



**CARACTERIZAÇÃO ACÚSTICA DE DOZE ESPÉCIES COMERCIAIS
BRASILEIRAS PARA CONFECCÃO DE INSTRUMENTOS MUSICAIS**

Roberta Batista Viana

Brasília-DF

2019



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL

**CARACTERIZAÇÃO ACÚSTICA DE DOZE ESPÉCIES COMERCIAIS
BRASILEIRAS PARA CONFEÇÃO DE INSTRUMENTOS MUSICAIS**

Roberta Batista Viana

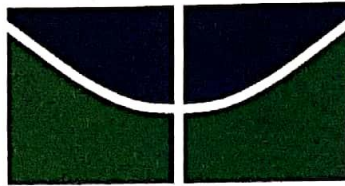
Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Departamento de Engenharia
Florestal da Universidade de Brasília como
requisito parcial para obtenção de grau de
Engenheira Florestal.

Orientador (a): Ricardo Faustino Teles (Dr., IFB)
Coorientador: Alexandre Florian da Costa (Dr., EFL/UnB)

Brasília-DF

2019

ii



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL

**CARACTERIZAÇÃO ACÚSTICA DE DOZE ESPÉCIES COMERCIAIS
BRASILEIRAS PARA CONFEÇÃO DE INSTRUMENTOS MÚSICAIS**

Estudante: Roberta Batista Viana

Matrícula: 12/0134608

Menção: SS

Banca examinadora:

Prof. PhD Ricardo Faustino Teles
Orientador
Instituto Federal de Brasília (IFB)

Prof. Dr. Alexandre Florian da Costa
Coorientador

EFL/FT – Universidade de Brasília

Prof. PhD Tatiana Olivieri Catanzaro
Membro da Banca
MUS – Universidade de Brasília

Dedico este trabalho aos meus pais, Roberto Viana de Castro e Nadja Batista Viana, e a minha irmã, Marina Batista Viana, que me ensinaram o valor da educação e sempre se mantiveram presentes me orientando e acreditando nos meus sonhos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais e minha irmã pelo tempo e esforço dedicados a garantir uma educação de qualidade e multidisciplinar, pela constante presença da arte em nossas vidas em suas diversas formas - especialmente a música - pelas longas viagens de carro em que a natureza se tornava uma das melhores formas de entretenimento e pelas diversas conversas ou experiências únicas que sempre instigaram minha curiosidade pela vida, o universo e tudo mais.

A minha avó Maria por despertar meu interesse por plantas desde a minha primeira lembrança da sua casa.

A minha companheira Kelly pela disponibilidade e ajuda em todos os momentos do projeto, por toda a paciência para me ouvir e por me tranquilizar nos momentos de insegurança.

Às professoras Regina Célia de Oliveira e Micheline Carvalho Silva por me apresentarem a fascinante área da botânica no princípio da minha vida acadêmica. À professora Júlia Sonsin Oliveira por compartilhar seus conhecimentos e pela paciência para identificar as espécies utilizadas no estudo.

Aos professores do departamento de Engenharia Florestal pela dedicação para lecionar.

Ao meu orientador Ricardo Faustino Teles agradeço por aceitar o convite para me orientar, pelos conselhos, paciência e acreditar no potencial do projeto. Ao meu coorientador Alexandre Florian da Costa pela disponibilidade de tempo, tranquilidade passada durante a orientação e pelo incentivo para seguir a carreira acadêmica. À professora Tatiana Olivieri Catanzaro por aceitar o convite em participar da avaliação e pela introdução ao ramo de acústica musical.

Aos funcionários do Serviço Florestal Brasileiro (SFB) pelo carinho e por me apresentarem o sistema de exploração sustentável durante minha primeira experiência profissional no setor florestal.

À equipe da marcenaria do Laboratório de Produtos Florestais pela rapidez e prontidão na confecção das amostras. Ao Luciano Roitman e Peter Wimmer por todas as contribuições e apoio na realização dos experimentos.

A Fundação de Apoio à Pesquisa do Distrito Federal (FAPDF) por financiar o presente projeto.

Agradeço a todas as pessoas que contribuíram direta ou indiretamente com o estudo.

Muito obrigada!

SUMÁRIO

| | |
|---|------|
| LISTA DE FIGURAS | vii |
| LISTA DE TABELAS | vii |
| RESUMO | viii |
| ABSTRACT | ix |
| 1. INTRODUÇÃO..... | 10 |
| 2. MATERIAIS E MÉTODOS | 12 |
| 2.1 Corpos de prova..... | 14 |
| 2.2 Climatização | 14 |
| 2.3 Propriedades físicas e mecânicas..... | 15 |
| 2.4 Propriedades acústicas | 16 |
| 2. Análise dos dados | 19 |
| 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO | 19 |
| 4. CONCLUSÃO | 26 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 27 |
| ANEXOS | 29 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Amostras das espécies estudadas..... | 13 |
| Figura 2. Aparelho <i>stress wave timer</i> com corpo de prova acoplado nos grampos. | 15 |
| Figura 3. Equipamento utilizado para emitir o sinal e captar a frequência de ressonância da madeira..... | 17 |
| Figura 4. Interface do programa Cool Edit Pro 2.1 onde: (a) espectro instantâneo da faixa de onda selecionada com o valor da frequência de ressonância da madeira no canto inferior direito (em vermelho); (b) representação de onda de uma amostra de Ipê..... | 17 |
| Figura 5. Representação da orientação tangencial (a) e radial (b) de uma amostra de madeira em um corte transversal de uma árvore..... | 23 |
| Figura 6. Gráfico da análise dos principais componentes (PCA) para as espécies estudadas.. | 23 |
| Figura 7. Peso das variáveis para o componente 1 (a) e componente 2 (b)..... | 24 |
| Figura 8. Agrupamento hierárquico das espécies estudadas..... | 25 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1. Nome comum e científico e origem das espécies estudadas..... | 13 |
| Tabela 2. Densidade e módulo de elasticidade dinâmico das espécies..... | 20 |
| Tabela 3. Propriedades acústicas das espécies estudadas..... | 20 |
| Tabela 4. Coeficientes de determinação (R^2) de correlação linear entre as propriedades avaliadas. Os coeficientes Tabelados são significativos a um nível de 0,01..... | 21 |

RESUMO

A maioria dos instrumentos musicais, ou seus componentes, são fabricados em madeira devido as suas propriedades físicas, mecânicas e acústicas excepcionais, excelente trabalhabilidade e estética agradável. Em alguns casos, certas espécies madeireiras são consideradas insubstituíveis, pois apresentam uma combinação única de características acusticamente relevantes. Logo, há uma grande demanda por um número restrito de espécies, o que torna sua utilização insustentável do ponto de vista econômico e ambiental. Porém, é possível que outras espécies com propriedades acústicas semelhantes existam em outras regiões, mas que ainda não foram suficientemente estudadas. O presente trabalho visa caracterizar espécies madeireiras comercializadas no Distrito Federal e avaliar o seu potencial acústico comparado àquelas empregadas tradicionalmente em instrumentos musicais. As propriedades físicas, mecânicas e acústicas foram quantificadas através do método não destrutivo de *stress wave* e método de vibração forçada com base na norma ASTM E1875 para obtenção do módulo de elasticidade dinâmico (MOEd), frequência de ressonância (f_r), velocidade do som (c), decaimento logarítmico (λ), coeficiente de radiação (R), coeficiente de perda (η), impedância (z) e coeficiente de conversão acústica (ACE). A partir desses resultados foi realizada uma comparação entre as madeiras estudadas e o Spruce (*Picea abies*) e Maple (*Acer sp.*) através do teste estatístico multivariado de análise de agrupamentos (cluster) onde o Freijó e o Jequitibá apresentaram um potencial acústico para substituição dessas espécies.

Palavras-chave: propriedades acústicas; instrumentos musicais; madeira; seleção de materiais.

ABSTRACT

Most musical instruments, or their components, are made of wood as this material presents unique physical, mechanical e acoustical properties, besides having a good workability and pleasing aesthetics. In some cases, certain wood species are considered irreplaceable because they comprise a rare combination of acoustically relevant characteristics. Therefore, this factor places an enormous pressure on a restricted supply of timber, and, in turn, their use becomes economically and environmentally unsustainable. However, it is possible that there are other species with similar acoustical properties which have not been fully explored yet. This study aims to characterize commercial species from Distrito Federal wood sellers and evaluate their acoustical potential compared to those traditionally used for musical instruments. The physical, mechanical and acoustical properties were quantified through non-destructive methods of stress wave and forced vibration based on the ASTM E1875 standard to obtain the dynamic elastic modulus (MOEd), resonant frequency (f_r), sound speed (c), logarithmic decrement (λ), sound radiation coefficient (R), loss coefficient (η), impedance (z) and acoustical conversion efficiency (ACE). Based on the data obtained the species were compared to the Spruce (*Picea abies*) and Maple (*Acer sp.*) through a grouped multivariate analysis (cluster) where Freijó and Jequitibá were appointed as potential substitutes for these species.

