



Caracterização acústica de doze espécies de madeiras comerciais brasileiras para confecção de instrumentos musicais

Viana, B.B.¹; Teles, R.F.²

¹ Pós Graduação em Ciências Florestais, Universidade de Brasília, Brasília, DF, Brasil, bentobativiana@gmail.com

² Coordenação de Produção e Design, IFB Samambaia, Brasília, DF, Brasil. Email: ricardo.teles@ifb.edu.br

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 doze 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 (Δ), coeficiente de radiação (R), coeficiente de perda (η), impedância (z) e coeficiente de conversão acústica (ACE). A partir desses dados foi realizada uma comparação entre as madeiras estudadas e o Spruce (*Picea* sp.) e Maple (*Acer* sp.) através do teste estatístico multivariado de análise de agrupamentos (cluster). Dentre as espécies estudadas, o Freijó (*Cordia goeldiana*) e o Jequitibá (*Cariniana* sp.) apresentaram um potencial acústico para substituição do Spruce e Maple, respectivamente, para confecção de tampos de violino.

Palavras-chave: madeiras tropicais, propriedades acústicas, instrumentos musicais, tampos de violino.

Abstract

Most musical instruments, or their components, are made of wood as this material presents unique physical, mechanical and 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 twelve commercial species from Distrito Federal (Brazil) 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 (Δ), 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). Amongst the selected species Freijó (*Cordia goeldiana*) and Jequitibá (*Cariniana* sp.) were appointed as potential substitutes for Spruce and Maple, respectively, to be used as violin soundboards.

Keywords: hardwood, acoustic properties, musical instruments, violin soundboards.

1. Introdução

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 e não só das cordas em contato com a crina do arco. 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 [1].

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, excelente trabalhabilidade e estética agradável [2, 3, 4, 5]. Além disso, a madeira apresenta uma suavidade, porosidade e baixa condutividade térmica que são ideais para certos tipos de flautas [2].

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 [4]. 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, nem muito abafado ou opaco, nem muito brilhoso ou estridente [6].

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 [7]. 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*) [2, 8]. Porém, considerando a distribuição geográfica da biodiversidade, é possível que existam espécies com propriedades semelhantes às tradicionalmente utilizadas, mas que ainda não foram suficientemente estudadas para este fim.

Mesmo considerando as alternativas de materiais sintéticos, essa grande demanda por um número restrito de espécies torna insustentável sua utilização do ponto de vista econômico e ambiental [7]. 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.* [9], 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 doze espécies de madeiras comercializadas no Distrito Federal bem como seu potencial acústico em comparação àquelas tradicionalmente empregadas na confecção de tampos de violino.

2. Materiais e métodos

As espécies escolhidas para o estudo foram identificadas a partir de suas características anatômicas com base na chave de identificação de madeiras comerciais do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) e na chave eletrônica desenvolvida pelo Laboratório de Produtos Florestais (LPF) do Serviço Florestal Brasileiro (SFB) [10, 11].

Ao todo, quatorze espécies foram selecionadas para o estudo, sendo onze de origem amazônica, uma espécie de madeira de reflorestamento e duas espécies não nativas comumente utilizadas na confecção de instrumentos musicais para fins de comparação. Foram essas: Cedro (*Cedrela odorata*); Cumaru (*Dipteryx* sp.); Currupixá (*Micropholis* sp.); Fava (*Vataireopsis* sp.); Freijó (*Cordia goeldiana*); Ipê (*Handroathus* sp.); Jequitibá (*Cariniana* sp.); Marupá (*Simarouba amara*); Roxinho (*Peltogyne* sp.); Sumaúma (*Ceiba petandra*); Timborana (*Enterolobium schomburgkii*); Pinus (*Pinus* sp.); Spruce (*Picea* sp.); e Maple (*Acer* sp.).

A dimensão final dos corpos de prova foi de 300x20x3 mm para realização do ensaio de vibração forçada. Após o corte, esses foram acondicionados na câmara de climatização até atingir a umidade de equilíbrio.

