e 15%, pelos métodos de determinação por vibração longitudinal (VL) e transversal (VT). Em que: * madeira de densidade mais baixa e **densidade mais alta.

O método vibracional transversal apresenta as maiores variações de atenuação acústica entre as duas condições de umidade com destaque para as madeiras *Eucalyptus paniculata*, *Corymbia citriodora*, *Pinus sp.* e *Pinus caribaea*.

Para as madeiras de *Khaya ivorensis*, de baixa e alta densidade, o método vibracional transversal apresentou as menores diferenças entre as duas condições de umidade

As maiores variações de atenuação acústica em virtude da elevação do teor de umidade foram obtidas para as madeiras de *Pinus sp.* e *Khaya ivorensis* de alta densidade nos ensaios realizados pelo método VT. Para o método VL as maiores variações foram obtidas para as madeiras de *Khaya ivorensis* de alta densidade e *Pinus caribaea*.

Em média, a atenuação acústica nas madeiras testadas foi inferior na condição de 12% (T=25°C e UR=65%) à condição de 15% de umidade (T=25°C e UR=80%).

Mesmo em condições de umidade diferentes, os métodos diferiram-se, como pode ser observado na figura 13. Pôde-se observar que pela distância das médias o efeito do aumento na umidade foi capturado com maior eficiência no método VT, que apresentou maior discrepância nos resultados entre a condição de umidificação de 12 e 15%.

A interação entre madeira, umidade e método ficou evidenciada. Por exemplo, no método VL, madeiras de *C. citriodora* e *E. paniculata*, apresentaram delta de 8% e 6%, enquanto no método VT as variações foram de 15%, respectivamente, enquanto o inverso ocorre para madeira de *Khaya* (Tabela 7)

4.5. Velocidade do som

Na tabela 8 tem-se as velocidades do som referentes à todas as madeiras testadas pelos métodos Vibracional Longitudinal (VL) e Stress Wave Timer (SW).

Tabela 8. Velocidades do som obtidas para as espécies estudadas pelos métodos VL e SW e variações percentuais entre métodos.

Madeiras	Tu=12%			Tu=15%		
	VL	SW	Delta	VL	SW	Delta
<i>Khaya ivorensis</i> *	4.455	3.990	11,7%	4.331	3.408	27,1%
<i>Pinus caribaeae</i>	4.398	3.650	20,5%	4.248	3.457	22,9%
<i>Pinus sp</i>	3.682	3.074	19,8%	3.437	2.798	22,8%
<i>Khaya ivorensis</i> **	4.044	3.231	25,2%	3.936	2.973	32,4%
<i>Corymbia citriodora</i>	5.160	4.168	23,8%	5.127	3.704	38,4%
<i>Eucalyptus paniculata</i>	4.661	3.545	31,5%	4.581	3.300	38,8%
Média	4400	3610	21,9%	4277	3274	30,6%

Em que: * madeira de densidade mais baixa e **densidade mais alta.

Observou-se que o método SW apresentou menores valores de velocidade do som, em todas as madeiras estudadas e que o método VL apresentou em média resultados 21,9 % e 30,6% acima do método SW.

Conforme observado na tabela 8, madeiras testadas com menor teor de umidade apresentaram, em média, os maiores valores de velocidade do som, nos dois métodos (SW e VL).

A madeira que apresentou a maior velocidade de propagação da onda sonora para as duas condições de climatização foi a madeira de *Corymbia citriodora* e o menor valor para madeira de *Pinus sp*. Isto está associado a forte correlação existente entre a rigidez do material e a velocidade do som (tabela 9).

Tabela 9. Coeficientes de correlação entre Modulo de elasticidade (E_{VL}) e velocidade do som

Madeiras	Correlação
<i>Khaya ivorensis</i> *	0,907900
<i>Pinus caribaeae</i>	0,985000
<i>Pinus sp</i>	0,819600
<i>Khaya ivorensis</i> **	0,968492
<i>Corymbia citriodora</i>	0,778500
<i>Eucalyptus paniculata</i>	0,972600

Obtidos pelo método de Pearson, com 5 % de significância

Para *Khaya ivorensis* foi observado que o grupo com menor densidade obteve maior velocidade do som, enquanto os de maior densidade maior velocidade. Esse efeito pode estar relacionado à maior grau de cernificação e inter cruzamento grã na madeira de maior densidade da espécie, associada à maior heterogeneidade do material e da disposição dos elementos anatômicos no sentido longitudinal, percorrido pela onda.