Key words: acoustical properties; musical instruments; wood; materials selection.

INTRODUÇÃO

O som pode ser definido como uma energia que se propaga por meio de ondas mecânicas longitudinais de maneira elástica. Esse fenômeno físico é composto pela fonte de vibração, meio de transmissão e recepção do ouvinte (ROEDERER, 1998; WOOD, 2013).

A fonte do som é composta por um mecanismo de excitação primária que provê a energia inicial para o sistema e pelo elemento vibrante fundamental que determina a frequência de vibração da nota e fornece os harmônicos superiores necessários. Além desses componentes, alguns instrumentos musicais possuem um ressonador adicional que auxilia o elemento vibrante primário na conversão de energia e confere o timbre final ao som (ROEDERER, 1998).

O meio de propagação é um dos aspectos mais importantes do som, visto que tal energia só pode ser transmitida em um meio físico, seja este sólido, líquido ou gasoso. Tal componente pode ser subdividido entre o que transmite o som e o que interfere em sua propagação (fronteiras). As fronteiras são fundamentais para a qualidade do som porque definem o padrão de reflexão e absorção das ondas sonoras e, conseqüentemente, a qualidade acústica de um ambiente ou instrumento (ROEDERER, 1998).

A maioria dos instrumentos musicais possui dois sistemas vibracionais interdependentes, sendo um deles apenas um meio de radiação do som emitido pelo outro. Por exemplo, em um violino, o som emitido se deve majoritariamente à vibração do corpo do instrumento. O corpo e o ar dentro dele possuem uma frequência própria (natural), mas que não vibram livremente porque dependem da vibração da corda como mecanismo de excitação primária. Este fenômeno é conhecido como vibração forçada. É importante salientar que a vibração resultante dos dois sistemas é diferente da soma das frequências próprias de cada componente tocadas isoladamente. Dessa forma, o meio de radiação do som se torna de fundamental importância para a intensidade do som e para sua qualidade e timbre (WOOD, 2013).

O aspecto de recepção do som geralmente é atribuído a um ouvinte humano, o que torna necessária a compreensão do órgão responsável pela audição e como tal informação é processada no cérebro. As oscilações são captadas pelo tímpano e transmitidas para os ossículos presentes no ouvido médio. A seguir, essas vibrações são transduzidas ao ouvido interno (cóclea), onde células ciliadas classificam as frequências captadas e produzem impulsos nervosos elétricos. Tais sinais são conduzidos ao sistema nervoso auditivo o qual é responsável pelo registro dos sons na memória do indivíduo e por respostas psicoacústicas (ROEDERER, 1998).

Como mencionado, existem diferentes tipos de mecanismos de produção de vibração e maneiras com que essa será transmitida. O sistema proposto por von Hornbostel e Sachs (1914) distribui os instrumentos musicais em cinco classes sendo: a dos idiofones, composta por

instrumentos que tem o próprio corpo como mecanismo de excitação primária (ex.: marimbas e xilofones); os membranofones, que utilizam uma espécie de membrana para produzir o som (ex.: bombo, darbouka, tímpanos); os cordofones, que têm cordas para a produção do som (ex.: violino, violão); os aerofones, que produzem o som a partir da vibração de uma coluna de ar (ex.: flautas, clarinetas e saxofones); e, inclusive mais recentemente, a dos eletrofones, que se valem de meios eletrônicos para a emissão do som (ex.: sintetizadores, teremin) (WEGST, 2006).

O instrumento musical mais antigo que se tem registro são as flautas feitas de ossos e marfim encontradas na caverna Geissenklösterle no sul da Alemanha. Porém, é possível que instrumentos mais antigos que esses fossem confeccionados com materiais mais perecíveis como folhas, frutos e madeira, uma vez que podem ser facilmente trabalhados com ferramentas simples. Ainda hoje, a maioria dos instrumentos musicais, ou seus componentes, são fabricados em madeira. Isso se deve ao fato de que esse material possui uma estrutura única, assim como propriedades físicas, mecânicas e acústicas excepcionais (BUCUR, 2006; WEGST, 2006; BRÉMAUD, 2012), excelente trabalhabilidade e estética agradável (FLETCHER, 1999; WEGST, 2006; BRÉMAUD, 2012). Além disso outras características da madeira como a suavidade, porosidade e baixa condutividade térmica são ideais para certos tipos de aerofones como as flautas de pã (FLETCHER, 1999).

Dentre as propriedades físicas e mecânicas da madeira destacam-se sua baixa densidade específica e seu alto módulo de elasticidade e de ruptura, as quais permitem confeccionar um instrumento musical resistente, porém de fácil manuseio pelo músico (WEGST, 2006). A madeira distingue-se de outros materiais também nas propriedades acústicas, porque possui uma alta velocidade de propagação de ondas longitudinais (próxima a dos metais) e uma impedância acústica baixa (como a do acrílico), porém uma eficiência de conversão acústica equiparável a do alumínio o que resulta em uma transmissão do som intermediária. Em outras palavras, um mesmo instrumento fabricado em madeira não terá um som abafado como aquele de acrílico e nem tão brilhoso como o de materiais metálicos (YOSHIKAWA e WALTHAM, 2014).

Por ser um material orgânico, a madeira apresenta uma grande variedade de combinações de propriedades acusticamente relevantes entre as espécies, entre diferentes indivíduos e até mesmo em uma única árvore, o que torna cada peça única. Por essa razão, certas espécies são tradicionalmente usadas na fabricação de instrumentos musicais como o Spruce (*Picea abies*) e Sitka Spruce (*Picea sitchensis*) para o tampo harmônico e o Maple (*Acer sp.*) para o fundo do violino (TELES, 2005). Para alguns casos, certas espécies madeireiras são consideradas insubstituíveis, pois apresentam uma combinação de propriedades físicas, mecânicas e acústicas singular, distinta de todos os materiais naturais e sintéticos disponíveis, como os arcos de violino confeccionados em Pau-Brasil (*Caesalpinia echinata*) (FLETCHER, 1999; BRÉMAUD, *et al.*, 2008).

De acordo com FLETCHER (1999), é possível que essa ausência de substitutos para algumas espécies madeireiras se deva a critérios além dos parâmetros comumente analisados em estudos acústicos. Um fator importante para a escolha do material são os fenômenos psicoacústicos, uma vez que o receptor é um dos aspectos principais do som (ROEDERER, 1998; WOOD, 2013). Por exemplo, a impressão de um som mais claro e polido das flautas confeccionadas em ouro não está relacionada a superioridade acústica desse metal em relação à prata, mas sim à menor escala de fabricação e processo produtivo mais minucioso (FLETCHER, 1999). Além disso, outro elemento que influencia a seleção de um material é a distribuição geográfica da flora e, conseqüentemente, a disponibilidade da madeira na região, que são fatores limitantes na produção de instrumentos musicais com diferentes materiais (FLETCHER, 1999; BRÉMAUD, *et al.*, 2008). Assim, é possível que outras espécies com propriedades semelhantes às do Spruce existam em outras regiões, mas que ainda não foram suficientemente estudadas.

FLETCHER (1999) também propõe que a substituição por materiais sintéticos seja uma possibilidade em alguns casos. No entanto, mesmo com a diversidade de materiais sintéticos e naturais, a gama de materiais utilizados na fabricação de instrumentos musicais pouco mudou (WEGST, 2006). Logo, essa grande demanda por um número restrito de espécies torna insustentável sua utilização do ponto de vista econômico e ambiental (TELES, 2005). Dessa forma, existe uma procura por espécies alternativas para confecção de instrumentos musicais as quais possibilitam a redução da demanda pelas madeiras comumente utilizadas para esse fim e incentivam a exploração sustentável desses materiais.

De acordo com OLIVEIRA *et al.* (2018) a maioria dos produtos madeireiros comercializados no Distrito Federal provém de fornecedores da região Norte do país e de madeiras oriundas de reflorestamento, como pinus e eucalipto, das regiões Sul e Sudeste.

A partir do exposto, o presente trabalho avaliou as propriedades acústicas de madeiras comercializadas no Distrito Federal bem como seu potencial acústico em comparação com madeiras empregadas tradicionalmente em instrumentos musicais.

MATERIAIS E MÉTODOS

Inicialmente foi realizado um levantamento e uma coleta de amostras de espécies madeireiras comumente comercializadas no Distrito Federal. A Figura 1 ilustra as madeiras que foram adquiridas e a Tabela 1 apresenta os nomes populares e científicos das respectivas amostras.



Figura 1 – Amostras das espécies estudadas. Onde A: Fava (*Vataireopsis sp.*); B: Cumaru (*Dipteryx sp.*); C: Sumaúma (*Ceiba petandra*); D: Marupá (*Simarouba amara*); E: Jequitibá (*Cariniana sp.*); F: Freijó (*Cordia goeldiana*); G: Pinus (*Pinus sp.*); H: Currupixá (*Micropholis sp.*); I: Timborana (*Enterolobium schomburgkii*); J: Cedro (*Cedrela odorata*); K: Ipê (*Handroathus sp.*); L: Roxinho (*Peltogyne sp.*).