2.1. Propriedades físicas e mecânicas

Os valores de densidade aparente (ρ) das espécies estudadas foram obtidos com base nas dimensões e massa dos corpos de prova, já o módulo de elasticidade dinâmico ($MOEd$) foi calculado a partir do tempo de propagação da onda de tensão produzida pelo aparelho de *stress wave*, conforme Equação (1) [7, 12].

$$MOEd = \frac{\rho \times c^2}{1000} \quad (1)$$

em que $MOEd$ corresponde ao módulo de elasticidade dinâmico (MPa), ρ é a densidade aparente da madeira (g.cm^{-3}), e c é a velocidade do som (m.s^{-1}).

A velocidade do som é calculada conforme Equação (2)

$$c = \frac{L}{tméd} \times 10000 \quad (2)$$

em que L é o comprimento do corpo de prova (cm) e $tméd$ é o tempo médio (μs) de propagação da onda no corpo de prova dado pelo aparelho.

2.2. Propriedades acústicas

A frequência de ressonância (f_r), ou frequência natural, é um caso particular do fenômeno de vibração no qual o padrão de vibração externo coincide com a do sistema em questão, de modo que esses vibram simultaneamente, em uníssono [1].

Para obter a frequência de ressonância, foi realizado o teste acústico com base na norma ASTM E1875 (2008) do método de vibração forçada. O aparelho consiste em dois transdutores eletromagnéticos – um excitador e um captador – e cordas de nylon que sustentam a amostra apoiada nos seus pontos nodais no esquema de pontas-livres [12]. Para que a onda fosse transmitida ao corpo de prova, placas metálicas (5x20x0.5mm) foram coladas nas extremidades de cada uma das amostras.

O sinal emitido foi uma onda senoidal com resolução de 16 bits variando 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 partir da resposta vibracional gravada, obteve-se o valor da frequência de ressonância para cada uma das amostras em hertz (Hz).

O decaimento logarítmico (A) descreve a variação de amplitude da onda entre dois picos consecutivos e corresponde às perdas de energia sonora devido às fricções internas do som no material. Este efeito provoca a conversão do som em calor, fenômeno conhecido como amortecimento mecânico [3, 7]. Este parâmetro foi calculado conforme Equação (3)

$$A = \frac{\pi \times \Delta f}{\sqrt{3} \times f_r} \quad (3)$$

em que A é o decaimento logarítmico (s.u.), Δf é a diferença entre frequências após e antes do pico de ressonância medidas na metade da amplitude máxima da curva (Hz) e f_r é a frequência de ressonância da amostra (Hz).

O coeficiente de perda (η) mede a dissipação da energia sonora no material em decorrência das fricções internas e foi calculado conforme Equação (4)

$$\eta = \frac{A}{\pi} \quad (4)$$

em que η é o coeficiente de perda (s.u.) e A é o decaimento logarítmico (s.u.)

Outro parâmetro relevante para a caracterização de um material acústico é sua impedância (z) que se relaciona com a transmissão da vibração de um meio para outro. A impedância corresponde à resistência do meio físico em propagar a onda sonora, ou sua capacidade de desacelerar o movimento das partículas acústicas [4, 5, 13]. Pode ser expressa conforme Equação (5)

$$z = c\rho \quad (5)$$

em que z é a impedância do material ($\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$), c é a velocidade do som (m.s^{-1}) e ρ é a densidade aparente da madeira (g.cm^{-3}).

A radiação (R) de um material descreve a amplitude média da onda sonora no meio em questão e se relaciona com a intensidade do som. Pode ser descrita conforme Equação (6)

$$R = \frac{c}{\rho} \quad (6)$$

em que R é a radiação do som ($\text{m}^4.\text{kg}^{-1}.\text{s}^{-1}$), c é velocidade do som (m.s^{-1}), ρ é a densidade aparente (kg.m^{-3}).

A eficiência de conversão acústica (ACE) representa a resposta de pico do material. Pode ser expressa como na Equação (7)

$$ACE = \frac{R}{A} \quad (7)$$

em que R é a radiação do som ($\text{m}^4.\text{kg}^{-1}.\text{s}^{-1}$) e A é o decaimento logarítmico (s.u.)