Na tabela 9 estão expressos os coeficientes de correlação entre o módulo de elasticidade obtido pelo método VL e a velocidade do som. Foi observada maior correlação para madeira de *Pinus caribaeae*, 0,985000. O menor coeficiente de correlação foi obtido para a madeira de *Corymbia citriodora*, com 0,778500.

4.6. Índice de eficiência acústica

O índice de eficiência acústica, indica a melhor ou melhores espécie ou tipo de madeira para uso acústico, e que utiliza para o seu cálculo à densidade da madeira, atenuação acústica, a velocidade do som na madeira e sua propriedade elástica (FARVARDIN; ROOHNIA; LASHGAR, 2015). Quanto maior esse índice melhor é a classificação acústica da madeira para seu uso em instrumentos musicais.

Na tabela 10, tem-se os índices de eficiência acústica obtidos nas duas condições de umidade de equilíbrio para as diferentes madeiras e métodos testados. Observou-se que a madeira com maior índice de Eficiência Acústica foi *Khaya ivorensis* de baixa densidade, distinguindo-se, em média, das demais madeiras. Essa diferença foi significativa à 12% de umidade no método VL e à 15% de umidade no método VT.

Os métodos VL não foi eficiente para evidenciar as diferenças de ECA entre 12% e 15% ao testar madeiras *Khaya ivorensis*, *Pinus caribaea* e *Corymbia citriodora*, que foram estatisticamente equivalentes no método. Para a madeira de *E. paniculata*, as diferenças entre os teores de umidade de 12% e 15% foram significativas tanto pelo método VL quanto o método VT. Notou-se pelo método VT que a elevação da condição de umidade teve como efeito a redução do índice de eficiência acústica, de forma significativa. Madeiras com elevado grau de cernificação, *Khaya ivorensis* de alta densidade e *Eucalyptus paniculata*, que apresentam maior densidade e atenuação acústica. A exceção foi *Corymbia citriodora*, que alcançou alto índice de eficiência acústica em virtude de seu elevado módulo de elasticidade, como pressupõe os dados da tabela 4 e da equação 13.

Tabela 10. Índices de Eficiência Acústica e desvios nas duas condições de umidade de equilíbrio e para as diferentes madeiras e métodos de ensaio.

Madeiras	VL		VT	
	12%	15%	12%	15%
<i>Khaya Ivorensis</i> *	342,9 ^{216,7a.A}	325,5 ^{214,0a.A}	333,7 ^{219,8a.A}	295,1 ^{244,6a.B}
<i>Pinus caribaea</i>	268,2 ^{149,2bc.A}	265,1 ^{173,4a.A}	285,1 ^{172,7a.A}	215,7 ^{160,7b.B}
<i>Pinus sp</i>	250,5 ^{107,2c.A}	174,1 ^{74,9b.B}	235,2 ^{119,9bc.A}	132,9 ^{45,2d.C}
<i>Khaya ivorensis</i> **	263,1 ^{135,9bc.A}	200,4 ^{105,4b.B}	200,2 ^{84,1c.B}	167,2 ^{102,9c.C}
<i>Corymbia citriodora</i>	287,7 ^{168,3b.A}	279,8 ^{192,6a.A}	261,6 ^{158,9ab.B}	207,2 ^{162,5b.C}
<i>E. paniculata</i>	177,1 ^{40,3d.B}	168,3 ^{63,6b.C}	199,5 ^{77,4c.A}	167,6 ^{100,2c.C}
média	264,9 ^{136,3}	235,5 ^{137,3}	252,6 ^{138,8}	197,6 ^{136,0}

Em que: * madeira de densidade mais baixa e **densidade mais alta. Letras minúscula distintas, na mesma coluna, mostram diferença estatística entre as médias dos postos pela análise de Kruskal-Wallis. Valores sobre escritos são as médias dos postos. Teste de média aplicado foi o teste de Dunn, ao nível de 5% de significância. Letras maiúsculas distintas mostram diferença estatísticas entre as médias em cada linha.