Tabela 1 - Nome comum, científico e origem das madeiras estudadas.

| Nome Comum | Nome Científico | Origem botânica |
|---------------------------|----------------------------------|-----------------|
| Jequitibá | <i>Cariniana sp.</i> | Amazônica |
| Cedro | <i>Cedrela odorata</i> | Amazônica |
| Sumaúma | <i>Ceiba petandra</i> | Amazônica |
| Freijó | <i>Cordia goeldiana</i> | Amazônica |
| Cumaru | <i>Dipteryx sp.</i> | Amazônica |
| Timborana | <i>Enterolobium schomburgkii</i> | Amazônica |
| Ipê | <i>Handroathus sp.</i> | Amazônica |
| Currupixá | <i>Micropholis sp.</i> | Amazônica |
| Roxinho | <i>Peltogyne sp.</i> | Amazônica |
| Pinus | <i>Pinus sp.</i> | Reflorestamento |
| Marupá | <i>Simarouba amara</i> | Amazônica |
| Fava | <i>Vataireopsis sp.</i> | Amazônica |
| Spruce^a | <i>Picea sp.</i> | Alemanha |
| Maple^a | <i>Acer sp.</i> | Canadá |

^aFonte: TELES et al., 2018.

As amostras foram identificadas utilizando-se uma lupa de 10x de aumento para a descrição macroscópica. As características anatômicas observadas foram comparadas às da chave de identificação de madeiras comerciais do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) e à chave eletrônica desenvolvida pelo Laboratório de Produtos Florestais (LPF) do Serviço Florestal Brasileiro (SFB) (FOELKEL, 2007; SFB, 2016).

As propriedades anatômicas observadas foram a visibilidade e o tipo de parênquima axial, visibilidade, arranjo e agrupamento dos vasos, possíveis conteúdos presentes nesses, porosidade da madeira, visibilidade (transversal e tangencial) e estratificação dos raios, distinção entre as camadas de crescimento, presença de canais secretores, cor da madeira, odor e textura.

Corpos de prova

Os corpos de prova foram confeccionados na marcenaria do LPF/SFB com o auxílio de uma plaina elétrica estacionária para remover imperfeições na superfície da madeira, uma serra circular de mesa para obter o comprimento e largura desejados - 300 e 20 mm, respectivamente - e a tupa para a espessura final da peça de 3 mm.

A seleção das 15 amostras por espécie foi feita excluindo as peças que apresentaram defeitos naturais ou derivados do processo de secagem. Não foi possível selecionar uma proporção similar de amostras com orientação radial e tangencial devido à baixa disponibilidade de peças nos locais de aquisição.

A mensuração da largura, espessura e comprimento das peças foi realizada com o auxílio de um paquímetro digital *Mitutoyo digital absolute AOS 500-173* com saída USB para aquisição dos dados em planilha eletrônica e precisão de $\pm 0,03\text{mm}$. As medidas de largura e espessura foram adquiridas em três pontos ao longo da amostra, sendo um no centro da peça e os outros dois a 672mm de cada extremidade. Essa distância corresponde aos pontos nodais obtidos pela multiplicação do comprimento da peça (L) pela constante 0,224 (HEARMON, 1965).

Climatização

As amostras foram acondicionadas na câmara de climatização com temperatura de 23°C e 65% de umidade, distantes 5 mm entre si e empilhadas sobre peças sobressalentes de madeira de 10 a 20 mm de espessura e comprimento variado entre as camadas para permitir o fluxo de ar entre as amostras.

A massa dos corpos de prova foi monitorada por meio de uma amostra para cada uma das espécies em questão, utilizando-se uma balança digital com 0,01g de exatidão. As amostras

permaneceram por vinte e cinco dias até entrarem em equilíbrio com umidade de 12%. Durante a realização de todo o estudo, as amostras foram mantidas na câmara de climatização com exceção do momento de realização dos testes.

Propriedades físicas e mecânicas

Os valores referentes às propriedades físicas e mecânicas das espécies estudadas foram obtidas com base nas dimensões e massa das amostras para o cálculo da densidade aparente e o módulo de elasticidade dinâmico pelo método não destrutivo de *stress wave* (TELES, 2005).

O aparelho empregado para o referido teste foi o *stress wave timer* modelo 239A com ambas extremidades da peça presas por grampos distantes 300 mm (Figura 2). Esse método permite determinar o tempo de propagação em microssegundos (μs) de uma onda de tensão entre duas extremidades passando pelo comprimento do corpo de prova.

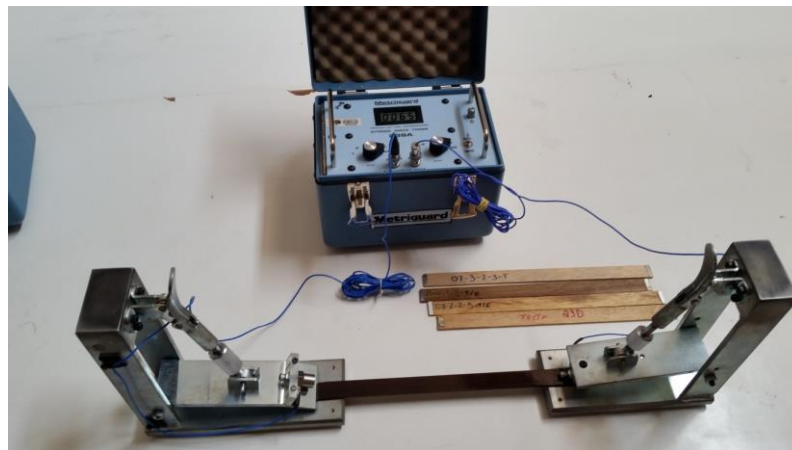


Figura 2 - Aparelho *stress wave timer* com corpo de prova acoplado nos grampos.

De acordo com HEARMON (1965) o módulo de elasticidade dinâmico (MOEd) pode ser obtido a partir da velocidade de propagação do som de acordo com a Equação 1.

$$MOEd = \frac{\rho \times c^2}{1000} \quad \text{Eq.1}$$

Onde:

MOEd = módulo de elasticidade dinâmico (MPa)

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

c = velocidade do som (m/s)

A partir dos dados obtidos no teste de *stress wave* foi possível calcular a velocidade de propagação do som através da Equação 2.

$$c = \frac{L}{t_{\text{méd}}} \times 10000 \quad \text{Eq.2}$$

Onde:

c = velocidade de propagação do som (m/s)

L = comprimento do corpo de prova (cm)

$t_{\text{méd}}$ = tempo médio (μs)

Propriedades Acústicas

A ressonância é um caso particular do fenômeno de vibração forçada no qual o padrão de vibração externo coincide com a frequência natural do sistema em questão de modo que esses entram em uníssono (WOOD, 2013).

O teste acústico para obter a frequência de ressonância das amostras (f_r) foi realizado com base na norma ASTM E1875 (2008) pelo método de vibração forçada. O equipamento utilizado para obter os valores desse parâmetro é composto por dois transdutores eletromagnéticos - um excitador e um captador – e cordas de nylon que sustentam a peça de madeira apoiada nos seus pontos nodais, em um esquema de pontas-livres (HEARMON, 1965) (Figura 3). As placas metálicas (5 x 20 x 0,5 mm) coladas nas extremidades das amostras permitiram que a onda percorresse o corpo de prova.

O sinal emitido pelo aparelho foi uma onda senoidal com resolução de 16 bits que varia de 100 a 300 Hz em um intervalo de 120 segundos, com amplitude constante, gerada com o auxílio do software Cool Edit Pro 2.1. A resposta vibracional foi gravada em um dos canais do programa de áudio. Por meio da ferramenta de análise do programa obteve-se o valor da frequência de ressonância da onda em hertz (Hz) (Figura 4).

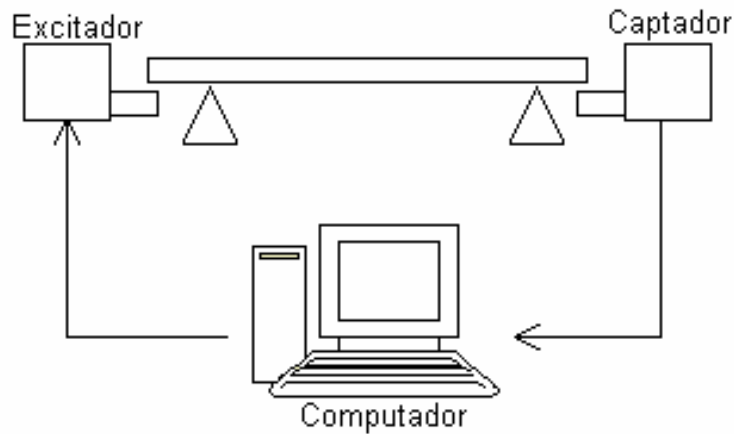


Figura 3 - Equipamento utilizado para emitir o sinal e captar a frequência de ressonância da madeira.
 Fonte: TELES, 2005.