2.3. Análise estatística

Os resultados foram analisados pelo teste de Tukey HSD e o método de correlação de Pearson para estabelecer a interação entre as todas as propriedades físico-mecânicas e acústicas consideradas no estudo. Também foi realizada uma análise dos componentes principais (PCA) e o teste estatístico multivariado de agrupamentos (cluster) para averiguar a distância entre as espécies escolhidas.

Os valores das propriedades físico-mecânicas e acústicas das espécies comerciais brasileiras foi comparado com das madeiras de Spruce (*Picea abies*) e Maple (*Acer sp.*) que são as tradicionalmente e universalmente utilizadas na confecção de instrumentos musicais e possuem uma grande gama de estudos as caracterizando [4].

3. Resultados e Discussão

As espécies selecionadas apresentaram uma grande amplitude de propriedades físico-mecânicas (Tabela 1) e acústicas (Tabela 2), com densidade aparente das espécies variando entre 0,35 a 1,07 g.cm⁻³ e o módulo de elasticidade dinâmico entre 5204 a 21025 MPa, sendo o menor valor atribuído às amostras de Sumaúma e os maiores às de Ipê para ambas propriedades físico-mecânicas.

Tabela 1 - Densidade aparente e módulo de elasticidade das quatorze espécies madeireiras selecionadas.

Nome comum	Densidade aparente (g/cm ³)	MOEd (MPa)
Fava	0,82	11956
Cumarú	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

A ANOVA do teste de Tukey apontou que todos os parâmetros observados apresentaram uma diferença significativa entre as espécies estudadas. No entanto, foi preciso comparar 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, para isso foi utilizado o teste Tukey HSD.

O teste Tukey HSD reuniu as espécies em nove grupos de densidade aparente. O agrupamento das espécies considerando o módulo de elasticidade se assemelhou ao da densidade devido a sua forte dependência dessa variável, porém com apenas sete grupos.

Para os parâmetros acústicos de frequência de ressonância, coeficiente de radiação e coeficiente de conversão acústica, o teste separou as espécies em cinco grupos. A velocidade do som reuniu as espécies em quatro grupos. A impedância as distinguiu em nove grupos, similares aos grupos de densidade aparente devido sua direta relação com esta propriedade. O coeficiente de perda agrupou as espécies em

sete grupos muito semelhantes aos propostos para o módulo de elasticidade. Porém, o decaimento logarítmico não apresentou qualquer diferença de média significativa entre as espécies.

Tabela 2 - Propriedades acústicas das quatorze espécies de madeiras selecionadas.

Nome comum	f_r (Hz)	Λ	c (m/s)	z ($\text{g cm}^{-2} \text{s}^{-1}$)	R ($\text{m}^4 \text{Kg}^{-1} \text{s}^{-1}$)	η	ACE ($\text{m}^4 \text{Kg}^{-1} \text{s}^{-1}$)
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 [14].

Em que: 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.

Observando apenas as propriedades físico-mecânicas seria possível inferir que o Jequitibá, o Freijó, o Pinus e o Curupixá seriam as espécies que mais se assemelhariam ao Spruce e Maple. Ao avaliar apenas o resultado do teste Tukey HSD não foi possível inferir qual a relação da frequência de ressonância (f_r), 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 3).

Tabela 3 - Coeficientes de determinação (R^2) de correlação linear entre as propriedades avaliadas.

	f_r	Λ	c	ρ	MOEd	z	R	η	ACE
f_r	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 (-)
c	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 (-)
z	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

Todos coeficientes são significativos a um nível de 0,01 com exceção dos 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 uma forte correlação com o coeficiente de radiação do som (-0,892) 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 [5], a alta correlação negativa entre o coeficiente de perda e o módulo de elasticidade dinâmico é influenciada pela orientação dos elementos celulares da madeira (em especial o ângulo das microfibrilas), 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 [4] 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 0,300, respectivamente. No entanto, os resultados da correlação de Pearson demonstraram que a variação da velocidade do som foi fortemente associada a frequência de ressonância.