As diferenças mais significativas foram evidenciadas através do método VT, pelo qual foi observada diferença estatística em entre as duas condições de climatização para todas as madeiras testadas.

Tabela 11. Variação percentual dos Índices de Eficiência Acústica (ECA) entre os teores de umidade para os métodos de vibração Longitudinal e Transversal e variação (%) dos índices de eficiência acústica entre os métodos de vibração longitudinal e transversal para os teores de umidade de 12 e 15%.

Madeiras	Variação entre Tu de 12 e 15%		Variação entre VL e VT	
	VL	VT	12%	15%
<i>Khaya Ivorensis</i> *	-5,1	-11,6	-2,7	-9,3
<i>Pinus caribaeae</i>	-1,2	-24,3	6,3	-18,6
<i>Pinus sp</i>	-30,5	-43,5	-6,1	-23,7
<i>Khaya ivorensis</i> **	-23,8	-16,5	-23,9	-16,6
<i>Corymbia citriodora</i>	-2,7	-20,8	-9,1	-25,9
<i>Eucalyptus paniculata</i>	-5,0	-16,0	12,6	-0,4
Média	-11,1	-21,8	-4,6	-16,1

Em que: * madeira de densidade mais baixa e **densidade mais alta. VL é método de vibração longitudinal e VT é método de vibração transversal.

As variações percentuais no ECA entre os métodos os métodos de vibracionais Longitudinal e Transversal e entre as condições de umidade estão descritas na tabela 11. Para todas as madeiras, com exceção de *Eucalyptus paniculata*, foram obtidos maiores índices para o método vibracional Longitudinal.

As variações no índice de eficiência acústica decorrentes do incremento no teor de umidade foram captadas em sua totalidade pelo método VT e pelo método VL. As maiores variações foram percebidas para as madeiras de *Pinus sp.* e *Khaya ivorensis* de alta densidade, pelo método VL, e *Pinus caribaeae* e *Pinus sp.* pelo método VT.

Com exceção de *Khaya ivorensis* de alta densidade as variações no ECA foram percebidas com maior eficiência pelo método VT.

Entre métodos, foi observada diferença, em que foi obtida média superior para o método Vibracional Longitudinal em detrimento do método Vibracional Transversal, com exceção para as madeiras de *Pinus caribaeae* e *Eucalyptus paniculata* à 12%, que apresentaram maiores resultados pelo método VL.

A diferença entre as madeiras testadas também foi observada, com destaque à madeira de *Khaya ivorensis* de baixa densidade, que obteve o mais elevado ECA entre as madeiras testadas.

Quanto à interação entre métodos, madeiras e condições de umidificação, pôde-se observar um padrão na obtenção do ECA para os diferentes métodos e Teores de umidade testados, com exceção de das madeiras com maior grau de entrecruzamento de grã (*Khaya ivorensis de alta densidade* e *Corymbia citriodora*), que divergiram para no método vibracional Longitudinal. A interferência da grã foi evidente na determinação por métodos não destrutivos, como observaram Mantilla e Azevedo (2003).

O efeito da elevação do teor de umidade é prejudicial tanto às propriedades acústicas quanto à rigidez da madeira, afetando fisicamente e mecanicamente a madeira (LOGSDON, 1998). Em ambos os métodos testados a variação de as variações no ECA após a umidificação dos corpos de prova foi negativa. Como consequência disso tem-se a dúvida sobre a validade do uso de espécies que tem alto teor de absorção de umidade

ou que não sejam tratadas, visto que o produto sofrerá consequências diretas da qualidade do material utilizado.

5. CONCLUSÕES

A definição das dimensões das amostras e suas proporções apresentaram resultados confiáveis.

Maiores teores de umidade atuam como reduzem as propriedades acústicas nas madeiras estudadas, diminuindo seu potencial de uso em instrumentos musicais.

Métodos distintos de medição de rigidez apresentam valores com distinção, que também dependem do teor de umidade de equilíbrio da madeira.

Quanto ao método, a maior eficiência foi verificada no método vibracional transversal, pois apresentou valores mais próximos para módulo de elasticidade obtido pela máquina de ensaios universal, e teve menor interferência do efeito da grã para determinação das propriedades acústicas.

O método Stress Wave Timer foi o mais afetado pelo teor de umidade.