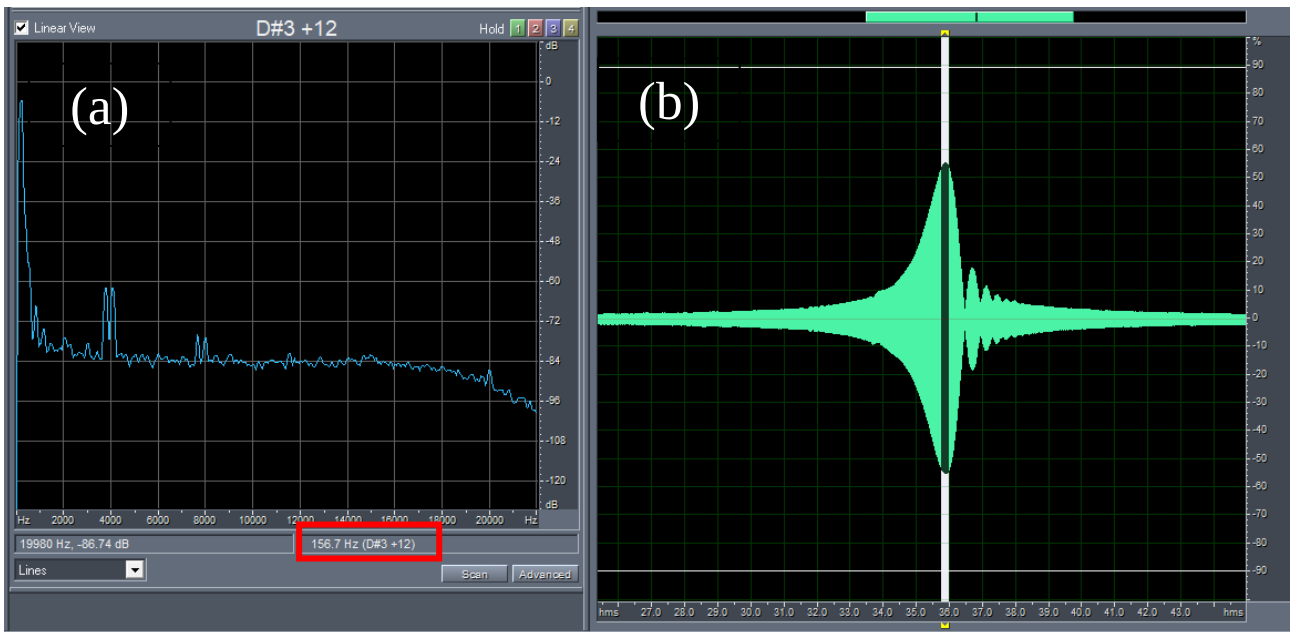


Figura 4 – Interface do programa Cool Edit Pro 2.1 onde: (a) espectro instantâneo da faixa de onda selecionada com o valor da frequência de ressonância da madeira no canto inferior direito (em vermelho); (b) representação de onda de uma amostra de Ipê.

De acordo com TELES *et al.* (2018) um dos parâmetros acústicos mais importantes é o decaimento logarítmico. Essa variável descreve o padrão de variação da curva após o pico de ressonância, uma vez que a estrutura da madeira gera fricções internas que levam a uma conversão de parte da energia acústica em calor. O decaimento logarítmico é calculado conforme a Equação 3.

$$\lambda = \frac{\pi \times \Delta f}{\sqrt{3} \times fr} \quad \text{Eq.3}$$

Onde:

λ = decaimento logarítmico (s.u.)

Δf = diferença entre frequências após e antes do pico de ressonância medidas na metade da amplitude máxima da curva (Hz)

fr = Frequência de ressonância (Hz)

Outros parâmetros acústicos relevantes são o coeficiente de perda, a impedância do material, a radiação do som e a eficiência de conversão acústica. O coeficiente de perda mede a dissipação de energia em um material por fricções internas (Equação 4).

$$\eta = \frac{\lambda}{\pi} \quad \text{Eq.4}$$

Onde:

η = coeficiente de perda (s.u.)

λ = decaimento logarítmico (s.u.)

A impedância de um material está relacionada com a sua transmissão de vibração de um meio para outro (Equação 5) (WEGST, 2006; BRÉMAUD, 2012).

$$z = c\rho \quad \text{Eq.5}$$

Onde:

z = impedância do material ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$)

c = velocidade do som (m. s^{-1})

ρ = densidade aparente do corpo de prova (kg. m^{-3})

A radiação do som descreve a amplitude média e a intensidade do som é expressa pela Equação 6.

$$R = \frac{c}{\rho} \quad \text{Eq.6}$$

Onde:

R = radiação do som ($\text{m}^4 \text{kg}^{-1} \text{s}^{-1}$)

c = velocidade do som (m s^{-1})

ρ = densidade aparente (kg m^{-3})

A eficiência de conversão acústica representa a resposta de pico do material, calculada conforme a Equação 7 (BRÉMAUD, 2012).

$$ACE = \frac{R}{\lambda} \quad \text{Eq.7}$$

Onde:

ACE = eficiência de conversão acústica ($\text{m}^4 \text{kg}^{-1} \text{s}^{-1}$)

R = radiação do som ($\text{m}^4 \text{kg}^{-1} \text{s}^{-1}$)

λ = decaimento logarítmico (s.u.)

Análise dos dados

Os dados foram analisados através do software SPSS fazendo-se uma análise descritiva, teste de Tukey HSD e o método de correlação de Pearson para determinar a interação entre cada um dos parâmetros considerados no estudo. Além disso, também foi realizada uma análise de componentes principais (PCA) e o teste estatístico multivariado de análise de agrupamentos (cluster) para avaliar a proximidade das espécies estudadas no conjunto de dados. Nesta etapa foi utilizado o software PAST.

Por fim, os resultados obtidos foram comparados com as propriedades físicas, mecânicas e acústicas das madeiras Spruce (*Picea abies*) e Maple (*Acer sp.*) uma vez que essas espécies são as mais empregadas em instrumentos musicais em todo o mundo e estão caracterizadas pelo estudo realizado por WEGST (2006).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados das propriedades físicas e mecânicas obtidas para cada uma das espécies são apresentados na Tabela 2 e as propriedades acústicas na Tabela 3.

Tabela 2 – Densidade aparente e módulo de elasticidade dinâmico das 14 espécies de madeira.

| Nome comum | Densidade aparente (g/cm ³) | MOEd (MPa) |
|---------------------|---|------------|
| Fava | 0,82 | 11956 |
| Cumaru | 0,99 | 17610 |
| Sumaúma | 0,35 | 5204 |
| Marupá | 0,41 | 8325 |
| Jequitibá | 0,61 | 10759 |
| Freijó | 0,51 | 11905 |
| Pinus | 0,60 | 13751 |
| Curupixá | 0,68 | 15115 |
| Timborana | 0,86 | 14785 |
| Cedro | 0,48 | 9814 |
| Ipê | 1,07 | 21025 |
| Roxinho | 0,89 | 14817 |
| Spruce ^a | 0,43 | 17000 |
| Maple ^a | 0,57 | 11700 |

^aFonte: TELES *et al.*, 2018.

Tabela 3 - Propriedades acústicas das 14 espécies de madeiras.

| Nome comum | f_r (Hz) | λ | c (m/s) | z (g cm ⁻² s ⁻¹) | R (m ⁴ Kg ⁻¹ s ⁻¹) | η | ACE (m ⁴ Kg ⁻¹ s ⁻¹) |
|---------------------|------------|-----------|-----------|---|--|--------|--|
| Fava | 144,54 | 0,0199 | 3820,4 | 3125,4 | 4,68 | 0,006 | 238,29 |
| Cumaru | 150,75 | 0,0173 | 4223,6 | 4167,5 | 4,29 | 0,006 | 257,19 |
| Sumaúma | 117,56 | 0,0458 | 3829,3 | 1353,2 | 10,91 | 0,015 | 347,02 |
| Marupá | 148,99 | 0,0208 | 4499,2 | 1850,3 | 10,95 | 0,007 | 570,30 |
| Jequitibá | 140,79 | 0,0331 | 4202,3 | 2555,3 | 6,93 | 0,011 | 302,06 |
| Freijó | 171,25 | 0,0438 | 4801,8 | 2472,0 | 9,56 | 0,014 | 515,99 |
| Pinus | 165,94 | 0,0176 | 4793,4 | 2860,0 | 8,06 | 0,006 | 464,12 |
| Curupixá | 166,19 | 0,0276 | 4705,9 | 3210,2 | 6,90 | 0,009 | 365,21 |
| Timborana | 158,47 | 0,0171 | 4153,5 | 3558,3 | 4,87 | 0,005 | 291,46 |
| Cedro | 152,62 | 0,0160 | 4490,7 | 2176,2 | 9,54 | 0,005 | 601,65 |
| Ipê | 165,99 | 0,0121 | 4421,2 | 4746,6 | 4,12 | 0,004 | 344,81 |
| Roxinho | 139,90 | 0,0229 | 4077,3 | 3622,0 | 4,59 | 0,007 | 215,83 |
| Spruce ^a | 190,60 | 0,0340 | 4520,0 | 1943,6 | 10,51 | 0,011 | 309,17 |
| Maple ^a | 157,30 | 0,0350 | 3750,0 | 2137,5 | 6,58 | 0,011 | 187,97 |

^aFonte: TELES *et al.*, 2018.