Tal discrepância pode estar associada à ausência de uma distinção entre amostras com orientação tangencial e radial ainda que essa seja um fator determinante no comportamento de propagação de ondas na madeira [2, 3, 5, 12, 15].

A análise dos componentes principais (PCA) permitiu estabelecer as relações entre as propriedades de maneira mais clara, uma vez que essa representa a distância entre as espécies no conjunto de dados (Figura 1). Neste 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 analisadas conforme Figura 2.

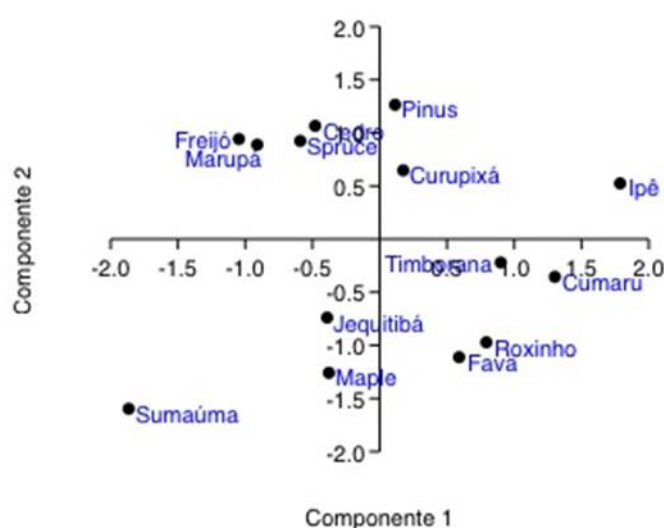


Figura 1 - Gráfico da análise dos componentes principais (PCA) para as espécies estudadas.

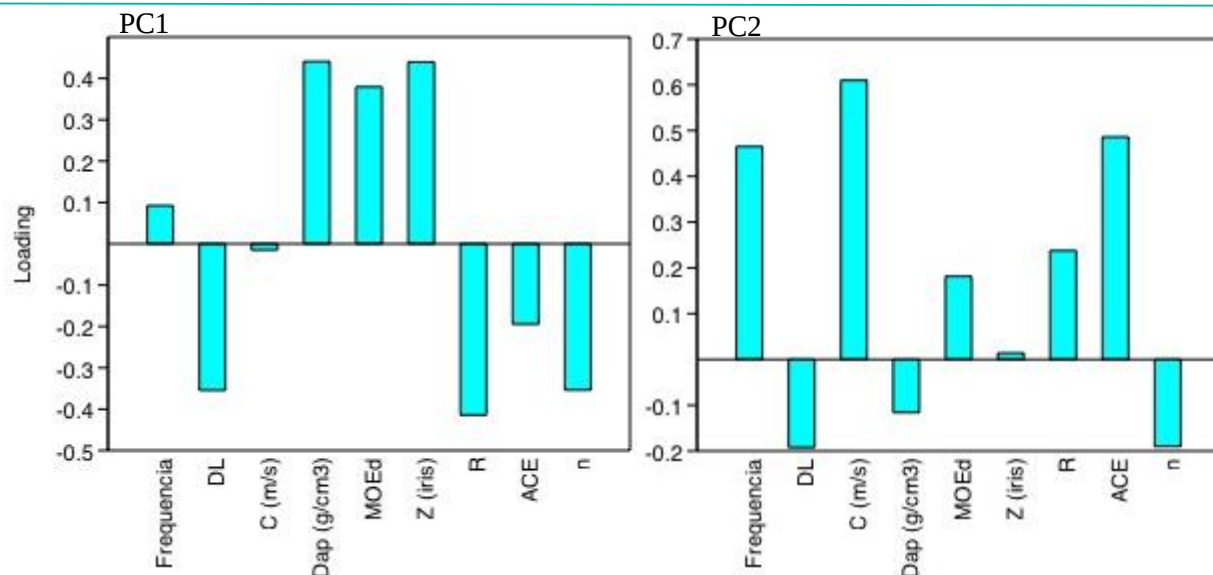


Figura 2 - Peso das variáveis para o componente 1 (PC1) e componente 2 (PC2).