A grã da madeira afeta sensivelmente as propriedades de rigidez e acústicas, obtendo resultados com maior variabilidade quando utilizado os métodos vibracionais. Tal efeito pôde ser observado em *Khaya ivorensis* de alta densidade e em *Corymbia citriodora* na determinação da atenuação acústica pelo método vibracional longitudinal.

6. REFÊRENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C - 215**: standard test method for fundamental transverse, longitudinal and torsional frequencies of concrete specimens. Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, 2008. 7 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E - 1876**: standard test method for dynamic young's modulus, shear modulus and Poisson's ratio by impulse excitation of vibration. Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, 2007. 6 p.

BEALL, F. C. Overview of the use of ultrasonic technologies in research on wood properties. **Wood Science and Technology**, v. 36, n. 3, p. 197-212, 2002.

BUCUR, Voichita. **Acoustics of wood**. CRC press, 2017.

CARREIRA, Marcelo Rodrigo; SEGUNDINHO, Pedro Gutemberg Alcantara; DIAS, Antônio Alves. Determination of the e/g ratio of wood logs using transverse vibration. **Wood Research**, v. 57, p. 207-220, 2012.

CARREIRA, Marcelo Rodrigo; SEGUNDINHO, Pedro Gutemberg de Alcantara; LAHR, Francisco Antônio Rocco; DIAS, Antônio Alves; CALIL JÚNIOR, Carlito. Bending stiffness evaluation of Teca and Guajará lumber through tests of transverse and longitudinal vibration. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 34, n. 1, p. 27-32, 2012.

CARREIRA, Marcelo Rodrigo; DIAS, Antonio Alves; DE ALCÂNTARA SEGUNDINHO, Pedro Gutemberg. Nondestructive evaluation of *Corymbia citriodora* logs by means of the free transverse vibration test. **Journal of Nondestructive Evaluation**, v. 36, n. 2, p. 26, 2017.

COELHO, José Clailson Franco; VIDAURRE, Graziela Baptista; DA SILVA, João Gabriel Missia; ALMEIDA, Maria Naruna Felix; OLIVEIRA, Ramon Ferreira; SEGUNDINHO, Pedro Gutemberg de Alcântara; ALVES, Rejane Costa; HEIN, Paulo Ricardo Gherardi. Wood grain angles variations in Eucalyptus and their relationships to physical-mechanical properties. **Holzforschung**, v. 74, n. 12, p. 1089-1097, 2020.

COSTA, Beatriz Cordeiro; SUZUKI, Patrícia Mie; BARROS, Welton dos Santos; FRÓES JÚNIOR, Paulo Silvano Magno; RABELLO, Fabrício Khoury; SANTOS, Mario Lima. Análise da conjuntura do mercado de madeira de reflorestamento no Estado do Pará. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 11, p. e80491110578-e80491110578, 2020.

DE OLIVEIRA, Fabiana Goia Rosa; SALES, Almir. Efeito da densidade e do teor de umidade na velocidade ultra-sônica da madeira. **Minerva**, v. 2, n. 1, p. 25-31, 2005.

DER SLOOTEN, H. J. **Avaliação das espécies madeireiras da Amazônia selecionadas para a manufatura de instrumentos musicais**. INPA, 1993.

DE ARAUJO, Henrique José Borges. Caracterização do material madeira. **Embrapa Acre-Capítulo em livro científico (ALICE)**, 2020.

FARVARDIN, Farzin; ROOHNIA, Mehran; LASHGARI, Amir. The effect of extractives on acoustical properties of persian silk wood (*Albizia julibrissin*). *Maderas. Ciencia y tecnología*, v. 17, n. 4, p. 749-758, 2015.