Onde: f_r = frequência de ressonância; λ = decaimento logarítmico; c = velocidade do som; z = impedância; R = coeficiente de radiação; η = coeficiente de perda; e ACE = coeficiente de conversão acústica.

Foi possível observar que as espécies selecionadas para o estudo abrangeram um grande espectro de densidade aparente e módulo de elasticidade, variando de 0,35 a 1,07 g.cm⁻³ e 5204 a 21025 MPa, respectivamente. Observando apenas a densidade aparente e módulo de elasticidade foi possível prever que o Jequitibá, Freijó, Pinus e Curupixá seriam as espécies que mais se assemelhariam ao Spruce e Maple. Porém, levando em consideração apenas a análise descritiva das propriedades físico-mecânicas e acústicas foi impossível determinar quais delas se assemelharam às espécies de referência devido à grande quantidade de variáveis avaliadas. Portanto, foi necessária uma análise estatística que pudesse estabelecer uma proximidade entre as espécies em questão.

A ANOVA do teste de Tukey mostrou que todos os parâmetros observados apresentaram uma diferença significativa entre as espécies estudadas (Anexo I). No entanto, foi preciso comparar isoladamente as espécies entre si para averiguar se a diferença entre as médias de cada variável foi realmente significativa, possibilitando que os erros do tipo I fossem evitados. Os resultados do teste Tukey HSD estão representados no Anexo II.

O teste Tukey HSD reuniu as espécies em nove grupos de densidade aparente, demonstrando que a maioria das espécies averiguadas apresentaram uma densidade aparente distinta das demais. O comportamento do módulo de elasticidade se assemelhou ao da densidade devido a sua forte dependência dessa variável. O decaimento logarítmico não apresentou qualquer diferença de média significativa entre as espécies.

Avaliando apenas o resultado do teste Tukey HSD não foi possível inferir qual a relação da frequência de ressonância (*fr*), decaimento logarítmico (λ), coeficiente de perda (η), velocidade do som (*c*) e coeficiente de conversão acústica (ACE) com as demais propriedades. Portanto, a correlação de Pearson foi adotada como forma de avaliar quais foram as possíveis interações entre as variáveis e quantificar tais correlações (Tabela 4).

Tabela 4 - Coeficientes de determinação (R²) de correlação linear entre as propriedades avaliadas.

| | <i>fr</i> | λ | <i>c</i> | ρ | MOEd | <i>z</i> | R | η | ACE |
|-----------|------------|-----------|------------|-----------|-----------|-----------|------------|-----------|-----------|
| <i>fr</i> | 1 | | 0,725 | 0,261 | 0,572 | 0,430 | 0,179 (-)* | 0,542 | 0,250 |
| λ | | 1 | | 0,207 (-) | 0,210 (-) | 0,215 (-) | 0,170* | 0,675 (-) | 0,432 (-) |
| <i>c</i> | 0,725 | | 1 | 0,155 (-) | 0,300 | | 0,278 | 0,345 | 0,517 |
| ρ | 0,261 | 0,207 (-) | 0,155 (-)* | 1 | 0,866 | 0,970 | 0,954 (-) | 0,418 | 0,537 (-) |
| MOEd | 0,572 | 0,210 (-) | 0,300 | 0,866 | 1 | 0,972 | 0,783 (-) | 0,566 | 0,291 (-) |
| <i>z</i> | 0,430 | 0,215 (-) | | 0,970 | 0,972 | 1 | 0,892 (-) | 0,509 | 0,423 (-) |
| R | 0,179 (-)* | 0,170* | 0,278 | 0,954 (-) | 0,783 (-) | 0,892 (-) | 1 | 0,285 (-) | 0,645 |
| η | 0,542 | 0,675 (-) | 0,345 | 0,418 | 0,566 | 0,509 | 0,285 (-) | 1 | 0,499 |
| ACE | 0,250 | 0,432 (-) | 0,517 | 0,537 (-) | 0,291 (-) | 0,423 (-) | 0,645 | 0,499 | 1 |

Os coeficientes tabelados são significativos a um nível de 0,01 com exceção daqueles indicados com um * que são significativos apenas a 0,05.

A frequência de ressonância apresentou uma forte correlação com a velocidade do som (0,725). O decaimento logarítmico não apresentou forte correlação com a maioria dos outros parâmetros, exceto o coeficiente de perda que apresentou um índice moderado (-0,675) uma vez que foi calculado a partir deste. A impedância apresentou correlação direta com o coeficiente de radiação do som e ambos com a densidade aparente e módulo de elasticidade dinâmico, visto que foram calculados a partir dessas variáveis. A velocidade do som e o coeficiente de conversão acústica apresentaram uma correlação mediana (0,517). O coeficiente de perda se correlacionou negativamente com o decaimento logarítmico e diretamente com a frequência de ressonância, módulo de elasticidade e impedância (0,542; 0,566 e 0,509, respectivamente). Por fim, o coeficiente de conversão acústica se correlacionou diretamente com o coeficiente de radiação (0,645) e velocidade do som (0,517) e inversamente com a densidade aparente (-0,537). Todas as correlações mencionadas acima foram significativas ao nível de 0,01.

De acordo com BRÉMAUD (2012), a alta correlação negativa entre o coeficiente de perda e o módulo de elasticidade dinâmico é influenciada pela orientação dos elementos celulares da madeira, pela composição química da parede celular e extrativos. Uma vez que foi observada uma forte correlação negativa entre o decaimento logarítmico e o coeficiente de perda, foi possível inferir que esse também possa ser influenciado pelos componentes microestruturais da madeira.

De acordo com WEGST (2006) a velocidade do som se relaciona diretamente à densidade e módulo de elasticidade da madeira. Porém, o presente estudo demonstrou que a densidade aparente e o módulo de elasticidade pouco se relacionaram com o parâmetro c , apresentando coeficientes de determinação de -0,155 e 0,3, respectivamente. No entanto, os resultados da correlação de Pearson demonstraram que a variação da velocidade do som foi fortemente influenciada pela frequência de ressonância.

Tal discrepância pode estar associada à ausência de uma distinção entre amostras com orientação tangencial e radial (Figura 5) visto que essa é uma característica importante para a propagação de ondas na madeira (HEARMON, 1965; FLETCHER, 1999; BUCUR, 2006; BRÉMAUD, 2012; BUCUR, 2016).

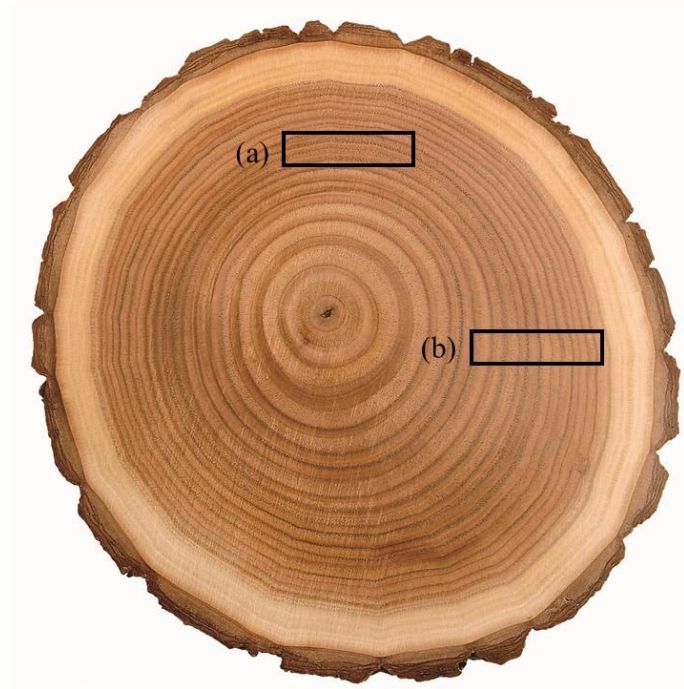


Figura 5 – Representação da orientação tangencial (a) e radial (b) de uma amostra de madeira em um corte transversal de uma árvore.

A análise dos componentes principais (PCA) permitiu estabelecer as relações entre as propriedades de maneira mais clara, uma vez que essa representa como as espécies se aproximam no conjunto de dados (Figura 5). No caso, 80% da variação dos dados foi explicada por dois componentes (eixos) PC1 e PC2, os quais foram influenciados diferentemente por cada uma das variáveis conforme Figura 6.