Em que: Frequencia = frequência de ressonância (f_r); DL = decaimento logarítmico (Λ); c = velocidade do som; Dap = densidade aparente em g/cm³ (ρ); z = impedância; R = coeficiente de radiação; ACE = coeficiente de conversão acústica; e n = coeficiente de perda (η).

O componente 1 é majoritariamente explicado por R, z, ρ (Dap), MOEd e Λ (DL), enquanto o componente 2 tem c, ACE e f_r (Frequência) como principais propriedades.

Analisando a figura 1, 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 η , e a maior ρ , 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 3.

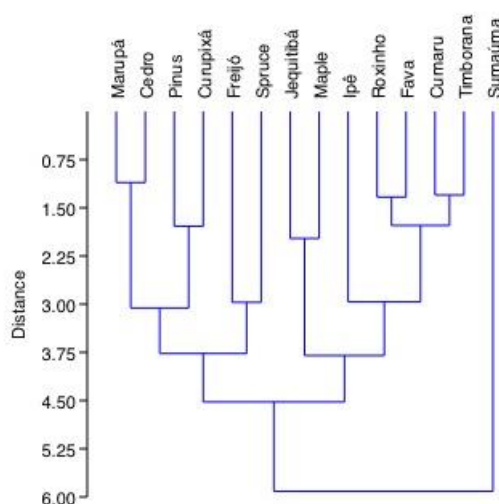


Figura 3 - Agrupamento hierárquico das espécies madeireiras estudadas.

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, Currupixá, 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 g.cm⁻³ para o outro subgrupo), pela impedância que variou entre 3125 a 4746 g.cm⁻².s⁻¹ para as espécies mais densas e de 2137 a 2555 g.cm⁻².s⁻¹ para as madeiras de densidade intermediária (Maple e Jequitibá), e pelo coeficiente de perda que apresentou valores muito menores para as madeiras tropicais densas ($\leq 0,007$ s.u.). Porém, essas ainda se encontram sob o mesmo grupo devido à semelhança entre o coeficiente de radiação e o módulo de elasticidade e 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 [5] 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 [5]. De acordo com Wegst [4] 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 1 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. Dessa forma, o Freijó pode não ser um substituto tão adequado para a madeira de Spruce.

4. Conclusão

O presente trabalho apresentou certos fatores limitantes relacionados ao material e metodologia adotada. Inicialmente, na aquisição das peças, a maioria das madeireiras 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, respectivamente. 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. Além disso, como o presente estudo abrangeu apenas doze espécies incomuns (sendo onze de origem amazônica e

uma de reflorestamento) 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.

5. Agradecimentos

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

6. Referências Bibliográficas

1. WOOD, A. *The Physics of Music*. 6th edition. Davies Press. 2013.
2. FLETCHER, N. *Materials for Musical Instruments*. *Acoustics Australia*. Canberra, v. 27, n. 1, p. 5-9, 1999.
3. BUCUR, V. *Acoustics of Wood*. The Thirteenth International Congress of Sound and Vibration. Vienna, Austria. 2006.
4. WEGST, U. G. K. *Wood for sound*. *American Journal of Botany*, v. 93, n. 10, p. 1439-1448, 2006.
5. 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.
6. YOSHIKAWA, S.; WALTHAM, C. *Woods for Wooden Musical Instruments*. International Symposium on Musical Acoustics. Le Mans, France. 2014. p. 281-286.
7. 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.
8. BRÉMAUD, I; CABROLIER, P.; MINATO, K.; GÉRARD, J.; THIBAUT, B. *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.
9. 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.
10. FOELKEL, C. *Identificação Macroscópica de Madeiras*. Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT. 2007.
11. SFB. *Chave interativa de identificação de madeiras comerciais*. Laboratório de produtos florestais - LPF/SFB. 2016.
12. 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.
13. LONG, M. *Architectural acoustics*. 2. ed. Oxford: Elsevier Inc. 2014.
14. 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.
15. BUCUR, V. *Handbook of Materials for String Musical Instruments*. Melbourne: Springer International , 2016.