- FLORES, André Luis Lima. **Análise de diferentes madeiras brasileiras em substituição às espécies tradicionais no violão clássico**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.
- GUILHON, David; GUIMARAES, Karoline de Lourdes Monteiro; LOURENÇO, Anna Karen Lima. Avaliação das propriedades tecnológicas das madeiras maranhenses voltadas para a fabricação de violões. **Estudos em Design**, v. 29, n. 2, 2021.
- HAINES, Daniel W.; LEBAN, Jean-Michel; HERBÉ, Christian. Determination of Young's modulus for spruce, fir and isotropic materials by the resonance flexure method with comparisons to static flexure and other dynamic methods. *Wood science and technology*, v. 30, n. 4, p. 253-263, 1996.
- HALACHAN, Pavol; BABIAK, Marian; SPIŠIAK, Dominik et al. Physico-acoustic characteristics of spruce and larch wood. **Wood Res**, v. 62, n. 2, p. 235-242, 2017.
- 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 (Bacharel em Engenharia Florestal). Universidade Federal de Brasília, Brasília. 2014.
- LATORRACA, João Vicente de F.; ALBUQUERQUE, Carlos Eduardo C. de. Efeito do rápido crescimento sobre as propriedades da madeira. **Floresta e Ambiente**, v. 7, n. único, p. 279-291, 2012.
- LOGSDON, Norman Barros. **Influência da umidade nas propriedades de resistência e rigidez da madeira**. 1998. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas). Universidade de São Paulo. São Carlos, 1998.
- MANTILLA, Edgar Vladimiro Carrasco; AZEVEDO, Antonio Pires Júnior. 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.
- MUSOLINO, Bruno de Castro. **Algoritmo de determinação do coeficiente de amortecimento em materiais refratários de alta alumina**. 2011. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, São Paulo. 2011.
- NCUBE, Elisha; MASILINGA, Paul. Prospective Zambian tonewoods for dreadnought acoustic guitar. **International Wood Products Journal**, v. 8, n. 4, p. 216-226, 2017.
- OBATAYA, E.; ONO, T.; NORIMOTO, M. Vibrational properties of wood along the grain. **Journal of Materials Science**, v. 35, n. 12, p. 2993-3001, 2000.
- OTANI, Lucas Barcelos; SEGUNDINHO, Pedro Gutemberg de Alcântara; MORALES, Elen Aparecida Martines; PEREIRA, Antônio Henrique Alves. Caracterização dos módulos elásticos de madeiras e derivados utilizando a Técnica de Excitação por Impulso. **Informativo técnico-científico ITC-05/ATCP, São Paulo**, 2014.
- ROOHNIA, Mehran. Wood: Acoustic Properties. **Reference module in materials science and materials engineering**. Elsevier, Oxford, p. 1-13, 2019.
- ROSA, Rafael Amorim; FRANÇA, Lélío Caiado Abreu; SEGUNDINHO, Pedro Gutemberg de Alcântara; LUBE, Vinicius Munaldi; PAES, Juarez Benigno. Caracterização da madeira de maçaranduba (*Manilkara* sp.) por métodos destrutivos e não destrutivos. **Revista Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)**, v. 5, n. 1, p. 10-12953/2177-6830. v05n01a07, 2014.

ROSS, Robert J. (Ed.). **Nondestructive evaluation of wood**. Government Printing Office, 2015.

SEGUNDINHO, Pedro Gutemberg de Alcântara; COSSOLINO, Leiliane Cristina; PEREIRA, Antônio Henrique Alves; CALIL JÚNIOR, Carlito. Aplicação do método de ensaio das frequências naturais de vibração para obtenção do módulo de elasticidade de peças estruturais de madeira. **Revista Árvore**, v. 36, p. 1155-1162, 2012.

SEGUNDINHO, Pedro Gutemberg de Alcântara; CARREIRA, Marcelo Rodrigo; REGAZZI, Adair José; DIAS, Antônio Alves. Influência do teor de umidade na determinação do módulo de elasticidade de vigas de *Pinus* sp. **Ambiente Construído**, v. 17, p. 319-329, 2017.

SEGUNDINHO, Pedro Gutemberg de Alcântara; REGAZZI, Adair José; POLETTI, Franco Simões; DE PAULA, Marcos Oliveira; MENDONÇA, Adriano Ribeiro; GONÇALVES, Fabricio Gomes. Variação dos módulos de elasticidade e ruptura em madeira de Cedro-Australiano por meio de ensaios não destrutivo e destrutivo. **Ciência florestal**, v. 28, p. 1163-1178, 2018.

SOUZA, Mário Rabello de. Classificação de madeiras para instrumentos musicais. **Brasília: IBDF**, 1983.

SPROßMANN, Robert; ZAUER, Mario; WAGENFÜHR, André. Characterization of acoustic and mechanical properties of common tropical woods used in classical guitars. **Results in physics**, v. 7, p. 1737-1742, 2017.