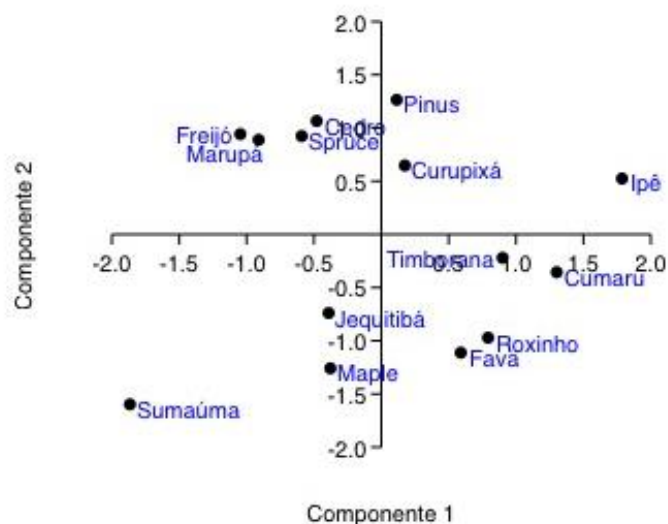


Figura 6 - Gráfico da análise dos componentes principais (PCA) para as espécies estudadas.

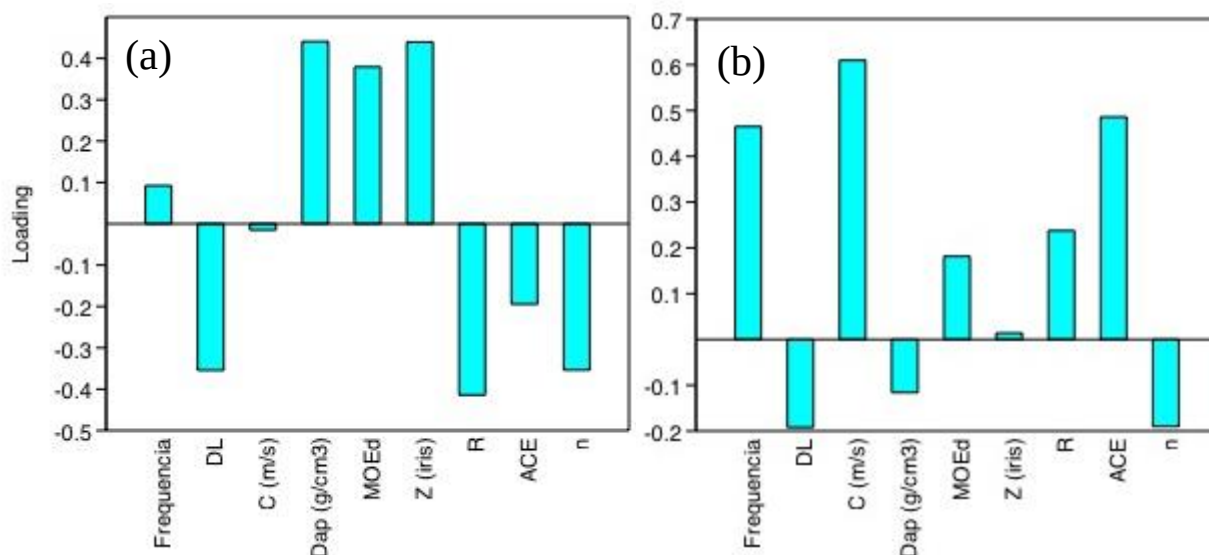


Figura 7 - Peso das variáveis para o componente 1 (a) e componente 2 (b).

O componente 1 é majoritariamente explicado pelo R, z, densidade, MOEd e decaimento logarítmico, enquanto o componente 2 tem c, ACE e fr como principais propriedades.

Foi possível observar que o Ipê está posicionado na extremidade positiva do eixo do componente 1 visto que esse tem o menor λ , R e n, e a maior densidade, MOEd e z. De maneira análoga, a Sumaúma se localizou na extremidade oposta do mesmo componente por apresentar as características contrárias ao Ipê.

Pelo teste de Tukey HSD o decaimento logarítmico poderia ser interpretado como uma propriedade insignificante para a avaliação acústica das espécies em questão, mas pela PCA essa propriedade apresentou um peso considerável no componente 1. Assim, foi possível assumir que existam outros fatores associados ao comportamento da curva da frequência de ressonância que ainda não foram estudados.

Como forma de complementar a PCA e estabelecer a proximidade entre as espécies avaliadas essas foram agrupadas pelo método de cluster conforme Figura 7.

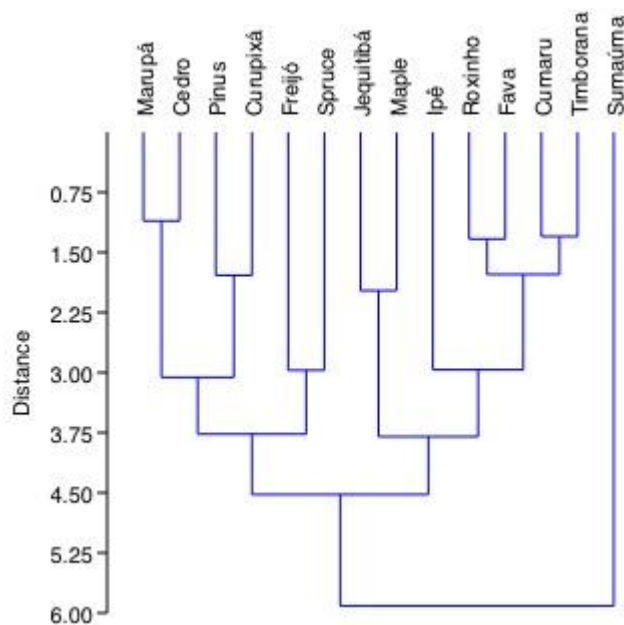


Figura 8 - Agrupamento hierárquico das 14 espécies de madeiras.

Essa análise separou as madeiras estudadas em três grandes grupos sendo um composto apenas pela Sumaúma porque essa não se assemelhou a nenhuma das outras espécies observadas. Outro pelas madeiras mais densas (Ipê, Roxinho, Fava, Cumaru e Timborana) juntamente com o Jequitibá e Maple e por último o das madeiras leves e intermediárias composto pelo Marupá, Cedro, Curupixá, Pinus, Freijó e Spruce. O Jequitibá foi a espécie que mais se assemelhou ao Maple, e o Freijó ao Spruce.

A distinção entre o subgrupo das madeiras mais densas e o subgrupo do Jequitibá e Maple no gráfico PCA provavelmente foi explicada pela diferença evidente da densidade (variando de 0,82 a 1,07 para o subgrupo das madeiras mais pesadas e 0,57 e 0,61 para o outro subgrupo), pela impedância que variou entre 3125 a 4746 para as espécies mais densas e de 2137 a 2555 (Maple e Jequitibá) e pelo coeficiente de perda que apresentou valores muito menores para as madeiras tropicais densas ($\leq 0,007$). Porém, essas ainda se encontram sob o mesmo grupo devido à semelhança entre o coeficiente de radiação e o módulo de elasticidade visto que essas foram as propriedades de maior relevância para o componente 1.

Os valores em questão e suas correlações coincidiram com os observados no estudo de BRÉMAUD (2012) no qual 79 espécies madeireiras foram avaliadas. A combinação de um alto módulo de elasticidade e baixo coeficiente de perda é incomum, o que diminui a probabilidade de substituição de espécies tropicais de alta densidade (BRÉMAUD, 2012). De acordo com WEGST (2006) madeiras que apresentam um baixo coeficiente de perda, alta densidade, dureza e radiação (como o Ipê, Timborana, Cumaru, Fava e Roxinho) são mais indicadas para idiofones.

Avaliando o subgrupo composto pelo Marupá, Cedro, Pinus, Currupixá, Freijó e Spruce verificou-se que a distância entre essas espécies foi influenciada majoritariamente pelo componente 2, que tem a frequência de ressonância, a velocidade do som e o coeficiente de eficiência acústica como principais variáveis. A Figura 5 apresentou o Cedro como a espécie mais próxima do Spruce, por apresentar uma densidade e velocidade do som similares, porém essas espécies se diferenciaram muito nas demais propriedades. Por outro lado, o Freijó se assemelhou à espécie de referência por apresentar a frequência de ressonância, velocidade do som e coeficiente de radiação mais próximos dentre as madeiras avaliadas ainda que as demais propriedades fossem discrepantes. É importante salientar que dentre as espécies desse grupo nenhuma apresentou uma similaridade tão evidente com o Spruce como no caso do Jequitibá comparado ao Maple.

CONCLUSÃO

O presente trabalho apresentou certos fatores limitantes relacionados ao material e metodologia adotada. Inicialmente, na aquisição das peças, a maioria das madeiras visitadas não apresentou o documento de origem florestal (DOF) que contém informações referentes à identificação, idade do indivíduo, local de coleta e posição da tábua na árvore que deveriam ser levadas em consideração para avaliar a variabilidade dos parâmetros a nível intraespecífico. A ausência desse documento e a falta de tempo hábil tornaram necessária a identificação das madeiras por meio de técnicas de macroscopia, o que, na maioria dos casos, determina apenas o gênero das madeiras estudadas.

O estudo também permitiu assumir que há outros critérios a serem avaliados como teor de umidade; interferência da climatização nas propriedades acústicas, anisotropia, extrativos, critérios psicoacústicos e análise espectral da frequência natural das amostras.

Por fim, os resultados indicaram que o Jequitibá e o Freijó apresentaram propriedades acústicas que se assemelham às do Spruce e Maple e, assim, podem ser consideradas como potenciais substitutos para estas espécies. Porém, a similaridade entre essas apenas indica a potencialidade acústica das madeiras alternativas, sendo necessária a confecção de instrumentos musicais com diferentes combinações de espécies para avaliar o comportamento acústico de maneira mais tangível. Como o presente estudo abrangeu apenas doze espécies incomuns e duas tradicionalmente utilizadas para o corpo de cordofones, há uma limitação para a descoberta da potencialidade acústica de espécies alternativas para outros componentes e tipos de instrumentos musicais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

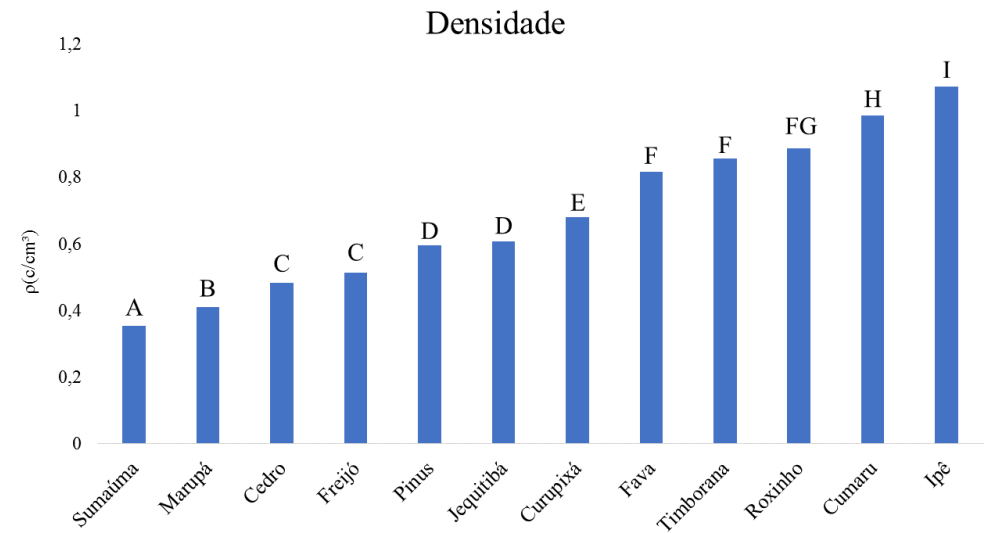
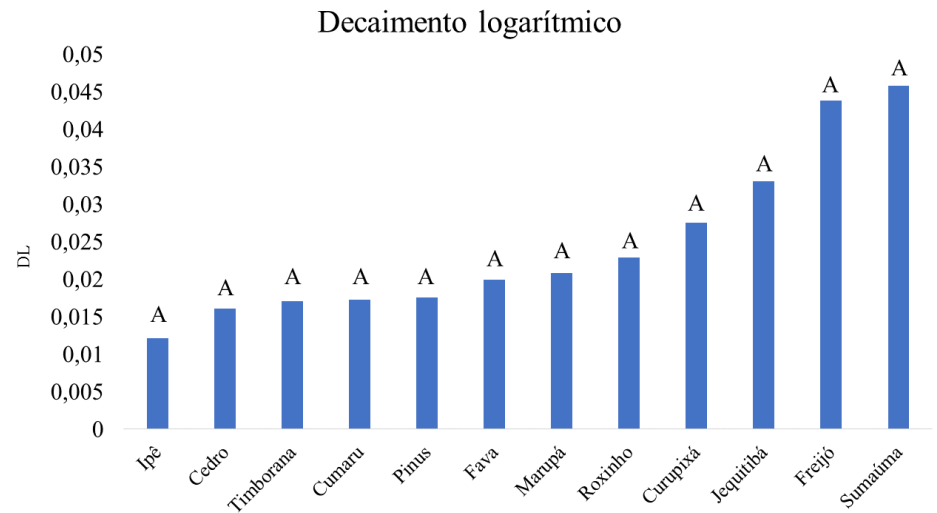
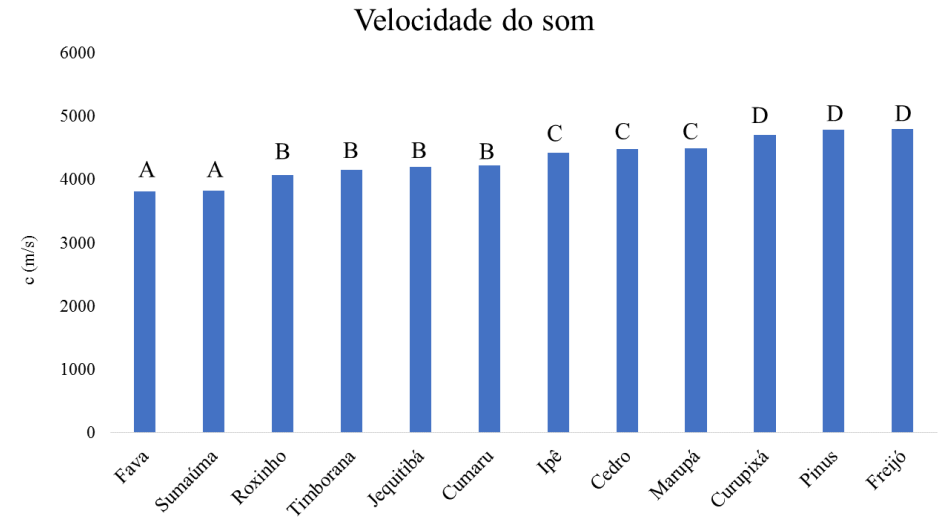
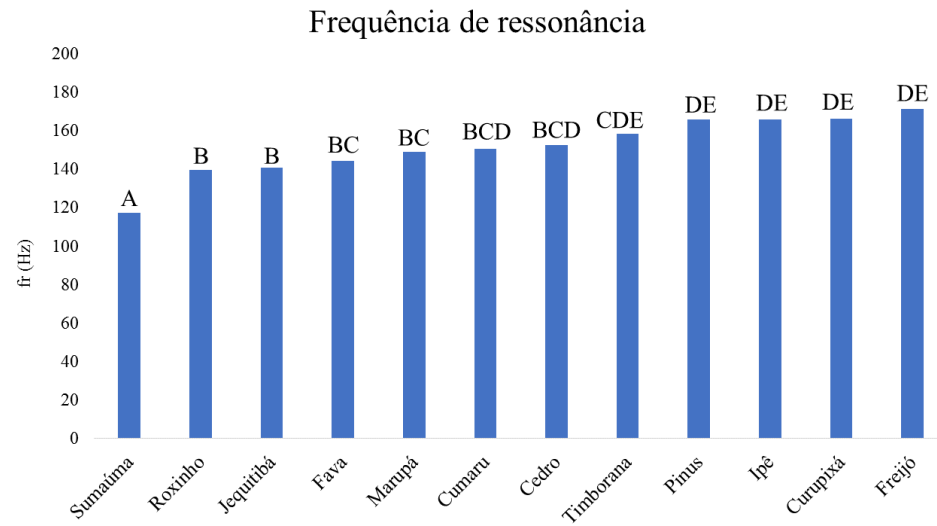
- BRÉMAUD, I. Acoustical properties of wood in string instruments soundboards and tuned idiophones: Biological and cultural diversity. **Journal of the Acoustical Society of America**, v. 131, n. 1, p. 807-818, Janeiro 2012.
- BRÉMAUD, I. et al. **Vibrational properties of tropical woods with historical uses in musical instruments**. International Conference of COST Action IE0601 Wood Science for the Preservation of Cultural Heritage. Braga, Portugal. 2008. p. 17-23.
- BUCUR, V. **Acoustics of Wood**. The Thirteenth International Congress of Sound and Vibration. Vienna, Austria. 2006.
- BUCUR, V. **Handbook of Materials for String Musical Instruments**. Melbourne: Springer International, 2016.
- FLETCHER, N. Materials for Musical Instruments. **Acoustics Australia**, Canberra, v. 27, n. 1, p. 5-9, 1999.
- FOELKEL, C. **Identificação Macroscópica de Madeiras**. Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT. 2007.
- HEARMON, R. F. S. **The assessment of wood properties by vibrations and high frequency acoustic waves**. Second Symposium of Nondestructive Testing of Wood. Olympia: Washington State University. 1965. p. 49-66.
- OLIVEIRA, K. N.; SANCHES, K. L.; PEREIRA, B. S. Levantamento sobre a oferta de madeira maciça no Distrito Federal em 2017/2018. In: **Caderno de Resumos da VIII Semana de Produção Científica do IFB**. 2018, p. 485.
- ROEDERER, J. G. **Introdução à Física e Psicofísica da Música**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 1998.
- SFB. **Chave interativa de identificação de madeiras comerciais**. Laboratório de produtos florestais - LPF/SFB. 2016.
- TELES, R. F. **Avaliação de madeiras amazônicas para utilização em instrumentos musicais**. Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e dos Recursos Renováveis - IBAMA; Laboratório de Produtos Florestais - LPF. Brasília, 32p. 2005.
- TELES, R. F.; SOUZA, M. R. D.; WIMMER, P. **Acoustical Properties of 10 Amazonian Hardwoods**. 25th International Congress on Sound and Vibration (ICSV25). Hiroshima. 2018. 7p.
- WEGST, U. G. K. Wood for sound. **American Journal of Botany**, v. 93, n. 10, p. 1439-1448, 2006.
- WOOD, A. **The Physics of Music**. 6^a ed. Davies Press, 2013.
- YOSHIKAWA, S. Acoustical classification of woods for string instruments. **Journal of Acoustical Society of America**, v. 122, n. 1, p. 568-573, Julho 2007.

YOSHIKAWA, S.; WALTHAM, C. **Woods for Wooden Musical Instruments**. International Symposium on Musical Acoustics. Le Mans, France. 2014. p. 281-286.

Anexo I – Tabela ANOVA teste Tukey

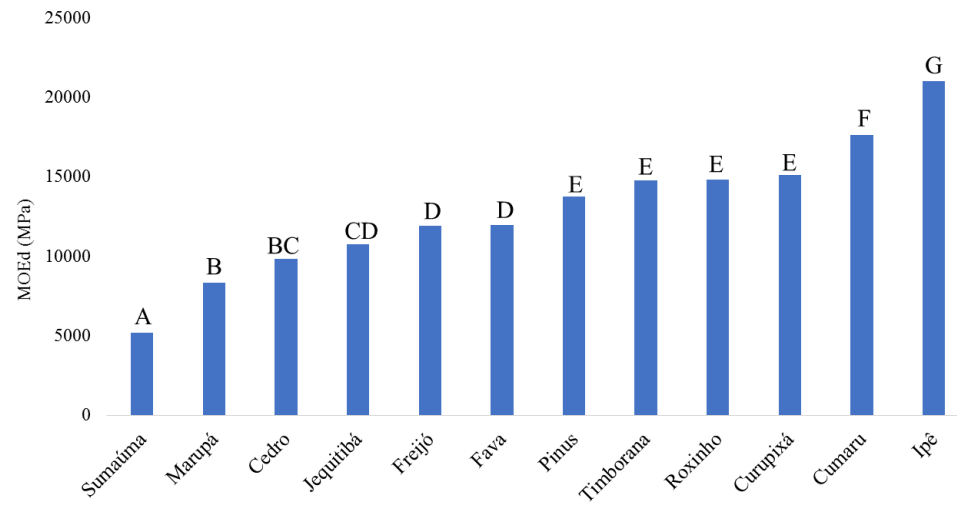
| | | Soma dos Quadrados | gl | Quadrado Médio | Z | Sig. |
|--|--------------|--------------------|-----|----------------|---------|-------|
| <i>f</i> r (Hz) | Entre Grupos | 37935,917 | 11 | 3448,72 | 20,031 | 0,000 |
| | Nos grupos | 28924,521 | 168 | 172,17 | | |
| | Total | 66860,438 | 179 | | | |
| λ | Entre Grupos | 0,02 | 11 | 0,002 | 2,239 | 0,015 |
| | Nos grupos | 0,136 | 168 | 0,001 | | |
| | Total | 0,156 | 179 | | | |
| c (m s ⁻¹) | Entre Grupos | 19112238,23 | 11 | 1737476,203 | 68,665 | 0,000 |
| | Nos grupos | 4251001,791 | 168 | 25303,582 | | |
| | Total | 23363240,03 | 179 | | | |
| Dap (g cm ⁻³) | Entre Grupos | 8,985 | 11 | 0,817 | 414,836 | 0,000 |
| | Nos grupos | 0,331 | 168 | 0,002 | | |
| | Total | 9,316 | 179 | | | |
| MOEd (MPa) | Entre Grupos | 2958158034 | 11 | 268923457,6 | 123,196 | 0,000 |
| | Nos grupos | 366726125,6 | 168 | 2182893,605 | | |
| | Total | 3324884160 | 179 | | | |
| z (g cm ⁻² s ⁻¹) | Entre Grupos | 155596312 | 11 | 14145119,27 | 225,393 | 0,000 |
| | Nos grupos | 10543286,43 | 168 | 62757,657 | | |
| | Total | 166139598,4 | 179 | | | |
| R (m ⁴ Kg ⁻¹ s ⁻¹) | Entre Grupos | 1145,132 | 11 | 104,103 | 187,58 | 0,000 |
| | Nos grupos | 93,237 | 168 | 0,555 | | |
| | Total | 1238,369 | 179 | | | |
| η | Entre Grupos | 25932,184 | 11 | 2357,471 | 14,906 | 0,000 |
| | Nos grupos | 26569,503 | 168 | 158,152 | | |
| | Total | 52501,687 | 179 | | | |
| ACE (m ⁴ Kg ⁻¹ s ⁻¹) | Entre Grupos | 2839658,164 | 11 | 258150,742 | 20,755 | 0,000 |
| | Nos grupos | 2089565,982 | 168 | 12437,893 | | |
| | Total | 4929224,147 | 179 | | | |

Anexo II – Gráficos teste Tukey HSD

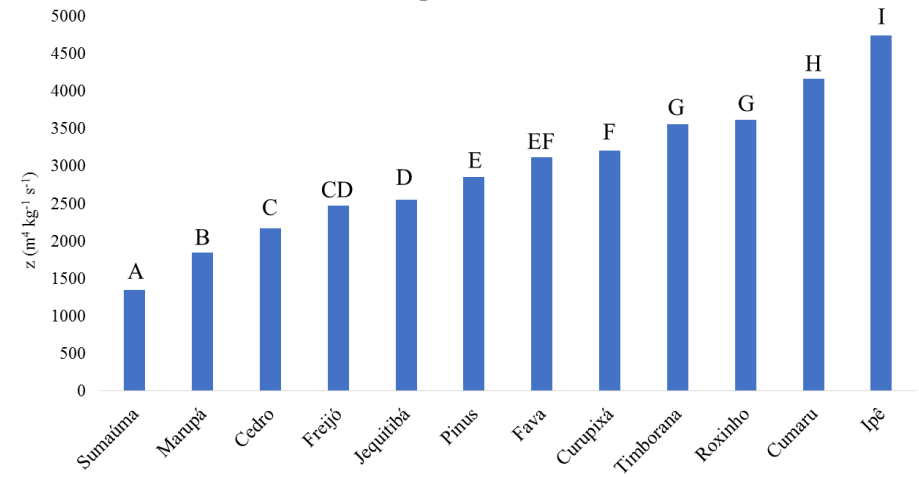


Anexo II - continuação

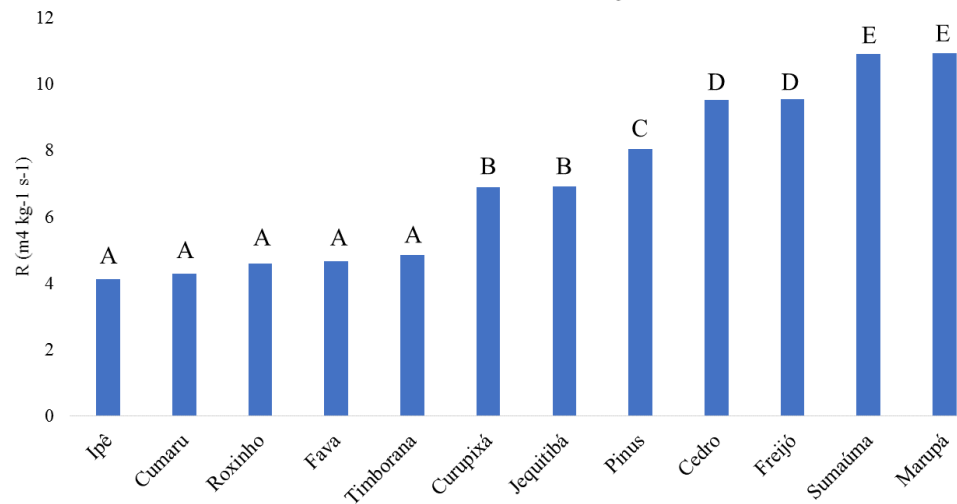
Módulo de elasticidade



Impedância



Coefficiente de Radiação



Coefficiente de perda

